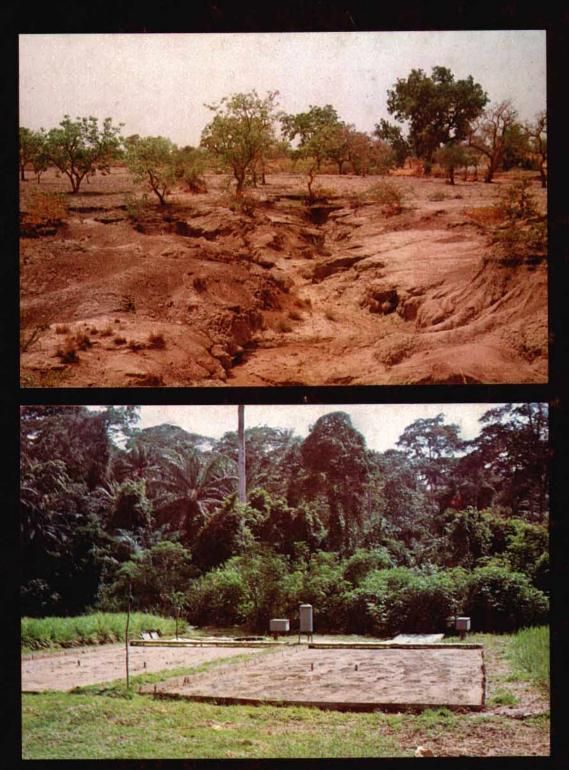
DYNAMIQUE ACTUELLE DE SOLS FERRALLITIQUES ET FERRUGINEUX TROPICAUX D'AFRIQUE OCCIDENTALE



Éric ROOSE

TRAVAUX ET DOCUMENTS DE L'O.R.S.T.O.M.

DYNAMIQUE ACTUELLE DE SOLS FERRALLITIQUES ET FERRUGINEUX TROPICAUX D'AFRIQUE OCCIDENTALE



Éric ROOSE



ÉDITIONS DE L'OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Pour tout renseignement, abonnement aux revues périodiques, achat d'ouvrages et de cartes, ou demande de catalogue, s'adresser au :

SERVICE DES PUBLICATIONS DE L'O.R.S.T.O.M. 70-74, route d'Aulnay - 93140 BONDY (France)

Les paiements sont à effectuer par virement postal au nom de Service des Publications ORSTOM, C.C.P., 22.272.21 Y PARIS; (à défaut par chèque bancaire barré à ce même libellé).

Nous vous signalons, dans la collection «Initiations, Documentations techniques»,

LES SOLS FERRALLITIQUES

I.S.B.N.: 2-7099-0092-0

n° 20 - Tome I = historique, développement des connaissances et formation des concepts actuels.

Y. CHATELIN

98 p. 21x27, I.S.B.N. : 2-7099-0093-9

n° 21 - Tome IV = la matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques.

P. de BOISSEZON, C. MOUREAUX, G. BOQUEL et G. BACHELIER

146 p. 21x27, 17 fig., 1 146 p. 21x27, 17 fig., I.S.B.N.: 2-7099-0315-6

n° 24 - Tome III = l'altération. Y. CHATELIN 144 p.21x27, 10 pl. photogr., LS.B.N. : 2-7099-0348-2

TRAVAUX ET DOCUMENTS DE L'O.R.S.T.O.M.

N° 130

DYNAMIQUE ACTUELLE DE SOLS FERRALLITIQUES ET FERRUGINEUX TROPICAUX D'AFRIQUE OCCIDENTALE

Étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées

Éric ROOSE

O.R.S.T.O.M. PARIS 1981

| | Thèse de Doctorat ès-Sciences, présentée le U.E.R. de Sciences fondamentales et appliquées. | |
|---|--|--|
| | | |
| | | |
| • | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| « La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, « que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées « à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but « d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le « consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayant cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40). « Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une « contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal». | | |
| I.S.B.N. : 2-7099-0594-9 | © ORSTOM Paris, 1981 | |

AVANT-PROPOS

Ce mémoire concrétise la synthèse de douze années d'expérimentations dans le cadre de programmes d'étude de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM) sur la dynamique actuelle de deux groupes de sols très répandus en Afrique Occidentale, et, par la suite, de trois années de dépouillement intensif des résultats, au Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université d'Orléans.

Mon intention première avait été de rédiger un bref mémoire en vue d'une thèse sur documents. Mais, à mesure de l'avancement de l'ouvrage, il s'est avéré utile de présenter une synthèse des 90 publications et documents internes déjà parus : naturellement, ceci ne pouvait plus se faire en une centaine de pages.

D'ailleurs, ce travail se situe à l'interphase de plusieurs disciplines scientifiques :

La pédologie d'abord, qui m'a fait découvrir la variabilité du milieu naturel tropical et qui m'a forcé à dépasser les observations et les conclusions techniques, pour réfléchir à leurs conséquences lointaines sur l'évolution de la couverture pédologique.

L'agronomie ensuite, qui m'a donné le goût de l'expérimentation de terrain et a attiré mon attention sur les influences réciproques existant entre le couvert végétal (naturel ou cultivé), le sol et le bioclimat.

L'hydrologie, la sédimentologie, la géographie physique et la géochimie enfin, qui s'interrogent sur les transferts de matière et leurs vecteurs, à l'échelle du paysage et des grandes régions climatiques. Et si j'ajoute que les mesures ont été effectuées pendant 4 à 11 années sur 91 lysimètres et 35 cases d'érosion ou de lessivage oblique, sous pluies naturelles ou simulées, en huit stations dispersées sur 1200 km de pistes, c'est pour mieux faire ressortir qu'il ne s'agit pas seulement du fruit du travail d'un seul homme, mais de la conjonction de circonstances favorables et de la volonté tenace de plusieurs équipes de techniciens, de chercheurs et d'administrateurs. Certes, il m'est impossible de citer chacun, mais je voudrais assurer de ma profonde gratitude tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail de longue haleine.

Toute réalisation a une histoire. A l'origine de mon orientation vers l'agronomie et la conservation des sols, se trouve un film de Josué de CASTRO, intitulé "La faim dans le monde". Ce document m'a fait prendre conscience de la misère du monde paysan et m'a incité à intervenir dans le domaine des relations entre l'eau - le sol et les engrais, domaine qui constitue l'une des clés de la production agricole dans les pays chauds. Cette première impulsion fut encouragée par mon père, jadis prospecteur de diamants au Congo belge, et par mon oncle, Marcel Van den ABEELE, agronome et administrateur général des colonies: leurs exemples m'ont incité à m'intéresser à mon tour à la mise en valeur des territoires d'Afrique. Durant mes études d'agronomie à l'Université catholique de Louvain, j'ai été initié à l'écologie par Jean LEBRUN, à l'économie forestière par Messieurs GILBERT, ANTOINE et BRICHET et à la pédologie par Messieurs BAYENS, LIVENS et FRIPIAT, anciens chercheurs de l'I.N.E.A.C. pour la plupart. Que ces éducateurs trouvent ici une marque de ma reconnaissance.

Comme en 1962, personne ne se préoccupait en Belgique des conséquences de l'érosion, j'ai été présenté à deux personnalités françaises qui ont marqué la suite de ma carrière : il s'agit des professeurs AUBERT et FOURNIER.

Monsieur Georges AUBERT m'a accueilli à l'ORSTOM dans la section de Pédologie qu'il présidait alors. Après m'avoir initié à l'approche naturaliste de la Science du Sol en France, il m'a envoyé en Côté d'Ivoire en janvier 1964, avec mission d'étudier les processus de migration de matières dans les sols tropicaux, et en particulier le lessivage oblique et l'érosion. Ce Maître renommé n'a cessé de m'encourager dans cette voie et sa présence dans le Jury de thèse en est un témoignage. De son enthousiame communicatif et de l'intérêt qu'il porte à ce travail, je lui suis infiniment reconnaissant.

Monsieur Frédéric FOURNIER, était alors Directeur du Bureau Interafricain des Sols (B.I.S.). C'est là qu'il m'a initié à la Conservation des Sols en me confiant sa documentation personnelle et en discutant chaque soir des résultats acquis sur les parcelles d'érosion installées en Afrique sous son impulsion, des travaux de HUDSON en RHodésie et des implications agronomiques de chaque technique antiérosive. C'est là que sont nés le projet d'utilisation d'un simulateur de pluie pour accélérer la collecte des données et la notion de méthode biologique de conservation des sols, si efficace en zone tropicale humide. Pour cette initiation personnalisée et pour ses interventions multiples et toujours bienveillantes à mon égard, qu'il en soit ici remercié.

Après le cycle d'enseignement de pédologie et la stage de Conservation des Sols, ma candidature à l'Office a été retenue. Je tiens à remercier Monsieur le Professeur Guy CAMUS, Directeur Général de l'ORSTOM et Monsieur GLEIZE, Directeur Général adjoint, pour le cadre de travail qui m'a été offert depuis lors, me permettant de réaliser, pour l'essentiel, ce que je souhaitais.

J'adresse aussi mes remerciements à M. FAUCK, Chef du bureau de la programmation et à M. Noël LENEUF, actuel président du Comité Technique de Pédologie de m'avoir accordé le temps nécessaire pour rédiger cette synthèse.

Je suis spécialement redevable à Messieurs LENEUF, LUC, BOUCHARDEAU, MAIGNIEN et TONNIER, Directeurs successifs du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé et à la cohorte d'administrateurs (en particulier M. GRINER) et de techniciens, des Services Centraux de l'ORSTOM (en particulier Messieurs CHEFSON, BOYER et CLAVAUD) qui, par leurs

interventions bienveillantes, ont rendu possible la collecte de données malgré des conditions souvent difficiles.

Cette collecte de données, nous la devons également à la collaboration de plusieurs laboratoires.

- <u>Au Service d'Hydrologie</u>, qui nous a beaucoup aidé, sur le plan matériel, en prêtant et entretenant une série de pluviographes, en aidant à mettre au point le simulateur de pluie, mais aussi sur le plan scientifique, en discutant du bilan hydrique et du passage de la parcelle au bassin versant. Je remercie tout spécialement M. RODIER, ancien Chef du service hydrologique de l'ORSTOM, mon parrain scientifique, pour l'intérêt qu'il a toujours porté à mes travaux, Messieurs SIRCOULON, Henri CAMUS, MOLINIER, LAFFORGUE et leurs adjoints (en particulier Jules TOILLIEZ) toujours prêts à me porter assistance.
- <u>Au Service de Bioclimatologie</u>, qui m'a fourni de nombreuses informations sur les pluies et l'évapotranspiration potentielle (Messieurs ELDIN et MONTENY).
- <u>Au Laboratoire de Botanique</u>, en particulier France BER-NHARD-REVERSAT et Charles HUTTEL, qui, avec SPICHIGER du Centre Suisse, m'ont aidé à suivre la population végétale de mes parcelles et son évolution au cours des expérimentations.
- <u>Au Laboratoire d'Agronomie</u> (BONZON, TALINEAU, PICARD, SICOT, HAINNAUX, de RICAUX, etc...) qui, outre de fréquentes aides matérielles, m'a apporté un soutien moral et scientifique pour développer les aspects agronomiques de mes recherches, en particulier la migration des engrais sous culture fourragère et sous ananas.
- <u>Au Laboratoire des Radioisotopes</u> (Messieurs LESPINAT, MARINI, BOIS, GOUYON, BLANC) avec lequel j'ai entrepris de nombreuses manipulations de terrain pour évaluer la dynamique de l'eau dans un milieu aussi complexe que la forêt dense.
- <u>Au Laboratoire de Géologie d'Adiopodoumé</u> (Messieurs DELVIGNE et HANRION) auquel je dois vingt analyses aux rayons X de mes échantillons de colloïdes et près de 200 lames minces provenant des profils des cases de lessivage oblique.

- A la banque de données pédologiques de Bondy (M. Van den DRIESSCHE et Melle AUBRY) qui a traité plus de 6000 fiches d'analyses d'eau, patiemment recopiées et mises en forme par Mme COQUAND à Orléans. L'analyse mécanographique de cette masse de données n'a peut-être pas répondu à tous mes espoirs, mais elle m'a considérablement aidé à voir clair sur l'origine de la variabilité qui règne dans le domaine de la charge chimique des eaux naturelles.
- Aux laboratoires centraux d'analyse de l'ORSTOM à Bondy (Messieurs DABIN, COMBEAU, PELLOUX et PINTA) et d'Adiopodoumé (Messieurs NALOVIC et GOUZY, Mmes PERRAUD, GAVINELLI, Didier de SAINT AMAND, MM. PETARD, TOPART, COULIBALI et l'équipe des techniciens africains) qui ont réalisé des prouesses pour mettre au point des techniques d'analyse de plus en plus fines et rapides en vue de faire face à un volume de demandes toujours croissant.
- <u>Au Laboratoire de Pédologie biologique</u> (CNRS à Nancy), où le Professeur SOUCHIER a fait analyser vingt échantillons de colloïdes extraits des eaux de drainage.

Rares sont ceux qui ont pu profiter d'une telle ambiance de camaraderie, de compétence et d'entraide pour réaliser leur programme de recherche. J'en suis bien conscient et je tiens à remercier chacun pour sa collaboration très précieuse.

Je dois une mention particulière aux nombreux collègues de l'ORSTOM, du GERDAT ou du CNRS qui, par leur critiques bienveillantes et leurs remarques astucieuses m'ont amené petit à petit à voir plus clair dans les conclusions des résultats patiemment accumulés. C'est pendant ces discussions passionnées, que sont nées la plupart des idées exposées dans cette étude. Je dois citer parmi bien d'autres:

- à l'ORSTOM : AUDRY, BOISSEZON, CHATELIN, COLLINET, COM-BEAU, LAFFORGUE et HUMBEL ;
- <u>au GERDAT</u>: du PLESSIS et DELABARRE de l'IRCA, GODEFROY de l'IRFA, JADIN et DEFGNEE de l'IFCC, CHARREAU, JENNY, ARRIVETS, KALMS POULAIN, BERTRAND, LEBUANEC, CHABALIER de l'IRAT, Y. BIROT, GALABERT, MILLOGO et PIOT du CTFT/H.V.;
 - au CNRS: SOUCHIER, LAMOTTE, JOSENS, LAVELLE et VILLECOURT;
- <u>et ailleurs</u>: HUDSON en Rhodésie, HEUSCH au Maroc, LAL au Nigéria, WISCHMEIER, MEYER, SWANSON, MOLDENHAUER, BARNETT, HARROLD

et les équipes du "Soil and Water Conservation" aux USA.

J'éprouve un grand plaisir à remercier le Professeur LELONG qui, avec le Professeur TRICHET, m'a accueilli au Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université d'Orléans et m'a présenté aux Professeurs GABIS, GROLIER, HUCHER, TOURRAY et CADET qui forment une vivante équipe. Déjà à Abidjan, François LELONG avait suivi mes travaux et dirigé ma thèse de docteur ingénieur. Malgré ses nombreuses charges, il ne ménagea pas son temps pour m'aider à rédiger les cinq rapports régionaux (qui forment une annexe à cette synthèse) et enfin cette thèse. C'est à son enthousiasme, à ses critiques toujours constructives et à ses encouragements que je dois, pour une large part, d'être arrivé au bout de cette entreprise : je lui en exprime ma profonde reconnaissance.

Je remercie aussi de leur amité et des services qu'ils m'ont rendus Messieurs LEPILLER, ILDEFONSE et GUILLOT, collègues d'Orléans qui m'ont aidé à résoudre divers problèmes de minéralogie.

Je remercie aussi tous ceux qui ont bien voulu faire partie de mon Jury de thèse ou réviser la première version de ce mémoire : Monsieur TRICHET, Professeur à Orléans, Monsieur SOUCHIER, Professeur à Nancy, Monsieur P. BIROT, Professeur de géographie physique, qui a relu attentivement la partie concernant l'érosion, Messieurs FOURNIER et COLOMBANI qui ont supervisé les chapitres sur les bilans de l'eau et les bassins versants, Messieurs FAUCK et AUBERT, pédologues de l'ORSTOM, qui ont pris le temps de relire avec soin mon manuscrit et m'aidèrent dans leurs exigeances de clarté et de rigueur, et enfin, Monsieur PEDRO qui, après s'être assuré de m'avoir bien compris, m'a proposé de nombreuses retouches pour mieux structurer la présentation des résultats et en souligner les conclusions principales.

Je n'aurais garde de terminer cet avant-propos sans avoir une pensée reconnaissante à l'équipe du laboratoire de pédologie expérimentale d'Adiopodoumé qui m'a suivi dans toutes mes tournées et a déplacé avec moi plus de 200 m³ de terre au pic, à la pelle et au burin, pour mettre en place les dispositifs, les tester et les suivre jusqu'à leur destruction finale, lors du démontage. Les longues heures passées ensemble au fond des trous à sonder la terre et à la maîtriser dans des

conditions souvent très pénibles de chaleur, d'humidité de l'air et de soif, nous laisse un sentiment de fraternité que je ne suis pas près d'oublier. C'est à Hamidou KINDO, Marcel KOUAME, José SAGOU, Diallo SOUNSOUNA et aussi à Pierre Henri des TUREAUX et à Jean ASSELINE que je dois d'avoir réalisé, avec très peu de moyens, quantité de dispositifs originaux.

Mes remerciements vont enfin à tous ceux qui m'ont aidé matériellement à réaliser ce mémoire : au Service de publication de l'ORSTOM (M. QUINET et Mmes DARDENNE et LORNE), au Service de documentation (Mmes MASSONI et PERROT), au dessinateur J.C. MANCHON d'Orléans, à Mme DEBIENNE qui a tapé très consciencieusement des centaines de pages et de tableaux et à Mmes HUE et FERRAND qui ont terminé la frappe, au Service de publication de l'UER Sciences d'Orléans.

Ensin à Madeleine ROOSE, mon épouse, qui tout en assurant l'éducation de mes trois bambins remuants, à trouvé le moyen de m'aider dans la tâche ingrate de la correction des épreuves, tout en gardant son humour.

La litanie est longue ae zous ceux qui m'ont prêté mair forte pour réaliser ce travail. Bien d'autres noms remontent encore à ma mémoire que je n'ai pu citer ici. J'envie ces artisans du temps passé. qui n'ont pas cru utile de signer leur ouvrage.

On doit tant aux autres!

RÉSUMÉ

Introduction --

En Afrique occidentale des surfaces importantes du vieux continent sont enfouies sous une couverture pédologique kaolinique, monotone du point de vue minéralogique. Ces couvertures sont très anciennes puisqu'il faut 20.000 à 100.000 ans selon les auteurs pour que se réalise la kaolinisation complète d'un mètre de granite. Or actuellement, le fonctionnement de la partie supérieure des profils pédologiques (ainsi d'ailleurs que le paysage tout entier) est en relation étroite avec le bioclimat. En particulier, les profils des sols ferrallitiques sont homogènes et le drainage vertical est abondant dans la zone forestière subéquatoriale de la basse Côte d'Ivoire. Par contre, les profils des sols ferrugineux tropicaux sont contrastés, le drainage profond est réduit et le ruissellement important dans la zone des savanes soudano-sahéliennes à climat tropical sec du centre de la Haute-Volta. De plus, des enquêtes ont montré que l'aménagement à des fins agricoles de ces sols tropicaux entraîne des modifications profondes des matières organiques et de la structure, de la dynamique de l'eau et des transferts de matières. Sans vouloir nier l'importance de l'héritage historique sur la maturation de l'épaisse couverture pédologique, une démarche expérimentale a été tentée sur le terrain, visant à quantifier les différents éléments du bilan de matières (eau, solubles, solides) en milieu naturel ou cultivé, dans le but de préciser l'influence du bioclimat et de l'homme sur la dynamique actuelle de la partie supérieure du profil, la plus sensible aux modifications extérieures.

Les résultats de cette étude sont présentés dans quatre parties :

- Caractères généraux du milieu, des sols et des dispositifs expérimentaux.
- II Phénomènes d'érosion : étude quantitative des causes et des facteurs de l'érosion.
- III Les bilans de matière : l'eau, les solubles, les solides.
- IV Interprétation générale : le rôle de la végétation, du climat et de l'homme.

Dans les pages qui suivent, seront résumés les principaux résultats de cette étude.

I. LES CARACTERES GENERAUX DU MILIEU, DES SOLS ET DES DISPOSITIFS

Pour appréhender la dynamique actuelle des profils en fonction des circonstances, l'analyse chimico-minéralogique de colonnes de sol ne convient pas, car elle intègre le facteur temps. On a donc envisagé des mesures continues sur le terrain des processus pédogénétiques pour préciser chaque terme du bilan de matière dans des conditions expérimentales les plus différentes possibles du point de vue :

- de la végétation : de la forêt dense à différents types de savane et de cultures (et même le sol nu) ;
- du climat : du pôle subéquatorial au pôle tropical sec, les précipitation annuelles diminuent de 2100 à 700 mm, l'ETP augmente de 1250 à 1900 mm. les températures maximales augmentent ainsi que la durée et la sévérité de la

saison sèche. L'agressivité des pluies diminue, mais celle de la chaleur desséchante augmente ;

- <u>du paysage</u> : l'inclinaison des versants diminue, mais leur longueur augmente ;

- des sols : les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux étudiés sont kaoliniques, riches en sables quartzeux, lixiviés en bases et appauvris en particules fines dans les horizons superficiels, mais les teneurs en matières organiques, la macroporosité et la structure diminuent de la zone forestière à la zone la plus sèche, de même que sous cultures sarclées;

- des roches mères : des granito-gneiss en majorité, mais aussi des schistes chloriteux et des sédiments argilo-sableux tertiaires dans la région forestière.

Pour évaluer les mouvements de l'eau et de ce qu'elle transporte, les observations ont été effectuées sur des petites parcelles homogènes, à l'aide de dispositifs respectant le mieux possible l'architecture de la porosité des sols tels que les cases d'érosion, les parcelles de lessivage oblique et les lysimètres monolithiques.

Parallèlement furent observées les remontées de terre fine par les vers et les termites et la production végétale des savanes, les précipitations et le pluviolessivage.

Plutôt que des mesures très précises de laboratoire sur échantillons remaniés ou des mesures de terrain limitées dans le temps, on a procédé à un grand nombre d'observations tout au long de nombreux cycles saisonniers (4 à 11 années) sur de petites parcelles situées à mi-versant, lesquelles représentent mieux la dynamique actuelle que les sols des sommets (influence importante de l'héritage) ou des bas-fonds (hydromorphie et colluvionnement). De très nombreuses analyses d'eau, de sols et de végétaux ont été réalisées sur place au laboratoire central de l'ORSTOM à Adiopodoumé.

II. ANALYSE QUANTITATIVE DES PHENOMENES D'EROSION

Il s'agit exclusivement de l'érosion en nappe et en rigole à l'échelle de la parcelle.

Sous végétation naturelle, le ruissellement et l'érosion sont très limités tant que le sol est bien couvert, et les variations interannuelles sont aussi importantes que les différences observées entre le milieu forestier et les savanes soudaniennes. Les phénomènes d'érosion ne deviennent notables que dans les steppes sahéliennes à couverture végétale discontinue (max. dans les zones de 400 à 700 mm de pluie). Les feux de brousse (surtout tardifs) modifient fortement la couverture végétale et sont susceptibles d'augmenter sérieusement les risques d'érosion.

En milieu cultivé, on peut observer de grandes différences d'érosion en fonction du type de culture ; comme les pluies sont très agressives (3 à 50 fois plus en Afrique de l'Ouest qu'en milieu tempéré), l'influence du couvert végétal sera très marquée sur les équilibres biologiques, les bilans hydriques, chimiques et colloïdaux ainsi que sur la structure du sol. Tout transport de terre nécessite une source d'énergie. Dans les paysages ondulés du vieux bouclier africain, la cause première de l'érosion est l'énergie des gouttes de pluie qui disperse les particules formant les agrégats et les mottes ; le ruissellement n'est qu'un agent de transport, mais à mesure que la pente des versants

augmente, son apport d'énergie croît et la forme que prend l'érosion passe de la nappe à la rigole ou la ravine. L'analyse des résultats à l'aide de l'équation de WISCHMEIER et SMITH (1960) montre l'ordre d'importance des facteurs conditionnels : le couvert végétal peut modifier l'érosion de 1 à 1/1000, la pente de 0,1 à 5 (rarement 20), l'érodibilité du sol de 1/3 à 1/100 et les techniques antiérosives de 1 à 1/10. Les pertes en terre représentent le produit de l'agressivité des pluies par les 4 facteurs de résistance du milieu et non leur somme, car si l'un deux s'annule, l'érosion tend effectivement vers zéro : on doit en tenir compte pour organiser la lutte anti-érosive et choisir une combinaison des facteurs les plus efficaces (méthodes biologiques).

La comparaison des transports liquides et solides à l'échelle de la parcelle et des bassins versants de différentes tailles est délicate à cause de l'influence majeure du couvert végétal : chaque échelle d'observation a son intérêt pour des buts différents.

III. LE BILAN HYDRIQUE

Les précipitations, le ruissellement, le drainage et les variations saisonnières du profil hydrique ont été mesurés sur le terrain pendant 4 à 11 ans. Puis, pour généraliser le bilan aux cas des années normales, décennales sèches ou humides, on a appliqué la méthode de Thorntwaïte modifiée.

- Tant que l'ETP est supérieur à la pluie (saison sèche), ETR = Pluie Ruiss.
- En saison humide, ETR tend vers ETP (du moins en milieu naturel) et Drain = Pluie-(Ruiss. + ETP).
- On ajoute ensuite à l'ETR brut, la variation saisonnière du stock d'humidité du sol (mesurée au champ) et on la soustrait du drainage brut. Le drainage vertical profond ainsi calculé est estimé par défaut.

Le drainage profond en année normale passe de 40-45 % sous forêt dense subéquatoriale, à 25-35 % sous savane soudanienne et tend à s'annuler au pôle sahélien ; à ce pôle sec, où les pluies sont généralement inférieures à 700 mm, le front d'humectation du sol ne dépasse pas chaque année 50 cm de profondeur, tant le pouvoir évoporant de l'air et le ruissellement superficiel sont élevés. En revanche, au pôle humide, l'ETP est limitée à 1250 mm de telle sorte qu'une masse d'eau considérable est disponible pour percoler à travers le profil jusqu'à la nappe phréatique (ou pour ruisseler si la surface du sol est dégradée). L'influence de la roche mère et de la topographie sur ce bilan est assez complexe. Par contre, le rôle de la végétation est important et d'autant plus important que le climat est sec. La forêt évapotranspire 150 à 200 mm de plus que les autres couverts végétaux, car elle dessèche le sol plus profondément. Elle modifie surtout la charge solide des eaux et la répartition des écoulements dans l'année : plus la végétation est dense, plus l'écoulement retardé (le plus utile) est favorisé et les écoulements de pointe (les plus dangereux pour l'érosion) sont laminés. Les résultats montrent enfin qu'on ne peut négliger le ruissellement dans les modèles d'estimation du bilan hydrique : il varie de 1 % en milieu naturel à plus de 40 % sous culture sarclée.

IV. LA CHARGE SOLUBLE DES EAUX

Dans la séquence étudiée, la charge soluble des eaux superficielles varie plus en fonction du volume des écoulements et des saisons qu'en fonction des stations elles-mêmes. La tendance à la dilution en milieu humide est compensée par des apports atmosphériques croissants (proximité de l'océan et de la

forêt) et par une activité biologique plus poussée : seule la silice des eaux de nappe augmente nettement avec l'aridité du milieu. Les eaux de pluie se chargent au contact des végétaux (surtout des arbres) et des couches humifères du sol, puis se déchargent avant d'atteindre la nappe phréatique : seuls la silice et le sodium, qui ne sont pas piégés par les végétaux, présentent des teneurs croissantes jusqu'aux sources.

L'influence de la roche mère sur la charge soluble des eaux superficielles est réduite, car il ne reste pratiquement pas de minéraux altérables dans les horizons traversés. La kaolinite est stable, le quartz est soluble dans certaines circonstances au sein des horizons superficiels, mais pas dans la zone d'altération ; les sesquioxydes migrent principalement sous forme colloïdale ou particulaire.

L'aménagement du milieu naturel (défrichement, feu, fertilisation) peut modifier considérablement la charge soluble des eaux superficielles, en changeant l'équilibre entre l'offre (minéralisation des matières organiques et engrais) et la demande d'éléments nutritifs (fixation par le sol et besoins des plantes). Il en résulte des risques de lixiviation des éléments les plus solubles (N, Ca, Mg, K, Na, Cl, SO4) et une tendance à l'acidification des sols soumis à une fertilisation intense, trop souvent incomplète. Les risques de pollution des nappes sont cependant réduits tant que les apports ne dépassent pas les besoins des plantes, ni la capacité de fixation du sol (fractionnement) et qu'ils sont effectués en dehors des périodes les plus humides de l'année. L'azote et les bases sont très mobiles alors que le phosphore est rapidement insolubilisé par le fer et l'alumine libres, abondants dans les sols tropicaux. Le potassium est très mobile dans les sols kaoliniques, tandis qu'il est rapidement rétrogradé dans les sols riches en argiles 2/1.

La composition chimique des eaux superficielles dépend donc surtout des phénomènes biochimiques et de l'aménagement du milieu par l'homme, tandis qu'au niveau de la nappe, elle est contrôlée par les lois d'équilibre physicochimique entre les minéraux et les solutions.

V. BILANS GEOCHIMIQUES DE L'EVOLUTION

Dans le milieu naturel, le bilan n'est équilibré que grâce aux apports atmosphériques et au recyclage rapide des éléments concentrés à la surface du sol par diverses activités biologiques (pluviolessivage, minéralisation des litières, remontées par la flore et la mésofaune). Qu'un processus quelconque interrompe la chaîne biologique et la productivité végétale diminue, tandis que les horizons superficiels du sol se dégradent. Ainsi, lorsque le feu parcourt régulièrement la savane, il empêche la régénération des arbres, abîme les touffes d'herbes, réduit la variabilité végétale : finalement le taux de matières organiques du sol diminue, tandis que sa compaction et son érodibilité augmentent.

L'arbre joue en quelque sorte le rôle du "bas de laine" pour accumuler les substances nutritives disponibles : sa destruction entraîne nécessairement une certaine dégradation du milieu, mais celle-ci peut être plus ou moins rapide et profonde en fonction de la brutalité des techniques de défrichement et du mode d'exploitation. En définitive, ce milieu tropical, où les minéraux altérables sont profondément enfouis sous la couverture kaolinique, est très fragile et difficile à mettre en valeur à cause de l'agressivité climatique ; de fortes pluies succèdant à de fortes chaleurs, les matières organiques sont rapidement minéralisées laissant un substrat pédologique pauvre chimiquement et fragile dans ses structures. L'exploitation agricole exige des apports

minéraux et organiques réguliers pour compenser les pertes de nutriments (exportation par les récoltes, érosion, lixiviation) et la réduction de certaines activités biologiques. L'utilisation rationnelle des résidus de culture au champ semble essentielle, tant pour réduire les exportations minérales que pour assurer un niveau raisonnable du taux de matières organiques dans les horizons superficiels du sol, une structure correcte et une bonne résistance à l'érosion, une capacité suffisante de stockage de l'eau utile et des nutriments.

VI. CONSEQUENCES DES TRANSFERTS PARTICULAIRES SUR LA MORPHOLOGIE DES PROFILS

Dans la séquence bioclimatique étudiée, l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels est généralisé sur les couvertures kaoliniques : cet appauvrissement provient de l'action combinée de l'érosion en nappe sélective, des remontées de matériaux fins par la mésofaune et du lessivage des élements colloïdaux. La destruction des argiles ne semble se produire qu'en milieu chaud beaucoup plus humide (pluie > 300 mm)

En milieu forestier subéquatorial, le drainage vertical est si important que le lessivage vertical à floculation diffuse domine les mouvements obliques de surface et développe des profils peu différenciés et profondément appauvris. Sous savane brûlée et sous culture sarclée le lessivage est aussi abondant, mais largement dépassé par les phénomènes d'érosion sélective. Sur forte pente ou en milieu dégradé, l'érosion devient décapante, ce qui limite l'épaisseur des horizons appauvris. Si le lessivage des éléments colloïdaux est plus apparent en milieu tropical sec, c'est que ceux-ci se déposent à faible profondeur, faute de drainage profond : ils forment des profils très différenciés. Dès lors se développe un horizon compact à faible profondeur lequel favorise les mouvements obliques superficiels de l'eau et de tout ce qu'elle peut transporter.

Pour le lessivage comme pour l'érosion en nappe, l'énergie des gouttes de pluie intervient pour désagréger les particules, tandis que l'eau assure leur transport. Par contre, les matières organiques peuvent jouer des rôles divergents : les acides fulviques maintiennent les colloïdes kaoliniques à l'état dispersé et assurent leur migration, tandis que d'autres formes de matières organiques protègent la stabilité de la structure et ralentissent l'érosion.

Les activités de la mésofaune sont multiples et très variables d'une espèce à l'autre. Retenons leur influence positive sur la macroporosité, la capacité de filtration et l'homogénéisation des horizons superficiels. Notons également que la remontée de matériaux riches en particules fines au-dessus de la litière et des lits de graviers, assure l'évolution de l'appauvrissement et la possibilité d'une érosion en milieu naturellement protégé.

VII. CONCLUSIONS GENERALES

De cette étude on peut retenir quelques enseignements généraux concernant la pédogenèse actuelle et l'influence de l'homme et de la végétation sur celle-ci.

1) - La différenciation des profils sur les couvertures kaoliniques tient à la diversité de la dynamique de l'eau et au rôle essentiel joué par diverses activités biologiques. En même temps que les mouvements de l'eau deviennent plus profonds du pôle sahélien au pôle subéquatorial, les activités biologiques s'amplifient et se diversifient au point d'influencer la plupart des processus pédologiques.

- 2) Les transferts de matières sous forme particulaire occupent une place prépondérante dans la séquence bioclimatique étudiée. Si la part des migrations solubles augmente à mesure que le climat devient plus humide, ils ne les dépassent pas, même en milieu subéquatorial. Sous culture peu couvrante, l'érosion en surface masque les autres transferts.
- 3) La lixiviation des nutriments et l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels sont des processus pédologiques très rapides (quelques dizaines d'années à quelques millénaires) par rapport à l'altération ferrallitique (quelques dizaines de millénaires par mètre de granite kaolinisé). De plus, l'homme, en aménageant le milieu naturel, accélère encore l'érosion et les migrations particulaires à la surface du sol. On comprend bien dès lors, pourquoi la morphologie des profils est en relation étroite avec le bioclimat actuel.
- 4) Le rôle de la végétation (surtout les arbres) sur la dynamique des sols est considérable.
- 5) Finalement, il faut insister sur le rôle fondamental de l'homme sur la pédogenèse actuelle. L'homme peut en effet modifier profondément la couverture végétale, les activités biologiques et la structure des horizons superficiels (travaux culturaux) ce qui accélère certains processus et peut changer la dynamique actuelle de la partie supérieure du profil. Le milieu étant exposé à un climat particulièrement agressif (chaleur desséchante suivie de pluies violentes), sa mise en valeur exige qu'on respecte les lois élémentaires de la nature et en particulier qu'on protège les horizons superficiels les plus actifs biologiquement et qu'on leur restitue régulièrement les éléments nutritifs et les matières organiques qui lui sont indispensables pour maintenir leur niveau de fertilité.

SUMMARY

Introduction —

In Western Africa, large areas of old landscapes are characterized by the occurance of a pedological cover of quartz, kaolinite, oxides and hydroxides of iron and aluminium. The soil profiles are very old, 20 000 to 100 000 years being required for the complete weathering of one meter of granite to kaolinite. Nevertheless, the evolution of the topsoil, (as well as the whole landscape), is closely related to the actual bioclimate. In particular, the ferralitic soil profiles found in the subequatorial zone of the Lower Ivory Coast are homogeneous with good vertical drainage while the ferruginous profiles found in the Soudane - Sahelian savanna of the dry tropical area of Central Upper-Volta, by contrast, have lower infiltration rates. Runoff is more significant in the latter area where deep percolation is not as great. Furthermore, it has been shown that the agricultural management of these tropical soils results in changes in organic matter content, the water balance and the transfer of matter in the soil profile. Bearing in mind that the maturity of these profiles is greatly influenced by climatic history, an experimental investigation aimed at quantifying the role of the various components of the soil profile (water, solutes, solids) in natural or cultivated plots with the intention of describing the bioclimatic and human influences on the formation of the upper part of the soil profile (the area most sensitive to external modification) was undertaken.

Results are presented in four parts:

- I. ENVIRONMENT, SOILS AND EXPERIMENTAL DEVICES
- II. QUANTITATIVE STUDY OF THE CAUSES OF, AND FACTORS INFLUENCING EROSION
- III. MATTER BALANCE: WATER, SOLUTES, SOLIDS
- IV. GENERAL INTERPRETATION: THE ROLE PLAYED BY VEGETAL COVER, HUMAN INFLUENCE, AND CLIMATE

The main results of this study are discussed in this summary.

I. ENVIRONMENT, SOILS AND EXPERIMENTAL DEVICES

. Mineral and chemical analyses of soil columns are insufficient to study the dynamics of soil profiles because this study includes the "time factor". Pedological processes were therefore monitored continuously for many years in the field, to examine each component of the transfer of matter within the soil profile under experimental conditions which were varied as much as possible as indicated below:

<u>Vegetation</u> ranges from dense humid forests to various types of savanna and agricultural crops or even bare soils.

Climate ranges from subequatorial areas to the dry tropical stations. The change in climate from the former to the latter regions is evident in the decrease in average rainfall from 2100 mm to 700 mm with an associated decrease in rainfall aggresivity, the increase in potential evapotranspiration from 1250 mm to 1900 mm and increases in maximum temperatures, duration and severity of the dry season and the dessicating action of the heat.

The topography varies between steep, short slopes in the subequatorial area and flatter longer slopes in the dry tropical stations.

The soils studied are ferralitic or ferruginous tropical soils composed of kaolinitic clay, quartz, sand, iron and aluminium hydroxides. The upper horizons are desaturated in bases and impoverished in fine particles. The organic matter content, macro-porosity and stability of structure all decrease from the forested to the dry areas and to areas under clean-weeded crops.

The bedrock consists mainly of granite-gneiss but chloritic schist and clay sands deposited during the Upper-Tertiary period also occur in the forested area.

With a view to evaluating water movement and matter transpore tation, observations were made in small homogeneous plots with the help of equipment and installations which do not disturb the macroporosity, such as runoff plots, erosion and oblique leaching plots (ERLO) and monolithic lysimeters. The transport of fine particles to the soil surface from the subsoil by earthworms and termites, the production of green matter by the savanna, the rainfall and the throughfall were also measured close to the plots.

Instead of carrying out very accurate measurements in the laboratory on disturbed soil samples, or obtaining short term field data, a great number of observations were made during 4 to 11 seasonal cycles on small plots located on hill= sides where the soil dynamics are more representitive than on the hilltops (where the history of the soil will have a significant influence) or in the valleys (where there is colluvium and hydromorphic influence). Numerous analyses of water, plants and soils were carried out in the Central Laboratory of Orstom at Adiopodoune.

II. QUANTITATIVE STUDY OF THE CAUSES OF, AND FACTORS INFLUENCING EROSION

The data concern only sheet and rill erosion on runoff plot scale -

Under natural cover, runoff (Kr = 0,2 to 2%) and erosion (E = 20 to 200 kg/ha/year) are very limited as long as the soil surface is completely covered; their annual variability is as significant as the differences observed between the forested areas and the Soudanian savannas. Erosion phenomena become significant only in the Sahelian steppes where the canopy is limited: erosion is maximal if rainfall reaches 400 to 700 mm. Bushfires (particularly late in the season) considerably reduce the canopy and therefore greatly increase soil and water losses.

- Under cultivation, large differences in erosion can be observed in relation to the crop type and the agricultural practices. Since rainfalls are very aggressive (3 to 50 times more in West Africa than in temperate areas), the canopy cover has a marked influence on biological activities, chemical and colloidal balance and also on the topsoil structure.
- For all soil transportation, energy is required. On the undulating landscapes of the old West African shield, the prime cause of erosion is the kinetic energy developed by the raindrops which disperse particles from the aggregates and the clods. Generally runoff is only a transporting agent, but when the slope gradient increases, the runoff-energy increases and sheet erosion is replaced by rill or gully erosion.
- The analysis of the data with the help of the "Universal Soil Loss Equation" (Wischmeier and Smith, 1960) shows the relative significance of the factors affecting erosion. The canopy coverage can change erosion from a relative value 1 on a bare plot, to 1/1000 under forest, the slope from 0,1 to 5 (seldom 20), the soil erodibility from 1/3 to 1/100 and the protective practices from 1 to 0,1. The soil losses amount to the product of the rainfall aggressivity and the four factors modifying erosion resistance (and not their amount), because when one factor is zero, erosion becomes effectively zero. We must take this into account in planning soil and water conservation and select a combination of the most effective factors.
- The comparison of erosion and runoff at plot scale and on watersheds of various areas is difficult because of the major role played by the canopy. Each scale is interesting, but not applicable to the same problems.

III. THE MATTER BALANCE

A. The Water Balance

- Rainfall, runoff, drainage and seasonal variations of soil moisture were measured in the field for periods of 4 to 11 years of above and below average rainfall. To compare the water balance in normal years and in decennal dry or wet years, a modified version of Thorntwaite methodology was applied.
- During the dry season, potential evapotranspiration (PET)
 exceeds rainfall: Actual Evapotranspiration (AET) = Rain Runoff.
- During the wet season, Actual Evapotranspiration is close to Potential evapotranspiration (PET) in natural conditions; then, Drainage = Rain - (Runoff + PET).
- For the correct yearly balance, the seasonal variations of the soil moisture measured in the field must be added to the AET roughly calculated and subtracted from the drainage roughly calculated, because the evapotranspiration depletes soil moisture. With this method, the estimated deep drainage is too low.
- The deep drainage in normal years decreases from 40-45% under subequatorial dense forest, to 25-35% under Soudanian savanna and to zero in the Sahelian area. In this dry area, where rainfall is generally less than 700 millimeters a year, free water does not percolate more than 50 centimeters through the soil, because PET and runoff are very high. On the other hand, in subequatorial areas, PET is limited to 1250 mm, so that a considerable quantity of water is available to drain through the profile to the watertable, or to runoff if the topsoil structure is destroyed. The influence of the bedrock and the topography on this water balance is complex. Furthermore, the role of the vegetation becomes more significant in dryer climates. In dense forest evapotranspiration is 150 to 200 mm

more than under other types of canopy because of deeper root penetration. The modifying influence of the forest is greater on the sediment load and flow distribution than on the total flow. In dense vegetation, base flow (the most useful type of flow) is increased and runoff peaks (significant for erosion) are reduced. The results also show that runoff cannot be neglected in modeling water balance estimation; indeed, it varies from 1% under natural vegetation to more than 40% under clean-weeded crops.

B. The Soluble Load of the Water

- In the area studied, the soluble load of surface waters varies more with the volume of the flow and the season than with geographical location. The tendency for lower soluble loads to occur in the wet areas is offset by increased atmospheric deposits (due to ocean and forest proximity) and increased biological activities. Only the silicon content of the watertable increases noticeably with the aridity. The rain water absorbs solutes and colloids from the canopy (particularly the trees) and humiferous horizons of the soil; this load then decreases before the drainage water reaches the watertable. Only the content of silicon and sodium (which are not trapped by vegetation or soil), increases in the groundwater.
- The influence of the bedrock on the soluble load of surface water is small because there is practically no weatherable material left in the upper horizons. Kaolinite is stable.

 Quartz is moderately soluble in some upper horizons, but not at the level of weathering rocks. Sesquioxides migrate chiefly in colloidal form.

- The management of the natural resources (burning, clearing, planting and fertilising) can increase considerably the soluble load of surface water by modifying the equilibrium between the supply (organic matter mineralisation, fertili= sation) and the demand for nutrients (fixation by the soil particles, needs of the plants and washing by drainage water). Consequently there is some risk of washing of the more soluble elements (N, Ca, -Mg, K, Na, Cl, 504) and a general tendency to acidification of intensively (and also often partially) Nevertheless the risk of pollution of the fertilised soil. watertable is low. as long as the supply does not exceed the plant requirements, nor the fixation capacity of the soil. Fertilisation during the wetter periods of the year is therefore not advisable. Nitrogen and bases are very mobile, but phosphorus is quickly insolubilised by free iron and aluminium, abundant in tropical soils. Potassium is easily washed off in kaolinitic soils, while it is quickly retrograded in soils rich in 2/1 clay.
- Therefore the chemical composition of surface water depends chiefly on biological and human activities, while below the watertable, the composition is controlled by physico-chemical equilibrium between minerals and solutions.

C. Chemical Balance

In nature, the chemical balance is controlled by atmospheric supply (rainfall, dust) and by the quick return of the nutrients concentrated in the topsoil by various biological activities (throughfall, litter mineralization, transport of chemicals above the surface by termites and plants). If a biological process is interupted, the organic matter content will decrease and the topsoil characteristics will become degraded. In cases where savanna is annually burned, the regeneration of trees is hindered and grass yield and the number of species decrease. Finally the soil organic matter content decreases while compaction and erodibility increase.

Trees play a major role in accummulating nutrients in the topsoil; clearing always involves some degradation, but this can be more or less significant depending on the roughness of the clearing and cultivation practices. Definitely, this tropical area, where weatherable minerals are deeply buried under the kaolinitic cover, is very difficult to develop because of the climatic agressivity; big storms are preceded by high temperatures, so that organic matter is quickly mineralized, leaving a soil poor chemically and frail structurally. Aoricultural management must include regular mineral and organic matter supply to compensate for nutrient losses (yield exportation, erosion, leaching) and the decrease of some biological activities. Reasonable residue management practices in the field seem to be very important to reduce mineral exportation as well as to maintain a reasonable level of organic matter in the topsoil, a good structure and resistance to erosion and a sufficient water and nutrient storage capacity.

D. <u>Consequences of Particle Transfer on the Morphology</u> of the Soil Profiles

In the studied bioclimatic sequence, the impoverishment in fine particles of the upper horizons is generalized on the kaolinitic covers. This impoverishment is caused by the combined actions of the selective sheet erosion, continual transport of fine ground by termites and leaching of colloids. The disintegration of clay particles appears to occur only in hot areas where rainfall exceeds 3000 millimeters.

In forested subequatorial areas, vertical drainage is very important: vertical leaching, with diffuse colloids deposition, is therefore greater than oblique leaching and surface movement (erosion); the profiles are slightly differenciated and impoverished to considerable depth. Under yearly burned savanna and under clean-weeded crops, leaching is also considerable, but selective sheet erosion is more important. On steep slopes and in degraded areas, erosion is less selective and scours the

upper humiferous horizons. If the leaching of colloids is more visible in dry tropical countries, it is because the colloids are deposited close to the surface because deep drainage is reduced; the profiles are very differenciated. A compact horizon which increases oblique and surface movement of water and chemical elements developes close to the surface.

The kinetic energy of raindrop detach particles from aggregates; these particles will be transported by runoff (erosion) and by drainage water (leaching). On the other hand, organic matter can play divergent roles: the fulvic acids maintains the disperced state of kaolinitic colloids and this allows their migration through the profile. Other forms of organic matter protect the structure stability and decrease erosion.

Mesofauna activities are numerous and vary from one species to another. We have to keep in mind their positive influence on the macroporosity, the infiltration capacity and the mixing (homogeneisation) of the topsoil. The rise of fine ground above the litter and stonelines makes soil available for erosion from natural well protected hillsides, ensuring continual impoverishment in fine particles of the upper horizons.

IV. GENERAL INTERPRETATION

From this study one can outline some general concepts concerning the actual pedogenesis and the influences of man and greencover.

1. The differenciation of profiles on the kaolinitic covers depends on the waterbalance and on various biological activities. In the same way that water movement becomes deeper from the Sahelian savanna to the subequatorial forest, the biological activities increase and diversify so much that they influence the most important pedological processes.

- 2. The transfer of solid particles is very important in the biological sequence studied. Solute migrations increase with the humidity of the climate, but they do not exceed solid transfer, even under subequatorial conditions. Under crops which do not cover the soil surface completely, surface erosion is the most important process.
- 3. Nutrient washing and impoverishment in fine particles are very rapid pedological processes (some ten to one thousand years) relative to weathering processes (some ten thousands years per one meter of granite). And if man manages the natural resources, he accelerates erosion and migration of solids on the soil surface.
- 4. The role of the vegetation (chiefly of the trees) is considerable on the soil evolution.
- Finally, the fundamental role of man on the actual pedogenesis must be emphasised. Man can considerably modify the canopy, the biological activities and the structure of the topsoil (by cultural practices); this can accelerate natural processes and modify the actual dynamics of the upper part of the profile. Because of the aggressive climate (rainfall occuring after dessicating heat), the management of tropical soils for agricultural production requires the protection of the topsoil (the more biologically active horizon) and regular input of nutrients and organic matter, which are indispensable to maintain soil fertility.

SOMMAIRE

| | page |
|--|------|
| AVANT-PROPOS | I |
| RESUME FRANCAIS ET ANGLAIS | VIII |
| INTRODUCTION | 1 |
| Ière PARTIE : LES CONDITIONS GENERALES DE L'ETUDE | 9 |
| Chap. I : Caractères généraux du milieu naturel étudié : l'environnement et les sols. | 11 |
| Chap. II : Les méthodes : analyse critique des principaux dispositifs. | 75 |
| PARTIE: LES PHENOMENES D'EROSION. SYNTHESE DES RESULTATS ACQUIS ET DES RESULTATS NOUVEAUX. | 105 |
| Chap. III : Les causes de l'érosion : l'énergie de la pluie et du ruissellement. | 107 |
| Chap. IV : Les facteurs de l'érosion. | 149 |
| Chap. V: Discussion et conclusions sur les phénomènes d'érosion. | 177 |
| III eme partie : les bilans de matieres. Etude des transferts de | |
| MATIERES ET DE LEURS EFFETS. | 197 |
| Chap. VI : Le bilan hydrique. | 201 |
| Chap. VII : La composition des charges solubles et solides des eaux de surface. | 253 |
| Chap. VIII: Les bilans géochimiques. | 291 |
| Chap. IX: Les aspects granulométriques des transferts de matières et les phénomènes d'appauvrissement. | 345 |
| IV PARTIE: INTERPRETATION D'ENSEMBLE | 389 |
| Chap. X: Influence de la végétation sur le bilan hydrique. | 393 |
| Chap. XI : Dynamique des profils pédologiques : aspect géochimique des transferts. | 407 |
| Chap. XII : Dynamique des profils : importance des transferts par- ticulaires. | 427 |
| Chap. XIII: L'aménagement du milieu naturel Ouest Africain. | 443 |
| CONCLUSIONS GENERALES. | 465 |
| BIBLIOGRAPHIE | 475 |
| ANNEXES | 515 |

INTRODUCTION

La pédologie est une discipline scientifique très jeune : elle émerge à peine des concepts statiques qui lui ont donné naissance, voici un siècle, et qui étaient fondés sur la description morphologique des profils et l'étude de leur répartition géographique et de leurs propriétés. Peu à peu, ces observations de type naturaliste ont permis de dégager des connaissances précises sur l'organisation verticale de ces formations superficielles à l'échelle du profil pédologique, et plus tard, sur les relations horizontales existant entre les profils d'une même toposéquence.

Cependant, il est généralement admis que la plupart des processus (sauf l'hydromorphie) qui donnent naissance à des profils différenciés à partir d'un matériau original donné, sont lents par rapport à l'échelle de temps que représente une vie humaine. Il en résulte que les tentatives des pédologues sont bien rares qui, pour comprendre le fonctionnement de l'objet de leurs études, ont modifié de façon expérimentale les facteurs du milieu qui interviennent dans la formation et le fonctionnement du profil pédologique.

En Afrique Occidentale où s'est déroulée cette étude, des surfaces importantes sont enfouies sous des couvertures pédologiques kaoliniques monotones du point de vue minéralogique. Ces couvertures sont très anciennes puisque la kaolinisation complète d'un mètre de granite exige 20.000 à 100.000 ans selon les auteurs. Or, il se fait que le fonctionnement de la partie supérieure des profils qui se sont développés sur ces épaisses couvertures kaoliniques (et les paysages tout entiers) est en relation avec le bioclimat que l'on peut observer aujourd'hui dans ces régions. En particulier, dans la zone subéquatoriale les profils sont homogènes et le drainage vertical est abondant dans les sols ferrallitiques. En revanche, dans les régions tropicales sèches, les profils sont contrastés et le drainage profond est réduit, tandis que le ruissellement superficiel est important sur les sols ferrugineux tropicaux. De plus, on s'est aperçu que l'aménagement à des fins agricoles des sols en région tropicale sèche, et à fortiori en région subéquatoriale, entraîne des modifications profondes tant sur la dynamique de l'eau, des matières organiques et des éléments nutritifs que sur la structure, la compacité et le complexe absorbant des horizons superficiels ainsi que sur les transferts de matières. Parallèlement à l'étude morphologique des profils et de leur organisation, il est donc possible d'entrevoir une démarche basée sur l'expérimentation et cherchant à préciser la dynamique actuelle des sols soumis à des conditions écologiques connues. Si l'héritage historique et les circonstances bioclimatiques qui ont présidé à la naissance et à la maturation de l'épaisse couverture pédologique, sont difficiles à préciser, il est peut-être possible de quantifier l'influence des conditions actuelles (modifiées ou non) sur la dynamique actuelle de ces sols, ou tout au moins, de la partie superficielle du profil qui semble la plus sensible aux variations de bioclimat ou d'aménagement.

Les études de dynamique actuelle sont assez récentes : elles ont été entreprises par des géologues dans les couches profondes en voie d'altération, par les agronomes dans la couche la plus superficielle du profil, mais rarement sur l'ensemble des deux premiers mètres du profil. Les géologues se sont penchés sur l'altération des roches (études expérimentales en laboratoire d'altération en milieux controlés : Pedro, 1964, Trichet, 1969, etc...) et la ge-

nèse des minéraux secondaires dans les horizons profonds du sol en observant la répartition spatiale des minéraux (DELVIGNE, 1965; WACKERMAN, 1975) et en analysant les eaux de nappe qui les ont baignés (TARDY, 1969; LENOIR, 1972; BLOT, 1980). Les agronomes ont suivi l'évolution des propriétés liées à la fertilité de la terre : leurs études sont généralement limitées à l'horizon labouré. Mais à l'occasion de quelques grands projets de développement, des enquêtes plus fondamentales ont été effectuées sur l'évolution du sol depuis leur défrichement, leur mise en culture et leur exploitation pendant 20 ans (CHARREAU, FAUCK, 1970; FAUCK, MOUREAUX, THOMANN, 1969). Ces enquêtes successives ont permis de montrer que certains processus étaient très rapides durant les premières années qui suivent le défrichement et plus lents une fois atteint un nouvel équilibre, fonction du type et du niveau de production. Ces études très intéressantes sont basées sur l'observation macro-et micro-morphologique, sur des analyses chimiques et des tests physiques plutôt que sur la mesure in situ des phénomènes actuels.

L'originalité de l'étude qui va suivre est de quantifier sur le terrain la vitesse des processus en relation avec la dynamique actuelle des deux mètres supérieurs de deux groupes de sols tropicaux assez voisins sur le plan géochimique, mais évoluant aujourd'hui sous des climats très différents : il s'agit d'une série de sols ferrallitiques répartis dans toute la Côte d'Ivoire et de sols ferrugineux tropicaux situés sur le plateau Mossi dans la région Centre de la Haute Volta.

Faisant table rase des débats opposant les écoles, sans les ignorer pour autant, on a considéré comme "une boîte noire", le modèle exploré qui a les dimensions d'un"pédon" (AUBERT et BOULAINE. 1967) de quelques dizaines de mètres carrés de surface et d'environ deux mètres de profondeur (zone habituellement explorée par la majorité des racines). Dans ces petites parcelles soumises à l'expérimentation (végétation naturelle, sol nu ou cultures fertilisées, averses décennales simulées), les conditions de climat, de végétation, de sol et de pente sont aussi homogènes que possible.

La dynamique actuelle des sols est définie progressivement en quantifiant (ne fut-ce que grossièrement) l'efficacité des processus pédologiques qui interviennent dans chaque cas, en calculant un bilan, le plus complet possible, de ce qui entre et sort de ce secteur du profil et en comparant les flux aux stocks et aux cycles internes au système sol-plante. Les conclusions de cette approche expérimentale sont finalement confrontées avec celles de méthodes plus classiques (mesures physiques sur le terrain pour clarifier la dynamique de l'eau, analyse macro-et micromorphologique, analyses chimiques du profil placé dans son environnement topographique, comparaisons agronomiques par enquêtes successives).

La dynamique de l'eau et de sa charge soluble et solide a fait l'objet d'une attention particulière. D'abord parce que c'est l'élément du climat qui varie le plus. Ensuite parce que c'est un des agents les plus actifs des transferts de matières. Les médecins analysent le sang et les liquides que rejettent leurs malades parce que ceux-ci véhiculent des informations précieuses sur le fonctionnement des cellules et des organes vivants. D'une manière analogue, nous pensons que les eaux qui baignent les agrégats et traversent le modèle, entrent en échange dynamique avec l'eau capillaire, les éléments qui y sont dissous et finalement ceux qui sont adsorbés par les solides qui en constituent la matière.

La comparaison au cours des saisons des qualités des eaux qui circulent dans le sol à différents niveaux fournit des indices sur la migration potentielle de la matière, sur la mobilité de ses éléments constitutifs et sur l'équilibre qui règne entre "l'offre" d'éléments solubles (apports par les pluies, les vents, les engrais ; produits de la minéralisation des matières organiques et de l'altération des minéraux, saturation du complexe adsorbant) et"la demande" (absorption par les racines, fixation plus ou moins définitive par les solides, immobilisation par les microorganismes, lixiviation par les eaux de drainage).

Pour que la comparaison soit significative, il nous a paru essentiel d'étendre l'étude dans l'espace et dans le temps. Connaissant l'irrégularité des pluies et l'importance majeure des averses exceptionnelles sur des processus pédologiques tels que l'érosion, la lixiviation et le lessivage, nous espérions en 7 ans explorer une bonne partie de cette source de variation. Or, tous nos dispositifs, originaux pour une bonne part, n'ont pu être mis en place en même temps et une

longue série d'années sèches ont limité la portée de certains résultats; les observations se sont donc étalées sur une douzaine d'années.

Dans un premier stade, il nous a paru important d'explorer d'abord la variabilité géographique (1200 km entre Abidjan et Ouagadougou) couvrant deux grandes zones climatiques (la zone forestière subéquatoriale à 2 saisons des pluies et la zone tropicale des savanes présahéliennes à climat contrasté) ainsi que leur frange de transition (région de Bouaké subéquatoriale relativement sèche et région de Korhogo, tropicale de transition humide). Dans la mesure du possible, nous nous sommes placés sur le type de roche le plus fréquent : des granites orientés, jadis dénommés granito-gneiss. En basse Côte d'Ivoire forestière cependant, nous avons pu nous situer sur des sols issus de sédiments tertiaires (dont la composition minéralogique est très proche des granites) et de schistes chloriteux. L'étude fouillée des toposéquences a été développée dans un deuxième temps avec l'aide d'un simulateur de pluie et par une équipe multidisciplinaire à partir de 1975 : elles feront l'objet de publications ultérieures.

Un tel programme qui s'étend sur 1200 km et implique l'intervention aussi variée que la pédologie, la géochimie, l'hydrologie, la climatologie et l'agronomie (bref l'écologie des sols), ne peut être réalisé par un chercheur isolé. Faute de disposer d'une véritable équipe multidisciplinaire, nous avons développé une étroite collaboration avec les collègues de l'ORSTOM et des instituts du GERDAT de ces diverses disciplines et des échanges suivis avec des spécialistes américains tels que WISCHMEIER, MEYER et MOLDENHAUER, intéressés par les relations entre l'eau et les transferts de matière.

Le présent mémoire est structuré de la façon suivante :

- Dans une première partie, on situera les sols dans leur toposéquence et on tentera de préciser l'environnement dans lequel les parcelles expérimentales ont été choisies, ainsi que les méthodes mises en oeuvre pour mesurer les différents processus qui interviennent dans la dynamique actuelle des profils.
- Le corps du mémoire, c'est-à-dire les résultats des mesures effectuées pendant une douzaine d'années sur le terrain, est consigné dans les parties II et III.
- La deuxième partie traite exclusivement des phénomènes d'érosion c'est-à-dire du volume de particules solides arrachées à la surface du sol et du volume de la phase liquide (pluie et ruissellement) qui arrache et transporte ces particules. Les études sur l'érosion étant beaucoup plus avancées que les autres et formant un tout cohérent, on les a isolées pour discuter plus longuement des facteurs qui en sont à l'origine ou qui peuvent en modifier l'expression potentielle.
 - La troisième partie traite de l'ensemble du bilan des migrations de matière, par voie interne comme à la surface du sol, en phases soluble et solide, ainsi que des conséquences de ces transferts sur la texture des horizons superficiels du profil.
 - Dans la quatrième partie est discutée l'influence de la végétation sur le bilan hydrique, la charge soluble des eaux superficielles et la différenciation des profils en fonction du bioclimat actuel. Enfin, on présentera une réflexion générale sur les problèmes posés par l'aménagement agricole de l'Afrique Occidentale, à travers les résultats de ces travaux.

PREMIÈRE PARTIE

LES CONDITIONS GÉNÉRALES DE L'ÉTUDE

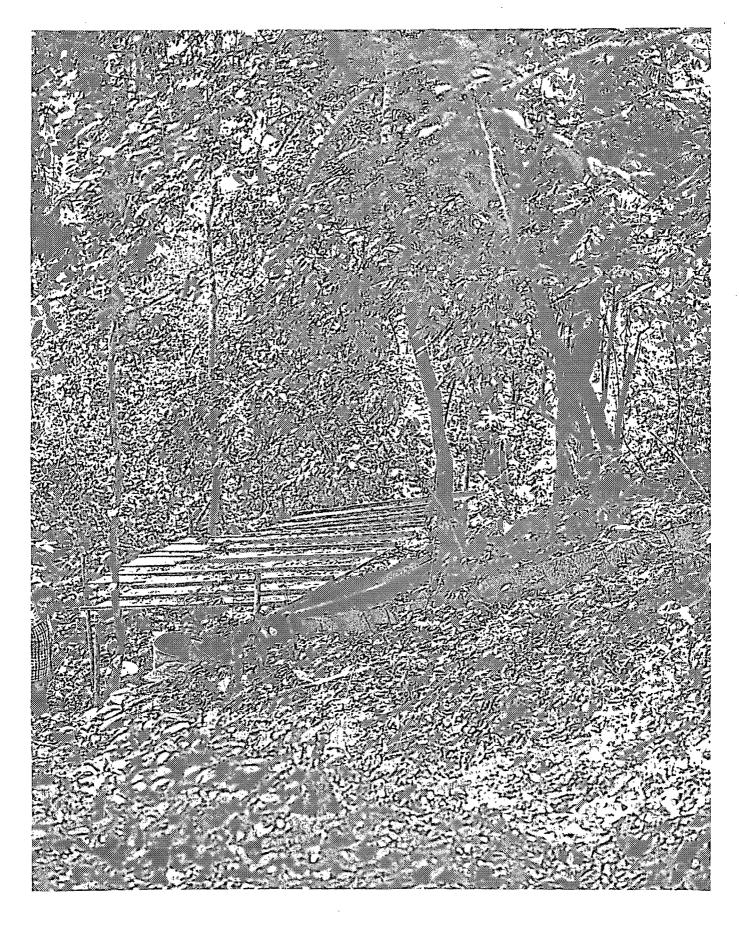


Photo 1 - Parcelle de lessivage oblique (R2) sur un versant très raide (p = 65 %) du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé (Sud Côte d'Ivoire)

Noter - la forêt dense humide secondaire,

A) - la litière de feuilles et la végétation basse qui protègent le sol et fertilisent ce versant abrupt. (ORSTOM)

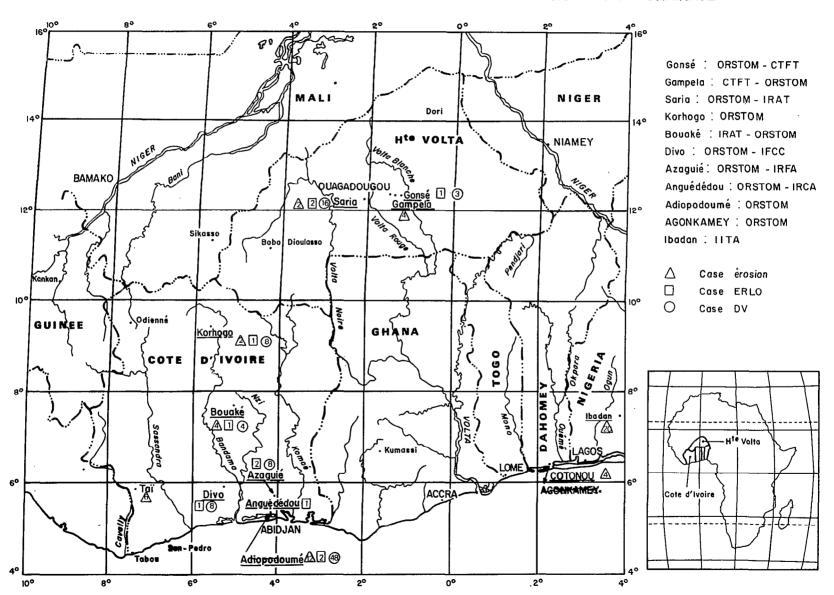
INTRODUCTION:

L'étude de la dynamique actuelle des sols a été abordée sur le terrain par la méthode des bilans de matières en huit stations représentatives situées sur une séquence bioclimatique allant de la région forestière subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire jusqu'aux plateaux couverts de savanes soudano-sahéliennes anthropiques du Centre de la Haute-Volta.

Du fait de la méthode adoptée, il est important de bien connaître, dès le départ, les caractéristiques du milieu où vont se produire les évolutions et les moyens mis en oeuvre pour mesurer ces dernières. Ce sera l'objet des deux premiers chapitres:

Chapitre I - Caractères généraux du milieu naturel étudié. L'environnement et les sols.

Chapitre II - Description et analyse critique des principaux dispositifs utilisés ainsi que des méthodes de mesure des paramètres fondamentaux.



2

CHAPITRE I - CARACTERES GENERAUX DU MILIEU NATUREL ETUDIE

Pour bien saisir le sens d'une expérimentation, il est souvent utile de comparer des situations contrastées, surtout lorsqu'il s'agit d'un milieu aussi hétérogène qu'un sol. C'est ainsi qu'en chaque station écologique retenue, nous avons comparé le milieu portant une végétation se rapprochant le plus possible de la végétation naturelle, à des parcelles nues ou cultivées selon les méthodes modernes. Au demeurant, les stations ont été choisies en tant que représentatives d'une région particulière, qui se distingue des autres:

- . par la *végétation "naturelle"* (quatre stations sous forêt et quatre sous savanes),
- . par le type de sol (six sur des sols ferrallitiques et deux sur des sols ferrugineux tropicaux),
- . par la *roche* qui, après altération, donne le matériau originel soumis à la pédogénèse (sédiments, schiste, granite),
- . par le type de paysage (plateaux échancrés, collines en lanières, larges croupes, plateaux cuirassés et long glacis gravillonnaires),
- . et surtout par le *régime climatique* (subéquatorial au Sud, tropical sec au Nord de la séquence et les transitions).

Il serait fastidieux de présenter successivement les huit stations d'observation. On se reportera aux rapports et aux articles (publiés antérieurement) dont il sera fait mention tout au long de ce travail. Le lecteur intéressé par les détails complémentaires peut consulter ces rapports de campagne comme des annexes au présent document de synthèse. Les éléments principaux de l'environnement de chaque station permettant de comparer les sites ont été résumés aux tableaux 1-1 et 1-2; ces figures 1.1. et 3.5. permettent de situer les parcelles et donnent également la répartition géographique de l'indice moyen d'agressivité climatique (défini au chapitre 3). Nous n'en discuterons ici que les limites de variation et soulignerons simplement quelques traits qui se sont avérés importants pour la différenciation des milieux écologiques.

Tableau I.I.: CARACTERISTIQUES DU MILIEU EXPERIMENTAL

| | ADIOPODOUME | ANGUEDEDOU | AZAGU1E | DIVO | BOUAKE | KORHOGO | SARIA | GONSE | |
|---|---|------------------------------------|--|-------------------------------|---|---|---|---|--|
| SITUATION Latitude Longitude Altitude | 5°19' N '4°13' W 30m | 5°25' N 4°08' W ~60m | 5°33' N 4°03' W ~80m | 5°48' N · 5°18' W ~ 150m | 7°46' N 5°06' W ~370m | 9°25' N 5°39' W 390m | 12°16' N 2°09' W ~300m | 12°22' N 1°19' W ~300m | |
| CLIMATS | EQUATORIAL | DE TRANSITION | (2 SAISONS DES | PLUIES) | | TROPICAL Transition | TROPI | CAL PUR | |
| Pluie an. Moy.(mm) ETP a.m. " Température (°C) Ind. Agress, Rusa | 1250 | 2100 1300 · 26.2° ~1000 | 1750 1314 26.2° 885 | 1450 1280 26°0 825 | 1200 1300 26.1° 512 | 1350 1660 27.0° 676 | 830 1885 28° 450 | 860 1905 28.1° 430 | |
| VEGETATION NAT. | | FORET DENS | E HUMIDE | | | SAVANE ARBO | OREE | | |
| | | Sempervirente | | semi-decidue | Guinéenne | Soudanaise | Soudano-Sahélienne | | |
| Végét.Comparée | Forêt2aire nu-maïs-div. fertilisé | isohypse | Forêt 2aire bananeraie Fert.+ irr. | cacao | Sav.Arbust. mais & div. fertil. Feu | Sav. brûlée sol nu,maïs Fertil. feu | Gav.pat.+Feu nu, sorgho fertilisé | Sav.Arb.brûl. - date variab le du feu | |
| PAYSAGES | | Plateaux Profondément entaillés | | Large croupe Moll. ondulée | Large croupe Moll, ondulée | | Dôme surb. Très long glacis | Plat. Tab. cuirassé Très long | |
| Pentes % Versant (m) | 4-7-11-20-65 20 à 500 | 29 100 à 500 | 14 180 | 10 300 | 4 700 | 3 750 à 1000 | 0.7 2000 | glacis 0.5 3000 | |
| SOLS | | | FERRALLITIQUE | | | | FERRUGINEUX-TROPICAL | | |
| | Très dés appauvri | aturës appauvri | remanié | Moyen.Désat. remanié | Très désat. | Moy.Désat. remanié | Lessivés | | |
| | modal | modal | appauvri | modal | remanié | modal | indurés sur cuir. peu prof. | à taches & concrét. Cuir. profonde | |
| Roche mère | Sédiment.III sablo-arg. | gédim.III sablo-arg. | Schist.chlor. | Granito-gneis | ss Granito- gneiss + fil.pegm. | Granito- gneiss + fil.quart | Granito- gneiss | granito- gneiss | |

I - LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DU MILIEU

1.1 L'extension géographique

La séquence climatique étudiée s'étend sur 7 degrés de latitude au Nord de l'équateur (5°19' N à Adiopodoumé - 12°22' N à Gonse) et 4 degrés de longitude à l'Ouest de Greenwich (1 à 5°). L'altitude est faible : elle augmente très progressivement du niveau de l'océan Atlantique en basse Côte d'Ivoire à 300-350 mètres dès le centre de la Côte d'Ivoire et jusqu'en Haute-Volta. Par la route, 1200 kilomètres séparent les stations extrêmes.

1.2 Les différences climatiques

Dans cette partie de l'Afrique occidentale, lorsqu'on se déplace du Sud au Nord, les précipitations annuelles diminuent de 2100mm (et plus) près d'Abidjan à 800mm près de Ouagadougou, tandis que l'évapotranspiration potentielle (ETP calculée selon la formule de TURC, 1961), augmente de 1250 à 1900 millimètres.

Cette double évolution des données climatiques entraîne nécessairement un changement de type de végétation (diminution de la densité et de la vigueur des arbres) ainsi qu'une évolution des risques d'érosion, de lixiviation des solubles et de lessivage des colloïdes.

Cinq stations sont soumises à un régime équatorial de transition caractérisé par des pluies abondantes (1200 à plus de 2000mm) réparties en deux saisons des pluies d'importance inégale, des températures mensuelles moyennes variant peu autour de la moyenne annuelle (26° C $^+$ 2), une humidité relative de l'air élevée presque toute l'année (70 à 100%) et une ETP modérée (1250mm) surtout en saison des pluies (Note 1).

Note 1

Un pôle plus sec s'étend autour de Bouaké et jusqu'au "V baoulé", de telle sorte qu'il pleut moins à Bouaké (climat subéquatorial) qu'à Korhogo (climat tropical à une seule saison des pluies).

TABLEAU 1.2 : CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DES STATIONS ETUDIEES

| | ADIOPODOUME | ANGUEDEDOU . | AZAGUIE | DIVO | BOUAKE | KORHOGO | SARIA | CONSE |
|---|---|--|--|---|--|--|--|--|
| Précipitations P. an. moy. (mm) P."var. décennale P. 2mois Maxi. (mm) Période la +humide P.mois le + humide P.mois le + sec P.journ. Fréq.lan | 2150 1600-2700 600-700 15/5aul 5/7 700 31 135 230 92 120 | 2100 ~ mai-juil. 650 30 - - - ~ ~ | 1750 1400-2100 450-1100 mai-juil. 302 18 78 120 70 80 | 1450 1050-1850 300-1100 mai-juil. 307 27 76 117 65 80 825 | 1200 900-1500 260-600 septOct. 180 15 71 113 60 80 512 | 1350 1000-1700 450-700 août-sept. 318 6 76 119 65 82 676 | 830 650-1050 280- 600 juilaoût 250 0 62 107 56 78 | 860 660-1060 280- 600 juilaoût 264 0 64 107 56 78 |
| Température (Moyen ann. °C (Mens.moy. °C | 26.2 24.4 à 27.6 | id " | 26.2 24.1 a 27.4 | 26 24.5 à 27.4 | 26.1 24.2 à 27.8 | 27.1 25.5 à 29.7 | 28 25 à 32.0 | 28.1 25 à 32.2 |
| Humidité air saison sèche % " pluie % | 50 - 90 70 - 100 | id. | 50 - 90 70 - 100 | id - | 40-80(60) 70-100(80) | 25 ~ 50 75 ~ 90 | 10 à 60 60 - 95 | 10 à 60 60 à 95 |
| Insolation annuel.(heures) var.mens. " | 1750 75 à 195 | id - | id - | id - | 1850 75 à 205 | 2780 . 152 à 281 | 3200 180 à 280 | 2900 180 à 280 |
| ETP .annuel moyen(mm) .journ.moyen. " | 1250 2.6 à 4.2 | 1300 2.6 à 4.2 | 1314 2.5 à 4.2 | 1280 2.6 à 4.1 | 1300 2.5 à 4.5 | 1660 3.4 à 5.6 | 1885 3.4 à 6.6 | 1905 3.7 à 7 |
| Durée saison sèche P < ETP (mois) | 3 | id. | 4 | 4 | 5 | 7 | 8.5 | 8.5 |

Au Nord de la séquence, les stations de Gonse et Saria connaissent un climat tropical pur (presque sud sahélien : RODIER, 1964) plus continental, plus sec et plus contrasté; 800 millimètres de pluie tombent en quatre mois consécutifs. Les températures maximales dépassent largement 42° C en saison sèche, tandis que l'humidité de l'air descend à moins de 10%.

Le régime climatique de Korhogo est intermédiaire (tropical de transition selon RODIER, 1964). Les pluies sont assez abondantes, mais concentrées en une seule saison (environ 6 mois); les températures sont presque aussi contrastées qu'à Gonse et l'ETP peut atteindre 1700mm. L'air peut être très sec en particulier lorsque souffle le vent du désert (Harmattan) de décembre à fin mars.

Si on étudie plus en détail les données climatiques (tableau 1-2) on observe que non seulement les précipitations annuelles moyennes diminuent du Sud au Nord de la séquence, mais aussi l'écart entre les précipitations annuelles de fréquence décennale (var. = 1100mm à Adiopodoumé, 700 à Bouaké et Korhogo, 400mm à Gonse). De même, les précipitations des deux mois consécutifs les plus humides sont très élevées près d'Abidjan (600 à 1700mm) et nettement moins à partir de Bouaké (280 à 600mm) : ces caractéristiques ont une importance capitale sur la dynamique des sols, car une fois le sol réhumidifié l'excédent de pluie par rapport à l'ETP doit forcément drainer ou ruisseler.

En bordure de mer, la hauteur de l'averse de fréquence annuelle ou décennale, et les intensités correspondantes, sont nettement plus élevées qu'ailleurs. Mais, d'Azaguié à Ouagadougou, les hauteurs et les intensités des averses journalières diminuent à peine, beaucoup moins vite que les précipitations annuelles moyennes (BRUNET-MORET, 1963-67). On peut donc prévoir dans la partie la plus sèche de notre séquence des averses journalières aussi élevées qu'à Abidjan, mais avec des fréquences nettement plus faibles : le climat tropical serait ainsi moins érosif que le climat équatorial. C'est bien d'ailleurs ce qu'on peut également conclure de la carte de répartition de l'indice d'agressivité RUSA

Note: Nous avons gardé les unités anglaises dans lesquelles l'auteur de l'équation a publié ses résultats, pour pouvoir les comparer directement aux nôtres, mais de simples coefficients permettent de passer aux unités décimales: R métrique = 1,735 RUSA

K métrique = 1,292 Kusa

an Afrique occidentale (Fig. 3.5.).

Rappelons brièvement que cet indice a été défini par WISCHMEIER et SMITH (1960) comme étant la somme des produits de l'énergie cinétique des pluies unitaires, par leur intensité maximale en 30 minutes (R_{usa} = $\sum_{EI_{30}}$) Dans la grande plaine américaine, cet indice d'agressivité varie de 50 à 600 pied-tonne/acre.pouce/heure en fonction des précipitations annuelles. Dans la séquence bioclimatique étudiée, il varie de 400 à 1200 : ainsi, l'agressivité des pluies est très élevée et ce, d'autant plus, que les précipitations annuelles moyennes sont importantes.

Il est encore utile de noter que les températures mensuelles, la durée de l'insolation (1800 à 3000 heures/an) et l'ETP annuelle n'augmentent significativement qu'à partir de Korhogo : dans la zone subéquatoriale, l'ETP est limitée, surtout en saison des pluies par une faible durée d'insolation.

L'évapotranspiration potentielle est un concept qui présente un intérêt écologique certain, puisqu'il intègre toute une série de données climato-logiques intéressant la croissance des plantes; d'un autre côté, il nous aidera à calculer les possibilités de drainage à travers le sol.

La séquence bioclimatique étudiée comprend donc deux pôles principaux et deux intermédiaires :

- la zone subéquatoriale très arrosée, humide, relativement peu ensoleillée et à ETP limitée en saison des pluies, à température moyenne et constante;
- la zone tropicale à une seule saison des pluies, beaucoup plus sèche et contrastée, plus chaude, plus ensoleillée et à forte ETP toute l'année.

Les deux sites de transition sont, d'une part Bouaké qui connaît deux saisons des pluies mais qui est peu arrosée et, d'autre part, celle de Korhogo où les pluies sont relativement abondantes et groupées en quelques mois.

1.3 Le couvert végétal

A la diversité climatique répond la diversité du couvert végétal naturel. Quatre stations sont situées en zone de forêt dense humide et les quatre autres en savane. Mais, sous ces appellations globales se cachent de nombreuses nuances.

Que ce soit à Adiopodoumé, Anguédédou ou Azaguié, la forêt sempervirente couvre le sol toute l'année; des arbres se dépouillent de leurs feuilles à toutes les saisons et c'est à peine si la chute de litière accuse un maximum en fin de saison sèche. A Divo, par contre, la forêt semi-décidue possède de nombreuses espèces qui perdent toutes leurs feuilles en saison sèche, ce qui leur permet de mieux équilibrer leur bilan hydrique : il s'agit d'une forêt mésophile à Celtis et Triplochiton scleroxylon (GUILLAUMET, 1967).

On peut aussi distinguer les forêts hygrophiles selon la nature du substrat et la présence d'espèces caractéristiques. Ainsi, sur les matériaux sablo-argileux du bassin sédimentaire pousse une forêt psammo-hygrophile à *Thurreanthus africana*laquelle est enrichie en fromagers et palmiers à huile en bordure de la lagune (Adiopodoumé) (AUBREVILLE, 1938). A Azaguié, c'est une forêt pélohygrophile à *Diospyros* et *Mapania* qui s'individualise sur les sols à texture fine issus des schistes birrimiens (MANGENOT, 1955).

En réalité, les forêts accessibles sont pratiquement toutes secondarisées par suite d'une exploitation plus ou moins ancienne des essences précieuses (Divo), de la collecte du sous bois pour pailler les bananeraies voisines (Azaguié) ou des perches et du bois de chauffe pour les villages environnants (Adiopodoumé). Malgré cette emprise de l'homme sur la forêt, celle-ci reste impressionnante par sa hauteur (fûts de 20 à 40 mètres), sa densité (3 étages) et la diversité des espèces qui la compose. Cette secondarisation du couvert forestier ne devrait pas entraîner de modification notable sur les processus que nous avons mesurés.

Les savanes sont peut-être encore plus variées que les forêts: le pâturage extensif, le feu et la culture itinérante les ont dégradées de façon très diverse. Protégée des feux, la savane guinéenne de Bouaké est une savane densément arborée à Panicum maximum et diverses lianes évoluant progressivement vers la forêt mésophile à Celtis; les arbres les plus représentatifs sont le Daniellia olivieri, Lophira lanceolata, Terminalia glaucescens, Isoberlinia doka, Hymenocardia acida, etc... (GUILLAUMET et ADJANAHOUN, 1969). En 1966, la parcelle étudiée était couverte d'arbustes rabougris par le passage annuel des feux, de grandes

herbes (Andropogon, Hyparrhenia, Pennisetum, etc...): il s'agit probablement d'une vieille jachère abandonnée au pâturage extensif depuis plus de dix ans. Depuis l'isolement du bloc au milieu des champs en 1968 et sa protection intégrale, les arbustes ont pris un tel développement en hauteur et en densité qu'ils ont presque éliminé les graminées (voir relevés ROOSE, BERTRAND, 1972)

A Korhogo, la savane soudanaise typique comprend encore des arbres de haute taille (Daniellia olivieri, Butyrospermum parkii, Parkia biglobosa, Isoberlinia doka, Parinari curatellifolia, Adansonia digitata), des arbustes et de hautes herbes. Cependant, dans la zone densément peuplée, la flore a été profondément modifiée par le pâturage, le feu, la culture itinérante, le défrichement sélectif au point de ne laisser qu'une savane arbustive principalement constituée d'arbustes pyrophilles, d'arbres protégés (karité-Nere-baobab) et de diverses espèces introduites (manguier, anacardier, teck, Cassia siamea) (photos 4,5,6 et 16,17).

Sur le plateau Mossi, la savane soudano-sahélienne a été modifiée dans le même sens par l'homme, mais la présence d'épineux (Ziziphus, Acacias, etc...) rappelle l'influence sahélienne très nette à partir du douzième parallèle. A Gonse, la savane parsemée d'arbustes et d'arbres à troncs courts est, en principe, protégée, mais les troupeaux sont autorisés à y passer pour rejoindre un point d'eau; pour éviter des incendies catastrophiques, on y organise des feux précoces, un mois après la fin de la saison des pluies. Sur la parcelle, le pâturage a été supprimé et les feux précoces contrôlés les deux premières années, puis supprimés pendant deux ans. En deux ans la végétation a connu un développement étonnant (fort développement simultané des herbes et des arbustes, apparition d'espèces nouvelles) au point qu'il était devenu difficile d'y pénétrer. Les trois dernières années d'expérimentation, nous avons pu constater les effets néfastes des feux tardifs sur le couvert végétal (destruction des arbustes et des souches d'herbes) et sur la conservation de l'eau et du sol (photo 9).

A Saria, l'une des parcelles est une vieille jachère pâturée, mais protégée des feux depuis plus de trente ans : elle présente l'aspect typique dans la zone dense du plateau Mossi des savanes à hautes herbes piquetées tous les cinquante mêtres de grands arbres utiles (karité - néré - raisinier etc...) (voir photo 7).

L'autre parcelle est une jeune jachère herbacée après une culture de mil ensilée en août 1970 : elle a été couverte à plus de 90% par les hautes herbes en dix huit mois (voir photo 8).

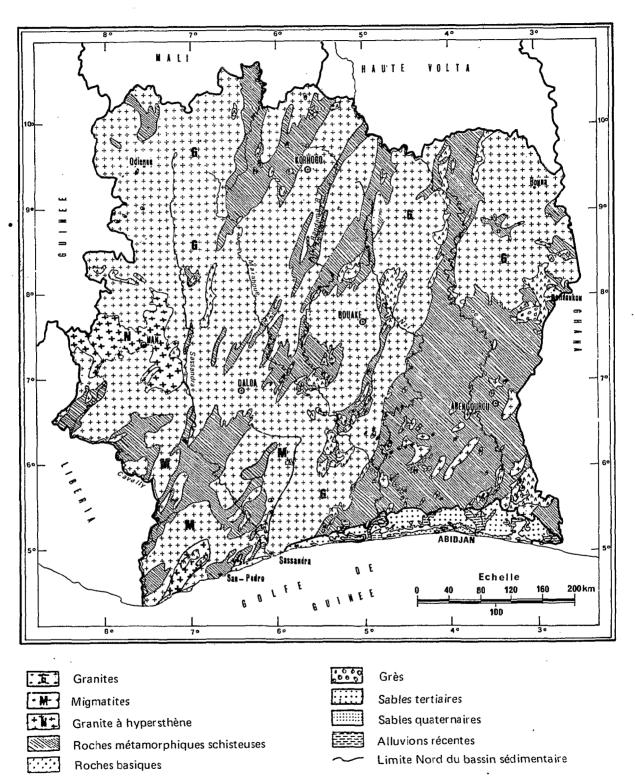
Quant aux cultures expérimentées, elles sont très diversifiées en fonction du climat; en plus de la parcelle nue de référence et d'une céréale (mais ou sorgho fertilisé) étudiées sur les stations principales (Adiopodoumé, Bouaké, Korhogo, Saria), des cultures industrielles très courantes qui occupent le terrain pendant 15 à 30 ans, ont été testées en zone forestière (plantation d'hévéa à Anguédedou, bananeraie à Azaguié, cacaoyère à Divo)

1.4 Les roches

En Afrique occidentale, de vastes étendues du bouclier précambrien recouvrent les altérations de divers types de granite. C'est pourquoi nous avons choisi de placer la plupart de nos stations d'observation sur granite (fig.1.2). Il s'agit de granites éburnéens plus ou moins orientés, jadis appelés granite baoulé ou granito-gneiss à deux micas. Sous cette appellation unique se cache une forte hétérogénéité de texture et de structure : la taille des grains et la proportion de minéraux noirs varient largement. De plus, ces massifs granitiques sont traversés de nombreux filons de pegmatite (à Bouaké), d'aplite ou de quartz (à Korhogo).

En basse Côte d'Ivoire, nous avons eu l'occasion de sonder l'influence de diverses roches mères sur les phénomènes observés. Ainsi, la
plupart des dispositifs ont été testés à Adiopodoumé (et dans la plantation d'hévéa de l'IRCA à Anguédedou) sur des matériaux argilo-sableux
du bassin sédimentaire tertiaire, ainsi qu'à Azaguié (station IRFA et forêt
du Téké voisine) sur des schistes chloriteux birrimiens traversés de
nombreux filons de quartz.

Cependant, l'altération profonde de ces roches soumises à des



Dressée par A. Perraud et P. de la Souchère d'après la carte géologique à 1 : 1 000 000 (Bagarre et Tagini)

Fig. 1.2 - Carte des roches mères de Côte d'Ivoire (<u>In</u> "Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire", <u>Mém. ORSTOM</u> n° 50)

climats chauds et humides pendant de très longues périodes, a donné naissance à un matériau très monotone sur le plan minéralogique : il est constitué essentiellement de quartz résiduel, de kaolinite et de goethite, et, secondairement, de divers oxydes et hydroxydes, de quelques minéraux lourds plus ou moins altérés et de traces d'illites ou de micas hydratés. La richesse chimique de ce matériau originel soumis à la pédogénèse actuelle est très faible dans tous les cas. Par contre, la texture des sols révèle assez bien la roche dont le matériau est issu; sur schiste la teneur en argile et limons est nettement plus élevée que sur granite ou sédiments tertiaires. De même, les filons de quartz restent observables jusqu'au sommet des horizons d'argile bariolée et donnent naissance à des nappes graveleuses qui suivent à peu près la topographie de la surface du sol.

1.5 Les paysages

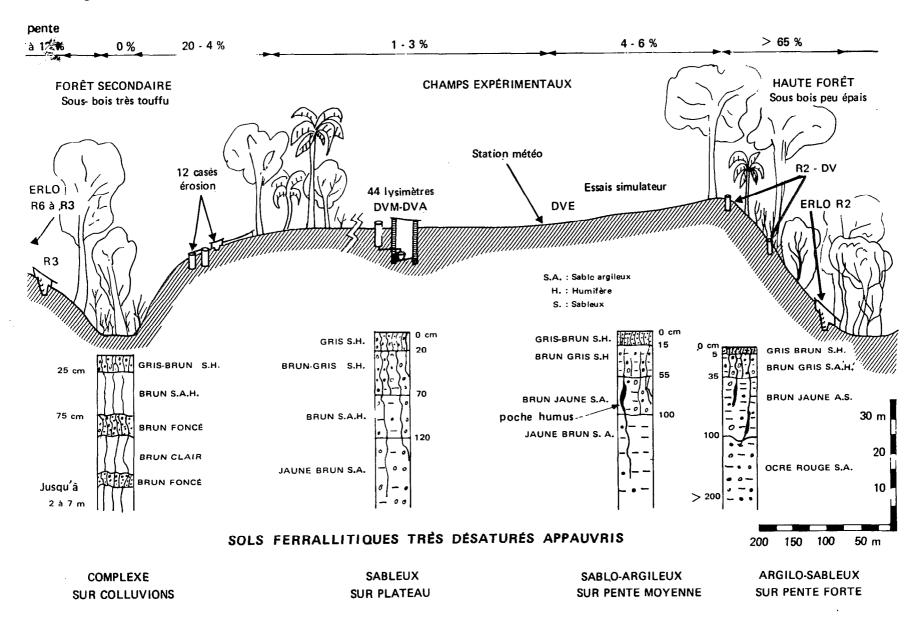
Les formes du modelé peuvent être très diverses en fonction des roches et du climat : depuis la pénéplaine légèrement inclinée vers l'océan, mais profondément entaillée par les vallées actives ou mortes, sur les sédiments tertiaires (côtes à rias : Adiopodoumé, Anguédedou), les reliefs très découpés en lanières à pentes raides et convexe-concaves sur schiste (Azaguié), les larges croupes à sommets vaguement aplanis et pentes assez douces convexe-concaves sur granite (Divo, Bouaké, Saria), jusqu'aux plateaux tabulaires cuirassés reliés par de longs glacis concaves souvent gravillonnaires (Korhogo et Gonse) des régions tropicales sèches (ROUGERIE, 1960; AVENARD, 1971).

Il apparaît au tableau 1.1. que les pentes diminuent du Sud au Nord, tandis que le versant s'allonge (quelques dizaines à plusieurs milliers de mètres). En région forestière, il n'est pas rare d'observer des pentes de plus de 10 à 20%.

Dans les régions de savanes guinéennes et soudanaises (en dehors des inselbergs), les pentes les plus répandues sont voisines de 3 à 5%, mais sur le plateau Mossi, d'énormes étendues ont moins de 2% de pente.

Si, à la forme du relief, on ajoute la diversité des couvertures végétales, des roches et des sols, on conçoit la diversité des situations étudiées.

Fig. 1.3. - Schéma de la toposéquence d'Adiopodoumé et répartition des dispositifs.



2 – LES SOLS SITUÉS DANS LEUR TOPOSÉQUENCE

Les profils pédologiques caractérisant les parcelles sur lesquelles eurent lieu les expérimentations, la place de ces profils dans la toposéquence ainsi que leur environnement (végétation, pentes, longueur et formes des versants) ont été représentés sur huit figures schématiques (Fig. 1-3 à 1-10). Les caractères importants de ces profils sont passés brièvement en revue, tandis que leur description détaillée et les résultats analytiques sont présentés sous forme de tableaux. Il serait trop fastidieux de parcourir la description de chaque profil étudié sur chacune des huit toposéquences; nous indiquerons au lecteur où trouver l'ensemble des observations et analyses dans les rapports de synthèse régionale ou dans d'autres publications.

2.1. Adiopodoumé

Les dispositifs sont dispersés sur un plateau en pente douce (lysimètres), deux versants convexes (cases d'érosion et ERLO R3) et une côte de pente très raide (lysimètres et ERLO R2) menant à une vallée sèche et un bras de la lagune EBRIE (fig.1-3). Ce paysage rappelle les côtes à rias et porte les traces des variations du niveau de l'océan depuis le mio-pliocène (plus 6 à moins 60mètres d'après LE BOURDIEC, 1958).

A part les fonds de vallée colmatés par une succession de couches sableuses plus ou moins humifères (quelquefois sur plus de sept mètres), les autres profils sont semblables à celui du bas de la parcelle ERLO "R2" (voir la liste des dispositifs) : ils n'en diffèrent que par l'épaisseur des horizons sableux-humifères et leur teneur en colloïdes (argile et matières organiques).

Profil de la parcelle "R2"

La description et les résultats analytiques sont consignés dans les tableaux 1.3 a et b.

Ce profil est situé au bas d'un versant très raide (pente > 65%) juste au-dessus du contact avec les sols colluviaux très sableux qui recouvrent la vallée. La parcelle est couverte d'une vieille forêt secondaire assez dense comportant au moins trois étages de végétation (arbres dominants, arbres dominés et arbustes plus lianes). La surface du sol présente une succession de plages couvertes d'une mince litière de feuilles mortes ou de végétation basse et de plages dénudées où apparaît en relief le réseau racinaire s'agrippant au sol : des micro-falaises burinées par les grosses gouttes de pluie et par le ruissellement alternent avec des replats (ROUGERIE, 1960). La couverture du sol par la litière et la végétation basse, mesurée par la méthode des points quadrats (mille points par station), diminue lorsque la pente augmente : elle décroît de 98% à 83% sur des pentes de 3 à 65% en novembre 1976 en dehors de la période de chute maximale des feuilles.

Les points essentiels à retenir de la lecture de la description et des résultats analytiques sont les suivants :

- Bonne porosité sur une grande profondeur et homogénéité du profil permettant un enracinement dont on trouve encore des traces au-delà de cinq mètres;
- Richesse chimique médiocre, étroitement dépendante des matières organiques (mull forestier tropical: PERRAUD, (1971), contenant une majorité d'acides fulviques dès la surface; si les teneurs en matières organiques sont relativement élevées en surface (6%) elles décroissent rapidement en profondeur (1% vers 50cm) ainsi qu'après mise en culture (ROOSE, 1973);
- Capacité d'échange de cations très faible de même que le taux de saturation (8 à 4% dès 20cm), si bien que le pH est très acide (4,2 à 5);
- Excellente perméabilité d'ensemble, sauf en surface, où il se forme rapidement une pellicule de battance lorsque le sol dénudé est soumis à la battance des pluies, et dans l'horizon jaune-rouge profond de plus d'un mètre où la macroporosité est réduite;
- Augmentation progressive du taux d'argile granulométrique (moins de deux microns) de 10-15% en surface à 25-30% vers 0.5 à 2 mètres sans

que se dessine nettement de "ventre textural" comme dans les sols lessivés classiques;

- Présence de graviers de quartz et de grès ferruginisés ainsi que de charbon de bois jusqu'à la base de l'horizon brun-jaune (vers un mètre); cela semble indiquer que le sol a été profondément remanié. Pourtant, le rapport sable fin/sable grossier reste constant (52 à 59%) jusqu'au matériau jaune-rouge (à part le mince horizon humifère remanié par la faune et l'érosion sélective).

Ce profil a été classé parmi les sols ferrallitiques très désaturés appauvris modaux sur sédiments tertiaires sablo-argileux, facies tronqué sur fortes pentes (Note 1) malgré un rapport ${\rm SiO}_2$ / ${\rm Al}_2{\rm O}_3$ anormalement élevé (AUBERT et SEGALEN, 1966).

Note: Des renseignements complémentaires sur les profils R3 et case d'érosion peuvent être trouvés dans le rapport de synthèse d'Adio-podoumé (ROOSE, 1979), dans la thèse sur l'érosion (ROOSE, 1973 et 1977) et sur les sols cartographiés sur les sables III dans l'article ROOSE, CHEROUX (1966) et dans "Le milieu naturel de Côte d'Ivoire" PERRAUD (1971).

Tableau 1.3a: RESULTATS D'ANALYSE DU PROFIL DE SOL DE LA CASE ERLO R2
- ADIOPODOUME -

| | | · | · | | · | | | · |
|---|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| HORIZON | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| PROFONDEUR (mini cm (maxí cm | | o/ ₅ | 20/30 | 40/ ₅₀ | 90/100 | 140/150 | 190/200 | 240/250 |
| GRANULOMETRIE | | | | | | | | |
| Argile Limon fin Limon grossier | z z | 12.3 | 17.3 2.6 3.9 | 23.1 2.7 3.6 | 28.6 2.9 4.1 | 24.8 3.8 5.9 | 19.0 3.1 2.2 | 15.5 1.1 3.0 |
| Sable fin Sable grossier | z z | 24.1 58.8 | 26.7 48.0 | 24.1 46.2 | 24.1 40.8 | 24.5 41.2 | 27.0 47.4 | 24.1 56.2 |
| Refus SF/SG | <u>z</u> | 41 | 56 | 52 | 59 | 59 | 57 | 43 |
| MATIERES ORGANIQUES | •/•• | | | | | | | |
| Carbone Azote | */•• •/•• | 36.34 2.60 13.9 | 7.28 | 5.36 0.64 | 5.56 0.50 | 5.20 0.28 | 5.15 0.28 | 5.05 0.28 |
| C/N Acides Humiques Acides Fulviques | •/ | 1.90 | 10.7 0.63 1.63 | 8.3 0.38 1.54 | 7.2 | | | |
| Taux Carbone humifié AF/AH | */•• \$ | 10.6 | 31.0 | 35.8 | | | | |
| CATIONS ECHANGEABLES | 3 | | | | | | | |
| Ca Mg | mé/100g. mé/100g. | | 0.16 | 0.06 | 0.08 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.15 |
| K Na | mé/100g. mé/100g. | 0.17 | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| C.E.C. Saturation | mé/100g. | 14.71 71.5 | 4.68 7.6 | 4.70 4.5 | 3.25 4.6 | 3.17 3.1 | 2.39 3.7 | 3.18 6.9 |
| pH eau 1/2,5 | - | 4.2 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.5 | 4.5 | 4.5 |
| ELEMENTS TOTAUX (att | aque triació | 1 | | | | | | |
| Perte au feu Résidus insolubles | Z Z | 8.60 79.80 5.70 | 3.65 79.80 9.90 | 4.50 76.10 10.30 | | 4.55 70.20 12.0 | 3.25 77.80 9.60 | |
| sio ₂ A1 ₂ 0 ₃ | Z Z | 3.58 | 5.41 | 7.04 | | 8.92 | 4.11 | |
| Fe ₂ 0 ₃ total | Z Z | 1.85 | 2.55 | 3.65 | | 3.05 | 6.25 | |
| TiO ₂ | 2 | 0.43 1.839 | 0.57 | 0.63 | 1.34 | 0.64 | 0.50 | 1 07 |
| 2 3 Olsen | z. z. | 0.10 | 1.60 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 1.07 0.03 | 1.07 |
| Ca Mg K | mé/100g. mé/100g. | 8.90 4.50 0.55 | 11.0 0.01 0.35 | 0.60 0.20 0.42 | 7.70 2.28 00.54 | 1.60 2.00 0.26 | 0.70 0.30 0.20 | 1.88 1.20 0.30 |
| Na Sio ₂ / Al ₂ o ₃ | ше́/100g. mе́/100g. | 0.70 | 0.60 | 0.48 | 0.62 - | 0.46 | 0.44 | 0.65 |
| CARACTERES PHYSIQUES | | | | | | | | |
| pF 2.5 2.7 | z Z | 14.20 13.58 | 10.83 9.77 | 11.56 10.71 | 14.47 13.83 | 14.82 14.38 | 15.31 10.61 | 11.37 8.62 |
| 3 4,2 | Î Z | 13.24 11.70 | 9.50 6.53 | 10.49 8.13 | 12.14 10.63 | 13.10 10.13 | 9.93 7.44 | 7.36 5.77 |
| Instabilité Struct. 1 Indice Perméabilité Densité apparente | | 0.19 60.21 | 0.95 4.76 | 2.65 1.69 | 3.76 0.91 | 3.91 1.20 | 3.31 1.81 | 3.07 1.10 |
| réelle Porosité totale macro | 7. 7 | | | | | | | |
| micro | ž | | | | | | | |
| | | | | | | | | İ |

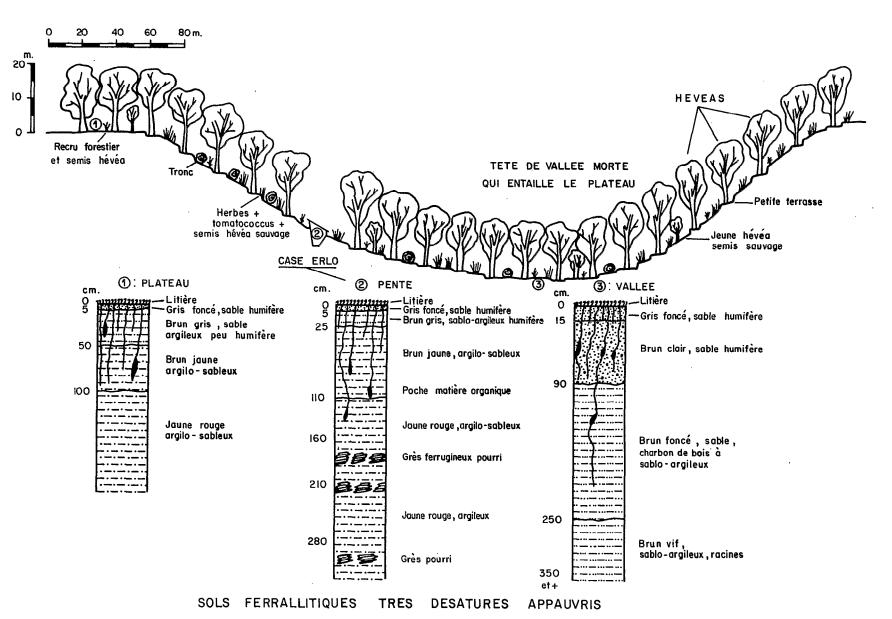
Tableau 1.3b : Description du profil R2 : Adiopodoumé, versant raide dans la réserve intégrale de la presqu'île.

Profondeur Description des horizons

- O 5cm Gris brun (10YR, 4/2 en humide), humifère, sable grossier à structure particulaire avec quelques agrégats associés au chevelu radiculaire très abondant, qui donne un peu de cohésion à l'horizon, très poreux, très perméable, mais vite desséché. Grains de quartz blanchis et peu liés à la matière colloidale. Forte activité biologique au contact de la litière Transition nette.
- 5 35cm Brun gris (10YR, 4/4), encore humifère, sablo-argileux et déjà plus cohérent. Structure fondue à débit polyédrique moyen faiblement développé. Grains de quartz couverts d'une pellicule ferrugineuse. Horizon poreux, perméable et colonisé par des racines plus épaisses et verticales. Charbons de bois, graviers de quartz ferruginisés arrondis et de grès ferrugineux. Transition progressive.
- 35 100cm Brun jaune (7,5YR, 5/6) argilo-sableux (quelques cutanes vers 45cm). Structure fondue à débit polyédrique plus grossier et encore moins développé. Poches brun foncé, plus sableuses, de pénétration des matières organiques; graviers de quartz ferruginisés arrondis. Horizon presque toujours frais, encore très perméable, assez poreux, mais plus compact et collant aux instruments; racines moins fréquentes et localisées dans les fissures, trous de rats et poches humifères. A la base de l'horizon, quelques taches jaune-clair peu marquées et traînée de quartz arrondi.

 Transition assez nette (couleur et consistance).

Jaune-rouge (5YR, 4/8), sablo-argileux, plus riche en sables grossiers (pseudo-particules), structure fondue à débit polyédrique grossier. Plus compact, moins poreux (37% vers un mètre à 27% vers deux mètres). Quelques grosses racines d'ancrage plongeant dans ce matériau qui durcit en se desséchant. Quelques taches jaunes ou rouges peu différenciées et quelques fissures recouvertes de revêtements beiges (pas retrouvées en lame mince) qui remontent presque jusqu'en surface. Passage au matériau originel.



1 et 2 : Argilo-sableux sur paysage à pente forte (30%)

3 : Complexe / colluvions sableuses

2.2. Anguédedou

La description du profil et les résultats analytiques sont présentés aux tableaux 1.4a et 1.4b.

Le dispositif ERLO est situé aux deux tiers d'un versant concave assez raide (29%) reliant le plateau à l'extrémité d'une vallée sèche; celle-ci forme une sorte de cirque creusé quarante mètres plus bas que le plateau (fig. 1.4).

La plantation d'hévéa choisie pour l'expérience (Bloc 3-3 des jardins grainiers de l'IRCA) a été aménagée dans l'ancienne forêt classée de l'Anguédedou.

Après un défrichement manuel et un brûlage léger, les lignes de plantation ont été piquetées le long des courbes de niveau et les gros troncs non consumés ont été andainés entre les lignes. Les jeunes plants greffés ont été repiqués (27-10-65) sur de petites terrasses aménagées à la houe de part et d'autre des lignes de plantation.

Les profils caractéristiques de la toposéquence sont très semblables à ceux décrits à Adiopodoumé (ROOSE, 1979) et aux sols des paysages à forte pente, définis lors de la cartographie régionale (ROOSE et CHEROUX, 1966).

Les caractéristiques physiques (horizons superficiels appauvris en argile sur 50 à 75cm, profils homogènes poreux et perméables) et les propriétés chimiques (altération très poussée, grande pauvreté en éléments assimilables et forte acidité) sont très proches de celles des profils d'Adiopodoumé à part une teneur un peu plus élevée en argile et en fer ainsi que la présence de bancs de grès ferrugineux altérés vers 160/210 et 280cm.

D'après la classification française (AUBERT et SEGALEN, 1966) il s'agit d'un sol ferrallitique très désaturé appauvri modal sur sédiments argilo-sableux et gréseux tertiaires.

Note: Des renseignements complémentaires sur les sols de la toposéquence sont disponibles dans le rapport de campagne 1966 (ROOSE, 1967) et surtout dans l'étude comparative des sols de cette toposéquence sous forêt et sous hévéa (TRAN THANH CANH,1972). Les sols cartographiés sur le bassin sédimentaire tertiaire sont traités dans un article (ROOSE, CHEROUX, 1966) et dans "Le milieu naturel de Côte d'Ivoire" (PERRAUD, 1971).

| HORIZONS | | | i | T | | , | | | | |
|--|---|---|--|--|---|---|---|---|---|---|
| PROFONDEURS (mini (cm) (maxi (cm) | | 0 5 (brûlé) | o 5 | 10 -20 | 50 60 | 80 90 | 130 150 | 170 190 | 2 30 250 | 280 290 |
| GRANULOMETRIE | | | | | | | | | | |
| Argile Limon fin Limon grossier Sable fin Sable grossier Refus SF/SG | 7 7 7 7 7 7 | 9.9 6.7 1.5 19.1 59.9 0 | 13.2 3.7 0.9 16 63.6 0 0.25 | 22 5.1 1.5 18.1 52.9 0 | 30.9 3.4 1.8 14.4 49.2 0 | 36 3.4 1.4 13.8 45.3 0 | 35.7 3 1.5 14 45.6 0 | 35.2 7.5 3 12.7 41.3 ? 0.31 | 32.2 10.7 4.3 10.8 41.8 ? | 35 7.1 3.9 11.5 42.4 ? |
| MATIERES ORGANIQUES | °/•• | 40.5 | 42.2 | 16.3 | 14.8 | 11.6 | 8 | 6.7 | 3 | 1.7 |
| Carbone Azote C/N Acides Humiques Acides fulviques | */•• */•• - */•• | 23.5 1.65 14.3 | 24.5 1.88 13.1 | 9.46 0.94 10.1 | 8.58 0.82 10.5 | 6.70 0.61 11 | 4.64 0.59 7.9 | 3.88 0.53 7.3 | 1.71 0.29 5.8 | 1 0.23 4.3 |
| * Taux carbone humifié | z | - | 13* | 37 | - | 35 | 31 | - | 25 | - |
| CATIONS ECHANGEABLES | | | | | | - | | | | |
| Ca Mg K Na C.E.C. Saturation pH eau 1/2,5 | mé/100g. mé/100g. mé/100g. mé/100g. mé/100g. z | 11.48 3.38 0.30 0.05 9.50 7.2 | 2.50 1.56 0.34 0.09 9.45 47 5.8 | 0.22 0.38 0.24 0.16 6.76 15 6 | 0.06 0.16 0.25 0.10 6.45 8.8 5 | 0.24 0.31 0.34 0.10 6.10 16.4 5.3 | 0.14 0.19 0.19 0.14 4.84 13.6 5.1 | 0.13 0.14 0.06 0.18 4.28 11.9 5.3 | 0.04 0.06 0.03 0.10 3.33 7 5.3 | 0.07 0.05 0.06 0.10 2.55 12.5 5.4 |
| ELEMENTS TOTAUX (attaqu | e triacide) | | | | | | | | | |
| Perte au feu Résidus insolubles SiO ₂ Al ₂ O ₃ | 7 7 7 | 111 | 77.8 6 5.4 | 70.1 9.4 8.9 | 57.2 13 13.1 | - - | 47.2 16.6 14.7 | 38.4 18.7 18.8 | 22.2 21.7 25.5 | - |
| Fe ₂ 0 ₃ total libre | z z | - | 3.5 | 4.95 - | 7.35 - | - | 10 | 13.5 | 19.5 | - |
| TiO ₂ P ₂₋₅ total Olsen Ca Mg K Na SiO ₂ / Al ₂ O ₃ | */** */** mé/100g. mé/100g. mé/100g. mé/100g. | 0.480 - 26.1 11.65 1.26 0.66 | 0.56 0.615 0.22 3.3 2.95 0.67 0.25 1.88 | 0.81 0.338 0.04 0.6 2.65 0.64 0.17 | 1.03 0.368 0.04 0.3 1.95 0.67 0.22 1.68 | 0.503 0.04 0.45 3.05 1.08 0.38 | 1.34 0.450 0.03 0.65 4.70 0.84 0.25 1.92 | 1.63 0.375 - 0.25 1.15 0.29 0.16 1.69 | 2.26 0.285 0.03 ⁺ 0.29 2.50 0.16 0.16 | - 0.270 - 0.15 3.75 0.12 1.02 |
| CARACTERES PHYSIQUES | | | | | | | | | | |
| pF - 2.5 - 2.7 - 3 - 4.2 Instabilité Struct. IS Indice perméabilité Densité apparente réelle Porosité totale macro micro | Z Z Z Z K cm/h | 12.13 10.93 9.43 8.08 1.56 7.8 1.10 2.60 57.9 40 17.9 | 11.18 10.38 9.22 8.71 1.11 16.6 1.10 2.60 57.9 40 17.9 | 13.1 12.2 10.5 8.2 2.87 3.1 1.52 2.60 41.4 20.6 20.8 | 15.2 14.4 13.4 10 2.59 2.9 1.50 2.73 45.2 20.5 24.7 | 16.1 15.0 14.3 11.6 2.84 2.1 1.45 2.69 45 19.2 25.8 | 15.9 15.4 14.3 11.4 2.55 5.6 1.45 2.75 45.3 14 31.3 | 17.9 17.6 16.7 13.5 2.68 5.2 1.56 2.82 43 11.5 31.5 | 21.1 20.9 18.7 16.8 2.79 3 1.56 2.82 43 10.3 32.7 | 20.9 20 18.8 16.5 2.70 5.6 - - |

^{* :} Données tirées de TRAN THANH CANH (1972); les autres de ROOSE (1967).

^{** :} Présence d'éléments solubles (feux).

Tableau 1.4a: Description du profil de la case ERLO à Anguédedou

Description des horizons **-** 5 Gris brun à gris noir si litière brûlée (10YR, 4/3 à 4/2), 0 humifère, sableux, structure particulaire avec quelques agrégats polyédriques associés au chevelu radiculaire très dense. Grains de quartz blanchis et nombreux charbons de bois. Horizon boulant, très poreux et très perméable. Transition nette (couleur, structure, texture). Brun gris de pénétration de l'humus (10YR, 5/4), sablo-argileux mais déjà collant aux instruments. Structure fondue à débit polyédrique moyen peu développé. Grains de quartz bien liés au fer et à l'argile. Nombreuses racines fines et moyennes à tendance horizontale. Charbons de bois petits et moins abondants; trous de rat de 4cm de diamètre. Horizon poreux un peu plus cohérent et compact. Transition progressive (couleur, texture). Brun jaune avec taches jaunes se multipliant vers le bas et 25 - 110traînées grises humifères plus sableuses (7,5YR, 5/6). Argilosableux, collant aux instruments. Structure fondue à débit polyédrique moyen peu développé; quelques fentes verticales à faces revêtues de cutanes beiges. Racines fines encore nombreuses, moyennes à dominante horizontale. Encore quelques charbons de bois (les derniers) et rares pénétrations humifères. Galerie de rat vers 40cm de profondeur, parallèle à la pente. Horizon très poreux, perméable mais assez compact. Transition progressive (couleur). Brun jaune rougeâtre (7,5YR, 5/6) à traînées rougeâtres et 110 - 160 quelques taches humifères au sommet, argilo-sableux. Structure fondue à débit polyédrique moyen à grossier peu développé. Horizon toujours frais, cohérent, collant aux instruments encore poreux. Nombreuses racines fines et moyennes à direction dominante horizontale. Fentes de retrait beiges et luisantes (cutanes). Transition nette (grès pourri). Jaune rouge (7,5YR, 6/6) à traînées rougeâtres, argileux avec 160 - 210des lignes de cailloux (diamètre < 5cm) de grès ferrugineux rouge rosé en voie de décomposition, cassables à la main; 180 grains de quartz brillants bien détachés de la masse ferrusondage gineuse; dissociation nette entre le sol et le grès déjà décoloré sur quelques millimètres. Structure fondue. Horizon humide, collant assez cohérent, encore poreux. Quelques racines. Transition nette (couleur et grès). Jaune rouge (7,5YR, 6/6) à traînées rougeâtres moins nombreu-210 - 280ses, argileux horizon compact tassé, plus sec, difficile à percer à la tarière.

Passée de cailloux de grès ferrugineux altérés jaune rouge.

vers 260

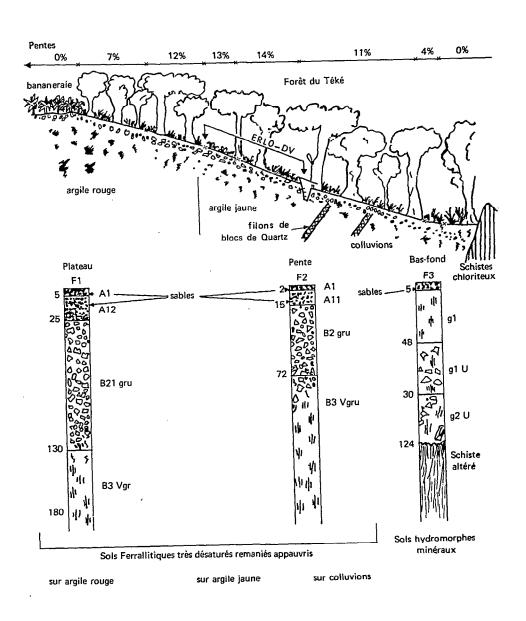


Fig. 1.5. - Schéma de la toposéquence de la forêt du Téké (Azaguié, basse Côte d'Ivoire).

2.3. Azaguié

Les dispositifs ont été placés au tiers inférieur des deux versants successifs de même orientation et même pente (14%); l'un appartient à la forêt classée du Téké et l'autre fait partie du carré "4" de la bananeraie irriguée de l'IRFA à Azaguié. Le paysage est vigoureusement ondulé et le réseau hydrographique beaucoup plus dense sur ces schistes que sur granite. Les sols sont classés ferrallitiques très désaturés remaniés (nappe de graviers) rouges au sommet des collines, jaunes sur les pentes et hydromorphes minéraux dans les bas fonds; la toposéquence est très courte. La parcelle de la bananeraie a été défrichée manuellement en 1951, débardée au tracteur, puis labourée manuellement au trident sur trente centimètres. Avant le début de nos essais, cette parcelle a vu se succéder une quinzaine de cycles de culture de bananiers (Poyo à une densité de 2000 plants/ha) comprenant des essais de paillage, de fumure et d'irrigation par aspersion.

Profil de la case ERLO sous forêt

La description et les résultats analytiques sont présentés aux tableaux 1.5a et b.

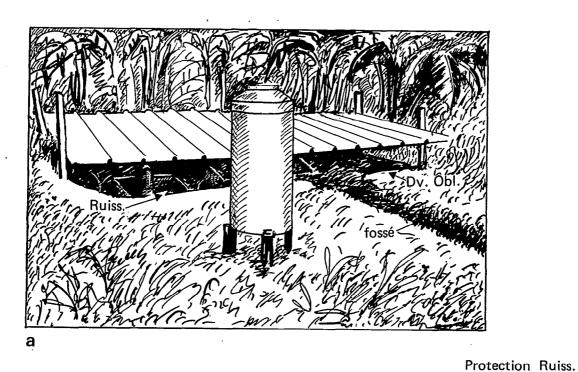
La parcelle est couverte d'une vieille forêt secondaire comportant au moins deux étages forestiers et un sous-bois au ras du sol très dense et assez régulièrement rabattu pour pailler les bananeraies voisines. Toute la surface du sol est couverte de litière, de sous-bois et de turricules de vers de terre très nombreux (20 à 50t/ha/an) (ROOSE, 1976). Mais, en dehors de la zone de fonte de ces turricules (sables jaunes délavés), on ne voit aucune trace d'érosion.

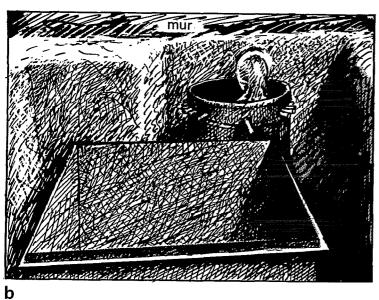
Les points essentiels à retenir de la description et des résultats analytiques sont les suivants :

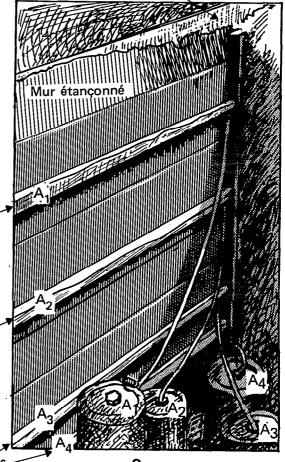
- altération très poussée, pauvreté chimique, faibles réserves en éléments assimilables et acidité élevée des horizons superficiels (pH = 4.5 à 5). Les valeurs très élevées (3 à 5) du rapport SiO₂/Al₂O₃ ne s'expliquent que par la présence de fragments de schistes altérés ferruginisés.

- Bonnes propriétés physiques (perméabilité, réserve hydrique, macroporosité) des horizons superficiels sous forêt mais diminution nette de la macroporosité dans la nappe de graviers (50cm) et l'horizon d'argile tachetée où on constate les traces d'engorgement temporaire (rareté des racines actives et individualisation poussée du fer).
- Appauvrissement en argile des horizons superficiels.
- Sous bananeraie, la macroporosité est très faible en dessous de l'horizon labouré: ceci est lié aux très nombreux passages des ouvriers chargés des multiples techniques culturales (fertilisation tous les mois, irrigation tous les dix jours en saison sèche et herbicides en saison des pluies).
 - Sous l'effet d'une fumure minérale abondante (N K Ca et Mg) et très fractionnée toute l'année, la fertilité chimique du sol s'est nettement améliorée par rapport à celle du sol de forêt.
- La succession des horizons est constante tout au long de la toposéquence mais la nappe de graviers est plus épaisse sur le sommet qu'en bas de pente et le niveau de terre fine s'épaissit dans la zone colluvionnaire.

Fig. 1.5b VUES DE LA CASE ERLO INSTALLEE DANS LA BANANERAIE DE L'IRFA A AZAGUIE







gouttières plastifiées -

C

Tableau 1.5a : FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL ERLO FORET DU TEKE

Paysage vigoureusement ondulé sur schistes chloriteux birrimiens

- 1967 -

| r | | 1 | | | | | | | , |
|---|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------------------------------|---------------|
| HORIZONS | | | } | | | | | | |
| PROFONDEURS (mini cm) | | 0 | 5 . | 30 | 90 | 160 | 180 | 240 | 280 |
| (maxi cm) | • | 5 | 30 | 75 | 140 | 170 | 200 | 260 | 320 |
| | | | | | | | | | |
| GRANULOMETRIE | | | | | . [| | , | | |
| Argile | 7. | 9.5 | 13.3 | 36.3 | 41.9 | 45.3 | 46.9 | 47.4 | 25.1 |
| Limon fin Limon grossier | z z | 4.1 | 6.7 10.5 | 9.2 · 8 | 13.2 | 18.4 | 19.3 | 25.9 | 29.4 |
| Sable fin | Z | 34.3 | 26.9 | 19.6 | 7.7 | 6.1 13.7 | 4 11.9 | 5.5 8.6 | 6.9 16.6 |
| Sable grossier Refus | 7 . 7 | 40.4 2 | 42.5 10 | 25.8 | 21.1 | 18.5 | 17.4 | 13.4 | 21.4 |
| SF/SG | - | 0.85 | 0.63 | 50 0.76 | 7 | 5 0.74 | 3 0.68 | 3 0.64 | 2 0.77 |
| | | | | | | | | | |
| MATIERES ORGANIQUES | °/ | 19.6 | 8.5 | 5.7 | | | | | |
| Carbone | °/ | 11.36 | 4.94 | 3.28 | ī | : | | | |
| Azote C/N | °/。。 - | 0.92 12.4 | 0.52 9.5 | 0.31 | | | | | |
| Acides humiques | - °/•° | 1.29 | 9.5 0.27 | 10.6 0.10 | | | | | |
| Acides fulviques | °/•• | 1.43 | 1.14 | 0.98 | | | | | |
| Taux carbone humifié | Z | 24 | 28 | 33 | | | | | |
| CATIONS ECHANGEABLES | | | | | | | | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | |
| Ca | mé/100g. | 0.58 | 0.12 | 0.11 | 0.20 | 0.07 | } | | |
| Mg K | mé/100g. mé/100g. | 0.50 | 0.18 | 0.21 | 0.30 0.03 | 0.40 0.03 | | | |
| Na | mé/100g. | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | | | |
| C.E.C. Saturation | mé/100g. | 4.80 | 3.40 | 4.49 | 5.76 | 7.29 | | | |
| pH eau 1/2,5 | 7 | 25 4.5 | 10 5 | 8 5 | 10 5.1 | 7.3 4.9 | 5.2 | 5.2 | |
| p. eau 1/2,5 | | ٠,٠ | ر | ر | | 4.9 | 3.2 | ٠.٤ | |
| ELEMENTS TOTAUX (attaqu | e triacide) | | | | | | | | |
| Perte au feu Résidus insolubles | Z Z | 2.15 | 2.50 | 5.45 | 7.25 | 8.05 | 9.20 | 8.75 | 6.70 |
| SiO. | ž | 85.9 8.6 | 81.10 10.9 | 58 20.5 | 40.20 26.1 | 31.30 29.6 | 23.60 31.50 | 25.10 34.90 | 41.70 27.2 |
| Al ₂ O ₃ | z | 2.44 | 3.98 | 8.51 | 11.93 | 14.91 | 17.59 | 18.64 | 12.7 |
| Fe ₂ 0 ₃ total | Z | 1.90 | 1.85 | 5.85 | 11.95 | 12.80 | 14.45 | 9.35 | 7.95 |
| linte | <u>z</u> . | 0.40 | | | | | 1 | ļ . | |
| TiO ₂ | ۸ ۰, | 0,43 | 0.47 | 0.63 | , 0.73 | 0.70 | 0.80 | 0.87 | 0.77 |
| P ₂ O ₅ total | °/ | 0.450 | | 0.85 0.02 | 0.69 | 0.65 | 0.09 | 0.50 | 0.08 |
| Ca | mé/100g. | 1.30 | 0.54 | 0.70 | 0.45 | 0.10 | 3.35 | 4.88 | 1 |
| Mg K | mé/100g. mé/100g. | 1.10 | 2.90 1.75 | 7.80 2.65 | 4.30 2.15 | 1.50 1.95 | 3.70 2.06 | 3.60 1.80 | |
| Na | mé/100g. | 0.72 | 0.68 | 0.68 | 0.70 | 0.60 | 1 | 0.65 | 1 |
| SiO ₂ / Al ₂ O ₃ | 7 | 5.99 | 4.66 | 4.1 | . 3.7 | 3.37 | 3.04 | 2 | |
| | | | | | | | | | |
| CARACTERES PHYSIQUES | | | | | ļ | | | | |
| pF - 2.2 - 2.5 | z z | 13.36 | 14.5 13.5 | 30.6 30.4 | 35.8 | 39.4 | 40.9 | 41.4 | 36.9 |
| - 3 | 7. | 8.04 | 11.4 | 27 | 32.9 31.9 | 38.8 37.1 | 40.6 | 40.9 40.6 | 35.8 34.8 |
| - 4.2 Instabilité Struct. IS | ₹ 0.49 | .5.53 0.49 | 6.1 | 14.8 | 20.6 | 23.1 | 23.6 | 22.7 | 22.5 |
| Indice perméabilité | K cm/h | 6.5 | 2.98 | 4.78 0.1 | 2.90 1.8 | 3.02 0.8 | 3.56 | 5 0.3 | 7.3 0.5 |
| Densité apparente | | 1.08 | 1.18 | 1.95 | 1.47 | 1.47 | | | |
| réelle* Porosité totale * | z | 2.59 58à61 | 2.63 37à55 | 2.67 27à38 | 2.75 46à48 | 2.75 46à48 | | | |
| macro* | z | 36à40 | 20à36 | 5à0 | 5à0 | 5ã0 | 1 | 1 | |
| micro# | 7 | 15 | 18 | 30 | 48 | 48 | | 1 | |
| · | | | <u> </u> | 1 | | L |] | 1 | J |

Données tirées de MOULO (1974).

Tableau 1.5b : Description du profil de la case ERLO sous forêt à Azaguié Paysage vigoureusement ondulé sur schistes chloriteux birrimiens - 1967

Profondeur Description des horizons

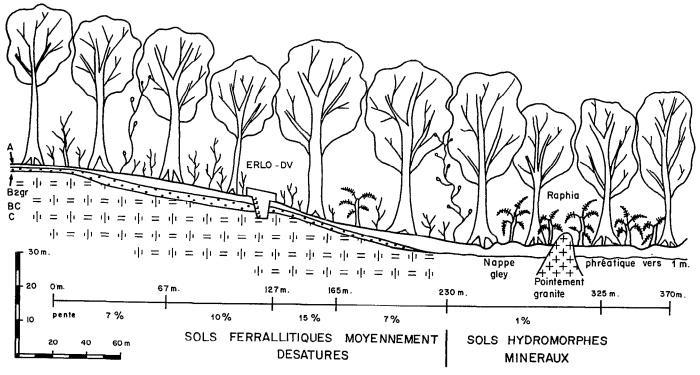
ന്ന

- 5 brun gris (10YR,5/2 en humide), humifère, riche en sables grossiers et fins peu liés aux colloïdes. Structure particulaire. Forte activité biologique (vers de terre) : horizon très poreux, très meuble et très perméable. Chevelu racinaire dense. Transition nette et ondulée.
- 30 Beige à jaune pâle (IOYR, 8/3) de pénétration humifère, sableux (fins et grossiers) à sablo-argileux. Structure massive à débit polyédrique moyen peu développé. Quelques graviers de quartz à arêtes émoussées (10%). Horizon friable encore très poreux (tubulaire), peu cohérent. Racines abondantes; activité biologique abondante, nombreuses galeries. Transition nette et ondulée.
- 30 80Brun jaune (10YR, 6/4) avec quelques taches rouilles à la base, quelques traînées de matières organiques. Nappe de graviers de quartz (refus = 50%) mal calibrés (0.5 à 15cm de diamètre). ferruginisés, à arêtes vives ou émoussées, emballés dans une matrice argilo-sableuse ocre. Structure polyédrique moyenne peu développée. Horizon peu poreux, peu friable, fort cohérent résistant à la pénétration des outils. Macroporosité très faible limitée à quelques tubulures tapissées d'un matériau beige argilo-limoneux et humifère. Seuls, quelques pivots entortillés arrivent à s'y frayer un chemin. A la base, quelques gravillons patinés couleur lie de vin et quelques concrétions ocres. Transition progressive et ondulée.
- Argile tachetée rouge sur fond ocre puis de plus en plus 80 à 320 blanchâtre et limoneux à partir de 150cm. Quelques gravillons et plus ferrugineux patinés et de nombreux amas concrétionnaires (litage du schiste ferruginisé reconnaissable) dans les trente premiers centimètres. Texture argilo-limoneuse. Structure polyédrique moyenne bien développée. Horizon assez cohérent; bonne microporosité, macroporosité réduite mais nombreuses canalicules (diamètre = 0.5 à 2cm) tapissées de matériau argilo-limoneux beige plus ou moins humifère par où pénètrent quelques rares racines fines

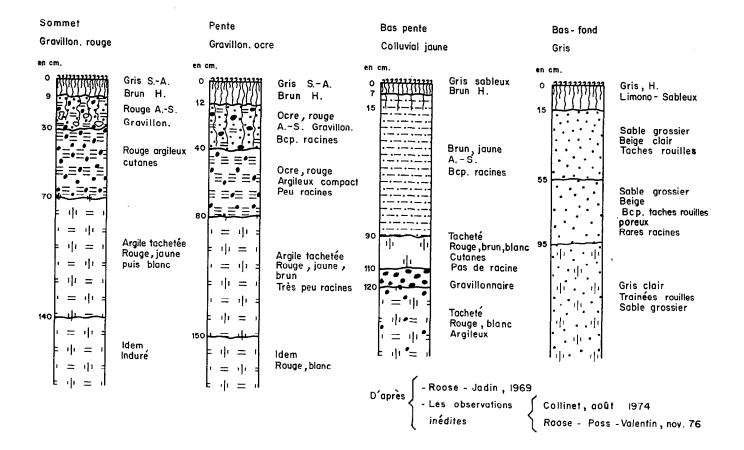
Quoique l'ensemble soit poreux en grand (canalicules) et parsemé de taches de pénétration des matières organiques, l'absence de racines et l'individualisation poussée du fer indiquent la présence d'un engorgement temporaire (15-30 jours/an) à partir de 50cm de profondeur et beaucoup plus long à partir de 150cm (taches blanches nombreuses). C'est probablement la raison du peu de racine qui parviennent à percer la nappe de graviers et à se développer dans l'argile tachetée.

D'après la classification française, il s'agit d'un sol ferrallitique très désaturé remanié appauvri sur schistes chloriteux à filons de quartz.

Des indications complémentaires sur les profils de la topo-Note: séquence peuvent être tirées de nombreux rapports (MONNIER, 1965; ROOSE et GODEFROY, 1967 à 1978 MOULO, 1974).



A. - S. Argilo - Sableux S. - A. Sablo - Argileux H. Humifère



2.4 Divo

Les dispositifs ont été placés à mi-pente d'une large croupe granitique à moins de cinq cents mètres du poste météorologique de la station IFCC à Brabodougou près de Divo.

La toposéquence schématisée à la figure 1.6, comprend, d'une part des sols ferrallitiques remaniés, rouges au sommet (0 à 4% de pente), ocres sur le versant (pente = 4 à 10%) et ocres jaunes sur la portion colluviale de bas de pente et, d'autre part des sols hydromorphes minéraux gris dans les bas fonds. La forêt est une vieille forêt secondaire dense humide semi-décidue à Celtis, remarquable par la hauteur de la voûte foliaire et par l'abondance du sous-bois : une mince litière couvre la surface du sol toute l'année. Une parcelle d'un hectare a été défrichée début 1971, légèrement brûlée et andainée manuellement avant la plantation d'une cacaoyère : le sol n'en a pratiquement pas souffert. De nombreux turricules témoignent de la forte activité des vers de terre.

'Profil de la case ERLO sous forêt avant défrichement

La description et les résultats analytiques sont présentés aux tableaux 1.6a et b.

Les points essentiels à retenir de la description et des résultats sont les suivants :

- Le profil est formé de la succession de trois horizons :
 - . un mince horizon humifère, riche, poreux, peu acide fortement colonisé par les racines,
 - une nappe de gravillons ferrugineux, perméable et exploitée par les racines,
 - . une épaisse couche d'argile tachetée à porosité fine, compacte, très argileuse à son sommet (50cm) et qui s'oppose à la péné-tration de l'eau et des racines en profondeur.
- Sur cinquante centimètres les racines disposent d'un milieu assez favorable : richesse chimique assez bonne, taux de saturation moyen, acidité faible, bonne porosité et réserve en eau moyenne. Les cacaoyers

autant que la forêt se développent bien.

- En-dessous, les horizons sont beaucoup plus compacts, moins poreux, à porosité fine et réserve hydrique satisfaisantes, mais à macroporosité et aération déficientes, richesse chimique faible aussi malgré quelques paillettes de micas qui témoignent d'une altération un peu moins poussée que dans les trois premières stations.
- Malgré la faible épaisseur du sol exploitable et la présence d'une nappe de gravillons ferrugineux abondants mais non tassés, les cacaoyers, autant que la grande forêt dense, se développent bien.
- Les quarante premiers centimètres sont légèrement appauvris
 (A + LF = 30 38%) par rapport à la nappe d'argile tachetée
 (A + LF = 58 à 52%).

Note: Renseignements complémentaires dans ROOSE et JADIN, 1969-1970

DABIN, 1956

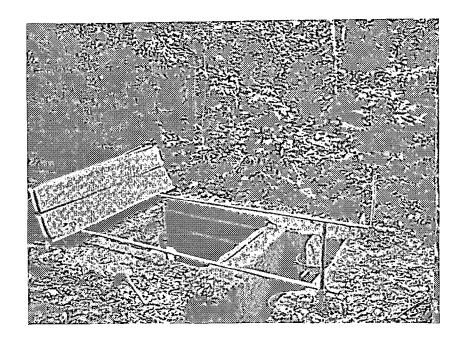


Photo 2 - Case ERLO de la station IFCC près de Divo (Centre Côte d'Ivoire)

Noter - la forêt semi-décidue très dense,

- le canal de ruissellement en fibres de verre et résine, moulé directement sur le sol,
- les gouttières réceptrices du drainage oblique reliées à des fûts en plastique de
- 60 litres, par des tuyaux de nylon,

 le manchon en plastique qui conduit calmement les eaux de ruissellement à un piège
 à sédiment et à un fût partiteur déversant 1/17 du débit dans un second fût de stockage (210 litres).

(Roose)

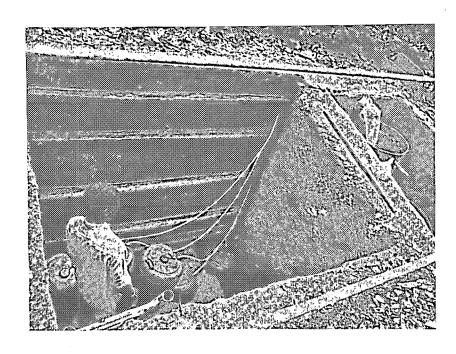


Tableau 1.6a : FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL DE LA CASE ERLO A LA STATION

IFCC de BRABODOUGOU PRES DE DIVO.

- 1967 -

| HORIZONS. PROFONDEURS (mini cm) (maxi cm) | | o 1 | 1 10 | 20 30 | 50 65 | 80 100 | 125 135 | 175 200 | 240 260 | 300 320 |
|---|---|---|---|---|---|---|--|---|--|--|
| GRANULOMETRIE Argile Limon fin Limon grossier Sable fin Sable grossier Refus SF/SG | Z Z Z Z Z | 24.5 5.3 1.4 12.3 53.7 0 | 26 3.7 1.4 13.2 52.4 4.4 | 34.7 3.4 1.3 9.4 50.1 53.3 | 50 8.4 1.9 11.3 26.9 6.9 | 43.5 8.4 1.4 11.1 34.1 6.9 | 40.9 12.4 2.3 12.2 28.2 | 33.3 15.1 1.6 10.7 36.6 | 44 22.1 0.8 9 21.1 | 32.3 25.3 0.9 12.1 25.9 |
| MATIERES ORGANIQUES Carbone Azote C/N Acides humiques Acides fulviques Taux carbone humifié | °/ °/ °/ °/ | 119.4 69.22 3.49 19.9 | 10.4 6.04 0.57 10.5 | 7.5 4.36 0.42 10.4 25.7 | | | | | | |
| CATIONS ECHANGEABLES Ca Mg K Na C.E.C. Saturation pH eau 1/2,5 | mé/100g. mé/100g. mé/100g. mé/100g. mé/100g. | 11.1 2.9 0.30 0.05 21.8 66 5.1 | 1.95 1.60 0.03 0.04 4.09 88 6.6 | 0.91 0.68 0.04 0.06 4.15 41 5.9 | 1.11 0.65 0.03 0.03 5.24 35 5.1 | 0.28 0.66 0.01 0.04 4.73 21 5.2 | 0.13 0.65 0.02 0.08 4.38 20 5.3 | 0.08 0.33 0.02 0.06 3.85 12 5.4 | 0-10 0-18 0-02 0-08 4-67 8 | 0.10 0.17 0.04 0.17 4.23 11 5.6 |
| ELEMENTS TOTAUX (attaque Perte au feu Résidus insolubles SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ total libre TiO ₂ P ₂ O ₅ total Olsen Ca Mg K Na SiO ₂ / Al ₂ O ₃ | e triacide) 7 7 7 7 7 7 8 100g. me/100g. me/100g. | 10.15 9.03 2.42 1.53 0.59 0.73 | 10.13 9.48 2.82 1.76 0.62 0.29 2.72 4.32 0.59 0.52 1.81 | 15.87 14.54 5.80 3.59 0.68 0.54 - 1.28 2.84 0.58 0.55 1.85 | 25.86 22.95 8.90 5.41 0.82 0.32 - 1.26 2.58 0.30 0.37 1.91 | 27.08 23.71 10.1 6.18 0.80 0.22 - 0.53 1.68 0.31 0.32 1.94 | 28.5 24.9 10.15 6.39 0.85 0.22 - 0.21 2.02 0.28 0.37 1.94 | 29.15 25.3 9.4 5.83 0.71 0.31 - 0.86 1.28 0.16 0.15 | 32.2 27.5 5.72 3.26 0.94 0.27 | 29.7 25.8 9.32 5.83 0.78 0.28 0.49 2.08 0.33 0.37 1.95 |
| CARACTERES PHYSIQUES pF - 2 | X | 24.63 23.9 21.2 21.1 0.10 49 1.20 2.58 53.5 | 29.7 12.7 11.5 8.7 1.04 5.6 1.20 2.58 53.5 ~31 | 32.1 19.3 15.8 12.7 1.05 2.8 1.55 2.60 40.4 ~15 | 34.7 27.7 25.4 21.4 2.83 5.5 1.65 2.61 36.8 0 34 à42 | 37.7 27.4 25.4 20.1 2.27 4.8 1.37 2.61 47.5 12 34 à36 | 38.6 29.5 24.8 13.2 2.57 3.1 1.35 2.65 49 13 33 à38 | 39.3 30.5 25.9 14.2 2.78 2.5 | 44.4 34.9 31.2 19 5.11 1.8 | 46.3 35.7 29.9 15.4 4.37 1.3 |

^{*} Note : Mesures effectuées sur le terrain par J. COLLINET en août 1974.

Tableau 1.6b : Description du profil de la case ERLO près de Divo.
- Station IFCC à Brabodougou : 1/2 pente 10% sur granite.

Profondeur

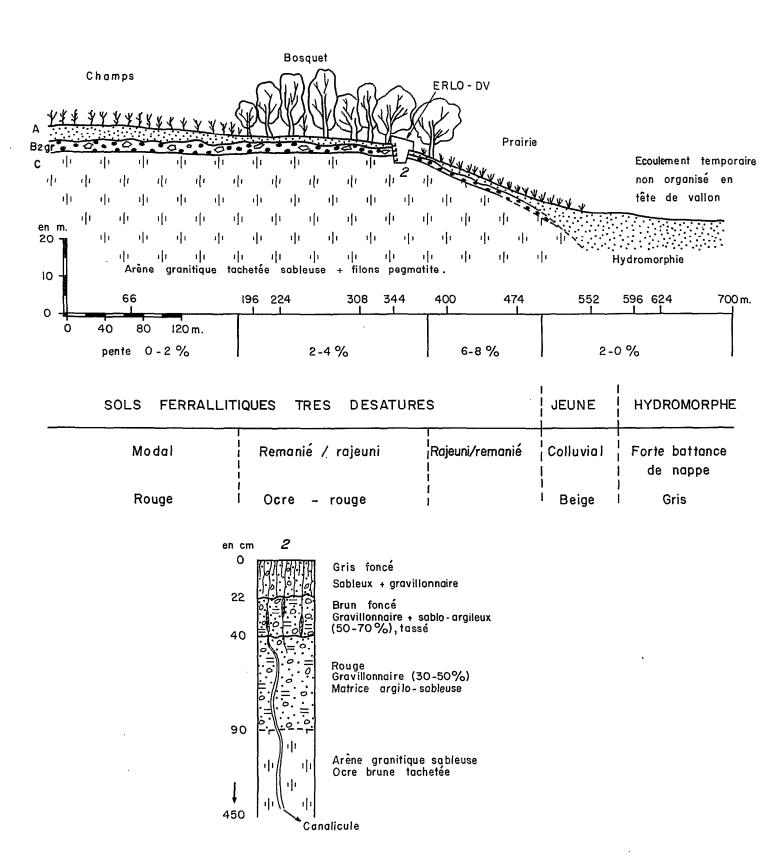
Description des horizons

cm

- O 2 Gris foncé (10YR, 4/6 en sec) très humifère, sablo-argileux (sables grossiers dominant) Structure grenue à polyédrique émoussée fine, bien développée, très cohérente et provenant de l'activité de la mésofaune (vers de terre et termites). Horizon ferme à l'état sec, cohérent et très poreux (porosité interagrégats et interstitielle). Chevelu de racines fines et moyennes abondant. Transition distincte ondulée.
- 2 12 Brun clair (7,5YR, 6/4 en sec), humifère, sablo-argileux (S.G. dominant). Structure polyédrique moyenne à grossière moyennement développée; vides importants entre agrégats avec quelques sables blanchis déliés. Horizon cohérent, non fragile, poreux (porosité tubulaire moins développée). Nombreuses racines moyennes et chevelu dense. Transition nette ondulée.
- Jaune rouge (5YR, 6/6) sans tache peu humifère. Nappe de gravillons ferrugineux (53%) petits (5à l'Omm de diamètre) arrondis, très durs, brun sombre avec fine cuticule, rouge vif en coupe, enrobés dans une matrice argilo-sableuse (S.G. dominant). Structure polyédrique fine peu nette. Horizon sec, compact, poreux (porosité tubulaire fine). Cutane sur vésicules. Rares éclats de quartz. Racines fines et moyennes peu nombreuses dans la masse de l'horizon. Transition graduelle festonnée.
- 40 75 Jaune rouge (5YR, 6/6) avec des taches rouges plus ou moins indurées (7% de refus), argileux. Structure fondue à débit polyédrique moyen peu développée. Horizon plus frais, compact, cohérent, peu poreux (porosité tubulaire très fine). Peu de racine. Transition graduelle régulière.
- 75 145 Tacheté rouge (5YR, 6/6 à 4/6) sur fond brun jaune, argilosableux. Taches rouges plus ou moins indurées jusqu'à un mètre. Structure fondue à débit polyédrique peu développée. Horizon frais, très compact, peu poreux (porosité tubulaire très fine). Racines très rares. Transition graduelle.
- 145 320 Horizon d'argile tachetée rouge (5YR, 7/4) et ocre avec des taches blanches (2,5YR, 6/6) qui envahissent de plus en plus le sol. Texture argilo-limoneuse et de plus en plus limoneuse à partir de 240cm. Structure fondue à débit polyédrique grossier. Horizon cohérent et compact, peu poreux (tubes très fins): pratiquement pas de racine. En profondeur, zone d'altération du granite calco-alcalin (quelques pail-lettes de micas).

D'après la classification française, il s'agit d'un sol ferrallitique moyennement désaturé, remanié modal ou légèrement appauvri sur granito-gneiss, calcoalcalin, facies tronqué sur forte pente.

TOPOSEQUENCE DE LA CASE ERLO DE BOUAKE



2.5. Bouaké

Les dispositifs ont été installés à mi-pente d'une large croupe granitique mollement ondulée non loin des cases d'érosion et du poste météorologique du Centre de Recherches Agronomiques géré par l'IRAT à sept kilomètres de Bouaké (fig. 1.7). Il s'agit d'un bloc d'un quart d'hectare de "l'extension 1967", sous savane arbustive intégralement protégée depuis 1968.

Sur le plateau et le haut des pentes, le sol est rouge et un horizon meuble de profondeur variable (10 à 100cm) recouvre une nappe gravillonnaire plus ou moins bien développée. Le sol devient plus ocre à mesure que l'on descend la pente et la cuirasse (gravillons soudés au contact de l'air) affleure localement. En bas de pente et dans le bas fond, on trouve des sols colluviaux très sableux, gris, hydromorphes en profondeur.

Depuis qu'on a arrêté les feux de brousse, la surface du sol est entièrement couverte d'une mince litière de feuilles ou d'un fouillis très dense d'herbes diverses. Il n'y a pas de relief particulier, à part des coulées de sable grossier qui marquent les passages empruntés jadis par le bétail. On dénombre environ quatre termitières de petite taille (moins de un mètre) à l'hectare; il n'y en a pas dans la parcelle ERLO.

Profil de la case ERLO sous savane arbustive près de Bouaké

La description et les résultats analytiques sont présentés aux tableaux 1.7a et b.

Les points essentiels à retenir sont les suivants :

- Le profil est formé de la succession de trois groupes d'horizon :
 - un mince horizon humifère et sableux assez riche et poreux, peu acide,
 - . une nappe gravillonnaire épaisse (70cm), pauvre chimiquement, riche en argile assez compacte et beaucoup moins poreuse à son

- sommet au point d'opposer un obstacle à la pénétration des racines grosses et moyennes,
- une arène granitique, sableuse, acide, pauvre chimiquement sauf à l'emplacement des filons pegmatitiques, assez perméable (grosses canalicules).
- Le taux de matières organiques (surtout l'azote) est beaucoup plus faible que sous forêt; c'est une des caractéristiques des savanes brûlées régulièrement (jadis cultivées tous les 20-50ans).
- L'altération n'est pas aussi poussée qu'en basse Côte d'Ivoire, puisqu'à l'endroit des filons pegmatitiques on trouve encore des paillettes de micas et une réserve chimique non négligeable : ailleurs, en dehors de l'horizon humifère, le sol est pauvre, désaturé et assez acide.
- Mais le facteur le plus limitant pour ce type de sol est sa faible réserve hydrique (25mm sur 25cm, 36mm sur 50cm, 87mm sur un mètre de sol) en relation avec le mince horizon humifère sableux et l'abondance des éléments grossiers à faible profondeur (50 à 70% de refus dès 25cm).
 - C'est un obstacle majeur à l'intensification de la production dans une région où la fréquence des périodes sèches de neuf jours consécutifs en période de culture est élevée.

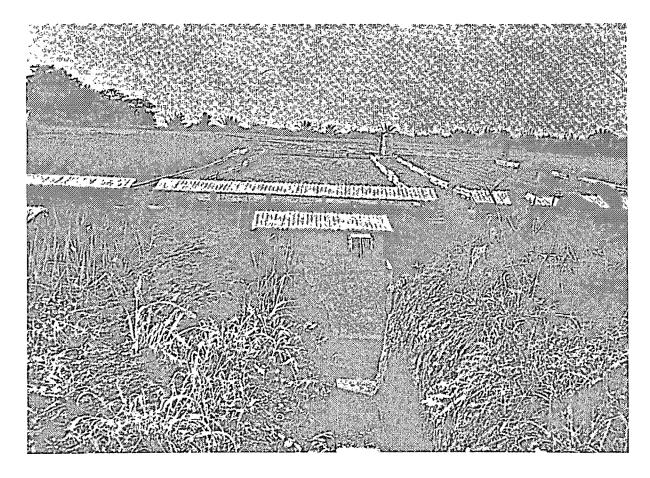


Photo 3 - Centre de recherche agronomique de Bouaké.

a - cases d'érosion

(Roose) b - case de lessivage oblique sous une savane arbustive protégée du feu et du pâturage.



Tableau I. 7a : FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL DE LA CASE ERLO DV

au C. R. A. de BOUAKE (1971)

| | | | | | | • | |
|--|---|---|---|---|---|---|--|
| HORIZON PROFONDEUR (mini cm) (maxi cm) | 0 5 | 30 40 | 55 65 | 90 100 | 190 200 | 290 300 | 340 360 |
| GRANULOMETRIE Argile Z Limon fin Z Limon grossier Z Sable fin Z Sable grossier Z Refus Z SF/SG - | 14.7 7.2 2.7 12.4 62.7 24 0.20 | 31.5 8.0 2.5 9.7 39.9 65 | 39.8 5.6 3.3 7.5 43.9 51 | 10.7 2.9 6.9 5.0 72.1 24 | 3.7 2.4 2.8 12.8 78.8 -5.4 | 6.7 5.6 4.9 18.1 66.2 3.3 | 8.5 8.5 5.0 26.3 49.2 0 |
| MATIERES ORGANIQUES Carbone Azole 23 13.34 0.90 14.8 1.39 1.24 20 | 19.7 11.46 0.68 16.8 0.83 2.20 26 2.65 | 13.0 7.55 0.38 19.9 0.23 1.73 26 7.52 | 0.08 15.5 0.02 | 0.05 16. 0.02 | 0.9 0.51 0.08 13.9 0.01 0.12 26 | 1.1 0.61 0.5 12.2 0.02 0.10 20 |
| CATIONS ECHANGEABLES Ca | 0g. 1.59 0g. 0.22 0g. 0.10 | 0.01 0.37 0.10 0.04 7.31 6.9 4.5 | 0.01 0.12 0.07 0.06 5.92 4.2 4.3 | 0.09 0.11 0.08 5.25 | 0.10 0.11 0.04 | 0.12 0.12 0.10 0.08 6.06 7 4.6 | 0.10 0.13 0.08 0.09 7.21 6 4.3 |
| ELEMENTS TOTAUX (attaque trial Perte au feu | 5.70 70.9 10.3 8.7 3.25 2.44 0.49 0.38 0.03 3.10 4.37 1.3 | 7.80 53.8 17 15.59 4.25 2.25 0.68 0.41 0.02 1.2 4.7 1.8 0.4 1.85 | 8.85 43.7 18.6 19.60 5.50 0.74 0.44 0.01 1.5 4.4 1.5 0.4 | 6.70 51.9 16.5 16.24 6.25 3.50 0.53 0.21 0.01 0.5 3.9 1 0.4 1.73 | 6.30 54 15.8 15.35 6 3.75 0.55 0.15 0.01 0.4 4.1 0.5 0.35 1.75 | 7.45 43.9 21.4 19.64 6.50 4. 0.69 0.21 0.01 0.4 4 0.7 0.30 1.85 | 8.55 36.2 24.6 21.54 6.25 3.75 0.71 0.21 0.01 0.4 4 0.6 0.40 1.94 |
| CARACTERES PHYSIQUES PF 2.5 % 2.8 % % 3 % % 4,2 % Instabilité Struct. Is Indice Perméabilité K cm/h Densité apparente réelle Porosité totale % macro % micro % | 11.06 10.40 9.95 7:88 0.40 100.8 1.28-1:57 2.44 48-36 33-17 15-19 | 19.56 17.58 17 15.71 0.81 123.1 1.80 2.48 27 7 | 22.95 20.02 19.91 17.61 1.52 32.7 1.80 2.50 28 | 13.07 12.46 11.29 9.37 0.61 33 1.75 2.50 30 7 | 10.88 9.55 8.60 6.75 0.50 11 (1.70) 2.50 32 13 | 14.51 12.84 12.57 7.93 1.90 43.2 (1.65) 2.50 34 10 24 | 17.94 16.05 15.15 12.22 2.05 14.1 (1.65) 2.50 34 5 |

Tableau 1.7b: Description du profil de la case ERLO-DV près de Bouaké - C.R.A. (IRAT): 1/2 pente 4% sur granite.

Profondeur

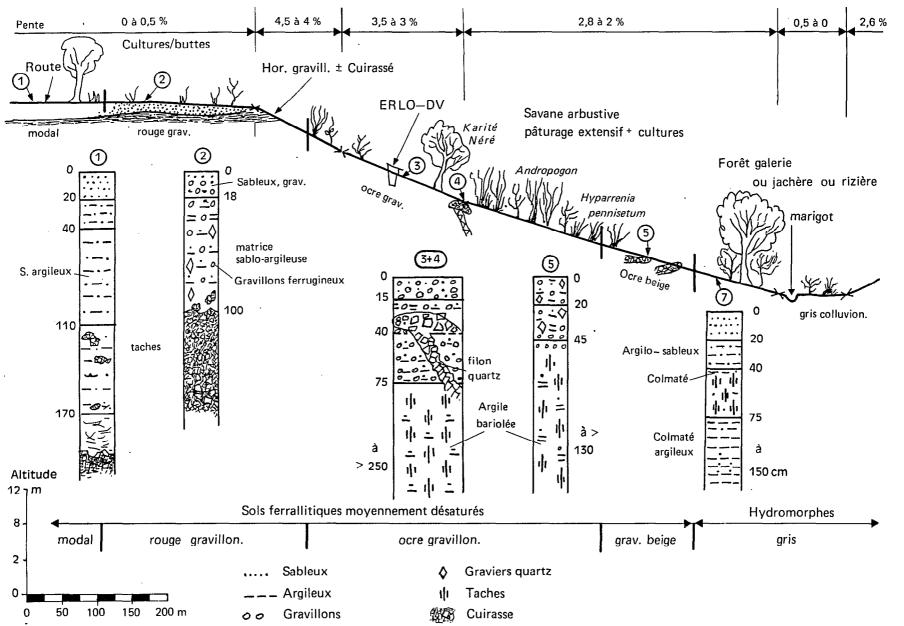
Description des horizons

СII

- O 10/22 Gris foncé (5YR, 2/1), sable grossier, quelques gravillons ferrugineux (diamètre < 1cm) et graviers de quartz plus ou moins ferruginisés (2 à 4cm de diamètre). Structure massive à débit polyédrique moyen peu développé. Horizon meuble et poreux : forte activité biologique. Racines nombreuses: les plus grosses ont tendance à s'étaler horizontalement. Transition nette et régulière.
- Brun foncé (5YR, 3/3) de pénétration de l'humus; nappe gravillonnaire (60 à 70% de refus) dans une matrice sablo-argileuse. Quelques fragments de roche altérée ferruginisée et des graviers de quartz (diamètre : 3 à 5cm, témoin des filons de pegmatite) sont mêlés aux gravillons ferrugineux arrondis dont la taille dépasse un centimètre. Structure massive à débit polyédrique moyen peu développé. L'horizon est meuble mais moins poreux et plus compact., nombreuses petites racines très contournées car la macroporosité est réduite. Transition graduelle et régulière.
- 40 90 Brun tacheté de rouge (2,5YR, 4/8) avec des traînées plus sombres de pénétration humifère. Gravillonnaire (30 à 60% de refus), matrice sablo-sableuse et nettement plus riche en particules fines que le restant du profil. Gravillons ferrugineux, quartz anguleux (2-7cm) et quelques débris de roche ferruginisée. Structure massive à débit polyédrique moyen et moyennement développée. Horizon plus compact poreux mais faible macroporosité: nombreuses fines racines très contournées. Transition graduelle et ondulée.
- 90 450 Arène granitique ocre brunâtre (7,5YR, 5/6) tacheté d'ocre, jaune, rouge et blanc; les taches blanches deviennent importantes à partir de 2,5mètres. Texture sableuse constituée de quartz et de micas. Structure massive et cohérente à débit polyédrique grossier moyennement développée. Horizon poreux mais compact, durcissant à l'air. Sur toute l'épaisseur de l'arène, présence de canalicules (1 à 3cm de diamètre) sombres remplies d'argile grisâtre, de matières organiques et souvent colonisées par de fines racines.

D'après la classification française, il s'agit d'un sol ferrallitique fortement désaturé rajeuni et remanié sur granite riche en petits filons pegmatitiques.

Fig.1.8- Schéma de la toposéquence "Case Erlo-Du" de Waraniene (Korhogo: Nord Côte d'Ivoire)



2.6 Korhogo

Les dispositifs ont été installés dans le bassin versant de Waraniene (cinq kilomètres de Korhogo) aux deux tiers d'un long glacis gravillonnaire concave qui relie un plateau tabulaire cuirassé à un bas fond hydromorphe à écoulement permanent (fig. 1.8). Sur le plateau et le haut du versant, les sols sont rouges et un horizon meuble d'épaisseur variable (0 à 170cm) recouvre une nappe gravillonnaire assez épaisse (45 à > 100cm). A mesure que l'on descend la pente les sols deviennent ocre puis beige, puis colluviaux gris plus ou moins hydromorphes. Localement les gravillons sont soudés en une cuirasse (voir corniche et fond des ravines au profil 5).

La zone est couverte de cultures et de savanes arborées (karité, néré, baobab) ou arbustives dégradées par le pâturage extensif et les feux annuels. Sur la parcelle d'un quart d'hectare isolée par une haie de ronces de fer, le troupeau ne passe plus. Cependant, l'homme y cherche de hautes herbes et allume chaque année des feux de brousse. Le feu y maintient une végétation herbacée en touffes (Andropogon et Hyparrenia) et quelques buissons pyrophiles. Il n'y a que quelques petites termitières (Trinervitermes) exploitées pour nourrir la volaille, mais on a tout de même recueilli une quantité notable de terre agrégée sous l'influence de la mésofaune.

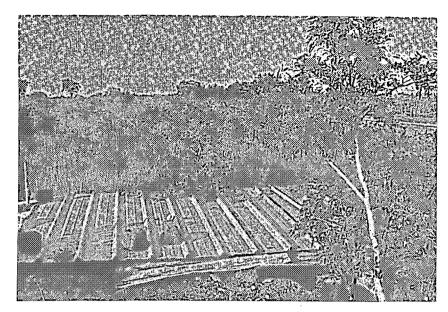
La surface du sol est couverte d'un mulch de gravillons ou d'une pellicule de battance et présente une succession de crètes (touffes d'herbes, termitières) entre de petites dépressions reliées quelquefois par les sentiers empruntés jadis par le troupeau. Ces irrégularités piègent l'eau de ruissellement et protègent le sol contre la battance des gouttes de pluie; la charge solide du ruissellement en nappe reste faible tandis que le sol n'est pas cultivé.

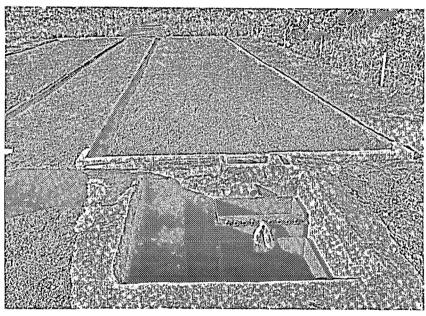
Profil de la case ERLO sous savane arbustive dégradée de Korhogo

La description et les résultats analytiques sont présentés aux tableaux 1.8a et b.

Les points essentiels à retenir sont les suivants :

- Le profil est formé de la succession de deux groupes d'horizon :
 - une nappe de gravillons (30 à 60%) dont les quinze premiers centimètres ont été ameublis par l'homme et la mésofaune, enrichis en humus et nutriments, appauvris en particules fines sur 15 à 40cm.,
 - une argile tachetée pauvre en macropores dont le sommet est enrichi en fer et en argile, très altérée, très pauvre chimiquement et assez acide (5,3 - 5,9).
- Le taux de matières organiques (surtout d'azote) est assez faible, comme dans toutes les savanes jadis cultivées et soumises aux feux annuels. L'horizon superficiel est cependant assez bien pourvu en bases, peu acide, mais carencé en azote et phosphore assimilable.
- La structure est médiocre dès la surface : le sol est perméable dans sa masse, mais sensible à la battance, ce qui réduit considérablement l'infiltration en fin de saison des pluies. Par contre, la charge gravillonnaire assure une bonne armature à la masse du sol qui reste perméable et résiste très bien à l'érosion en nappe (formation d'un mulch de graviers). La réserve hydrique est évidemment très réduite dans les horizons gravillonnaires, mais considérable dans la nappe d'argile tachetée; aussi les graminées se dessèchent un à deux mois après la dernière pluie utile, tandis que les arbres restent verts toute l'année.







Photos 4 - 5 - 6 - Case ERLO, cases d'érosion et lysimètres sur le bassin de (Roose) Korhogo (Nord Côte d'Ivoire)

Noter - la savane arbustive dégradée par la culture et les feux annuels, - la pente diminue de 4 % dans les éboulis de la cuirasse à 2 % en bas de versant.

Tableau 1. 8a : FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL DE LA CASE ERLO DE KORHOGO

(WARANIENE - MARS 1967)

| HORIZON | | | | | | T | |
|---|--|--|---|---|--|--|--|
| PROFONDEUR (mini cm) (maxi cm) | | o 15 | 20 35 | 60 80 | 130 140 | 190 200 | 240 250 |
| GRANULOMETRIE | | | | } | | | |
| Argile Limon fin Limon grossier Sable fin Sable grossier Refus SF/SG | z z z z z | 15.5 8.8 5.9 23.2 45.4 69.1 0.51 | 44.6 .5.3 3.9 11.5 33.9 63.8 0.34 | 52.7 8.3 4.7 8.1 25.3 46 0.32 | 32.3 1.8 3.2 11.7 50.8 15.2 0.23 | 26.7 8.8 5.2 18 41 0 | 24.1 11.3 7.8 24.4 32.3 0 0.76 |
| MATIERES ORGANIQUES Carbone Azote C/N Acides Humiques Acides Fulviques Taux Carbone humifié AF/AH | °/•° °/•° °/•° °/•° 7 | 15.93 0.86 18.5 1.17 1.08 14 | | 2.86 0.39 7.4 | 1.19 0.29 4.1 | 1.11 0.26 4.3 | 1.03 0:22 4.6 |
| CATIONS ECHANGEABLES Ca Mg | mé/100g. mé/100g. mé/100g. | 2.53 0.18 | 1.01 0.88 0.06 | 0.86 0.48 0.04 | 0.64 0.46 0.11 | 0.55 0.44 0.08 | 1.11 0.48 0.02 |
| Na C.E.C. Saturation pH eau 1/2,5 | mé/100g. mé/100g. Z | | 0.05 8.30 24 5.5 | 0.05 7.72 19 5.6 | 0.05 6.77 19 5.9 | 0.05 7 16 5.3 | 7.06 7.06 23 5.7 |
| ELEMENTS TOTAUX (attac | que triacio | ie) sur | terre fine | 2 | | | |
| Perte au feu Résidus insolubles SiO ₂ | ž | 8.66 59.38 13.52 | 10.55 37.06 23.58 | 11.98 17.11 31.98 | 12.61 14.83 31.85 | 11.81 17.29 30.43 | 11.21 20.77 31.09 |
| A1 ₂ 0 ₃ Fe ₂ 0 ₃ total libre | z z z | 12.55 4.30 1.54 0.75 | 22.33 4.95 1.54 1.04 | 30.48 6.65 1.65 0.96 | | 7.10 1.63 0.96 | 28.86 7.20 1.65 0.73 |
| P ₂ O ₅ total Olsen | °/ | 0.12 | 0.16 | 0.14 | 0.35 | 0.35 | 0.34 |
| Ca Mg K Na SiO ₂ / Al ₂ O ₃ | mé/100g. mé/100g. mé/100g. mé/100g. | 3.38 5.95 0.85 0.35 1.83 | 1.57 8.67 1.32 0.75 1.79 | 1.03 5.92 1 0.42 1.78 | 0.67 3.83 0.70 0.67 1.76 | 0.67 2.50 0.60 0.62 1.71 | 1.25 3.92 0.58 0.27 1.83 |
| CARACTERES PHYSIQUES | | | | | | | |
| pF 2.5 2.7 3 4,2 Instabilité Struct. Is Indice Perméabilité Densité apparente réelle | z z z z K cm/h | 15.34 12.18 11.92 4.65 | 18.64 16.89 13.93 7.59 - | 24.88 22.67 21.67 10.26 | 24.51 21.64 21.26 7.63 5.9 | 25.32 22.05 21.52 7.07 6.5 | 25.33 21.94 21.01 6.83 - 5.2 |

Tableau I.8b: Description du profil de la case ERLO-DV près de Korhogo
-Bassin versant de Waraniene, 2/3 pente concave 3% sur
granite -

Profondeur

Description des Horizons

cm

- 0 10/20 Brun gris (5YR, 3/3) humifère, sableux, contenant 20 à 60% de petits gravillons ferrugineux arrondis (diamètre: 0.3 à 2cm) à cassure rouge mouchetée de noir avec quelques quartz anguleux. Structure polyédrique fine peu développée. Horizon meuble et très poreux; activité biologique et chevelu racinaire bien développés surtout dans les cinq premiers centimètres. Transition nette et irrégulière reflétant encore après plus de dix ans les techniques de culture en billons d'un cycle cultural antérieur.
- Brun rougeâtre (5YR, 4/6) de pénétration de la matière organique, argileux gravillonnaire (refus = 30 à 60%); en plus des gravillons semblables aux précédents apparaissent quelques concrétions brunes (diamètre = 2 3cm) et quelques graviers de quartz saccharoïdes ou ferruginisés. Structure massive à débit polyédrique moyen moyennement développé.

 Quelques poches alvéolaires (4 à 10cm de diamètre) tapissées de revêtement argileux beige. Horizon plus cohérent, plus compact, mais on y trouve encore quelques racines fines et moyennes. Transition nette, ondulant de 34 à 68cm de profondeur.
- 40 120 Argile rouge (5YR, 4/6) tachetée de brun, ocre et beige, argileux contenant encore pas mal de gravillons jusqu'à 80cm de profondeur et quelques quartz ferruginisés. Structure massive à débit polyédrique moyen bien développé. Horizon compact, collant aux instruments mais traversé de nombreux macropores de 5 à 10 millimètres de diamètre (couloirs de termites, vieilles racines, etc...). Encore quelques alvéoles revêtues d'argile beige. Transition graduelle.
- 120 350 Argile bariolée rouge brunâtre (2,5YR, 4/6) à taches grises et blanches de plus en plus nombreuses à mesure qu'on descend dans le profil. Texture argilo-limoneuse. Structure massive à débit polyédrique grossier bien développée.

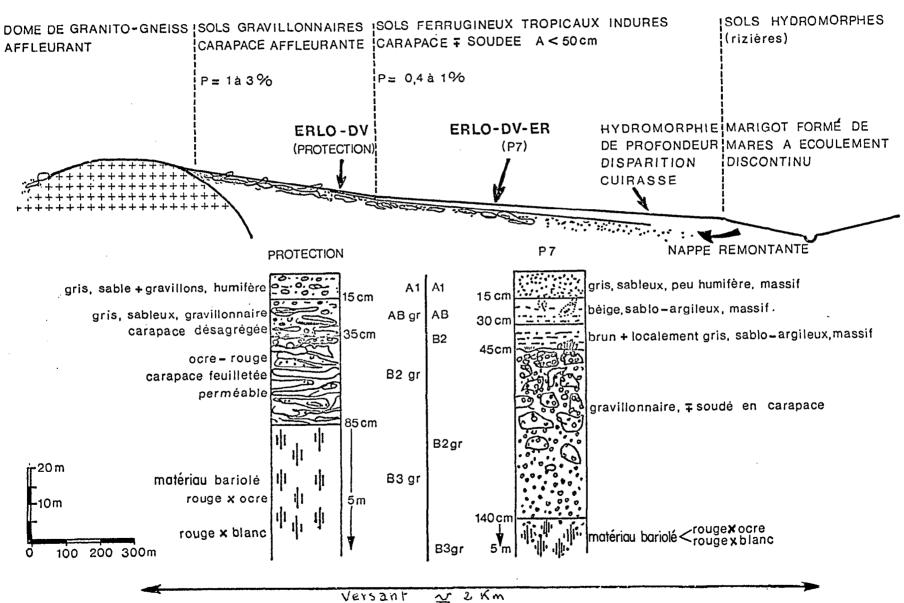
 Horizon très cohérent en sec, compact mais traversé de gros pores (5-10mm) colonisés par des radicelles et tapissés de revêtements argileux blanchâtres. Quelques radicelles et alvéoles jusqu'en bas du profil.

De minces filonets de quartz, de pendage conforme à la topographie (voir fig. 1.8, profil 4), traversent tout le profil jusque vers 40-60cm et s'étalent ensuite en un chapeau dissymétrique dont les éclats les plus grossiers sont déplacés vers le bas de la toposéquence. Autour de ces filons de quartz, les matériaux sont nettement plus sableux, plus cohérents et plus secs.

Le niveau d'argile bariolée se prolonge en profondeur jusqu'à une arène sableuse et un granite migmatitique leucocrate à grains fins vers 10 à 30 mètres de profondeur d'après les matériaux rejetés autour des puits piezzométriques

(PERRAUD, CHEROUX, 1963). Le niveau de la nappe phréatique oscille considérablement selon la position topographique et les saisons; elle peut remonter à moins de deux mètres en bas de pente et six mètres à hauteur du profil et de la parcelle ERLO après les averses des mois d'août et septembre.

D'après la classification française, il s'agit d'un sol ferrallitique moyennement désaturé remanié, modal, sur granite, facies appauvri. Fig. 1.9



2.7. Saria

Les dispositifs ont été installés au Centre de Recherche Agronomique géré par l'IRAT (quatre-vingts kilomètres de Ouagadougou) en deux points d'un long glacis de sol ferrugineux tropicaux à cuirasse peu profonde (fig.1.9).

Un dôme granitique surbaissé domine un long glacis gravillonnaire localement cuirassé (pente = 1 à 2%) qui s'enfonce graduellement
sous un manteau de matériaux sableux en surface, puis argilo-sableux en
profondeur (pente < 1%) avant de disparaître dès que naissent des conditions d'hydromorphie de profondeur. Le lit du marigot à écoulement
temporaire est formé d'une succession de mares sommairement aménagées
pour la riziculture de nappe et pour le jardinage; il est entouré
d'une étroite bande de sols ocres.

La zone est couverte de cultures et de jachères ayant l'allure de savanes arborées pâturées et brûlées chaque année. Le feu et la culture ont éliminé progressivement les arbustes pour ne respecter que quelques grands arbres particulièrement utiles (karité, néré, baobab, raisinier, tamariniers, etc...). La surface du sol est parsemée de petites termitières (Trinervitermes) montrant combien la mésofaune est active en dehors des cultures (ROOSE, 1976 et 1979).

a) Profil de la case ERLO sous jeune jachère en parcelle 7

La description et les résultats analytiques sont présentés aux tableaux 1.9a et b.

Les points essentiels à retenir sont les suivants :

- Le profil est formé de la succession de trois groupes d'horizon :
 - un niveau de terre fine argilo-sableuse appauvrie en particules fines sur vingt centimètres;
 - . une nappe gravillonnaire ferrugineuse localement cuirassée, tassée et peu perméable;
 - . une épaisse nappe d'argile tachetée semblable à celles

des sols ferrallitiques.

- L'ensemble est très pauvre chimiquement. En particulier, les teneurs en matières organiques, azote, potasse échangeable et phosphore assimilable sont très basses comme dans beaucoup de zones de savane densément peuplées, où la durée de la jachère est courte et les feux de brousse quasi annuels. La capacité d'échange de bases est médiocre (2 à 4 mé) et le taux de saturation diminue de 70% en surface à 30-50% en profondeur parallèlement au pH (5,3 à 4,9).
- Le milieu physique est aussi défavorable. La perméabilité de la masse du profil est médiocre et de plus, la stabilité de la structure est mauvaise dès la surface : le sol est donc sensible à la battance . Cette pellicule imperméable est à l'origine d'un taux très élevé de ruissellement, intolérable dans une zone qui manque aussi cruellement d'eau. La faible épaisseur de terre fine au-dessus de la cuirasse (50cm) limite la réserve hydrique disponible pour les cultures vivières. Sous la cuirasse, par contre, se trouve une réserve d'eau importante qui permet aux arbres de rester verts et de porter du fruit en pleine saison sèche à condition que leurs racines réussissent à traverser la cuirasse peu perméable.

b) Profil de la case ERLO sous vieille jachère en protection

La description et les résultats analytiques sont présentés aux tableaux 1.10a et b.

Par rapport au profil précédant, on remarque les différences suivantes :

- Le niveau de terre fine est pratiquement absent et la nappe gravillonnaire affleure plus ou moins remaniée en surface et pénétrée de matières organiques.
- La matrice est légèrement plus riche, mais les réserves sont encore plus réduites compte tenu de la présence des gravillons (50 à 60%).
- L'augmentation de la macroporosité et de la perméabilité des horizons favorise un enracinement plus profond; mais elle augmente aussi les risques de lixiviation, car la capacité de rétention en eau des horizons gravillonnaires est très faible et, en définitive, les cultures souffrent encore plus de l'irrégularité des pluies. Les grands arbres, par contre, et les hautes herbes s'y développent fort bien s'ils sont protégés des feux : l'accès aux réserves hydriques permanentes sous la cuirasse y est plus facile.



Photos 7 et 8 - Parcelles ERLO et cases d'érosion à Saria sur la parcelle de protection et la parcelle 7.

Noter - la végétation typique du plateau Mossi (Haute Volta) composée de hautes graminées et de quelques grands arbres utiles.

Malgré une pente très faible (0,5 %), le ruissellement peut dépasser 50 % à cause de la pellicule de battance qui se développe entre les touffes.

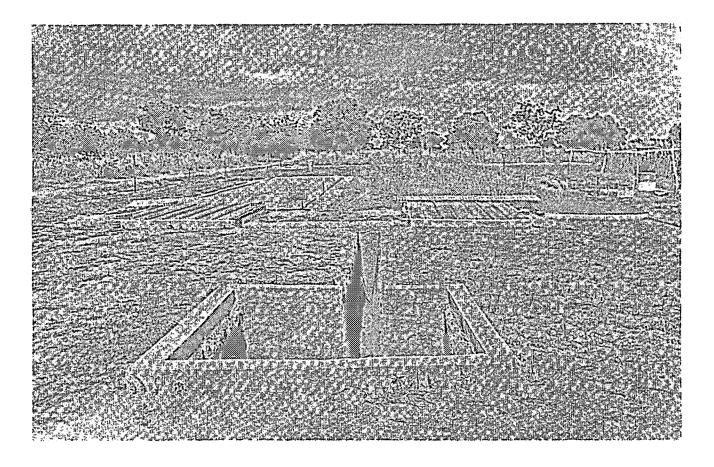


Tableau 1.9a : FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL DE SARIA (HAUTE-VOLTA)

ERLO PARCELLE P7 (Labo. Central ADIOPODOUME) 1972

| IORIZON | | gris | beige | brun-j. | gravill. gris | gravill. rouge | | argil | e bariolée | | Granite + altéré |
|--|--|---|---|---|--|---|--|---|--|--|---|
| PROFONDEUR (mini cm) (maxi cm) | | 0 15 | 20 35 | 35 55 | 55 100 | 110 150 | 175 200 | 225 250 | 300 3 ⁵ 0 | 400 450 | |
| GRANULOMETRIE Argile Limon fin Limon grossier Sable fin Sable grossier Refus SF/SG MATIERES ORGANIQUES Carbone Azote C/N Acides Humiques Acides Fulviques Taux Carbone humifié | * | 12.9 5.3 20.2 21.7 40.6 4 0.53 6.6 3.83 0.32 12 0.17 0.47 | 30 6.6 17.8 17 28.3 6 0.60 7.2 4.17 0.35 12 0.11 0.67 18.7 | 33.9 6.1 19.4 14.1 25.6 9 0.55 5.1 2.98 0.27 11 0.54 21.8 | 23.9 7.9 9.9 12.9 42.6 59 0.30 2.8 1.60 0.17 9.4 | 16 8.4 11.2 11.8 51.5 39 0.23 1.3 0.73 0.07 | 18.7 9.2 10 f 15.6 45.7 30 0.34 0.9 0.53 0.05 10.6 0.02 0.05 13.2 | 30.6 10.8 12.2 11.4 34.5 20 0.33 | 30.7 12.1 12.2 12.6 32 19 0.39 1.2 0.72 0.04 18 0.02 0.09 14.9 | 45.6 14.8 10.1 9.2 19.4 27 0.47 0.7 0.40 0.02 20 0.01 0.04 | |
| AF/AH CATIONS ECHANGEABLES Ca Mg K Na C.E.C. Saturation | mé/100g. mé/100g. mé/100g. mé/100g. mé/100g. | 0.83 0.37 0.09 0.02 1.81 72 | 1.45 0.67 0.07 0.04 3.57 67 | 0.83 0.32 0.10 0.03 3.71 | 1.03 0.49 0.33 0.03 3.77 | 1.05 0.42 0.25 0.05 3.30 54 | 0.96 0.44 0.26 0.08 3.86 45 | 1.08 0.57 0.17 0.21 4.26 | 1.14 0.67 0.22 0.26 4.15 | 1.70 1.02 0.15 0.39 4.31 | |
| pH eau 1/2,5 ELEMENTS TOTAUX (attaque Perte au feu Résidus Insolubles SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ total libre TiO ₂ F2 ^C 5 total Olsen Ca Mg K Na SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | z z z z z z z z z z z z z z z z z z z | 3.1 79.6 7.3 6.3 2.35 1.2 0.76 0.19 0.01 1.36 14.39 2.13 0.97 1.97 | 6.1 59.9 15.7 13.7 3.10 1.7 0.96 0.23 0.01 1.70 14.90 3.62 0.97 1.95 | 6.5 . 55.7 16.6 15 3.8 2.3 0.93 0.25 0.01 - 14.90 3.83 1.29 1.88 | 8.3 38.5 19.5 18.8 13.8 8.8 0.85 0.42 0.01 | 9.6 27.7 24.4 23 15.3 12 0.86 0.31 0.01 - 20.38 4.47 2.90 1.80 | 9.7 26 25.7 24.2 13.3 10 0.85 0.30 - - 15.38 4.47 2.26 1.80 | 8.5 34.2 23.7 21.7 10.9 8.8 0.90 0.20 - - 17.37 4.89 1.94 1.86 | 9.6 25.7 26.6 24.5 12.2 9.4 0.91 0.20 - - 21.84 10.21 2.58 1.85 | 10.1 23.2 30.4 26.3 9.7 8.4 0.87 0.15 0.01 - 16.62 6.80 2.26 1.97 | 0.6 72.3 15.5 1.7 0.35 0.20 50.89 41.69 56.28 133.22 |
| CARACTERES PHYSIQUES pF - 2 -2,5 -3 -4,2 Instabilité Struct. IS Indice perméabilité Densité apparente réelle | % cm/h | 18.2 12.5 - 4.2 2.3 3.5 1.71 2.66 | 24.8 17.1 - 9.4 1.8 5.2 1.60 2.63 | 10 - 6.2 1.75 2.70 | 9.9 - 4.8 2.35 2.75 | 10.4 - 4.4 2.30 2.79 | 12.6 - 3.3 2.25 2.74 | 12.7 - 2.9 1.85 2.73 | 13.9 - 2.1 1.75 2.75 | 14.2 - 1.9 1.80 2.70 | 2.52 |

Tableau 1.9b : Description du profil de la case ERLO-parcelle 7 à Saria (Haute Volta) - C.R.A. IRAT près de Koudougou; 1/2 pente < 1% sur granite -

Profondeur

Description des horizons

CTD

- 15 Horizon labouré, gris à taches beiges, peu humifère, sableux, riche en sables fins. Structure fondue et pellicule de bat--tance en surface. Horizon boueux à l'état humide et massif à l'état sec; porosité tubulaire et vésiculaire. Quelques fines fentes de dessèchement par mètre courant en sol sec nombreuses racines. Transition nette sur un centimêtre et régulière (fond de labour).
- Beige avec taches plus grises de pénétration humifère, sablo-15 - 30argileux avec quelques petits gravillons ferrugineux et cailloux de quartz ferruginisé (refus = 6%). Structure massive à débit polyédrique moyen faiblement développé. Horizon plus cohérent à porosité bien développée (tubulaire et localement vésiculaire et interstitielle); nombreuses racines fines et bonne activité biologique. Traces de revêtement argilo-humifère dans les macroporosités (vérifiée en lames minces). Transition assez nette sur trois centimètres et régulière.
- 30 45Brun jaune, localement grisâtre au contact avec l'horizon suivant (hydromorphie temporaire ?) argilo-sableux. Structure massive à débit polyédrique moyen mieux développé. Horizon compact assez cohérent à porosité microet macrotubulaire; racines peu nombreuses mais nombreuses cavités de deux à quatre centimètres de diamètre (iules. termites, etc...). Nombreux cutanes argileux jaunes. Transition nette sur un centimètre et régulière.
- 45 60 Beige gris gravillonnaire (refus 60%); gravillons gris en surface, rouge lie de vin en coupe de cinq à vingt millimètres de diamètre, de forme arrondie ou amygdalaire. Matrice sablo-argileuse beige (hydromorphie ?). Racines très peu nombreuses; quelques tubulures tapissées de fer et d'argile grisâtre permettent la pénétration de l'eau de percolation et de fines racines. Horizon tassé, compact mais se fragmentant facilement. Transition nette mais irrégulière (pénétration localisée dans l'horizon suivant).
- 60 140Rouge gravillonnaire (refus 40%); gravillons soudés en carapace compacte très dure à pénétrer. Gravillons arrondis (trois à dix millimètres de diamètre) mélangés à des concrétions (trente millimètres) de couleur rouge lie de vin avec des grains de quartz blancs et des grains noirs. Quelques tubulures (deux - trois centimètres de diamètre) enrobées de fer, remplies d'argile grisâtre, parfois colonisées par de fines racines. Cutanes ferro-argileuses rouges abondantes (lames minces). Transition progressive sur trente centimètres.
- 140 500 Argile bariolée rouge, ocre et blanc vers le haut mais de plus en plus grise à partir de deux cent cinquante centimètres et plus Texture argilo- sableuse de plus en plus limoneuse. Structure massive à débit polyédrique grossier peu développé. Horizon assez friable et riche en tubules blanchâtres où se logent quelques radicelles observées jusqu'au fond du puits. Cutanes abondantes rouges et jaunes, puis seulement jaunes à partir de trois mètres. Par suite de son organisation et malgré un rapport SiO2/Al2O3 qui le rapproche des sols ferrallitiques, ce profil à été classé (CPCS, 1967) comme un sol ferrugineux tropical lessivé peu profond sur carapace à cinquante centimètres.

Voir egalement (JENNY, 1964 et 1965; KALOGA, 1966) et l'annexe 1.2.1 ARRIVETS, ROOSE et CARLIER, 1973; ROOSE, 1979.

Note

Tableau 1.10a : FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL DE SARIA (HAUTE-VOLTA)

ERLO PROTECTION : 1972 (Labo. Central Analyse ADIOPODOUME)

| HORIZON | | Gris foncé | beige | sommet carapace | carapace | ar | gile bariol | бе | | | |
|--|--|--|---|--|---|--|---|--|---|--|--|
| PROFONDEUR (mini cm) (maxi cm) | | 0 18 | 25 35 | 35 45 | 55 100 | 125 145 | 175 200 | 225 250 | 275 300 | 350 | 450 |
| GRANULOMETRIE | | | | | | | | | | | , |
| Argile Limon fin Limon grossier Sable fin Sable grossier Refus SF/SG | 7 7 7 7 7 7 | 12.1 5.5 21 21.5 38.4 51 0.56 | 27.4 6.6 17.1 13.1 34.9 63 0.38 | 28.1 6.6 15 12.8 36.9 52 0.35 | 21.3 6.1 9.2 10.5 52.1 32 0.20 | 26.6 8.2 11.9 13.3 39.6 21 0.34 | 29.5 9.2 11.6 13.9 36.1 17 0.39 | 27.4 11.8 10.5 13.1 37.6 4.5 0.35 | 28.9 14.9 9.9 11.9 35.6 6 0.33 | 41.6 14.2 9.4 10 24.1 15 0.41 | 34.3 17.4 9.7 11.4 27.1 12 0.42 |
| MATIERES ORGANIQUES | °/ | 16.6 | 9.5 | 7.5 | 2.8 | 1.7 | 1.1 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.5 |
| Carbone Azote C/N Acides humiques Acides Fulviques Taux Carbone humifié AF/AH | */ */ - */ Z | 9.63 0.75 12.8 0.88 0.79 17.3 0.90 | 5.50 0.52 10.6 0.37 0.75 20 2.03 | 4.36 0.37 11.8 0.13 0.59 17 4.54 | 1.63 0.20 8.2 - - | 0.97 0.20 9.7 - - | 0.63 0.10 9. 0.02 0.08 14 | 0.40 0.07 10 - - - | 0.34 0.04 11 0.01 0.03 12 | 0.41 0.03 3 - - | 0.30 0.12 3 0.01 0.04 17 4 |
| CATIONS ECHANGEABLES | | | | | | | | | | | |
| Ca Mg K Na C.E.C. Saturation pH eau 1/2.5 | mé/100g. mé/100g. mé/100g. mé/100g. mé/100g. vé/100g. | 1.93 0.67 0.14 0.01 3.60 76 5.5 | 1.68 0.57 0.09 0.04 3.30 72 5.5 | 2.15 0.67 0.11 0.02 4.30 69 5.5 | 2.10 0.74 0.13 0.01 4.04 74 | 2.23 0.87 0.24 0.01 4.12 81 5.9 | 1.61 0.84 0.41 0.03 3.96 73 | 1.31 0.84 0.59 0.04 3.29 84 5.5 | 1.06 0.84 0.72 0.05 3.22 82 5.4 | 0.73 0.80 0.44 0.05 3.69 47 4.6 | 0.75 0.58 0.33 0.06 3.80 46 4.8 |
| | | | | | | | | | · . | | |
| ELEMENTS TOTAUX (attaque Perte au feu Résidus insolubles SiO ₂ Al ₂ O ₃ | triacide Z Z Z Z | 5 69.7 9.8 9 | 6.9 53.3 17.1- | 8.3 42.4 20.4 -18.9 | 9.9 26.6 26.2 24 | 9.6 27.9 26.1 23.7 | 10 25 27.6 24.7 | 9.8 25 28.4 25.8 | 9.8 26.5 29.4 26.3 | 10.7 18.6 33.2 29.8 | 11.1 17 34.6 28.9 |
| Fe ₂ 0 ₃ total libre | z z | 5,4 3.1 | 5.2 3.3 | 8.1 | 12.2 8.5 | 11.2 | 11.1 8.5 | 9.2 6.8 | 7•1 5 | 6.2 4.5 | 6 |
| TiO ₂ P ₂ O ₅ total Olsen Ca Hg K Na SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 7 */ */ mé/100g. mé/100g. mé/100g. | 1.03 0.76 0.05 - 21.34 2.55 0.97 1.85 | 1.13 0.47 0.01 24.32 6.17 2.58 1.90 | 1.06 0.42 0.01 | 1 0.35 0.01 - 18.86 3.62 1.61 1.86 | 1.01 0.24 0.01 - 26.80 4.04 1.61 1.87 | 1.03 0.20 0.01 | 0.94 0.16 0.01 - 14.39 4.68 1.61 1.87 | 0.86 0.12 0.01 4.89 4.47 1.94 | 0.95 0.18 0.01 23.57 46.65 5.96 1.94 1.89 | 0.81 0.16 0.01 2 23.82 5.53 1.29 2.03 |
| CARACTERES PHYSIQUES pF - 2 - 2,5 - 3 - 4.2 Instabilité Struct. IS Indice perméabilité Densité apparente | Z K cm/h | 5 2.5 2.2 1.82 | 8.3 2.6 2.8 | 10.5 | 11.2 5.1 | 13 | 12.1 3.3 | 13 2.5 | 12.2 | 13.8 | 13.4 |
| | K cm/h | | 2.6 | 1 1 | 1 | ĺ | | 1 | | | |

Tableau 1.10b : Description du profil de la case ERLO-DV de la parcelle de protection à Saria

- C.R.A. de l'IRAT près de Koudougou; 2/3 pente 1,4% sur granite -

Profondeur

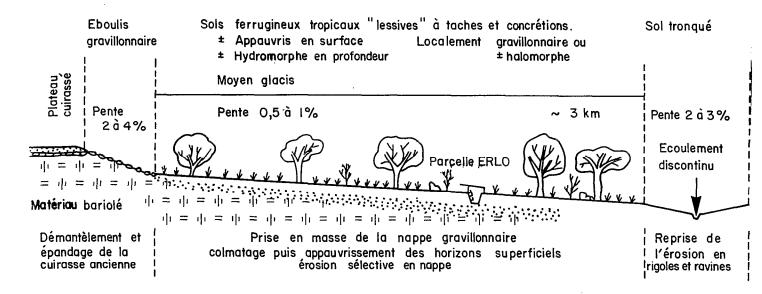
Description des horizons

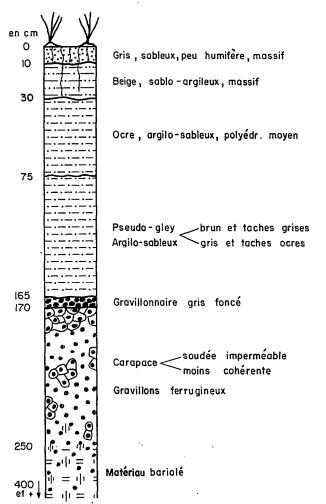
cm

- O 15 Gris foncé humifère, gravillonnaire (refus > 50%) à matrice sableuse. Structure fondue à polyédrique fine peu développée. Gravillons grisâtres en surface mais ocres à la cassure, quelques pseudo-concrétions plus tendres. Horizon meuble très poreux : porosité macrotubulaire et trois fentes fines par mètre courant jusqu'à quarante centimètres de profondeur en saison sèche. Nombreuses racines et activité biologique importante. Aucun revêtement dans les pores sauf dans les galeries de termites (lames minces). Transition assez nette mais ondulée.
- Beige plus clair, gravillonnaire (refus > 50%) à matrice sableuse avec des blocs feuilletés détachés de la carapace sous-jacente, pseudo-concrétions plus nombreuses. Horizon meuble, bien drainant; forte porosité macrotubulaire, nombreuses racines à direction dominante horizontale; importante activité biologique. Revêtement argileux jaune peu développé. Transition nette mais irrégulière.
- 35 85 Ocre rouille; carapace ferrugineuse litée avec feuillets noirs (manganèse) dure mais perméable. Racines rares se glissant dans des macroporosités obliques entourées d'un manchon ferrugineux et remplies d'argile blanchâtre. Horizon compact et cohérent. Nombreuses cutanes rouges et jaunes. Transition progressive.
- 85 500 Horizon d'argile bariolée rouge avec des taches ocre, jaune et plus et grise : ces taches blanchâtres deviennent dominantes vers quatre cent soixante quinze centimètres. Horizon friable de texture sablo-argileuse à gros grains de quartz, se délitant en grosses mottes ; structure fondue à débit polyédrique moyen bien développé. Quelques racines se faufilant dans les macroporosités et les tubules jusqu'à cinq mètres de profondeur. Cet horizon se retrouve identique en P7. Nombreux revêtements rouges et jaunes jusqu'à trois mètres.

Selon la classification française (CPCS, 1967) il s'agit d'un sol ferrugineux gravillonnaire érodé sur cuirasse litée en voie de désagrégation.

Fig. I.IO SCHEMA DE LA TOPOSEQUENCE DE LA PARCELLE ERLO DE GONSE PRES DE OUAGADOUGOU





2.8 Gonse

Les dispositifs ont été installés dans une parcelle de la "Forêt classée de Gonse", non loin des essais du Centre Technique Forestier Tropical concernant l'étude du bilan hydrique et la résistance à la sécheresse de diverses essences forestières locales ou importées (eucalyptus). La végétation est une savane arborée type à Butyrospermum parkii, Parkia biglobosa, Combretum glutinosum et divers épineux (Ziziphus, Acacia, etc..); elle est soumise à un feu précoce sauf sur la parcelle retenue, où le tapis graminéen évolue rapidement (touffes d'Andropogon et Pennisetum) en fonction de la date du feu auquel elle fut soumise. En fait, il existe toute une série d'associations végétales liées à la mosaïque de sols variant quant à leur profondeur, à l'hydromorphie et à l'induration.

La toposéquence schématisée figure 1.10 est typique de la zone granitique du plateau Mossi : elle est caractérisée par son mauvais drainage externe. Elle se compose de buttes tabulaires cuirassées de faible altitude, d'un court éboulis de cuirasse (pente 2 à 4%) et d'un long glacis d'épandage gravillonnaire (pente 0,5 à 1%) relié au lit mineur du marigot à écoulement temporaire par une étroite bande de sols ocres très érodés (pente 2 - 3%). Sur le glacis, la nappe gravillonnaire plus ou moins indurée est couverte d'un niveau de terre fine plus ou moins épais sur lequel s'est développée une mosaïque de sols ferrugineux tropicaux plus ou moins indurés, hydromorphes et parfois halomorphes.

La surface du sol sur la parcelle présente quelques traces discrètes d'érosion en nappe (déterrage des touffes d'herbe, cône de fonte de vieilles termitières, épandage de sable blanc et glaçage du sol entre les touffes) et de nombreuses petites termitières grises ne dépassant guère cinquante centimètres de haut (Trinervitermes).

Profil de la case ERLO sous savane arborée

La description et les résultats analytiques sont présentés aux tableaux 1.11a et b.

Les points essentiels à retenir sont les suivants :

- Le profil est formé de la succession de trois groupes d'horizons :
 - . un niveau de terre fine argilo-sableuse fortement appauvrie en particules fines sur 30 centimètres et à la fois colmatée et engorgée à la base sur 90 centimètres.
 - une nappe gravillonnaire épaisse d'un bon mètre, réduite en surface, imperméable, compacte, localement indurée ensuite.
 - . un niveau d'argile bariolée reposant vers 7 à 11 mètres sur une arène granitique et la roche pourrie.
- Du point de vue chimique, le niveau de terre fine est assez riche en bases, mais pauvre en phosphore et surtout en matières organiques (C et N). La capacité d'échange de cations (3 à 10 mé/100g. pour 10 à 40% d'argile) souligne la présence en profondeur d'un autre type d'argile que la kaolinite (il s'agit d'illite). Le taux de saturation du complexe est élevé (plus de 50% en surface et plus de 100% dans l'horizon hydromorphe) et le pH voisin de la neutralité (6 à 7,3).

Le sol apparaît comme un mauvais support physique pour les plantes : sensible à la battance, compact et vite engorgé en profondeur.

- La stabilité de la structure et la perméabilité sont médiocres dès la surface. La porosité totale est faible et la macroporosité quasi nulle dès soixante quinze centimètres de profondeur; sur un mètre d'épaisseur, le sol est complètement colmaté, tassé et présente diverses manifestations d'hydromorphie, surtout au voisinage de la cuirasse dont le sommet est imperméable. Les racines sont d'ailleurs presque toutes localisées dans les trente premiers centimètres : les rares racines d'arbres qui pénètrent au-delà de l'horizon ocre, sont toutes tortueuses, à la recherche de voies de pénétration entre les agrégats.
- Les phénomènes principaux à signaler sont donc l'appauvrissement en particules fines et la lixiviation des bases dans les trente premiers centimètres, le colmatage et l'hydromorphie dès soixante quinze centimètres de profondeur.



Photo 9 - Parcelle ERLO de Gonsé (Centre Haute Volta)

Sur ces pentes très faibles (0,5 %), l'érosion reste modeste (10 - 400 kg/ha/an), mais le ruissellement peut dépasser 50 % des pluies, en cas de feux tardifs, ce qui est intolérable dans les régions qui souffrent tant de la sécheresse.

Noter - la végétation arbustive mieux conservée qu'à Saria, car il s'agit d'une forêt protégée,

(Roose) - la faiblesse de la couverture herbacée de la parcelle, un an après un feu de brousse tardif.

Tableau 1.11a : FICHE ANALYTIQUE DU PROFIL DE LA CASE ERLO DE GONSE

| *************************************** | | T | I | | r | -T | | r | j | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| HORIZONS PROFONDEURS (mini cm) | | 0 | 20 | 40 | 90 | 120 | 150 | 160 | 200 | 366 |
| (maxi cm) | | 10 | 30 | 60 | 100 | 130 | 160 | 170 | 210 | 300 350 |
| GRANULOMETRIE | | | | | | | | | | |
| Argile Limon fin | z z | 7.7 5.4 | 14.1 5.6 | 41 4.3 | 40.1 5.4 | 38.8 6.5 | 40.3 7.7 | 40.5 7.8 | 39.3 5.5 | 26.7 |
| Limon grossier Sable fin | z z | 8.6 37.2 | 7.4 35.2 | 7.5 22.7 | 7 21.4 | 6.3 | 8.2 21.5 | 4.5 22.9 | 4.1 15.7 | 4.1 13.8 |
| Sable grossier Refus | z z | 38.3 0 | 36.8 0 | 23.2 | 23.1 | 29 0 | 23 6.7 | 24 13.2 | 33.4 67 | 48.3 74 |
| SF/SG | ~ | 0.96 | 0.96 | 0.98 | 0.85 | 0.70 | 0.93 | 0.95 | 0.47 | 0.29 |
| MATIERES ORGANIQUES | */•• | | | | | | | | | |
| Carbone Azote | */ */ | 4.66 0.30 | 4.02 0.28 | 2.38 0.23 | 1.18 0.15 | | | | | 1 |
| C/N Acides humiques | •/•• | 15.3 0.81 | 0.61 | 10.1 | 7.7 | | | | | į |
| Acides fulviques Taux carbone humifié | °/•• | 0.23 23 | 0.38 25 | | | | | | | - G |
| CATIONS ECHANGEABLES | | | | | | | | | <u> </u> | ļ |
| Ca | mé/100g. | 1.81 | 1.38 | 3.18 | 5.65 | 4.78 | 6.63 | 7.93 | 5.33 | 2.75 |
| Mg K | mé/100g. mé/100g. | 0.95 0.10 | 0.94 | 0.12 | 2.77 0.29 | 0.25 | 3.08 0.30 | 3.60 0.36 | 2.50 0.32 | 1.72 |
| Na C.E.C. | mé/100g. mé/100g. | 0.02 3.20 | 0.03 4.57 | 0.03 6.84 | 0.08 8.89 | 0.06 8.04 | 0.08 9.28 | 0.08 | 0.35 7.43 | 0.05 4.91 |
| Saturation pH eau 1/2,5 | 7 | 90 6.8 | 52 | 76 5.9 | 99 6.3 | 94 6.9 | - ** 7 | 7.3 | 7.2 | 95 |
| | | | <u> </u> | | - 1.V V - 1 | | | | | |
| ELEMENTS TOTAUX (attaqu | e triacide) | | | } [| | | | | 1 | |
| Perte au feu | z Z | 1.53 | 2.52 | 5.10 | 4.95 | 5.63 | 6.06 | 5.86 | 7.39 | 7.89 |
| Résidus insolubles SiO ₂ | ž | 89.59 3.53 | 83.08 6.68 | 57.57 17.60 | 58.55 17.34 | 54.28 18.63 | 51.83 | 51.99 20.65 | 40.72 22.14 | 34.20 22.93 |
| A1 ₂ 0 ₃ | z | 2.96 | 4.93 | 13.41 | 13.31 | 13.53 | 14.36 | 14.08 | 17.07 | 13.34 |
| Fe ₂ O ₃ total libre | z z z | 1.15 0.82 0.54 | 1.65 1.03 0.72 | 3.15 1.93 0.86 | 3.30 2.10 0.78 | 4.95 4.12 0.76 | 4.45 3.39 0.86 | 4.30 2.75 0.94 | 10.20 5.32 0.96 | 12.80 7.81 0.96 |
| P ₂ O ₅ total | °/ | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.27 | 0.24 |
| Ca | °/ mé/100g. | 3.86 | 2.54 | 3.51 | - 5.78 | 6.86 | 7.21 | 8.96 | 11.31 | - 7.99 |
| Mg K | mé/100g. mé/100g. | 3.72 0.83 | 3.62 0.83 | 6.52 | 7.64 2.09 | 10.72 | 10.98 | 2.46 | 4.78 1.39 | 7.92 2.38 |
| Na SiO ₂ / Al ₂ O ₃ | mé/100g. | 0.18 2.02 | 0.32 2.29 | 0.32 2.23 | 0.40 2.21 | 2.34 | 0.53 | 0.48 | 0.61 2.20 | 0.68 2.12 |
| CARACTERES PHYSIQUES | | | | | | | | | | |
| pF (- 2 - 2.5 | z . | 8.12 | 9.82 | 15.4 | 15.7 | 17.4 | 18.6 | 18.9 | 16.8 | 15.36 |
| 1-3 | z z | 6.66 5.33 | 8.72 8.15 | 15.3 14.5 | 14.9 14.3 | 16.3 15.3 | 18.5 18.2 | 18.5 17.7 | 14.5 14.2 | 13.97 13.47 |
| L- 4,2 Instabilité struct. IS | Z | 2.27 2.43 | 4.54 3.22 | 10.9 1.94 | 11.1 5.44 | 7.22 | 12.9 7.76 | 12.6 | 10.9 5.05 | 10.77 4.05 |
| Indice perméabilité Densité ∫apparente | K cm/h | 9.1 1.59 | 1.9 1.74 | 4.5 1.70 | 2.5 1.76 | 1.1 | 2.19 | 2.3 2.19 | 0.9 - | 2.76 |
| lréelle P oro sité (totale | - % | 2.50 36.4 | 2.49 30.1 | 2.50 32 | 2.46 28.5 | - | 2.64 12.4 | 2.64 | - | - |
| d macro micro | z z | 23.5 12.9 | 13 17.1 | 7.4 24.6 | 1.6 26.9 | - | 0 | 0 | - | - |
| | | | | | | | | | | |

Les chiffres obtenus pour les bases échangeables semblent majorés par des éléments solubles (feux). On ne peut donc calculer le taux de saturation.

Tableau 1.11b : Description du profil de la case ERLO-DV de Gonse

- Long glacis d'épandage gravillonnaire en profondeur pente 0.5% sur granite -

Profondeur Description des horizons en sec

cm

- 0 10 Gris clair en sec (2,5YR, 7/2) gris foncé en humide (2,5YR, 4/2) légèrement humifère, sableux. Structure lamellaire en surface (pellicule de battance) massive ensuite avec quelques minces fentes de dessèchement (tous les 75cm environ). Horizon boueux à l'état humide, très cohérent en saison sèche. Abondant chevelu racinaire et forte activité biologique. Transition nette et régulière.
- Beige, (10YR, 6/4 à 4/4) peu humifère sablo-argileux à structure massive avec quelques minces fentes de retrait. Abondantes racines de toutes tailles et forte activité des termites. Grains de sable très grossiers et quelques gravillons ferrugineux lie de vin avec patine, de diamètre inférieur à un centimètre. Horizon friable poreux. Cutanes jaunes dans les pores (lames minces). Transition nette (un centimètre) et régulière.
- Ocre, (7,5YR, 6/4 à 5,4) argilo-sableux à structure polyédrique moyenne bien développée. Horizon friable, bien colonisé par les racines mais beaucoup moins par les termites: la porosité vésiculaire y est rare et la macroporosité beaucoup moins développée - vers le bas présence de quelques taches ocre rouge et de petits gravillons arrondis de un à deux millimètres (type plomb de chasse). Cutanes mieux développées. Transition graduelle.
- Pseudogley à taches de couleur brune et gris (10YR, 7/4 à 6/4) jusqu'à cent quinze centimètres puis ocre rouille sur fond gris avec des concrétions mangasénifères et quelques gravillons ferrugineux. Texture argileuse; sables fins = 0.7 à 0.9 sables grossiers. Structure polyédrique moyenne bien développée. Horizon compact à l'état humide mais à l'état sec, il se délite facilement en petits polyèdres à tendance cubique. Quelques fines racines entre les agrégats et dans les galeries de termite mais pas de grosse racine. Nombreuses cutanes.
- 165 170 Horizon gravillonnaire gris foncé (10YR, 7/3 à 6/3), friable peu poreux, pas de racines. Transition nette.

- 170 250 Carapace ocre (7,5YR, 6/4) formée de petits gravillons ferrugineux à peine soudés et de graviers de quartz usés emballés dans une matrice argileuse ocre en voie d'induration. L'ensemble est compact, imperméable et soudé localement en une cuirasse. Transition progressive.
- 250 à 400 Argile bariolée ocre, rouille et blanc avec de nombreux et plus gravillons arrondis, sablo-argileux, perméable et sillonné de tubules.

Suivant la classification française (CPCS, 1967), il s'agit d'un sol ferrugineux tropical lessivé à taches et concrétions sur matériaux remaniés issues de granite, série pseudogley sur cuirasse en profondeur.

Note: Renseignements complémentaires dans les rapports de synthèse ROOSE et BIROT (1970) et ROOSE (1978).

3 - CONCLUSIONS SUR LE MILIEU DE L'EXPÉRIMENTÀTION

Les dispositifs expérimentaux mis en place sur le terrain tout au long de la séquence bioclimatique permettent d'aborder des situations contrastées du point de vue :

- climat : depuis le climat humide subéquatorial jusqu'aux régions sèches tropicales,
- végétation : sol nu, cultures diverses, savane présahélienne jusqu'à la forêt dense,
- roche : sédiments argilo-sableux, schistes chloriteux et divers granito-gneiss,
- paysage : depuis les modelés très entaillés jusqu'aux plateaux cuirassés entrecoupés de long glacis,
- sol : depuis les sols ferrallitiques très désaturés jusqu'aux sols ferrugineux tropicaux.

Du Sud au Nord, les pentes diminuent et les versants s'allongent, les précipitations diminuent, tandis que le pouvoir évaporant de l'air augmente : il s'en suit nécessairement des potentialités différentes d'érosion et de drainage.

Les sols forestiers sont généralement plus poreux et plus perméables que les sols ferrugineux tropicaux couverts de savanes dégradées par les feux. Cependant, une constante se dégage de leur comparaison : les horizons superficiels sont tous lixiviés en bases et appauvris en argile sans pour autant qu'apparaisse nettement le ventre d'argile de la couche texturale.

Il nous faut maintenant aborder l'exposé des méthodes expérimentales utilisées pour préciser les éléments des bilans hydriques et géochimiques et des transferts actuels de matières.

CHAPITRE 2 : LES METHODES

1 - JUSTIFICATION DES MÉTHODES

Le choix de l'approche a été fonction essentiellement du but que l'on s'était assigné, à savoir appréhender la dynamique actuelle et déterminer ses variations en fonction des conditions du milieu étudié.

La méthode classique, basée sur une analyse fine chimique et minéralogique des colonnes de sol, telle qu'elle a été exposée par LELONG (1969), LELONG et SOUCHIER (1970) ou FAUCK (1972) ne pouvait convenir, car elle se montre globale dans le temps et ponctuelle dans l'espace, (LELONG et SOUCHIER, 1979). Elle intègre bien l'échelle de temps pendant laquelle s'est développé le profil (cad l'héritage) ainsi que les échanges avec le reste de la toposéquence. Cependant, les difficultés surgissent lorsqu'il faut distinguer les phénomènes actuels alors que leur vitesse d'action est réduite et que les variations spatiales, à l'échelle du mètre, sont notables.

Il fallait donc envisager une autre méthode, basée sur des mesures continues effectuées in situ, de façon à préciser les différents termes du bilan actuel de pédogénèse et à déterminer les tendances évolutives, ponctuelles dans le temps et globales dans l'espace. Naturellement, il s'agit d'une méthode plus lourde puisqu'elle exige la mise en place d'une série de dispositifs en vue de mesurer tous les éléments du bilan en un même endroit; elle fournit une analyse plus fine de la dynamique actuelle des éléments en fonction de conditions les plus différentes possibles (végétation naturelle, culture, sol nu). Elle consiste à suivre l'évolution de volumes réduits, homogènes (petites parcelles) soumis aux conditions naturelles en analysant les mouvements de l'eau et de ce qu'elle transporte comme éléments solubles et solides, en des milieux aussi différents que la forêt dense installée sur des sols ferrallitiques très désaturés en bases et la savane soudano-sahélienne associée à des sols ferrugineux tropicaux.

Cependant, l'évaluation actuelle du bilan hydrique, et plus encore des migrations de matières, exige la conservation méticuleuse de la structure du sol et des voies préférentielles de circulation de l'eau que sont les macropores. En effet, l'hétérogénéité de l'infiltration comme de la plupart des propriétés physiques est bien connue de tous ceux qui l'ont mesurée sur le terrain (AUDRY et al., 1973, HUMBEL, 1970; FAUCK, 1956; CAMUS et al., 1976; LAFFORGUE et NAAH, 1977; ROOSE, 1972). HUMBEL (1975) rappelle que l'écoulement d'un fluide à travers un tube varie comme la puissance quatrième de son rayon et que si l'infiltration dans les sols varie généralement de l à 100, donc beaucoup moins que le suggère la loi de POISEUILLE, cela provient des sinuosités des macropores. Perturber le moins possible l'architecture des pores du sol fut donc une préoccupation majeure pour le choix et la mise au point des dispositifs que nous allons brièvement décrire puis critiquer. Ils ont été conçus pour apporter des données précises sur les flux d'eau et de matières.

Nous envisagerons tout d'abord les dispositifs spécifiques mis au point à cet effet, à savoir :

- Les cases d'érosion dont le but est de chiffrer le ruissellement et et l'érosion superficielle;
- les cases de lessivage oblique (ERLO) qui permettent en outre d'appréhender le drainage oblique qui circule à l'intérieur des différents horizons du sol (volume et charges);
- les cases de drainage vertical (DV) où est mesurée la percolation des eaux libres à travers des monolithes de sol (volume et charges).

Ensuite, nous préciserons les conditions de mesure de deux données fondamentales pour notre projet, à savoir les précipitations (volume et charges) et les remontées biologiques d'origine végétale et animale.

2 - DESCRIPTION ET ANALYSE CRITIQUE DES DISPOSITIFS PRINCIPAUX

21 : Les cases d'érosion.

Elles sont composées d'une parcelle de quelques dizaines à quelques centaines de mètres carrés complètement isolées de l'extérieur par des tôles fichées en terre sur au moins dix centimètres (FOURNIER, 1954; ROOSE, 1968 et 1973). A l'aval un canal récepteur dirige les eaux et les terres érodées vers un système de stockage composé d'un piège à sédiments et de plusieurs cuves reliées entre elles par un partiteur. Elles permettent la mesure du volume des eaux ruisselées à la surface du sol et du poids des terres érodées, des particules fines migrant en suspension plus ou moins stable sur de grandes distances et des particules plus grossières (sables et agrégats) rampant de proche en proche. A Gampela et Allokoto (dispositifs C.T.F.T.), les parcelles sont plus grandes (environ 5000m²) et sont munies à l'aval d'une grande cuve (4m³) dotée d'un seuil triangulaire et d'un limnigraphe Richard (BIROT et GALABERT, 1967). Les levées de terre compactée qui isolent les parcelles introduisent malheureusement une certaine erreur sur les transports solides (1 à 2 t/ha).

Etant données les erreurs provenant essentiellement du partiteur, du mode de prélèvement de la charge solide en suspension dans les eaux (intégration de gros volumes d'eau ruisselée) et de l'humidité des terres de fond, on ne peut espérer une précision des résultats à moins de dix pour cent près (ROOSE, 1973). On verra au chapitre IV que les perturbations apportées au sol lors de la mise en place des bordures peuvent entraîner une augmentation artificielle de l'érosion qui peut atteindre une à deux t/ha la première année sur de fortes pentes sans que le ruissellement ne change : ces erreurs sont d'autant plus visibles que le milieu est bien couvert par la végétation et les transports solides réduits.

On peut se demander qu'elle est la signification des mesures sur petites parcelles d'érosion classique et leurs qualités propres par rapport aux capteurs de sédiments ouverts sur le versant, aux mesures sur un grand nombre de repères (par exemple les aiguilles) ou aux mesures de débits liquides et solides sur des bassins versants de diverses tailles.



Photo 10 - Parcelles d'érosion d'Adiopodoumé de 7 % de pente.

Noter - l'érosion en nappe sur une parcelle nue protégée par une pulvérisation de Curasol, (Roose)

- au fond, la forêt dense humide secondarisée.

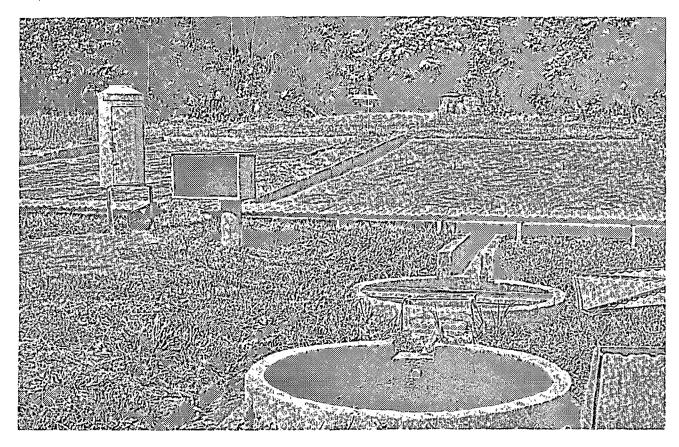


Photo 11 - Dispositifs de mesure des pluies, du ruissellement et de l'érosion à Adiopodoumé. Un pluviographe à mouvement journalier, une (Roose) parcelle close, un canal de réception couvert et deux cuves reliées par un partiteur très simple protégé par une série de filtres.

L'isolement de parcelles de petites dimensions (50 à 5000m²) bien représentatives d'un type de sol et de pente, permet des comparaisons valables de l'influence de différents facteurs (pentes, couverts, techniques culturales) sur l'infiltration et les phénomènes d'érosion en nappe ou en rigole. Les parcelles d'érosion classique, par contre, ne donnent pas la valeur absolue du ruissellement et de l'érosion en un point du versant, car les bordures artificielles des parcelles empèchent les apports d'eau et de terre provenant des surfaces situées en amont. Si le but essentiel de l'expérimentation est l'étude de la pédogénèse en milieu naturel (et non la comparaison des effets de différents couverts végétaux), il faut veiller à ce que les parcelles intègrent le sommet du versant (cas de R2 à Adiopodoumé et des parcelles du Djebel Dissa dans le Sud Tunisien).

Cependant, cela semble difficile pour des raisons pratiques sur des versants très longs. On peut alors se demander si l'erreur due à l'isolement des parcelles est significative (en plus ou en moins) car le ruissellement (et l'érosion) sous forêt et savanes denses n'est pas forcément un phénomène cumulatif, surtout s'il reste en nappe ou en filets intensément anastomosés. Les rares mesures de l'effet de la longueur de pente sur l'érosion (en milieu naturel ou cultivé africain) montrent qu'au-delà d'une certaine limite (variable selon les sols et l'aménagement de leur surface) les valeurs ont tendance à se stabiliser sinon à diminuer, en raison des forces de frottement dues aux irrégularités de la surface du sol, au chevelu racinaire superficiel, aux nombreuses tiges des graminées ou à la litière de feuilles sous forêt, à la forme concave ou irrégulière des versants qui possèdent de nombreux pièges à sédiments (replats, trous de racine, anciens terriers, galeries creusées par la mésofaune).

Ouvrir la partie supérieure de la parcelle pour intégrer l'ensemble du versant nous paraît une mauvaise solution, car elle ne permet pas de connaître l'origine des eaux et des sédiments captés, pas plus que de quantifier la lame ruisselée ou érodée (égale Volume/surface). S'il s'agit d'une étude qualitative, les capteurs ouverts qui comportent les mêmes dispositifs de capture et de mesure qu'une parcelle d'érosion

classique (plus ou moins simplifiés), mais aucune bordure (toujours source possible d'erreur) peuvent donner de bons résultats. Leur dispersion en grand nombre dans diverses positions clés d'un versant permet de se faire une bonne idée de l'activité érosive au cours de l'année sur chaque secteur du versant.

Certaines techniques antiérosives (labour et billonnage en courbe de niveau, terrasses, etc...) ne peuvent s'étudier que sur petits bassins versants de quelques hectares. Si les études sur petits bassins peuvent donner des résultats remarquables, il faut toutefois noter que plus le bassin est grand, moins le milieu est homogène et moins l'analyse des facteurs de l'érosion est précise. De plus, les mesures de débit effectuées sur bassins versants par les hydrologues et les sédimentologues intègrent non seulement l'érosion en nappe et rigole des versants, mais aussi l'érosion linéaire au fond des rivières, les ravinements et les éboulements des berges et des versants, de même que la sédimentation au pied des pentes et dans les plaines.

Toutes ces méthodes exigent une présence quasi permanente sur le terrain pendant les événements pluvieux. Si on ne peut envisager que des passages intermittents, il est encore possible de mesurer l'évolution du niveau du sol par rapport à des repères naturels (collet ou racines des arbres dont on connaît l'âge) ou artificiels (longues aiguilles fichées dans le sol, lignes de poteaux sur lesquels on pose des poutrelles de mesure ou entre lesquels on tend des fils, potences, etc..) (HUDSON, 1964 et 1973; GLEASON, 1957; BOURGES et al., 1973). Ces méthodes sont séduisantes, car elles exigent peu de moyens et peu de temps pour effectuer les mesures (un ou deux jours tous les deux à cinq ans) et respectent au mieux le milieu. Cependant, la précision des mesures est très faible, environ mille cinq cents fois plus faible que celle des parcelles d'érosion classiques (une baisse de un millimètre du niveau du sol correspond à une érosion d'environ 15t/ha) (HUDSON, 1973). De plus, la hauteur du sol peut varier sans que la terre soit érodée ou sédimentée. Le sol "respire" : il gonfle en saison de pluie avec l'augmentation de l'humidité du milieu et se rétracte en saison sèche. La mésofaune peut creuser des galeries, changer sa densité apparente et déposer à sa surface des déjections ou divers monticules qui s'étaleront plus ou moins au cours des

averses. Aussi, ces méthodes sont-elles réservées à des reconnaissances du niveau général de l'activité érosive, à des mesures localisées à des têtes de ravine ou des cônes de sédimentation où les changements de hauteur sont rapides, ou encore à des zones peu accessibles où les mesures ne peuvent se faire que de loin en loin (moyennes sur dix ans en espérant que les repères aient survécu hors de toute surveillance).

En résumé, à chaque type de question posée correspond une échelle d'observation et une méthode d'expérimentation appropriée. Les petites parcelles d'érosion ont rendu de grands services pour comprendre les mécanismes de l'érosion et en distinguer les causes et les facteurs. En leur adjoignant un certain nombre de dispositifs et de mesures complémentaires, nous pensons pouvoir en tirer des conclusions intéressant le bilan hydrique et la dynamique actuelle de quelques types de sols.

2.2. Les cases de mesure de l'érosion, du ruissellement et semme du lessivage oblique (ERLO)

Le dispositif des cases ERLO a déjà été décrit en détail (ROOSE, 1968).

Lorsque les eaux d'infiltration se heurtent à des horizons moins perméables, elles forment des engorgements ou des nappes temporaires d'eau libre susceptible de s'écouler dans le sol vers les points bas de la toposéquence et de provoquer des transports obliques de matière. L'objectif des cases ERLO est de capter des échantillons de cette eau de gravité qui percole obliquement à travers les différents horizons du sol en vue d'analyser leur charge soluble et solide et éventuellement d'évaluer l'intensité des migrations par cette voie. Le dispositif est constitué d'une part, d'une parcelle d'érosion classique (parcelle isolée, canal récepteur, cuves de stockage) et, d'autre part, d'une fosse (2 x 2 x 1 mètre) dont la face amont a été étançonnée (bois très dur enrobé de résine); des fentes de quinze centimètres de profondeur ont été creusées dans le sol sous chacun des principaux horizons (jusque vers 150 à 200cm) pour y fixer des gouttières plastifiées reliées

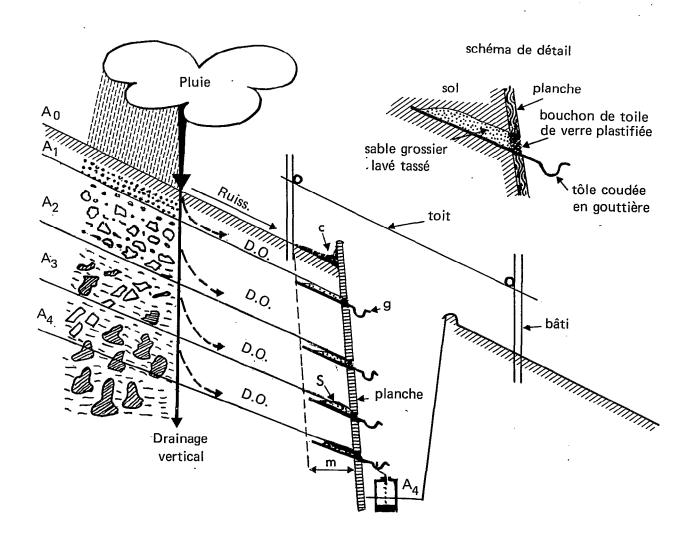


Fig. 2.1 SCHEMA D'UNE CASE DE LESSIVAGE OBLIQUE (ERLO DE AZAGUIE

par des tuyaux à des jerrycans de soixante litres. Du sable grossier de quartz lavé et tassé maintient en place les gouttières et assure un bon contact entre le sol et les gouttières. L'ensemble est couvert d'un toit de tôle (fig.2.1 et 2.2). Le mur amont étant protégé des eaux de pluie par le toit, et du ruissellement par le canal (toile de verre plastifiée sur place), les eaux qui s'écoulent dans les gouttières proviennent nécessairement d'une nappe d'eau libre s'écoulant obliquement à l'intérieur du sol.

Ce dispositif constitue en somme un type particulier de lysimètre, de surface grande mais mal précisée (les tôles de bordures sont fichées dans le sol sur dix centimètres de profondeur et n'arrêtent que le ruissellement superficiel), sans bordure latérale (il respecte donc les phénomènes naturels de drainage) et dont le fond est constitué par un horizon imperméable ou tout au moins nettement moins perméable que les horizons susjacents. Comme dans tous lysimètres, du fait de la rupture des capillaires au niveau du contact sol/tôle réceptrice, on néglige la migration de l'eau sous tension ainsi que des éléments solubles et des solides qu'elle transporte. Bien que nous n'ignorions pas leur réalité (GOMBEER et D'HOORE, 1971), nous pensons qu'étant données la faiblesse du débit et la lenteur des déplacements de l'eau sous tension, la charge soluble et solide transportée est faible en regard des migrations associées à l'eau libre au coeur de la saison des pluies (surtout en zone tropicale humide).

Certains observateurs pensent que cette méthode sousestime le drainage oblique du fait que la tranche de sol ("le mur sec") protégée par le canal de ruissellement doit d'abord être humectée avant de laisser s'écouler l'eau à travers ses pores (BERTRAND, communication écrite du 19 décembre 1972). Pour le vérifier, toute une série de profils hydriques parallèles à la surface du sol, ont été réalisés sur la face amont de la fosse ERLO pour mettre en évidence un éventuel gradient d'humidité à mesure qu'on s'approche des planches de soutènement. Les résultats des mesures effectuées à Anguédedou, Adiopodoumé (R3), Bouaké et Korhogo montrent que les différences d'humidité sont toujours faibles et pas forcément systématiques; dans le pire des cas le sol situé

directement contre les planches de soutènement est légèrement plus sec (1% en moins) que le sol situé à plus de cent cinquante centimètres devant le dispositif et seulement sur une tranche de cinq à dix centimètres. Les planches (et le toit) jouent donc un rôle capital pour limiter l'évaporation au niveau du "mur sec" (qui ne reçoit ni pluie, ni drainage) et la succion latérale compense aisément les pertes d'eau artificielles dues au dispositif (fosse). Un simple calcul (*) montre d'ailleurs qu'il s'agit de quantités peu importantes de l'ordre de deux à quatre litres, ce qui ne changerait en rien nos conclusions sur la faible importance du drainage oblique par rapport au bilan annuel (moins de un pour cent) dans les circonstances où nous les avons étudiées.

D'autres observateurs estiment que l'on ne recueille par cette méthode que les eaux circulant au sommet de la nappe phréatique ou craignent que la tranchée n'accélère la circulation des eaux libres. Or, les expériences ont montré que les échantillons recueillis en début de saison des pluies proviennent généralement des horizons superficiels: ils sont donc sans rapport avec la nappe phréatique qui, à Adiopodoumé par exemple, se trouve à plus de dix mètres de profondeur à cette époque. Par contre, il est probable que le simple fait de creuser une fosse accélère le mouvement latéral des eaux libres qui engorgent certains horizons lors des plus fortes averses; la fosse agit comme un drain qui diminue les forces de frottement de l'eau contre les parois des pores (AUDRY, Communications écrites en 1972 et 1973). Il nous semble cependant que si le temps de réponse et de transit des eaux est légèrement diminué le volume du drainage oblique n'est guère modifié (ni sa charge soluble ou solide) qui de toute façon reste très faible. S'il en avait été autrement, nous aurions aperçu lors du démontage des dispositifs des modifications de structure et de porosité, des dépôts ou, au contraire, des vides au contact entre le sol, le sable lavé et les gouttières réceptrices.

^{(*):} Volume de terre concernée = 2 x 2 x 0.05 à 0.10 = 0.2 à 0.4m³.

La variation d'humidité constatée au voisinage des planches de soutènement étant de 1%, l'absorption par le "mur sec" égale 2 à 4 litres par averse sur 2 mètres de profondeur.

D'après les travaux de laboratoire de NORTCLIFF et THORNES (communication orale au Symposium de l'Union Internationale des Géographes qui s'est tenue à Paris en octobre 1978 sur le sujet : Méthodes de terrain pour mesurer la dynamique des versants) la position des tôles réceptrices du drainage oblique est très importante en ce qui concerne l'efficacité du captage. Pour obtenir le meilleur captage des eaux de drainage oblique, il faut que la tôle soit posée quelques centimètres sous la limite des horizons de perméabilité différente, comme c'est le cas dans nos dispositifs.

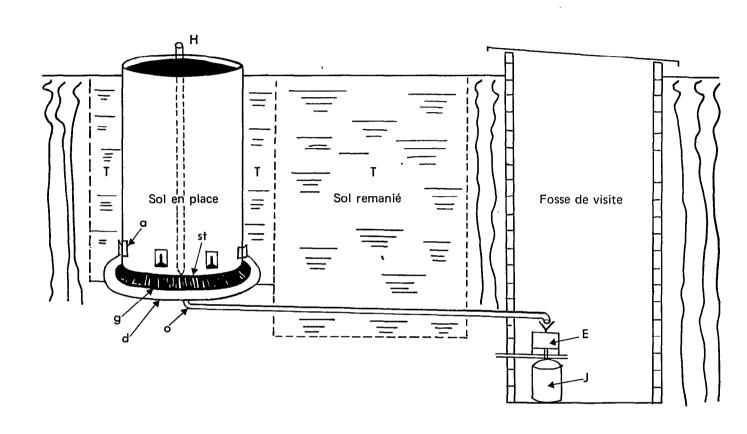
L'origine des eaux de drainage oblique recueillies est mal précisée. En effet, s'il est possible de délimiter une parcelle en vue de réaliser une mesure quantitative du ruissellement superficiel, par contre on risque de troubler gravement les conditions naturelles d'écoulement du drainage oblique en tentant de circonscrire les horizons profonds d'une parcelle. Dans un cas particulier cependant, il est possible d'obtenir une mesure quantitative : lorsque la parcelle englobe le sommet du versant. Mais ce manque de précision sur l'origine des eaux de drainage oblique recueillies n'est pas très gênant, car les volumes drainés obliquement sont faibles par rapport aux autres éléments du bilan hydrique et dans la mesure où il importe surtout de connaître la qualité des eaux libres à chaque niveau. Le drainage vertical peut être estimé par calcul* ou par la méthode lysimétrique : le produit des charges par le volume drainé permet d'estimer les flux.

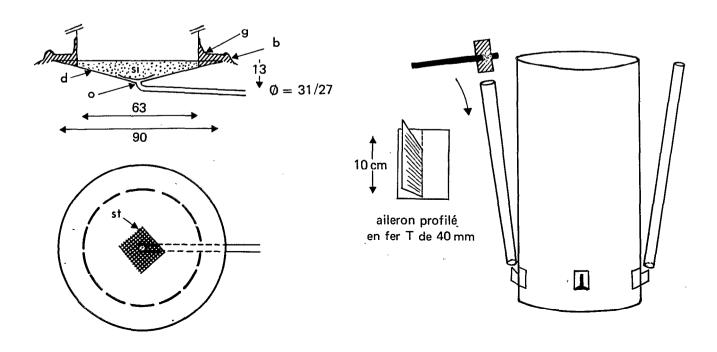
2.3.: Les cases de drainage vertical (DV)

Le drainage oblique étant réduit dans la plupart des stations d'observation et limité à une courte période de l'année, il s'est avéré nécessaire pour préciser la qualité des eaux de percolation de capter les éaux de drainage vertical, beaucoup plus abondantes d'après les bilans hydriques calculés.

^{*} Note: La méthode d'estimation du bilan hydrique par calcul sera exposée au chapitre 4.

SCHEMA D'UNE CASE DE DRAINAGE VERTICAL (Lysimètre monolithique)





Il ne pouvait être question d'avoir recours aux lysimètres classiques formés d'une cuve remplie d'un sol reconstitué, car la dynamique de l'eau libre est étroitement liée à la macrostructure (Mc INTYRE et LODEVAY, 1968; SHARMA et UEHARA, 1968). En reconstituant le sol, on modifie forcément la macroporosité et donc la vitesse de circulation des solutions, les temps de contact entre percolat et les particules solides et on peut craindre que leurs charges solubles et solides en soient affectées.

La méthode des casiers drainant que nous avons testée en 1970, est intéressante, car elle permet de respecter la structure et le réseau racinaire très dense dans les horizons superficiels (ROOSE et Henry des TUREAUX, 1970). Malheureusement les essais sous irrigation et sous pluie naturelle ont montré que ces casiers, quelle que soit leur forme, ne fonctionnent qu'à l'occasion de très grosses averses (trois à cinq jours par an) et leur rendement (drainage observé/drainage calculé) est faible (généralement 5 à 20%) et très variable pour un même traitement (ROOSE, 1979).

Pour arriver à boucler correctement le bilan, il a paru indispensable d'isoler complètement le monolithe de sol à l'aide d'un cylindre de tôle galvanisée rendu solidaire d'un cône drainant (rempli de sable grossier lavé) par du goudron coulé à chaud : ce dernier assure également un bon contact sol/tôle (voir figure 2.3 et pour le détail cf. ROOSE et Henry des TUREAUX, 1970). La forme cylindrique a été adoptée pour limiter les effets liés aux bordures : les lysimètres ont une surface de 0.312m² et un diamètre de 63 centimètres (déterminé par la dimension des tôles du commerce) ce qui permet l'usage d'un humidimètre à neutrons. Des essais préliminaires ont montré que sur les sols sablo-argileux, on ne peut réduire le diamètre sans risquer l'écrasement de la colonne de sol : l'augmentation du diamètre est également délicate à cause des difficultés à surmonter pour mettre en place le fond drainant. Quatre-vingt-onze cylindres ont été introduits en force jusqu'à des profondeurs comprises entre quarante et cent quatre-vingts centimètres dans des sols très divers (sablo-argileux, mais aussi graveleux ou cuirassés).

Pour vérifier qu'il n'existe pas de voie préférentielle d'écoulement (fente ou vieille racine), chaque cylindre est testé par une irrigation d'eau chargée de suspension. Si le sol a été reconstitué ou est trop perturbé lors de la mise en place, le front d'eau atteint cent cinquante centimètres au bout de cinq à six heures et les eaux sont jaunes et troubles. S'il y a une fente de décollement entre le cylindre et le sol, le drainage est accéléré (cinq à trente minutes), s'arrête rapidement et les eaux restent troubles. Au cas où tout est normal, le drainage commence une à trois heures après le début de l'irrigation et les eaux sont claires ou légèrement opalescentes. Après vingt quatre heures, quatre-vingts pour cent des percolations ont été captées, mais il faut deux à trois semaines pour que le débit tarisse après la grande saison des pluies en basse Côte d'Ivoire : il semble que la barrière des interfaces sol - sable - drain soit partiellement levée, car le monolithe pèse de tout son poids (200 à 800 kilos) sur le drain.

Cette méthode est facile à mettre en oeuvre, même si l'on ne dispose que de moyens très limités. Son faible coût permet les nombreuses répétitions rendues nécessaires par l'hétérogénéité du sol et de sa macroporosité. Les expériences ont montré que s'il est aisé d'obtenir une bonne précision sur les volumes drainés avec quatre répétitions (CV = 10 à 20%), la qualité chimique des eaux peut varier dans une large mesure d'un lysimètre à l'autre (mauvaise répartition des engrais ou phénomènes naturels?) au point d'oblitérer la signification des différences entre traitements (ex. essais maïs ou ananas fertilisés à Adiopodoumé). On peut cependant reprocher à cette méthode un certain nombre de limites liées, soit à la méthode lysimétrique elle-même, soit aux dimensions des monolithes.

- <u>La méthode lysimétrique implique</u>, qu'au fond des cuves, une discontinuité (tôle ou drain au sens large) vienne interrompre les capillaires et donc la migration de l'eau sous tension (et de sa charge). Une partie des eaux susceptibles de drainer en milieu naturel reste donc au fond des lysimètres (engorgement au moins temporaire avec taches ferrugineuses observées à Korhogo dans la couche de sable lavé) et cette perturbation est d'autant plus importante que le lysimètre est peu profond et la texture du sol est fine.

D'après HARROLD, DREIBELBIS et KONHKE (1958, 1967), la profondeur



Photo 12 - Case de drainage vertical (détail au démontage).

Noter - le matériel s'est bien comporté pendant 5 ans,

- la tôle 12/10 en fer galvanisé est blanchie (oxydation) et attaquée superficiellement par les racines,
- le goudron de route qui assure une bonne étanchéité et un bon contact sol/tôle n'a pas souffert,
- les tuyaux de plastique qui relient le fond des lysimètres aux bidons de stockage ont quelquefois été abimés par les rongeurs,
- le sol remué autour des lysimètres n'a toujours pas repris sa structure naturelle. On peut donc se poser des questions sur la représentativité de la dynamique de l'eau et des matières dans les lysimètres reconstitués.

(Roose)

des lysimètres est au moins aussi importante que les effets de bordure (jamais chiffrés quoique souvent cités) et il faut prévoir une profondeur minimale de un mètre en terrain sableux, un mètre cinquante à deux mètres sur des sols argilo-sableux et plus de deux mètres en milieu très argileux pour réduire ces erreurs à moins de dix pour cent. Pour la plupart des sols étudiés dans notre réseau, il n'y a plus guère de différence systématique du volume drainé au-delà de cent cinquante centimètres de profondeur. En zone tropicale sèche, le pouvoir évaporant de l'air est si desséchant que ce sont les drains les moins profonds qui fournissent le plus de drainage (voir Gonse, Saria et même Korhogo: ROOSE, 1977 à 1979). La présence de cette zone engorgée au fond de drains pourrait avoir des conséquences fâcheuses sur la migration des colloïdes très sensibles aux variations des conditions d'aération du milieu. Les expériences de terrain ont montré que les eaux de drainage recueillies au fond des cases DV en milieu naturel sont moins chargées en colloides, fer, alumine et matières organiques que les eaux libres recueillies à la même profondeur dans les cases ERLO.

Pour éviter ces inconvénients, certains auteurs utilisent des plaques poreuses au fond des lysimètres et appliquent une tension du même ordre que le sol en place voisin (SWANSON), malheureusement ces dispositifs retiennent les colloïdes et se colmatent.

Une expérimentation faisant intervenir des mesures neutroniques de l'humidité et des mesures tensiométriques pour estimer les
flux a été mise en place à Manankazo (Madagascar) pour mettre en évidence
la différence de drainage qui devrait théoriquement exister entre celui
qui est mesuré au bas d'un lysimètre fermé du même type que le nôtre
(profondeur égal 180cm, diamètre égal 63cm), au bas d'un cylindre non
fermé et surtout dans le sol en place non aménagé. Bien qu'il ait été
montré que les flux ne sont pas organisés de la même manière, le drainage
fut plus important dans le lysimètre fermé que dans le sol en place
(résultat inverse de celui que la théorie laissait prévoir !).

JOURDAN, MARINI et VILLEMIN (1978) interprètent leurs résultats en
soulignant l'importance de l'hétérogénéité du sol; on pourrait aussi
estimer que la théorie ne recouvre pas encore toute la complexité du
phénomène naturel!

- D'autres limites sont inhérentes à la surface réduite des dispositifs. Elle n'intègre pas la maille de l'hétérogénéité du sol et encore moins de certains couverts végétaux (forêts, plantations arbustives, savanes arborées) : d'où la nécessité de nombreuses répétitions par objet d'expérimentation. Par contre, ces dispositifs peuvent rendre de bons services dans le cadre d'études sur les fourrages, le mais, mil, sorgho, arachide, ananas et autres plantes cultivées dont la densité et la taille sont compatibles avec la surface du drain. Sous forêt, hydrique mesuré à l'aide d'une batterie de quatre lysimètres, est complètement faussé d'une part, parce que les précipitations ne sont plus distribuées de façon homogène sous la voûte foliaire et d'autre part, parce que pour introduire les cylindres, il est nécessaire de trancher le chevelu racinaire très superficiel et à tendance horizontale; l'évapotranspiration étant ainsi fortement réduite, le drainage recueilli est beaucoup trop abondant et bien souvent les éléments nutritifs n'étant plus captés par les racines, sont lessivés rapidement lors des premiers orages (ex. R2 Adiopodoumé, Azaguié et Divo).

Pour éviter les variations de drainage dues à l'hétérogénéité du ruissellement de surface, nous avons été amené à faire dépasser les bordures des lysimètres au-dessus de la surface du sol. Mais en forçant ainsi toutes les eaux de pluie à s'infiltrer dans le sol, on a augmenté artificiellement le drainage par rapport à celui qui existe dans la nature. Il faut donc soustraire au drainage brut mesuré en lysimètre, le ruissellement observé en parcelle d'érosion (ou tout au moins une large proportion : quatre-vingts pour cent) qui a lieu à la même époque que le drainage (lorsque le sol est gorgé d'eau). Si le ruissellement est négligeable sous forêt ou sous culture fourragère, il n'en va pas de même sous mais et sa prise en compte modifie considérablement l'évaluation du drainage sous certaines cultures.

Une autre approche des problèmes de migration dans les eaux de drainage consiste d'une part à calculer le drainage (FRANQUIN et FOREST, 1977) et, d'autre part, à analyser les solutions du sol recueillies à l'aide de capsules poreuses soumises à une faible dépression. Cette méthode contourne plusieurs des obstacles cités plus haut; elle a été

utilisée au Sénégal (PIERI, 1979) et aux U.S.A. (WARREN, 1973). Il semble cependant, d'après les travaux de HANSEN et HARRIS (1975) et ceux de PIERI (1979) que les résultats (volume des extraits et teneurs) soient largement dépendants des conditions d'application de la méthode : les teneurs dépendraient des tensions exercées dans les capteurs, du débit d'entrée de la solution (donc de la taille des pores de la capsule) et du colmatage des pores de la céramique. Cette technique ne permet pas d'aborder la migration des solides ni des colloïdes; d'après NIELSEN (1972), la céramique peut exercer une certaine filtration de la solution captée par rétention de nitrates, de phosphate et probablement de tous les éléments comme le fer, la silice, l'alumine et les matières organiques qui migrent pour une bonne part liés à des colloides. Par ailleurs, il ne nous semble pas évident que les solutions extraites du sol à quelques périodes de l'année (donc provenant en majeur partie des micropores, c-à-d. la réserve hydrique du sol) donnent une bonne évaluation des qualités des eaux de drainage dont la majorité circule rapidement et pendant de courts laps de temps dans les macropores.

Il n'y a donc pas de solution parfaite et il faut chercher à adapter les méthodes choisies aux problèmes abordés en vérifiant le plus souvent possible les résultats par un faisceau d'informations d'origine la plus diversifiée possible.

Il faut aussi souligner la nécessité de continuer les mesures en lysimètres pendant une période suffisamment longue (au moins dix ans d'après BELOUSOVA, 1979) pour en tirer des enseignements corrects sur la dynamique des sols; certains équilibres microbiologiques sont, en effet, assez lents à atteindre (GADET et SOUBIES, 1962, 1963, 1972).

2.4. Le simulateur de pluie

La majeure partie des résultats de cette synthèse ayant été obtenue sous pluies naturelles, nous nous contenterons d'évoquer l'intérêt et les limites des simulateurs de pluie et de décrire brièvement (note 1)

Note 1 : le lecteur pourra trouver davantage de détails sur l'intérêt, les limites et la description des principaux types de simulateur en consultant les publications de MEYER (1958 et 1960), SWANSON (1965), HUDSON (1956-1973) et VALENTIN (1978).

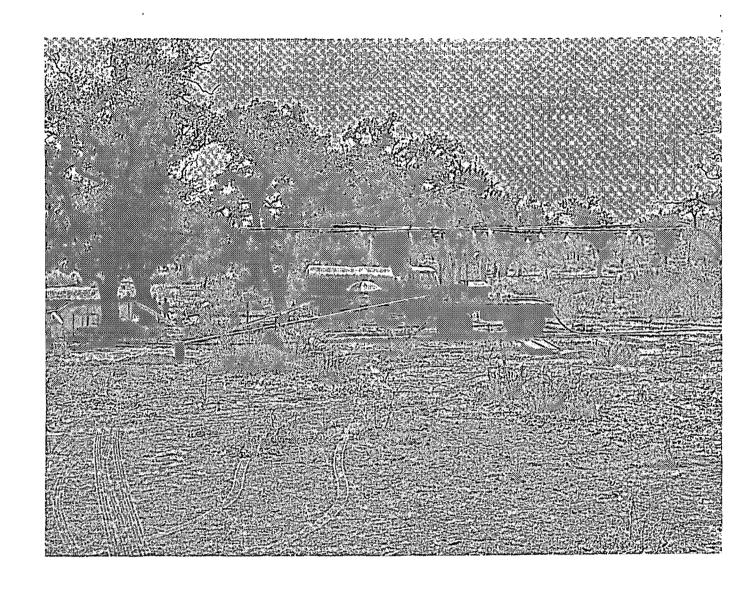


Photo 13 - Le simulateur de pluie de l'ORSTOM à Puni (Haute Volta).

Noter - le camion citerne, la réserve d'eau puisée dans le lac de Bam ; le simulateur à dix bras tournant à 4 tours/minute, portant (Roose)

30 gicleurs et les deux parcelles (nue et travaillée, naturelle) munies de dispositifs d'enregistrement.

le modèle qui a été mis au point à Adiopodoumé par toute une équipe de pédologues et d'hydrologues (ROOSE et Henry des TUREAUX dans une première phase, puis BOUCHEZ et enfin ASSELINE, COLLINET, LAFFORGUE et VALENTIN).

L'intérêt d'un simulateur de pluie réside dans la possibilité qu'il offre de faire varier à volonté les caractéristiques des pluies
dans des conditions expérimentales précises et programmées et, en particulier, d'observer dans d'excellentes conditions de travail la réaction
d'un champ (sol x humidité et structure des horizons de surface x végétation x techniques culturales x pente) à des averses de fréquence rare.
Son utilisation programmée dans le temps permet d'analyser les phénomènes d'infiltration et d'érosion à l'échelle de l'averse (ou même de
ses différentes phases) et de modéliser l'influence des différents
facteurs étudiés séparément ou en combinaisons de plus en plus complexes.
C'est un instrument de choix pour étudier la variation spatiale et
étendre à l'ensemble des sols reconnus lors d'une cartographie régionale,
les résultats acquis sous pluie naturelle sur un nombre limité de sols
en station (essais de longue durée).

L'usage des simulateurs implique aussi certaines limites :

- limites spatiales d'abord; puisqu'il n'est pas possible d'arroser tout un versant, les phénomènes cumulatifs le long des versants échappent en . grande partie à ce genre d'expérimentation.
- limites temporaires ensuite, car il est peu probable que tous les sols réagissent de la même façon à des séries d'averses (400 à 1200mm) réparties sur trois à cinq mois (pluies naturelles) ou concentrées en une à quatre semaines (pluies simulées) (ex. évolution lente des fentes des vertisols et variations saisonnières de la structure sur les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux).

Après deux mois de mission (ROOSE, 1968), nous avons sélectionné le simulateur qui nous a paru le plus robuste, le plus mobile et le plus facile à manoeuvrer par une équipe réduite parmi les modèles les plus utilisés aux U.S.A.: le "Rainulator" de MEYER et le simulateur à bras rotatifs de SWANSON. C'est ce dernier type qui a servi de modèle au simulateur construit par 1'ORSTOM à Adiopodoumé (1973-1974) après

adaptations aux conditions locales. Il est capable de soumettre un couple de deux parcelles (cinq par dix mètres) à des pluies d'intensités voisines de trente, soixante, quatre-vingt-dix et cent vingt millimètres par heure. D'après VALENTIN (1978) l'énergie cinétique dispensée par ces pluies simulées serait voisine de celle mesurée sous pluies naturelles pour des intensités de quatre-vingt-dix et cent vingt millimètres/heure et 1,2 à 1,5 fois supérieure pour des intensités de trente à soixante millimètres/heure. Ce simulateur comporte :

- un système de stockage et décantation des eaux puisées dans une retenue (pompe trente chevaux, camion citerne dix tonnes, deux bassins de trente mètres cube):
- un système de fourniture d'eau claire sous pression adéquate (pompe de dix chevaux, cinq cents mètres de tuyau d'irrigation, régulateur de pression, manomètres, axe horizontal fixe sur un chariot, axe vertical tournant à quatre tours/minute, motoréducteur et boîte à eau);
- un système de simulation des pluies (dix bras horizontaux sur lesquels sont fixés trente vannes et trente gicleurs "Veejet" réglables, le tout suspendu par des cables à l'axe tournant à quatre tours/minute);
- un système de mesures (deux parcelles au bas desquelles un canal de réception guide les eaux ruiselées et les terres érodées vers une cuve de un quart de mètre cube, munie d'un limnigraphe à mouvement rapide et d'échantillonneurs pour la charge soluble et solide; des chronomètres, deux pluviomètres linéaires, un pluviographe, un totalisateur de vitesse du vent, une sonde à neutrons pour contrôler l'infiltration).

Le protocole expérimental est adapté à chaque étude, mais prévoit la réalisation d'une douzaine d'averses variant quant à leur intensité, leur durée (jusqu'à stabilisation de l'infiltration) et l'intervalle de temps entre averses. L'étude complète sur trois à cinq sols répartis le long d'une toposéquence prend quatre à six semaines pour une équipe de trois chercheurs, trois observateurs spécialisés et six manoeuvres.

3 - LES MÉTHODES DE MESURE D'AUTRES PARAMÈTRES FONDAMENTAUX

3.1 Les capteurs des eaux de pluie

Chaque station est équipée d'un pluviomètre "association" muni d'une bague de 2000cm² située à 150 centimètres au-dessus de la surface du sol et d'un pluviographe Cerf à augets basculants (tous les demis-millimètres de pluie) et à mouvement rotatif journalier permettant d'estimer l'intensité en cinq minutes.

D'après HEUSCH (1970), la géométrie de ces capteurs est telle qu'elle peut créer des turbulences et réduire l'efficacité à quatre-vingt-dix pour cent en cas de grand vent (cas exceptionnel dans nos stations). Sous forêt, les précipitations ont été mesurées à l'aide d'une dizaine de pluviomètres association posés sur le sol (bague vers vingt cinq centimètres) ou d'un pluviomètre linéaire de deux centimètres de large, vingt centimètres de profondeur (pour éviter le rejaillissement des gouttes) et cinq mètres de long posé vers 0,5mètre de hauteur entre deux arbres.

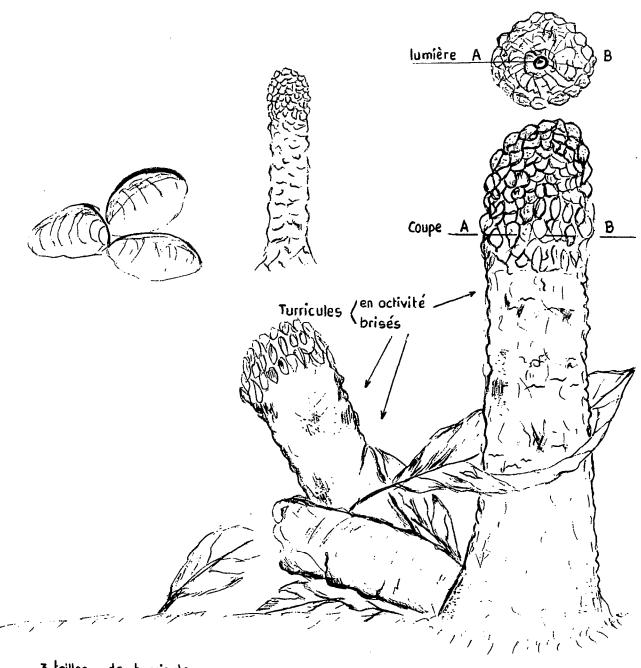
Pour l'analyse chimique des eaux de pluie, différents dispositifs en plastique ont été utilisés : soit des bacs de lm² disposés sous le couvert, soit des bouteilles de deux litres surmontées d'entonnoir dont le goulot est obturé par un bouchon filtrant en coton. Chaque dispositif étant soigneusement lavé à l'eau de pluie après chaque averse, et les échantillons d'eau immédiatement filtrés, les éléments dosés reflètent la charge soluble des eaux de pluie associée à la fraction soluble des poussières qui peuvent se déposer entre deux averses ou qui accompagnent les gouttes (noyaux de condensation).

3.2. Les dispositifs de mesure de remontées de terre fine par la mésofaune

32.1 Dispositif relatif aux vers de terre

La présence d'une multitude de turricules de vers de terre (voir figure 2.4) tout au long de la toposéquence limitrophe de la forêt

Fig. 2.3 CONFIGURATION DES TURRICULES OBSERVES AU TEKE



3 tailles de turricule.

3 tailles de perles de terre rejetée. 3 espèces de vers de terre.

GRANDEUR NATURE

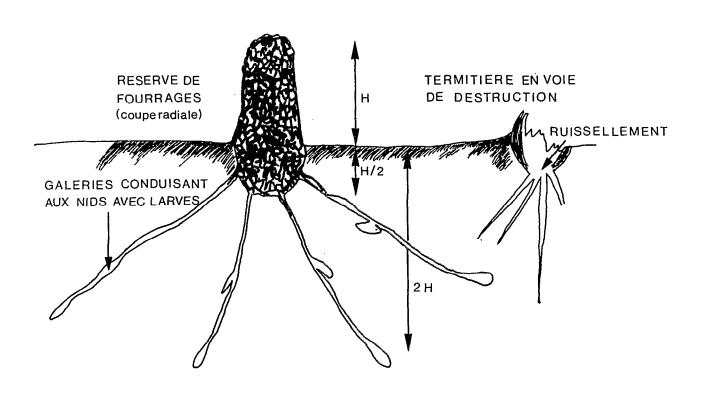
du Téké pose le problème de leur intervention dans la dynamique actuelle de ces sols forestiers. Etant donnés les interactions possibles entre la position topographique, le stock d'eau du sol, la production de la litière par la végétation et l'activité des vers de terre, il s'est avéré indispensable d'explorer les variations de cette activité en fonction des positions topographiques.

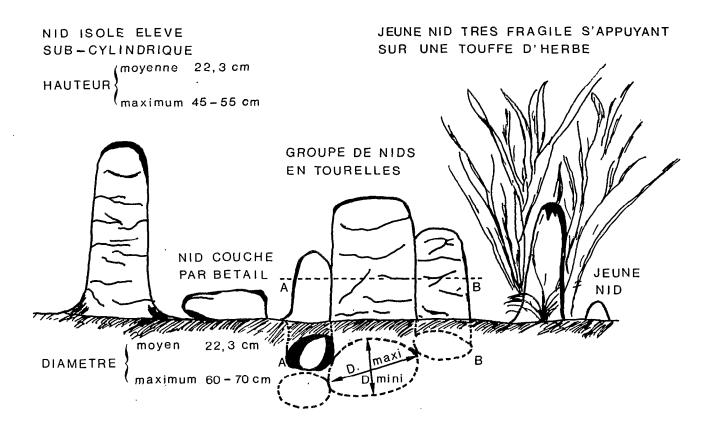
Dans un premier temps, une enquête de variabilité spatiale a été réalisée à l'époque de l'année où l'activité des vers est maximale, juste après la saison des pluies. De cet inventaire instantanné, il ne faut pas espérer une estimation de la production annuelle des turricules, mais seulement une estimation des variations spatiales à une époque de l'année; en effet, les résultats au Téké montrent qu'une récolte ne peut donner que vingt cinq à cinquante pour cent de la somme des récoltes annuelles, car l'énergie des gouttes de pluie les désagrège rapidement sur place. Si l'activité des vers de terre est sousestimée en raison de l'érosion, il faut rapprocher les mesures aux mêmes emplacements sans pour autant risquer de modifier l'activité de la faune par des interventions trop fréquentes. La variabilité de l'activité des vers de terre est importante dans le temps (en fonction des saisons) et dans l'espace (selon les positions topographiques) : elle est nettement plus forte durant les périodes où le sol est humide (sur soixante centimètres) qu'en saison sèche, et sur le plateau ou le bas-fond que sur les pentes.

En pratique, nous avons évité de rapprocher les observations à moins de un mois et de les espacer de plus de trois mois, tout en faisant coincider les mesures avec les périodes caractéristiques du climat (fin de chaque saison). Quatre à six prélèvements par an furent effectués pendant trois ans sur une quinzaine de parcelles de un mètre de côté réparties en cinq situations topographiques : une sur le plateau, trois sur la pente et une dans le bas-fond.

Pour réduire les perturbations du milieu naturel, il ne restait sur le terrain que deux piquets de fer (matérialisant la diagonale des parcelles) et une plaque blanche numérotée : lors des observations un cadre en fer cornière délimite sans ambiguité les parcelles. A ce

Fig. 2.4 CONFIGURATION DES NIDS DE TRINERVITERMES GEMINATUS





moment toute la litière est soigneusement enlevée, les différentes sortes de turricules dénombrées et mis en sacs numérotés sans pénétrer à l'intérieur de la parcelle; enfin, la litière est remise en place pour éviter de modifier l'activité des vers dont c'est la nourriture.

Il est évident que cette méthode ne peut donner qu'une estimation par défaut des remontées de terre fine au-dessus de la surface du sol et non une mesure de l'activité totale des vers à cause de l'érosion simultanée, mais surtout parce que ceux-ci rejettent une bonne partie des terres ingérées à l'intérieur du sol, dans les anciennes galeries. Ainsi, LAVELLE (1974) a montré que dans la savane de Lamto où la production de turricules s'élève à vingt cinq tonnes à l'hectare par an, la masse de terre ingérée par les vers atteint huit cents tonnes à l'hectare par an. Ces chiffres reposent sur la mesure de la dynamique des populations de vers "au champ" et sur l'évaluation au laboratoire des quantités de terre ingérée par différentes tailles de vers de terre (c-à-d particules agglomérées par les vers vivant dans un sol initialement tamisé à un millimètre et maintenu à une humidité voisine de celle du sol en place).

32.2 Dispositifs relatifs aux termites (Trinervitermes) à Gonse et Saria (Haute-Volta)

A côté de l'érosion et du drainage, il semble nécessaire de chiffrer les quantités de terre remontées chaque année non seulement par les vers, mais aussi par les termites très actives semble-t-il, à en juger par le nombre de nids épigés (mille trois cents nids à l'hectare) pour interpréter l'évolution actuelle de certains sols de savane. L'inventaire de la population des termitières donne des informations sur les dimensions de celles-ci à un moment donné, mais pas sur la dynamique de la population, ni sur le rythme des remontées en terre ou de la destruction des nids.

a) Caractéristiques des termitières

Pour mesurer les remontées annuelles de terre et l'érosion des termitières sur pied, nous avons tenté toute une série de mesures s'étendant dans le temps (cinq ans) et dans l'espace (huit parcelles de

deux cent quarante à quatre cents mètres²)

Dans un premier temps, il s'agit de sacrifier une partie de la population de termitières pour déterminer les caractères faciles à mesurer
(sans détruire les nids) et qui sont en relation étroite avec le poids
et l'accroissement de poids des petites termitières de Trinervitermes
qui occupent seules le terrain étudié. L'inventaire a été effectué sur
deux parcelles de deux cent quarante mètres², les nids ont été extraits
délicatement à la houe, puis furent mesurés la hauteur maximale, les
diamètres maxima et minima à la base, le poids total et le volume (par
déplacement d'eau après emballage sous un mince film plastique). Sur la
parcelle ERLO, les termitières furent soigneusement remises en place
dans l'espoir (déçu) qu'elles soient resoudées par les termites : en
fait, il en est résulté une forte diminution de la population.
Il ressort de ces mesures :

- que la surface des parcelles (deux cent quarante mètres ²) est suffisante pour donner une image correcte de la population étudiée puisque les variations sont faibles;
- que le volume mesuré est 1,56 fois plus faible que le volume calculé à partir du cylindre tenant compte de la hauteur totale et du diamètre basal moyen;
- que la densité apparente moyenne (da = 0,712) est la même quelles que soient la taille, l'âge et la forme de la termitière puisqu'il existe une rêgression linéaire très étroite (r = 0,987) entre le poids et le volume des termitières;
- que l'unique critère nécessaire pour estimer le poids (P) d'une population de nids épigés de Trinervitermes est le diamètre (D) moyen à la base; la hauteur (H) n'améliore que fort peu la précision (ROOSE et BIROT, 1970)

$$P = 0,569 + 1,231 \text{ (AD}^b)$$
 où $A = 0,004$, $b = 2,2456$ et $r = 0,962$
 $P = U + VD^b + WH^d$ où $b = 2,2456$; $d = 2,279$
 $V = 1,1955$; $W = 0,0008$ et $r = 0,970$

En pratique, le poids des termitières a été évalué en se référant à la courbe poids = f(diamètre basal moyen) établie à partir des

soixante trois termitières observées en mars 1970 et des soixante dix termitières prélevées à la fin de l'essai en 1975.

<u>b - Marquage_des_termitières</u>

Afin de préciser par des mesures directes la croissance des édifices aériens, il semblait utile de marquer les nids existants une ou deux fois l'an.

Après deux tentatives insatisfaisantes (tige de fer enfoncée au centre de la termitière ou chaulage complet des édifices = nids abandonnés), il s'est avéré pratique de doter chaque termitière d'une plaque de fer, numérotée, indestructible, et de marquer chaque année les nids (ou partie de nids) nouvellement bâtis avec des taches de peinture au latex diluée dans l'essence (0,5litre d'essence plus un litre de peinture pour trois cents termitières); il semble que ces taches de couleurs vives et différentes d'une année à l'autre résistent à l'agressivité des pluies et ne gênent nullement la croissance des termitières, mais permettent de suivre de façon très précise l'évolution annuelle de l'inventaire (ROOSE, 1976).

c - L'érosion des nids épigés

Les pluies violentes qui tombent sur ces monticules de terre nue provoquent souvent des brèches dans la muraille des édifices qui sont rapidement colmatés par les termites. Ces travaux d'entretien exigent des matériaux neufs qui n'apparaissent guère lors des inventaires annuels.

Pour mesurer l'érosion des termitières, il a fallu séparer les édifices aériens de leurs habitants et suivre l'évolution du poids des nids déposés sur une nappe de plastique en dehors de la zone de protection des herbes et arbustes. Les mesures montrent que les termitières perdent vingt six à trente trois pour cent de leur poids au bout d'un an et soixante pour cent au bout de la seconde année d'exposition aux pluies. L'effritement des termitières est lent au début (pavage de sable grossier des vieilles termitières), mais lorsque des

brèches apparaissent après un ou deux ans, la disparition est rapide (ROOSE, 1976).

<u>d</u> - Remontées de terre fine

La comparaison des inventaires, l'estimation de nouveaux édifices et de l'érosion ont permis de montrer la dynamique des populations et de chiffrer les remontées annuelles (mille cent trente kilos à l'hectare par an en moyenne à Gonse). La comparaison des couleurs et des propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés pour la construction des nids avec celle des différents horizons du sol avoisinant indique que leur origine n'est pas très profonde (jusqu'à la base de l'horizon appauvri).

4 - CONCLUSIONS

A chaque problème posé correspondent une échelle d'observation et des méthodes appropriées. L'objectif de ces recherches sur les transferts de matière étant de saisir les tendances instantanées de la pédogénèse actuelle, il impliquait la mise au point de méthodes bien adaptées au terrain et leur suivi pendant de longues années. C'est pourquoi toute une série de dispositifs ont été progressivement conçus ou adaptés aux circonstances locales pour quantifier les différents éléments du bilan : pluviomètres de divers types, cases d'érosion, cases de lessivage oblique (ERLO), cases de drainage vertical, simulateur de pluie, dispositifs divers en vue de mesurer le couvert végétal ou les remontées de terre par les vers ou les termites.

Aucune de ces méthodes n'est à l'abri des critiques, mais l'accumulation de faisceaux d'informations recueillies sur une même parcelle a permis de dégager un certain nombre de faits nouveaux et de chiffrer des phénomènes déjà connus.

Dans ce chapitre, nous nous sommes borné à décrire brièvement et à critiquer les principaux dispositifs dont nous discuterons les résultats : nous n'aborderons pas la critique de méthodes déjà connues comme celle des humidimètres à neutrons, ni les méthodes d'analyse

physiques et chimiques: les méthodes de dosages utilisées sont celles en vigueur du Laboratoire Central d'Analyse du Centre ORSTOM d'Adio-podoumé. Elles ont été décrites par NALOVIC (1968), puis par GOUZY (1973). De même, les méthodes d'estimation du bilan hydrique au niveau du sol seront détaillées au chapitre 6 propre à ce bilan et les méthodes relatives à l'interprétation des résultats d'analyses d'eau seront traitées au chapitre 7 où 1'on discute de la composition chimique des eaux.

Pour donner une vue d'ensemble des expérimentations, les dispositifs mis en place et les types de mesures effectuées en chaque site d'expérimentation sont récapitulés au tableau 2.1.

Tableau 2.1 : DISPOSITIFS ET TYPES DE MESURES EFFECTUEES DANS LES STATION D'OBSERVATION

| Dispositifs et Expérimentation | Adiopodoumé | Anguédedou | Azaguié | Divo | Bouaké | Korhogo | Saria | Gonse |
|--|---|-------------------|--|---|--|--|--|--|
| Précipitation à ciel ouvert . pluviomètres . pluviographes à augets . capteur qualitatif Précipitation sous couvert . pluviomètres ronds ou liné- aires . bacs ou entonnoirs | 5 2 f forêt 10 10 | 1 1 0 | 2 1 0 | 2 1 0 | 2 1 · 0 | l l l savane !linéaire qualitatif | 2 1 1 savan.&Arb. | 1 1 0 |
| Cases d'érosion (E.R) pente expérimentation (Couvert Végét. sol nu | 12 4-7-20% Forêt&cult. 3 | o | 0 | O | 3 à 5 4% culture sol nu | 2 3% sol nu | 2 05% sorgho butt sol nu | 0 é |
| Cases ERLO couvert végêt. expérimentation type de sol pente | 7 forêt l 7-11-65% | l hevéa 29% | 2 forêt bananeraie 14% | | I Sav.Arbor. I 47 | l Sav.Arbust. l 3% | 2 J.ouV.jach. 2 2et0.5% | Sav.Arbor. |
| Cases drainage vertical couvert Expérimentation Profondeur sol (cm) | 44 8 forêt 36 culture 40-80-140 180 | _0 | 8 forêt Bananeraie 40-80-140 180 | 8 4 forêt 4 cacao 40-80-140 180 | 4(+10) Sav. herbacé (culture) 40-80-140 180 | | Jachère il. herbacée sorgho fert 80-80-120 180 | 3 Jachère herbacée i1. 30-60 90 |
| Remontées biologiques par litière vers de terre par { termites { divers | l invent. | 0 | 4 années O O | l invent. | 0 | 4 ans | 4 ans 4 ans | 3 ans 5 ans Fourmil. |

Pluviomètre standard : Hauteur de pluie à 150cm de hauteur du sol dans un capteur rond de 2000cm²
Pluviographe à augets : hauteur cumulée dans le temps d'où on calcule l'intensité, l'énergie cinétique
et l'indice d'agressivité R .

Capteurs de pluie : charge soluble
Case d'érosion (E.R.) : lame ruisselée et terre érodée (volume, charge soluble et solide)
Case lessivage oblique (ERLO) : lame ruisselée et terre érodée en surface plus drainage oblique (volume charge soluble plus solide)
Case drainage vertical (DV) : lame d'eau libre percolée au-delè de certains horizons (volume et charge soluble

plus solide).

DEUXIÈME PARTIE

LES PHÉNOMÈNES D'ÉROSION : Synthèse des résultats acquis et des résultats nouveaux

INTRODUCTION:

Par phénomènes d'érosion, nous entendons non seulement l'érosion sensu stricto, c'est-à-dire le flux de particules solides arrachées à la surface du sol en tonnes par hectare et par an, mais encore le ruissellement, lequel constitue le flux liquide qui transporte (et parfois arrache) ces particules. Les phénomènes d'érosion tiennent une place capitale dans cette étude des processus qui modifient la dynamique actuelle des sols : c'est en effet au niveau du ruissellement et de l'érosion que vont se distinguer, pour l'essentiel, les bilans en milieu aménagé par l'homme de ceux du milieu naturel, que ce soit en région tropicale sèche ou en région subéquatoriale. Nous aborderons ces phénomènes dans une perspective pédogénétique (dynamique évolutive actuelle des horizons supérieurs du sol), ce qui ne nous empêchera pas d'énoncer les applications techniques des résultats fondamentaux que nous discuterons.

Cependant, la présentation de cette partie de notre étude offre des difficultés.

- D'une part les données relatives au ruissellement et à l'érosion seront reprises dans la troisième partie consacrée aux bilans géochimiques. Aussi, pour éviter les répétitions, nous ne présenterons dans cette partie qu'une approche globale des phénomènes d'érosion, mettant en relation les hauteurs d'eau ruisselée et les poids de terre perdue au bas des parcelles d'érosion, en fonction des différents facteurs susceptibles de les influencer.
- D'autre part, nous serons amené à présenter à la fois des résultats acquis par différents auteurs, des résultats personnels publiés dans une précédente synthèse (ROOSE, 1973-1977) et des résultats nouveaux (en particulier sur le milieu naturel). Cette présentation simultanée des

résultats personnels et de leur discussion précédant l'exposé des résultats acquis sur les bilans géochimiques (troisième partie), bouscule quelque peu l'ordre classique; elle reflète la clarification progressive dans l'approche des problèmes de l'érosion, grâce à la confrontation des auteurs. En outre, il nous a paru important de préserver l'unité du sujet (l'érosion) et de le présenter à cette place, entre les données acquises (le milieu et les méthodes) et les résultats nouveaux (bilans hydriques et géochimiques), puisqu'il tient des deux à la fois.

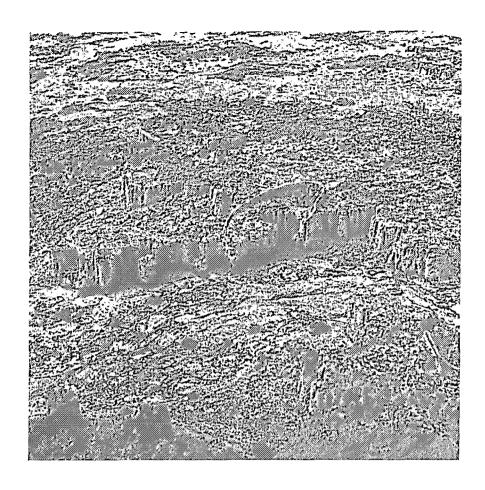
L'érosion par la pluie est le premier processus dont nous avons abordé l'étude en cases d'érosion : les parcelles sont complètement isolées de leur environnement par les tôles et couvrent quelques dizaines à quelques centaines de mètres carrés au bas desquelles, on mesure l'eau et les terres qui s'échappent. Du fait de la méthode, les résultats n'ont que rarement une valeur absolue (sauf si le sommet de la parcelle englobe le haut du versant); il s'agit donc essentiellement de comparer diverses conditions de stations et de traitements plutôt que de mesurer l'érosion exacte qui se manifestait en un point du versant avant l'installation des parcelles.

Les dispositifs ont été installés sur des versants caractéristiques de chaque région et non à des endroits particulièrement choisis pour mettre en évidence tel ou tel processus; ils permettent d'étudier l'érosion moyenne régionale en nappe et en rigole, à l'exclusion des autres formes de l'érosion. Le ravinement, les glissements de terrain, le creusement des rivières et le recul des berges ainsi que certains phénomènes de sédimentation plus ou moins définitifs (colluvions sableuses de bas de pente) ne peuvent être étudiés qu'à l'échelle des bassins versants; nous ne pourrons aborder ces problèmes qu'en comparant nos résultats de mesures sur parcelles à ceux que d'autres auteurs ont obtenus sur des bassins de tailles diverses.

Le problème de l'érosion aréolaire (ou en nappe) a déjà été traité lors d'une précédente synthèse (ROOSE, 1973-1977) en faisant état avant tout des observations réalisées sur les cases d'érosion cultivées d'Adiopodoumé et en les comparant aux résultats obtenus sur quelques

stations d'Afrique de l'Ouest. Depuis lors, de nouveaux résultats ont été acquis en particulier sur un nombre plus important de points d'observations et en conditions se rapprochant le plus possible du milieu naturel. Nous insisterons donc ici sur les phénomènes d'érosion observés sous divers types de forêts et de savanes avant de résumer les principaux résultats acquis sous différentes cultures et sur sol nu (potentialités).

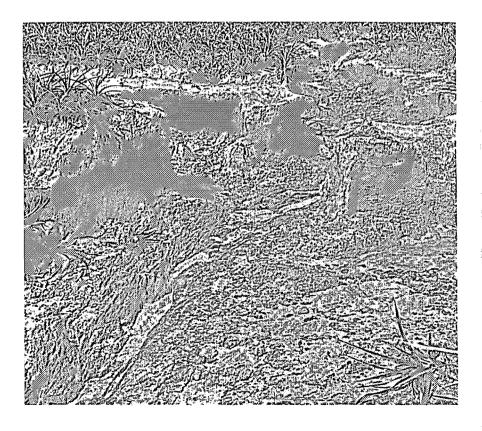
Suivant la démarche logique justifiée par la compréhension des phénomènes d'érosion, nous présenterons tour à tour un chapitre sur les causes de l'érosion (pluie et ruissellement), puis un chapitre sur les facteurs de l'érosion (couvert végétal, pente, érodibilité du sol et techniques antiérosives), enfin un chapitre de discussion et de conclusions théoriques et pratiques.



Photos 14 - Erosion en nappe et en ravine : deux formes d'érosion provoquées par deux sources d'énergie différentes.

C'est l'énergie des gouttes de pluie qui dégage les «microdemoiselles coiffées». En revanche, l'énergie du ruissellement, concentré dans les rigoles ou sur les routes, cisaille à la base ces demoiselles coiffées et creuse les ravines.

(Roose) (cf. plantation d'ananas)



CHAPITRE III - LES CAUSES DE L'EROSION

L'arrachement des particules terreuses par l'érosion et leur transport nécessite une source d'énergie : celle-ci peut être le vent, la pluie et ou le ruissellement. Pendant 7000ans les hommes ont tenté vainement d'arrêter l'érosion accélérée en s'opposant au ruissellement qui se développe dans les champs cultivés : ils ignoraient le rôle que joue l'énergie des gouttes de pluie sur le déclanchement des processus érosifs (STALLINGS, 1957). Il a fallu attendre les travaux de LAWS (1940) sur les caractéristiques des gouttes de pluie (diamètre, vitesse, énergie) et ceux d'ELLISON (1944 à 1952) sur l'effet "splash", la battance des pluies, le détachement et le transport des particules terreuses pour ouvrir une ère nouvelle de recherches aboutissant à des méthodes biologiques de lutte antiérosive (= couvrir le sol) beaucoup plus efficaces et mieux adaptées aux conditions écologiques et socio-économiques du développement rural des pays tropicaux (ROOSE, 1978).

Mais ces idées nouvelles sur l'origine de l'érosion n'ont pas été accueillies de suite par tous les chercheurs. Certains pionniers du Service de Conservation des Sols aux U.S.A., et BENNET (1930) lui-même, repoussaient encore ce concept en 1951 : "Certes, la battance des pluies est importante mais, les plus graves manifestations de l'érosion ne sont-elles pas associées à l'énergie abrasive liée au ruissellement et à la fonte des neiges ?". Et, en Afrique, devant les ravages que cause l'érosion suite aux défrichements brutaux et à la culture mécanisée à outrance, ne préconise-t-on pas encore toujours des méthodes de terrassement pour canaliser les eaux de ruissellement, au lieu d'inventer des méthodes plus "douces" pour défricher et pour faire produire les sols sans les exposer à l'agression terrible des pluies tropicales(cf SEFA · en Casamance, FAUCK, 1956, et en Côte d'Ivoire les plantations d'hévéa de la savane de Dabou). Les travaux des chercheurs sur les processus de l'érosion ont aujourd'hui démontré que "le splash" ou encore "la battance des pluies" est la cause la plus importante de l'érosion (HUDSON, 1973 page 26).

Nos travaux sur l'érosion en Afrique de l'Ouest s'inscrivent dans cette ligne de recherches qui s'attache à analyser les causes profondes et les facteurs qui modifient l'expression de l'érosion potentielle. L'objectif est de proposer des méthodes adaptées aux conditions écologiques au sens large et aussi de comprendre comment les différents processus d'érosion (en nappe, rigole, sélective, décapante) laissent leur trace dans la morphologie des profils en milieu naturel et cultivé, et ceci depuis la zone forestière subéquatoriale, jusqu'aux savanes présahéliennes. Cette démarche a été profondément influencée par les travaux de quatre origines.

D'abord par le professeur FOURNIER qui est à l'origine de tout un réseau de parcelles d'érosion mises en place par l'ORSTOM et les Instituts de Recherches Appliquées (regroupés au GERDAT) en Afrique de l'Ouest et à Madagascar. Durant un stage de trois mois au Bureau Interafricain des Sols à Paris (1963), nous avons analysé les documents qu'il avait rassemblés, discuté des conclusions et tracé les grandes lignes des recherches qu'il fallait entreprendre : planifier les essais en vue de l'analyse statistique, définir et mettre en place un réseau de parcelles de référence, développer un projet de simulateur de pluies en vue de l'analyse expérimentale systématique des paramètres. Dans cette équipe, CHARREAU nous a sensibilisé au rôle des techniques culturales sur les sols de Casamance (SEFA, 1964) et à la nécessité de faire preuve d'imagination pour adapter les méthodes mises au point sous climat tempéré, climat beaucoup moins agressif (CHARREAU, 1972). Quant aux chercheurs du Centre Technique Forestier Tropical travaillant tant au Niger, en Haute-Volta qu'à Madagascar, ils ont admirablement souligné le rôle des couvertures végétales, naturelles ou cultivées, le rôle des feux et l'intérêt des approches à différentes échelles spatiales (parcelles, bassins) (cf. BAILLY, de COIGNAC et al., 1974).

Ensuite HUDSON (1960 à 1973) qui, en Rhodésie, s'est attaché à chiffrer l'énergie des gouttes de pluie et à démontrer que c'est bien l'agressivité des pluies tropicales qui est à l'origine de l'érosion sur les sols ferrallitiques puisqu'une simple toile moustiquaire tendue sur le sol nu arrête l'érosion et réduit le ruissellement. Il a tracé la voie à suivre pour résoudre le problème de l'érosion accélérée sous culture - car on ne peut tout de même pas se passer des cultures - en montrant qu'on réduisait considérablement les risques en intensifiant l'exploitation des meilleures terres (fortes densités, engrais d'où meilleur

couvert végétal) et en laissant les terres sensibles sous une couverture permanente (mise en défens ou pâturage limité).

Ensuite, la nombreuse équipe de chercheurs qui a permis à WISCHMEIER de rassembler plus de dix mille résultats d'essais sur parcelles et bassins versants de quarante quatre stations des U.S.A., de les analyser statistiquement, d'identifier les paramètres les plus étroitement liés à l'érosion et de quantifier empiriquement ces facteurs dans le but d'améliorer la définition des moyens à mettre en oeuvre pour limiter les pertes en terre à des valeurs acceptables. L'équation de prévision des pertes en terre proposée par WISCHMEIER et SMITH en 1960, et sans cesse précisée jusqu'en 1978, néglige les interactions diverses existant entre les facteurs de l'érosion, mais définit clairement les facteurs qui déterminent l'importance de l'érosion à l'échelle des champs. En suivant ce fil conducteur, nous avons engagé une étude plus systématique de l'érosion en Afrique de l'Ouest, adapté la définition de la parcelle nue standard qui permet à la fois de préciser la résistance propre au sol face à l'agressivité des pluies et de rapprocher les résultats assez hétérogènes obtenus sur les diverses stations (ROOSE, 1968). Suite aux synthèses des résultats obtenus au Sénégal (1967), en Côte d'Ivoire et Haute-Volta (1973) et au Dahomey (1976), nous avons pu hiérarchiser l'importance de chacun de ces facteurs en Afrique de l'Ouest (ROOSE, 1975-1976) ce qui nous permet de proposer des méthodes de lutte antiérosives adaptées aux circonstances régionales.

Plus tard, HEUSCH nous a montré sur le terrain au Maroc que si cette équation s'applique sur certains sols (à argile kaolinitique dominante), elle n'est pas adaptée à toutes les conditions rencontrées en Afrique, en particulier dans le cas des vertisols sur les marnes du Pré Rif, des climate méditerranéens et sahariens, des reliefs jeunes et en général dans les conditions favorisant l'érosion linéaire par rapport à l'érosion en nappe (HEUSCH, 1970 - ROOSE, 1971).

1 - LA PLUIE, CAUSE PREMIÈRE DE L'ÉROSION

Tout transport comporte une dépense d'énergie. Dans le cas de l'érosion en nappe, c'est l'énergie des gouttes de pluie qui déclanche les processus de destruction des agrégats du sol, la formation d'une pellicule de battance peu perméable et la naissance du ruissellement, lequel assure le transport des particules détachées (ELLISON, 1944 et 1945). Cependant, lorsque la pente du versant augmente, le ruissellement devient lui-même abrasif et son énergie peut dépasser celle de la pluie quand l'inclinaison de la pente dépasse certaines limites fonction des forces de frottement développées par la rugosité de la surface du sol (16% pour certains sols de la plaine américaine testés par WOODRUFF en 1948). Sur des versants très inclinés et là où dominent le ravinement et les sapements des berges, l'énergie du ruissellement devient la cause principale de l'érosion (HEUSCH, 1970). Mais, sur les vieilles surfaces du bouclier Ouest Africain où les pentes sont relativement faibles (1 à 15%), c'est l'énergie des gouttes de pluie qui est l'agent causal principal de l'érosion; la morphologie de la surface du sol (microdemoiselles coiffées, organisation du ruissellement en nappes plus ou moins anastomosées, voir photo 14) et l'importance majeure du couvert végétal et de la pellicule de battance sur les phénomènes d'érosion, en sont des signes évidents. HUDSON (1961-1963-1973) a démontré le rôle capital de l'énergie cinétique des gouttes de pluie en couvrant 1'une de ses parcelles nues d'une toile moustiquaire qui absorbe l'énergie sans diminuer l'intensité des pluies : l'érosion et, dans une moindre mesure, le ruissellement furent réduits de façon spectaculaire. DABIN et LENEUF (1958), ROOSE (1973) et LAL (1975) sont arrivés aux mêmes conclusions en montrant qu'une mince couche de paille (deux centimètres soit environ 6t/ha) suffit à réduire l'érosion sur une parcelle nue à des valeurs négligeables, semblables à celles qui ont été observées sous une forêt dense tropicale haute de 40 mètres.

1.1. Hauteur, intensité, durée et fréquence des pluies

Sans ruissellement pour déplacer les particules de terre détachées par la pluie, il n'y a pas d'érosion. Or, le ruissellement n'est que le refus à l'infiltration, laquelle diminue au cours du temps, à mesure que le sol se réhumecte et que se forment des pellicules de battance (GARDNER, 1975). On conçoit dès lors la complexité des liaisons qui existent entre les diverses caractéristiques des pluies et le ruissellement







Photo 15 - L'énergie des gouttes de pluie est à l'origine de nombreuses manifestations de l'érosion à la surface du sol.

a - les microdemoiselles coiffées.

colonnettes de terre protégées de l'agressivité des gouttes de pluie par un «chapeau» cohérent : graine, racine, feuille, caillou ou terre durcie.

Plus la pente est forte, plus l'érosion est forte et plus les colonnettes sont élevées.

b - les cônes de projection.

les gouttes d'eau désagrègent les mottes et projettent des particules en tous sens. Ces particules s'accumulent au pied des tiges protégées par une touffe de feuilles.

c - les cratères.

les gouttes de pluie se rassemblent quelquefois sur les feuilles des végétaux (gouttières ou ligules), augmentent leur volume et pilonnent le sol avec une énergie cinétique accrue ; témoins ces cratères observés à la surface du sol autour de touffes de manioc.

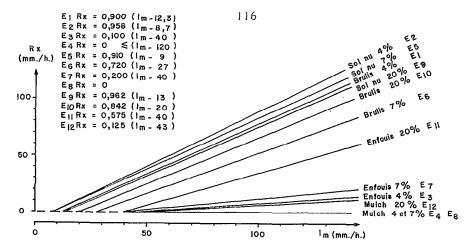


Fig. 3.1 Intensités maximales de ruissellement dans les conditions d'humectation les plus favorables.

D'après LAFFORGUE, NAAH (1976).

L'intensité minimale d'infiltration dépend de l'intensité des averses, mais aussi de la pente du sol (relation complexe) et de l'aménagement de la surface du sol.

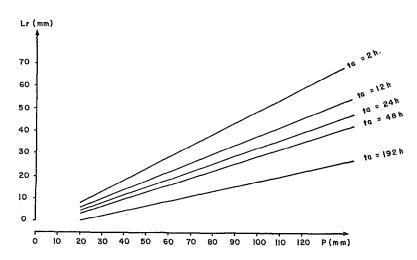


Fig. 3.2 Influence de ta sur la hauteur de la lame ruisselée.

(Brûlis : pente = 20%; I_m = 60 mm./h.)

D'après LAFFORGUE, NAAH (1976).

Plus le sol est sec, plus l'infiltration est elevée (classique)

ta : temps en heure entre 2 averses

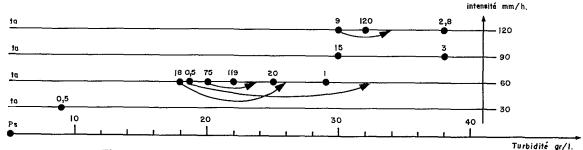


Fig. 3.3 Charge solide totale en fonction de ta et de l'intensité des pluies.
D'après ROOSE, ASSELINE (1978).

La charge solide des eaux de ruissellement augmente avec l'intensité des pluies et le rapprochement entre les averses (ta faible); elle dépend aussi de l'état structural de la surface du sol (voir ta mal classé = flèches).

ou l'érosion mesurés au bas de petites parcelles.

Ainsi, nous avons montré que ni la hauteur de la pluie, ni son intensité, pris isolément, ne peuvent expliquer les phénomènes observés (ROOSE, 1973). Cependant, en combinant la hauteur et l'intensité maximale de la pluie pendant une certaine durée (7 à 30 minutes selon les auteurs) apparaissent des seuils de déclanchement des phénomènes d'érosion : ces seuils varient selon les circonstances, en particulier en fonction de l'humidité préalable du sol avant l'averse et de l'aménagement de la surface du sol (rugosité, porosité, couvert végétal) (ROOSE, 1973).

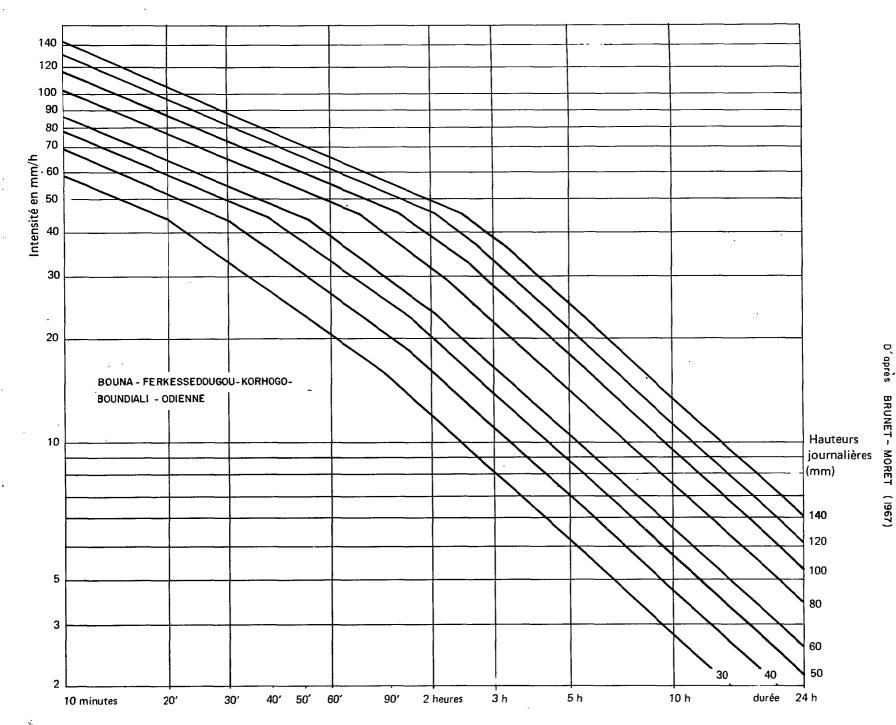
Ceci peut être illustré par les figures 31, 32 et 33 tirées des études de LAFFORGUE et NAAH (1976) et ROOSE et ASSELINE (1978) sur une série de 55 averses simulées sur les parcelles d'érosion d'Adiopodoumé (12 parcelles = 3 pentes X 4 traitements : sol nu, ananas plus résidus brûlés, ananas plus résidus enfouis et ananas plus résidus laissés en surface).

- La figure 31 montre l'intensité maximale de ruissellement (= infiltration stabilisée) dans les conditions d'humectation les plus favorables, en fonction de l'intensité de la pluie et des différents traitements (couvert végétal x pente).
 - Remarquons l'influence surprenante de la pente sur sol nu, influence variable en fonction de l'état de la surface du sol.
- La figure 32 met en lumière l'influence du temps de ressuyage (temps en heures entre deux pluies) sur la hauteur de la lame ruisselée pour un traitement donné (ananas plus résidus de culture brûlés sur une pente de 20%) et pour une intensité de pluie (60mm/heure).

 Cette relation est classique et bien connue des hydrologues; elle exprime le fait que plus le sol a le temps de se ressuyer entre deux averses plus tard le ruissellement se déclanche.
- La figure 33 indique que la charge solide totale des eaux de ruissellement varie en fonction de l'intensité des pluies, du temps de ressuyage entre deux averses et surtout de l'état de la surface du sol (pellicule de battance). Alors que l'humidité préalable du sol affecte largement le ruissellement c'est la stabilité de la structure -sorte de
 mémoire des agressions antérieures qui joue le rôle principal du sol
 pour l'érosion.



COURBES, INTENSITE, DE FREQUENCE CONNUE EN DUREES CHAQUE POUR DES AVERSES POINT



Les caractéristiques des averses exceptionnelles, celles qui entraînent les plus forts transports de matériaux, ont été étudiées par BRUNET-MORET, en particulier en Haute-Volta (1963) et en Côte d'Ivoire (1967). De cette étude, on peut tirer deux groupes de résultats extrêmement importants : d'une part la hauteur de l'averse journalière de retour l à 100 ans pour les principaux postes qui nous intéressent, et d'autre part, les courbes "intensité-durée" pour des averses de hauteur correspondant à diverses fréquences (voir figure 3.4).

Nos résultats personnels plus récents, mais moins étendus dans le temps, confirment ceux de cet auteur (ROOSE, 1970, 1973, 1977 à 1979).

<u>Tableau 3.1</u>: Précipitations journalières (mm) de retour 1 à 100 ans en divers postes de Côte d'Ivoire et Haute-Volta, calculées d'après la loi PEARSON III par BRUNET-MORET (1963-1967)

| STATION | Nbre | PLUIE an.Moy. | PROBABILITE 1 FOIS EN | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|
| | Obs. | (mm) | l an | 2ans | 5ans | 10ans | 20ans | 50ans | 100ans | | |
| Abidjan aéro Azaguié Divo Bouaké aéro Korhogo [*] _ Ouagadougou V . | 28 28 15 42 29 32 | 2124 1794 1612 1199 1351 868 | 135 78 76 71 76 62 | - 91 88 84 89 74 | 200 107 104 101 106 92 | 230 120 117 113 119 107 | - 133 129 126 132 123 | - 150 146 144 156 147 | (280) 163 158 156 169 166 | | |

* : Selon CAMUS et al., 1976 (chiffres un peu plus faibles que ceux de BRUNET-MORET, 1967).

L'analyse des données du tableau 3.1. sur la hauteur de l'averse journalière d'une fréquence fixée dégage trois points :

- 1 Sur la bande côtière (moins de 30km de profondeur), on observe chaque année des averses de l'ordre de 135 millimètres et tous les cinq ans de 200 millimètres de hauteur;
- 2 Sur le reste de la Côte d'Ivoire les averses de fréquence annuelle varient de 71 à 78 millimètres de hauteur parallèlement aux précipitations annuelles moyennes;
- 3 dans la région centre de la Haute-Volta, les averses de fréquence annuelle sont nettement plus faibles (60-62mm), de même que les précipitations annuelles moyennes.

On retiendra de ce tableau, d'une part que les averses de fréquences annuelles et décennales sont très élevées par rapport à celles qu'on observe en climat tempéré et, d'autre part, qu'on peut enregistrer en milieu tropical sec des averses de hauteur (et aussi d'intensité) aussi grande qu'en région subéquatoriale, mais avec des fréquences plus faibles et d'autant plus faibles que les précipitations annuelles moyennes sont faibles. Ainsi, des pluies de 110 millimètres en 24 heures s'observent plusieurs fois par an à Abidjan, tous les 6 à 8 ans d'Azaguié à Korhogo et seulement tous les 12 à 15 ans vers Ouagadougou (ROOSE, 1979).

La figure 3.4 illustre un résultat important des travaux de BRUNET-MORET. Les relations entre l'intensité d'une averse et le temps pendant lequel on observe cette intensité sont semblables pour des averses de même hauteur : autrement dit les averses sont de même type. On peut donc en chaque station attribuer une fréquence de retour pour chaque courbe intensité-durée. A l'inverse, il est possible de définir les relations intensité-durée pour des averses de fréquence donnée. Ainsi, au cours d'une averse de fréquence annuelle (donnée sur le tableau 3.1) on peut s'attendre à des intensités maximales durant trente minutes de 90mm/heure à Abidjan, 60 à 70 mm/h entre Azaguié et Korhogo et 56mm/h à Ouagadougou. Au cours d'une averse décennale, les intensités maximales en 30 minutes seront de 120mm/h à Abidjan, 78 à 82mm/h entre Azaguié et Korhogo et 78mm/h à Ouagadougou.

Lors des évenements pluvieux de très faible fréquence, les hauteurs et les intensités des averses se ressemblent dans toute la zone considérée, à l'exception de la frange côtière et des massifs montagneux.

Cette étude sur les averses exceptionnelles prend tout son intérêt lorsqu'on se rappelle l'importance que de nombreux auteurs attachent au rôle des précipitations exceptionnelles sur les phénomènes d'érrosion et de ruissellement (FOURNIER, 1967; GREER, 1971; HUDSON, 1973; ROOSE, 1973; LAL, 1975). Lors de ces événements exceptionnels en effet, sous l'action conjuguée de fortes intensités, de longues durées, de la saturation du sol ou de la mauvaise structure de sa surface, certains seuils sont dépassés au-delà desquels se manifestent d'étonnants débits

de ruissellement et d'abondants transports de terre. En zone tropicale de tels cataclysmes ne se produisent pas forcément lors d'averses isolées, mais plutôt lors de séquences pluvieuses qui sapent petit à petit la résistance du milieu. Ainsi à Adiopodoumé, l'étude d'une douzaine d'averses de 110 à 230mm/jour a montré que l'érosion et le ruissellement des parcelles d'expérimentation n'ont atteint lors de chacun de ces événements rares que 25 à 45% de ceux qu'on a observés sur toute l'année (ROOSE, 1973-1977). En accord avec WISCHMEIER et SMITH (1958) nous avons donc constaté que ce n'est pas une averse exceptionnelle, mais bien la somme des 10 ou 20 fortes pluies de l'année qui détermine le niveau de l'érosion en milieu tropical humide ou sec (ROOSE, 1975). Par contre, en milieu méditerranéen ou désertique, la pluie exceptionnelle décennale ou centennale suffit à transformer radicalement le paysage (HEUSCH, 1970; ROOSE, 1971). Ceci s'expliquerait par la forte probabilité de cette averse exceptionnelle de tomber sur un sol peu couvert (cas de la zone saharienne) et sur des pentes en équilibre peu stable (cas fréquent dans le bassin méditerranéen et dans les montagnes jeunes); en région tropicale, les plus fortes averses tombent généralement au coeur de la saison des pluies à une époque où le sol est déjà bien protégé par la végétation.

1.2. Les indices d'érosivité des pluies

Après avoir défini les principales caractéristiques des précipitations observées dans la séquence bioclimatique étudiée (hauteur, intensité, durée, fréquence), on abordera le problème du choix d'un indice pluviométrique calculé à partir de données climatiques et capable de rendre compte du pouvoir érosif des pluies vis-à-vis du sol.

FOURNIER (1960-1962) a obtenu sur de grands bassins versants une bonne corrélation entre les transports solides et un indice p2

P

Où "p" est la précipitation moyenne du mois le plus humide et "P" la pluie annuelle moyenne. Cet indice climatique conjugué à un indice topographique a permis d'établir une carte du danger d'érosion en Afrique au Sud du Sahara, mais il ne s'applique guère à l'échelle du champ où

l'aménagement de la végétation et de la surface du sol a trop d'influence; il s'appuie davantage sur le contraste saisonnier (lié au type de végétation naturelle) que sur la somme de l'énergie apportée par chaque pluie. ARNOLDUS (1977) l'a modifié récemment en vue d'estimer l'indice sélectionné par WISCHMEIER (1959) (Voir plus loin).

Il suggère de calculer la somme des douze indices mensuels $\frac{p2}{p}$ où "p" représente cette fois les précipitations moyennes de chaque mois et "P" égale toujours les précipitations annuelles moyennes.

R index = f
$$(\sum_{i=1}^{n} \frac{p^2}{p})$$
 Equation 1

Dans ce cas, il tient mieux compte de l'importance de toutes les averses et obtient de bonnes corrélations régionales avec l'index d'agressivité des pluies de WISCHMEIER. Cette méthode a été mise au point pour la préparation de la carte de la dégradation des sols du monde produite par la FAO au 1/5.000.000.

HUDSON (1961-1963-1973) a observé qu'en Rhodésie du Sud 1'érrosion ne se développe sérieusement dans les champs que lorsque l'intensité des pluies dépasse le seuil de 25mm/heure et qu'au-delà de ce seuil, il existe une étroite corrélation entre l'érosion par splash et l'énergie cinétique des précipitations. Il a donc proposé comme indice (KE > 25mm) la somme de l'énergie cinétique de toutes les pluies ou partie de pluie dont l'intensité dépasse 25mm/heure. Cet indice néglige ainsi l'influence des petites averses sur l'humidité préalable du sol. Cependant, il a permis d'établir de bonnes corrélations avec l'érosion observée sur parcelles au Nigéria(LAL, 1975) et en Rhodésie (ELWELL et STOCKING, 1975) mais n'a donné lieu à aucune étude de répartition géographique en dehors de la Rhodésie.

LAL (1975-1976) a proposé un indice simplifié (A.Im) faisant intervenir le produit de la hauteur de l'averse(A en cm) par l'intensité maximale durant sept minutes. Il constate, en effet, après de nombreux auteurs (CHARREAU, 1969; GALABERT et MILLOGO, 1972; CTFT, 1974; LAL, 1975; AALDERS, 1976) d'excellentes corrélations entre l'énergie cinétique des pluies et leur hauteur et des corrélations au moins aussi étroites entre les pertes en terre de ses parcelles de l à 15% de pente

du centre Nigéria (1972-1973-1974) et cet indice simplifié qu'avec les autres indices existants. La précision des relations est encore améliorée par une donnée sur la vitesse du vent au cours de l'averse, donnée malheureusement rarement disponible.

WISCHMEIER (1959) a réuni à l'Université de Purdue les résultats des mesures de transport solide en parcelles réparties dans une quarantaine de stations expérimentales des U.S.A. En comparant les corrélations obtenues entre les pertes en terre et divers paramètres caractéristiques des pluies, il a trouvé que les deux meilleurs paramètres étaient l'énergie des pluies de plus de 12 millimètres (E) et l'intensité maximale en 30 minutes (I30). En les combinant, il a défini un indice d'agressivité des pluies (R) égal à la somme des produits de l'énergie cinétique des pluies unitaires par leur intensité maximale en 30 minutes (exprimée en mm/heure)

$$R = \sum_{E,I_{30}} Equation 2$$

Cet indice se calcule pluie par pluie, en découpant les enregistrements pluviographiques en segments d'intensité constante. (Pour le mode de dépouillement voir CTFT, 1966; ROOSE, 1972-1973-1977; HUDSON, 1973).

Tableau 3.2

Variabilité de l'indice R en fonction de la hauteur de la pluie en Afrique de l'Ouest

| | Abio | ljan | Divo |) | Boual | :é | Korhogo | 0 | Saria/Gons | sé | Allokot | to |
|--------|---------|------|----------|------|----------|-------|----------|------|------------|------|---------|------|
| • | Var. | Moy. | Var. | Moy. | Var. | lMoy. | Var. | Моу. | Var. | Moy. | Var. | Moy. |
| h = 15 | 0,5 à 5 | 8 | 1 à 7 | 4,5 | 0,5 à 7 | 3,7 | 1,5 à 7 | 5 | 2,3 à 6,5 | 4,7 | 1,5 à 8 | 5 |
| h = 30 | 6 à 24 | 18 | | | 4 à 22 | • | 1 | | | | 1 | • |
| h = 50 | 12 à 66 | 44 | 20 à 90 | 48 | 15 à 80 | 40 | 19 à 80 | 50 | 30 à 65 | 48 | 30 à 65 | 50 |
| h = 70 | 32 à 90 | 78 | 49 à 108 | 84 | 25 à 100 | 73 | 31 à 120 | 83 | 84 à 104 | 86 | | _ |

Var. : domaine de variation des valeurs de R.

Moy. : moyenne des valeurs de R pour la hauteur de pluie considérée.

Les résultats montrent qu'il existe de fortes variations de l'indice R pour des pluies de même hauteur et que les variations augmentent rapidement avec la hauteur de la pluie (Cf. tableau 3.2). Par contre, les moyennes des classes de hauteur pour de nombreuses pluies

(plus de 30 par station et par classe) varient peu d'une station à l'autre, depuis la basse Côte d'Ivoire jusqu'au Niger (Voir tableau 9, page 31, ROOSE 1977).

L'étude de la répartition spatiale de cet indice R en Afrique pose des problèmes : d'une part le nombre de postes météorologiques équipés d'un pluviographe capable d'enregistrer des intensités très fortes pendant de courtes durées (5 minutes) est réduit et, d'autre part la période pendant laquelle ces postes ont fonctionné est généralement très courte.

Par contre, il existe en Afrique de l'Ouest un réseau relativement serré de postes d'observations de la hauteur des pluies journalières depuis 20 à 50 ans, ce qui permet de calculer des hauteurs moyennes annuelles représentatives.

Nous avons donc été amené à étudier directement les liaisons existant entre la hauteur des pluies journalières et l'indice d'agressivité R et nous avons constaté (ROOSE, 1975-1976-1977) :

- que dans la basse Côte d'Ivoire, il existe une régression rectilinéaire (R = ah + b) entre cet indice R et la hauteur des averses de type "mousson" tombant de juin à septembre;
- qu'il existe des régressions curvilinéaires (log R = f(log h)) pour les pluies orageuses extrêmement voisines pour des postes aussi éloignés qu'Abidjan et Ouagadougou;
- que ces relations ne sont valables qu'en moyenne avec un échantillonnage suffisamment étendu.

En transformant jour après jour les hauteurs des précipitations (selon leur nature) en indice R, et ceci pour un minimum de 5 ans, nous avons obtenu des écarts inférieurs à 5% par rapport à l'indice annuel moyen calculé selon la méthode CTFT (1966).

Il y a donc là un moyen de transformer de longues séries d'observations de pluies journalières (20 à 50 ans) pour trouver des moyennes annuelles et mensuelles satisfaisantes des indices d'agressivité de la pluie et tenter d'en cartographier la répartition (ROOSE, 1973).

Ce faisant, il nous est apparu qu'il existe une relation empirique simple entre l'indice d'agressivité annuel moyen (R am) sur une période suffisamment longue (5 à 10 ans) et la hauteur de pluie annuelle moyenne (H am) durant la même période :

R am / H am = $0.50 \div 0.05$ Equation 3 ROOSE (1975-1976-1977)

Ce rapport s'est avéré suffisamment constant en une vingtaine de points dispersés de la Côte d'Ivoire au Niger et du Sénégal au Tchad, à l'exception des postes météorologiques situés sur ou dans la zone perturbée par les montagnes (DCHANG et BEFANDRIANA où les périodes d'observation sont trop courtes, ainsi qu'en bordure immédiate de la mer où il est respectivement plus faible et plus fort.

Mises à part ces exceptions, le rapport Ram/Ham varie autour de 0.5 d'une façon qui paraît aléatoire d'une année à l'autre et d'un poste au voisin, si bien qu'en absence de données nouvelles sur des séries suffisamment longues d'observation, il semble raisonnable d'utiliser le rapport Ram/Ham = 0.35 pour les zones montagneuses,

0.60 pour la frange cotière

0.50 pour tout le reste de la zone étudiée, quelque soit le rapport Ram/Ham mesuré en fait pendant 4 à 12 ans.

Cette relation nous a permis de dresser une première esquisse de la répartition de cet indice en Côte d'Ivoire (ROOSE, 1973), en Haute-Volta (ROOSE, ARRIVETS, POULAIN, 1974), au Bénin (ROOSE, 1976) et finalement pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (ROOSE, 1975). Il s'agit de documents de travail provisoire en attendant le dépouillement de séries suffisamment longues d'observation. La précision de cet indice estimé (5%) est largement suffisante pour l'utilisation sur le terrain de l'équation de prévision de l'érosion de WISCHMEIER et SMITH (1960). Une étude récente en République du Bénin(AALDERS, 1976) confirme nos conclusions sur le rapport Ram/Ham: dans l'intérieur du pays, il est toutefois plus proche de 0.55 que de 0.50, mais cet écart provient sans doute d'une différence de dépouillement des pluviogrammes et de la

Fig. 3.5 - Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (Rusa de Wischmeier) en Afrique de l'Ouest et du Centre - Situation des parcelles d'érosion - <u>D'après</u> les données pluviométriques rassemblées par le Service Hydrologique de l'ORSTOM et arrêtées en 1975.

courte durée des observations (2 à 5 ans).

Il découle de l'esquisse présentée à la figure 3.5 que l'agressivité climatique est très élevée en région tropicale humide et décroft
presque parallèlement aux isohyètes entre Abidjan (Ham = 2100mm,
Ram = 1260) et Ouagadougou (Ham = 830mm et Ram = 430). Ceci s'explique
par le parallélisme existant entre les courbes "intensité x durée", la
hauteur de l'averse décennale et la hauteur des précipitations annuelles
moyennes dans cette région (BRUNET-MORET, 1963 et 1967).
Les pluies étant de même type dans toute cette zone (à part les régions
côtières et montagneuses), il n'est pas indispensable de faire intervenir un indice tenant compte de l'intensité des pluies en plus de
leur hauteur, comme cela a été proposé par WISCHMEIER aux U.S.A. (1962),
MASSON en Tunisie (1971) et KALMAN au Maroc (1967).

A titre de comparaison, signalons que l'indice d'agressivité des pluies annuel moyen exprimé en unités anglaises (foot.tons/ acre.inch) varie de :

- 20 à 550 aux U.S.A. (WISCHMEIER et SMITH, 1978);
- 20 à 120 en climat tempéré (LAURANT et BOLLINE, 1978; PIHAN, 1978);
- 50 à 350 en climat méditerranéen (MASSON, 1971; KALMAN, 1967; MASSON et KALMS, 1971; PIHAN, 1978);
- 200 à 600 en zone tropicale sèche (ROOSE, 1975);
- 500 à 1400 en zone subéquatoriale de Côte d'Ivoire (ROOSE, 1975).

Il découle de tous ces résultats que l'agressivité des pluies en région tropicale est extrêmement élevée par rapport à celle d'autres régimes climatiques pourtant réputés érosifs (le climat méditerranéen par exemple). Mais il faut souligner que cet indice ne concerne que l'érosion en nappe et ne convient plus lorsque l'érosion est linéaire comme c'est le cas sur les sols riches en argiles gonflantes, sur les fortes pentes et là où les transports solides dépendant des glissements de terrain et des divagations du réseau hydraulique comme c'est fréquent dans les paysages jeunes entourant le bassin méditerranéen.

CONCLUSION

=======

Ayant ainsi situé les précipitations de la séquence bioclimatique étudiée dans l'échelle des valeurs mondiales d'agressivité climatique, il sera plus facile de comprendre l'importance décisive du climat dans les manifestations parfois spectaculaires de l'érosion en région tropicale.

Mais, auparavant, il faut préciser le mode d'action du ruissellement qui relaie la battance des pluies dans la dynamique de l'érosion sur fortes pentes et ensuite analyser les facteurs de l'érosion qui conditionnent ces manifestations.

2 - LE RUISSELLEMENT

a) Définition

Par ruissellement, nous entendons la fraction des pluies qui ne peut s'infiltrer à l'intérieur du sol pour des raisons diverses et qui s'échappe au bas d'une parcelle expérimentale entièrement isolée (case d'érosion ou case ERLO). Il ne s'agit pas d'une valeur absolue (sauf si la parcelle comprend le sommet du versant) mais plutôt d'une valeur comparative et relative à différents traitements auxquels sont soumis différents types de sols. Nous exprimerons le ruissellement (qui est un terme du bilan hydrique de la parcelle) par le rapport entre la lame d'eau ruisselée et la lame d'eau précipitée. Ce rapport peut être considéré en moyenne sur l'année (KRAM = coefficient de ruissellement annuel moyen en pourcentage des précipitations), ce qui intéresse le bilan hydrique, ou au cours d'une averse élémentaire (KR MAX = coefficient de ruissellement maximum pour une averse donnée) ce qui régit le dimensionnement de toute une série d'ouvrages (fossés d'assainissement, ponts, déversoirs et hauteur des barrages, etc...).

b) L'énergie du ruissellement.

Au paragraphe précédent, nous avons souligné l'importance de l'énergie cinétique des pluies en zone tropicale et surtout en zone subéquatoriale : elle est trois à cinquante fois plus élevée qu'en climat méditerranéen ou tempéré. Nous avons fait remarquer que c'est l'énergie des gouttes de pluie qui est à l'origine des phénomènes d'érosion en nappe. Il reste à démontrer que l'énergie apportée par le ruissellement est inférieure à celle des pluies. Le tableau 3.3 tiré du livre de HUDSON (1973) nous le fera comprendre aisément. Rappelons que l'énergie cinétique (Ec) est une fonction de la masse (m) et du carré de la vitesse (V) de la matière en mouvement.

$$Ec = I/2 \text{ m.V}^2$$
 Equation 4

Tableau 3.3 : Calcul de l'énergie cinétique d'une pluie et du ruissel------ lement qui en résulte (HUDSON, 1973).

| 1 | PLUIE | RUISSELLEMENT |
|---------|--|--|
| Masse | Soit P = masse des pluies | soit un KRAM = 25% |
| | m pluie = P | mruiss. = P/4 |
| | ************************************** | |
| Vitesse | Soit la vitesse finale des gouttes | soit la vitesse du ruissel- lement sur un champ |
| | Vp = 8m./sec. | Vr = 1 m./sec. |
| | | |
| Energie | $1/2 P \cdot (8)^2 = 32 P$ | $1/2 \cdot P/4 \cdot (1)^2 = P/8$ |

La pluie possède donc 256 fois plus d'énergie que le ruissellement sur ce champ. Cependant la pente du terrain va intervenir. Lorsque la pente du terrain augmente, le volume ruisselé n'augmente pas forcément, mais bien la charge solide (ROOSE, 1973). C'est donc que la vitesse des eaux ruisselantes augmente avec la pente, ce qui suppose le rassemblement

des eaux en filets hiérarchisés, moins sensibles que les nappes ruisselantes aux forces de frottement développées par les aspérités de la surface du sol. Et, comme l'énergie des pluies est indépendante de la pente des versants, il arrive un moment où, l'inclinaison du versant augmentant, l'énergie du ruissellement croît jusqu'à dépasser celle des pluies. Ainsi dans certaines régions, les filets d'eau ont naturellement tendance à se regrouper, par exemple sur les sols bruns et les vertisols, sur les reliefs jeunes et dans les zones méditerranéennes ou désertiques (cf. les vertisols sur marne du Pré-Rif marocain : HEUSCH (1970 à 1971).

Voyons donc quelle importance peut prendre le ruissellement en milieu naturel ou aménagé dans la séquence bioclimatique étudiée et quels sont les facteurs qui influencent son importance.

2.1. Le ruissellement dans le milieu naturel (cf. tableau 3.8)

21.1 : Sous forêt, le ruissellement est extrêmement réduit. Le KRAM ne dépasse guère 0.1 à 2% des pluies annuelles, tandis que le KRMAX atteint l à 7% lors des averses violentes tombant sur un sol détrempé. Deux cas font exception : une très forte pente et une parcelle sur un sol issu de schiste. A Adiopodoumé, en effet, le ruissellement maximum a plus d'une fois dépassé 12% sur un versant de 65%. A Azaguié, le KRAM a atteint 5.5% en 1968 (année particulièrement humide) et 34 à 39% pour des averses unitaires. Sur les pentes les plus répandues (5 à 30%), il semble que le ruissellement soit nettement plus fort sur les sols issus de schiste que sur ceux qui sont issus de granite ou de sédiments tertiaires.

La forêt, avec sa frondaison dispersée sur plusieurs étages, les buissons et la litière de feuilles mortes, couvre le sol toute l'année et le protège contre l'énergie des gouttes de pluie. La vitesse d'infiltration reste élevée tout au long de la saison des pluies. Seule peut intervenir la saturation du sol au-dessus d'un horizon relativement peu perméable, à faible macroporosité : c'est le cas de la base de la nappe graveleuse à Azaguié et de l'horizon jaune rouge (profondeur > lmètre) à Adiopodoumé.

En général, sur une même station, le ruissellement n'est pas systématiquement plus élevé les premières années de mesure que les suivantes et le coefficient de ruissellement annuel n'est pas nettement influencé par la hauteur des précipitations annuelles; à Azaguié le ruissellement est certes le plus fort en 1968, année où les pluies sont les plus élevées (P = 2051mm), mais le ruissellement est presque aussi abondant en 1970 (KRAM = 5.1 KRMAX = 39%) alors que les précipitations atteignent à peine 1660mm.

Des résultats semblables ont été observés sur trois parcelles couvertes de fourrés forestiers denses de la station d'Agonkamey dans le sud de la République du Bénin (cf. VOLKOFF, VERNEY, WILLAIME, 1965-1970; ROOSE, 1976).

Il semble enfin que pour un même type de sol sur matériau sablo-argileux tertiaire, le ruissellement augmente lorsque la pente des versants s'accentue : ainsi à Adiopodoumé, pour des pentes s'étalant de 7 à 11-20 et 65%, le KRAM passe de 0.1 à 0.3 - 0.5 et 1.2% et le KRMAX de 0.7 à 1.3 - 3.2 et 12% du montant d'une averse.

Comme en forêt, le ruissellement court entre le sol et la litière, il est continuellement freiné par les aspérités du sol et piégé par les trous laissés par les racines pourries et la faune. Sa trajectoire est discontinue et son volume réduit dans la séquence étudiée.

21.2 : Sous les savanes ou les vieilles jachères protégées depuis quelques années, les ruissellements moyens (KRAM = 0.02 à 5%) et maxima ne sont guère plus élevés que sous forêt.

a) Rôle des feux

Par contre la situation est radicalement différente si des feux interviennent chaque année. L'exemple de Gonse (au tableau 3.4) est très significatif à cet égard (pente 0.4%)

Tableau 3.4. : Effet du feu de brousse sur le ruissellement d'une parcelle (Gonse : 1967-1973)

| Précipitations (mm) | Protection intégrale 674 et 799 | Feux précoces 759 et 810 | Feux tardifs 553 à 691 |
|------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| KRAM % | 0.2 | 2.5 | 15 |
| KRMAX % | 1 | 10 | 50 à 70 % |
| | | | |

Il y a en effet une différence très nette de couverture du sol au cas où le feu traverse une parcelle.

- Si le feu est précoce (un mois après la dernière pluie utile), il passe vite, brûle les parties aériennes desséchées, mais ne détruit ni les souches d'herbes ni les grosses branches d'arbres: il élimine, par contre, les jeunes semis, la litière de feuilles mortes et bon nombre d'insectes.
- Les feux tardifs comme on peut en voir en pays Senoufo ou sur le plateau Mossi en avril-mai sont catastrophiques. En effet, les herbes étant très sèches à cette époque, le feu s'attarde sur chaque souche d'herbe, détruit la moindre paille, les parties aériennes des buissons et parfois même certains grands arbres; le sol est pratiquement nu et restera très mal protégé pendant un an minimum : les averses orageuses battent alors la surface du sol, forment une pellicule de battance très peu perméable qui donne naissance à d'abondantes nappes de ruissellement.

b) Rôle de protection intégrale

Par contre, si la parcelle est totalement protégée du pâturage et des feux, les hautes herbes et les buissons prospèrent, couvrent entièrement le terrain en deux à quatre ans, produisent une abondante litière qui absorbe l'énergie des gouttes de pluie et favorise l'activité de la mésofaune : celle-ci brasse et perfore les horizons superficiels.

Les essais sur les jachères de Saria mettent en lumière

l'influence des pailles résiduelles laissées sur le sol depuis fin 1971 (voir tableau 3.5).

Tableau 3.5: Influence de la protection intégrale sur le ruissellement mesuré sous deux jachères. En 1974, avant les premiers orages, exportation de la litière (SARIA)

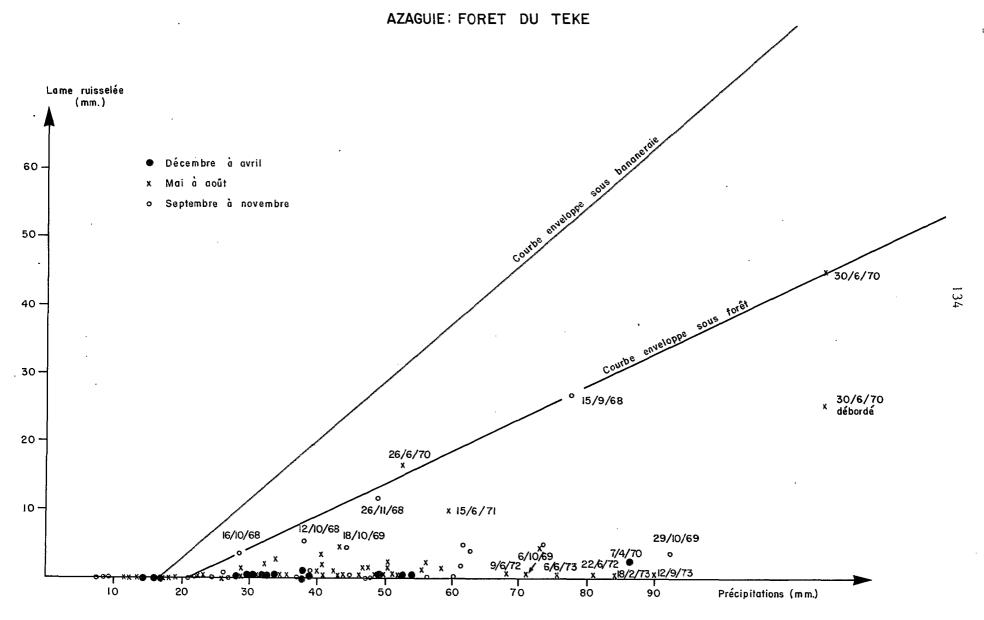
| ANNEES | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 |
|------------------------------------|----------|---------|---------|---------|
| Précipitations mm | 602 | 724 | 672 | 714 |
| Ruissellement : | | | | |
| - sur jeune jachère KRAM % KRMAX % | 20 51 | 5 29 | 6 22 | 8 30 |
| - sur vieille jachère | | | | |
| KRAM % KRMAX % | 10 41 | 0.4 | 0.3 | 3 8 |

En 1971, le ruissellement est très élevé sur les jachères, car la plus jeune jachère était encore peu couverte et la plus ancienne était pâturée de façon extensive.

Au cours des deux années de protection intégrale, le ruissellement (et l'érosion) s'est maintenu à un niveau très bas. En avril 1974, avant les premiers orages, toutes les herbes et les feuilles sèches couvrant la surface des parcelles ERLO ont été ramassées : les coefficients de ruissellement moyens et surtout maxima sont aussitôt remontés de plusieurs %, sans pour autant retrouver le niveau initial, car les souches d'herbes sont reparties vigoureusement dès les premières pluies (elles n'avaient pas brûlé).

c) Rôle des touffes d'herbes et de la mésofaune

Cependant, en absence de feu et de pâturage, l'infiltration redevient bonne après quelques années de protection. En effet, si les tests d'infiltration au double anneau (PIOGGER ou MUNTZ) ont montré à Saria que l'infiltration est très faible entre les touffes d'herbes



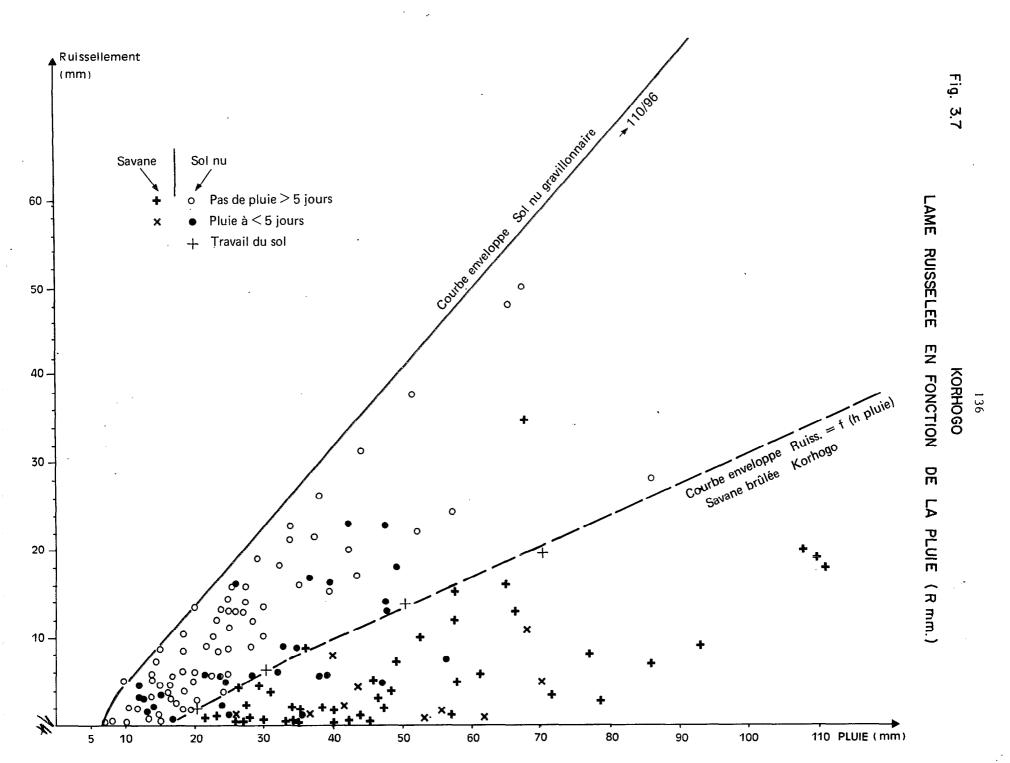
sur les plages dénudées (I = 10 à 20mm/h) elle est cinq à dix fois supérieure sous les touffes; les termites et d'autres animalcules y trouvent en effet un abri qui leur convient, y construisent de petits édifices très temporaires et creusent des galeries qui, jointes aux canalisations laissées par les racines pourries, favorisent l'infiltration(ROOSE, 1979). On conçoit dès lors que plus les herbes croissent, plus elles couvrent la surface et dévient de leur trajectoire les gouttes de pluie pour les guider vers la base des touffes où elles s'infiltrent facilement.

Il faut ajouter le rôle de frein au ruissellement joué par les tiges des plantes, par les racines subaériennes et surtout par la litière. En diminuant la vitesse du ruissellement, on augmente le temps de l'infiltration et aussi son volume : ce freinage est cependant plus efficace sur la charge solide que sur le volume ruisselé (baisse de la compétence du ruissellement, cf. les bandes d'arrêt).

d) Rôle de l'humidité du sol

Outre la densité du couvert végétal au coeur de la saison des pluies, le type de sol, la structure et l'état de sa surface (pellicule de battance), la texture des altérites et la pente du versant, l'humidité du sol avant la pluie joue également un rôle très important. Aux figures 3.6 et 3.7 sont présentées les relations entre la hauteur de pluie et la lame ruisselée (en mm) pour la forêt et la bananeraie d'Azaguié ainsi que pour la savane brûlée et la parcelle nue de Korhogo. Les courbes enveloppes représentent le ruissellement maximum observé lorsque le terrain est saturé, c'est-à-dire lorsque le temps Ta entre deux averses est inférieur à 24 heures. Plus ce laps de temps s'allonge, plus le sol sera desséché et donc apte à infiltrer une nouvelle fraction d'averse. On remarque (figure 3.6) que dans la forêt du Téké, des pluies de 80 à 90 millimètres de hauteur n'ont donné lieu qu'à un ruissellement négligeable ou nul; ce fut également le cas à Adiopodoumé en P6 (ROOSE, 1966).

Par contre, à Korhogo (figure 3.7), sous savane brûlée, toutes les pluies de plus de 60 millimètres ont donné lieu à du ruissellement, mais un ruissellement souvent nettement moins important que celui prévu par la



courbe enveloppe. En outre, le point de rencontre de cette courbe enveloppe avec l'axe des abcisses, montre qu'il faut un minimum de 14 à 18 millimètres de pluie à Korhogo pour que naisse le ruissellement sous la savane de Korhogo et plus de 22 millimètres de pluie dans la forêt d'Azaguié. Sur sol nu, il suffit de 7 millimètres de pluie pour que se déclanche le ruissellement à Korhogo, alors qu'il en faut 17 sous bananeraie à Azaguié.

Conclusion : Comparaison forêt - savane

Les raisons sont nombreuses pour lesquelles le ruissellement est généralement plus abondant en zone de savane qu'en région forestière.

- 1 Les sols ferrugineux tropicaux sont plus riches en limons et sables fins et moins perméables dans leur masse que les sols ferrallitiques (10 à 20mm/heure contre 60 à plus de 800mm/h).
- 2 Sous savane, la litière est brûlée chaque année, si bien que les horizons superficiels sont très pauvres en carbone et azote organique et leur structure devient très peu stable.
- 3 Sous savane parcourue par le bétail et les feux, le sol est mal couvert en début de saison et la battance des pluies forme une pellicule à structure lamellaire à la surface du sol, laquelle commande l'infiltration à l'intérieur du profil.
- 4 Les pentes les plus répandues dans les paysages de savane étant plus faibles que sous forêt (voir tableau 1.1.) on aurait pu penser que la rétention d'eau à la surface du sol (flaques) serait plus élevée sous savane. En réalité, des études au simulateur de pluie ont montré que sur sol sec, la pluie d'inbibition (celle qui tombe avant que commence le ruissellement) est plus importante et plus variable sur les sols ferrallitiques que sur les sols ferrugineux tropicaux (COLLINET, VALENTIN, 1979).

.2.2. Le ruissellement sous cultures

Sous culture, et à plus forte raison sur sol dénudé, le ruissellement est généralement beaucoup plus élevé que sous le couvert

naturel (voir tableau 3.8 et figures 3.6 et 3.7).

Le coefficient de ruissellement annuel moyen passe de 2 à 35% à Adio-podoumé, de 0.2 à 26-49% à Bouaké, de 3 à 40% à Korhogo et de 2 à 45% près de Ouagadougou (Gampela et Saria). Le KRMAX. atteint 60 à 80% lors de violentes averses tombant sur des sols mal couverts et jusqu'à 98% sur sol nu(Adiopodoumé et Korhogo: ROOSE, 1973 et 1979).

a) Variabilité en fonction des cultures

On peut cependant constater au tableau 3.8 la grande variabilité du ruissellement sous culture : toutes les plantes cultivées et toutes les techniques culturales n'entraînent heureusement pas une dégradation aussi rapide de l'infiltration. L'aménageur pourra tirer parti de cette variabilité pour choisir la mise en valeur la mieux adaptée aux conditions écologiques du terroir.

Ainsi, sous plantation d'hévéa de l'Anguededou, le ruissellement observé est très voisin de celui des versants forestiers de même pente à Adiopodoumé (KRAM = 0.5%).

Sous forêt primitive de Divo, le ruissellement est même légèrement plus élevé que sous la cacaoyère qui lui a succédé sur la même parcelle (KRAM = 0.4%) : le recru forestier régulièrement rabattu dans les interlignes et les cacaoyers protègent aussi bien le sol que la forêt de 40 mètres de haut qui les a précédés.

b) Influence de l'utilisation des résidus de culture.

L'ananas est une plante qui protège généralement bien le sol: son architecture en entonnoir lui permet de rassembler les eaux de pluie vers la ligne de plantation où l'infiltration n'a pas été dégradée par la passage des ouvriers et des engins, comme dans les interlignes.

Tableau 3.6: Ruissellement (KRAM %) sous ananas en fonction de la pente et des techniques culturales (Adiopodoumé 1975-1976)

| Pluie≃3337mm/16mois | 1 | <u>AN</u> Brûlés | | Résidus en surface | Moyen./ |
|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|----------------------|
| Pente 4% 7% 20% | 44.6 34.7 29.3 | 7.3 4.4 7.5 | 1.7 1 3.4 | 0.9 0 1.0 | 13.6 10.0 10.3 |
| Moyen./Traitement | 36.2 | 6.4 | 2.0 | 0.6 | 11.3 |

Il apparaît au tableau 3.6 que lorsque la plantation est effectuée à une date proche (mai) de la période très pluvieuse (15 mai - 15 juillet), le mode d'utilisation des résidus de culture a une influence remarquable sur l'infiltration.

Au cas où les résidus sont brûlés et enfouis avant la plantation des ananas, le ruissellement est réduit au I/6ème de celui qu'on a mesuré sur les parcelles nues qui servent de témoin (effet du couvert de l'ananas). Si les résidus sont enfouis après desséchement à l'air, le ruissellement n'est plus que le 1/18ème de celui du témoin (effet du couvert plus matières organiques du sol). Et, si les résidus sont laissés en surface (= mulch de 20t/ha de matière sèche), le ruissellement est quasi nul quelle que soit la pente. C'est là un exemple du rôle considérable que peut jouer le paillage du sol qui, pour atteindre son efficacité optimale pour protéger le sol de l'agression des pluies, doit avoir là 2 centimètres d'épaisseur ou environ 4 à 6t/ha de matières sèches, quelle que soit la nature de celles-ci (ROOSE, LACOEUILHE, 1976).

c) <u>Influence de l'inclinaison de la pente</u>

Sous culture, le ruissellement augmente généralement avec l'inclinaison de la pente, mais cette tendance est beaucoup moins systématique qu'on le pense : il y a des seuils qui dépendent du type de plantes et de l'aménagement de la surface du sol (voir tableau 3.6). Sur sol nu, par contre, le ruissellement peut décroître lorsque la pente augmente. Nous avons déjà signalé cette observation étonnante (ROOSE, 1973). Depuis lors, nous avons pu la vérifier avec le simulateur de pluie (LAFFORGUE et NAAH, 1976; ROOSE et ASSELINE, 1978) et sous pluies naturelles (ROOSE, LACOEUILHE, 1976).

HUDSON (1957) avait émis l'idée qu'au-delà de 2% de pente, le ruissellement n'augmente pas forcément avec la pente, contrairement aux transports solides. LAL (1975) constate sur des parcelles nues près d'Ibadan au Nigéria, qu'il n'y a pas de différence significative du ruissellement pour des pentes variant de 1 à 15% : d'après cet auteur, cela tient aux variations des propriétés hydrodynamiques des sols tout au long du versant.

Nous avons tenté d'expliquer cette observation (ROOSE, 1973).

A côté des erreurs de projection verticale des parcelles pentues, il nous semble que, dans le cas des sols sur les sables tertiaires, il faille faire appel à deux processus qui concourrent à ce fait étonnant.

- 1 Sur faible pente, le ruissellement a tendance à s'organiser en filets sans avoir l'énergie suffisante pour creuser de vraies rigoles. Sur les versants de plus de 15%, par contre, le ruissellement cisèle la surface du sol, creuse tout un réseau de rigoles et développe cette surface de telle sorte qu'un nombre plus élevé de pores débouchent à l'air libre et participent à l'infiltration.
- 2 Sur faible pente, le ruissellement n'a pas assez d'énergie pour déplacer en suspension toute la terre désagrégée par la battance des gouttes. Les sables se trainent donc à la surface du sol, en colmatent les pores et accélèrent la formation d'une pellicule de battance très peu perméable. Sur forte pente, au contraire, le ruissellement est assez fort, non seulement pour transporter toutes les particules détachées, mais aussi pour décaper le fond des rigoles et cisailler les surfaces interrigoles : les pores restent donc ouverts et le ruissellement est moins important que sur des pentes moindres.

d) Influence de la longueur de la pente

L'influence de la longueur de la pente sur l'intensité du ruissellement est encore moins marquée. WISCHMEIER (1966) rapporte qu'il n'a pas trouvé de relation significative entre le ruissellement et la longueur des parcelles d'érosion : les expériences ont duré dix ans dans douze Etats d'Amérique BORST et WOODBURN (1942) n'avaient pas trouvé d'effets significatifs non plus.

A Ibadan, LAL (1975) a observé sur des pentes de 10 à 15% que le ruissellement (et l'érosion) sont plus forts sur des parcelles de 12 mètres de long que sur celles de 37 mètres. Il en conclut cependant que l'influence de la forme de la pente (ruissellement sur pente convexe > normale > concave) domine largement celle de la longueur de la parcelle.

A Adiopodoumé, VALENTIN (1978) a montré qu'en moyenne sur une douzaine de pluies simulées (de 60 - 90 et 120 millimètres/heure) totalisant 650 millimètres de hauteur (R = 1200), le ruissellement sur des parcelles nues fraichement défrichées de 6% de pente, varie ainsi :

longueur pente = 1 - 2 - 5 - 10 mètres KR. moyen. % = 27% - 29 - 23 - 20% des pluies

Il semble donc que la pente (longueur et inclinaison) n'a pas une influence très constante, ni très importante sur le ruissellement.

e) Influence du travail du sol

Par contre, l'homme peut transformer radicalement l'hydraulicité d'un versant en modifiant artificiellement sa rugosité, sa stabilité structurale ou sa porosité.

Pour DULEY (1939), l'influence sur le ruissellement de l'encroûtement de la surface d'un sol est finalement plus importante que le type de sol et la porosité de ses différents horizons. BURNELL et LARSON (1969) ont démontré que le retard apporté au démarrage du ruissellement, suite à un labour, dépend moins de la profondeur de sol remué que de la rugosité de la surface du sol. HARROLD (1967) pense que dans les régions où l'on craint surtout les orages d'été, intenses mais brefs, le labour profond en courbe de niveau peut retarder considérablement le démarrage du ruissellement en augmentant la rugosité de la surface du sol et sa macroporosité (= son pouvoir d'éponge). Le sous-solage effectué en sec sur des sols à horizon durci à faible profondeur, peut augmenter l'infiltration à condition de faire éclater la masse de l'horizon induré et colmaté (BIROT et GALABERT, 1967; MASSON, 1971).

MANNERING, MEYER et JOHNSON (1966) rapportent qu'en cinq ans de traitement du maïs en "minimum tillage", l'agrégation du sol et l'infiltration (gain 24%) ont augmenté, tandis que l'érosion a baissé (de 34%) par rapport au traitement conventionnel (=labour en plein). Tous ces auteurs insistent sur l'importance qu'il y a d'éviter de pulvériser

la surface du sol lors de la préparation du lit de semence. D'où l'idée de n'émietter que la ligne de semis et de laisser les interlignes en grosses mottes recouvertes ou non de déchets de culture (MANNERING, MEYER et JOHNSON, 1966; MASSON, 1971; SHANHOLD et LILLIARD, 1969).

Au Nigéria (Ibadan), LAL (1975) considère que les risques d'érosion sur des champs dénudés par le labour sont tels - suite à la dégradation de la structure à la surface de celui-ci - qu'il préconise un travail minimum du sol à la ligne de plantation tandis que les interlignes sont couverts des résidus de la culture précédente. Cette méthode du travail minimum du sol combiné au paillage, pose certains problèmes de lutte contre les mauvaises herbes et de protection phytosanitaire, de telle sorte qu'elle ne donne pas toujours les rendements les meilleurs lors des années correctement arrosées; mais au cas où les pluies sont insuffisantes, ou mal réparties, l'amélioration de l'infiltration, la limitation des pertes par érosion, le maintien de la structure à son niveau original, l'activité accrue de la mésofaune (surtout les vers de terre) et l'amélioration du régime thermique assurent une production soutenue.

Par contre, sur les sols ferrugineux tropicaux sableux des zones tropicales sèches du Sénégal, CHARREAU et NICOU (1972) ont montré que sans labour profond, les rendements diminuent de moitié, car l'alimentation hydrique n'est pas correcte : le réseau racinaire n'est pas assez développé et les pluies s'infiltrent mal dans ces sols sensibles à la battance ce qui retarde la date du semis. CHARREAU (1969) a observé qu'en enfouissant des matières organiques lors d'un labour en grosses mottes effectué avant la saison sèche, on augmente la stabilité de la structure et l'infiltration : les problèmes d'érosion s'en trouvent réduits d'autant. Sous l'impulsion de cet auteur, un essai a été réalisé au Centre de Recherches Agronomiques de Bouaké sur le même type de sol ferrallitique remanié riche en graviers qu'à Ibadan sur quatre parcelles nues en vue de mettre en lumière l'action du travail du sol. Quatre traitements furent comparés pendant quatre ans dont les résultats figurent au tableau 3.7

Tableau 3.7 : Effet du travail du sol sur une parcelle nue de 4% de pente sur le ruissellement (% des pluies) et sur l'érosion (t/ha/an) d'après KALMS (1975)

| Cases | d'érosi | on du | CRA | à | Bouake | |
|-----------|---------|-------|------|---|---------|--|
| Oases | T CLOST | ou aa | OIGI | • | DOGGLCC | |

| | l Plu | ie | | ssellemen les pluies | • | - | ; ; ; I | Érosion (| t/haˈ/an | ha/an) | | Turbidité (mgr/l.) | | | |
|-------|-----------|------------------|-----------|-------------------------|-----------|-----------|---------------|-----------|-------------|-------------|-------|--------------------|-----|-------------|--|
| Année | h (mm) | R _{USA} | L | L # P | P | 0 | L | L + P | P | 0 | 1 | L+P | P | 0 | |
| 1971 | 1345 | 523 | 34 | 32 | 35 | (41) | i 11,5 | 14,9 | 12,9 | | | - | - | - | |
| 1972 | 965 | 329 | 37 | 34 | 37 | <u>42</u> | 19,7 | 11,0 | 25,0 | 17,9 | i | | - | - | |
| 1973 | 959 | 352 | <u>35</u> | 40 | 47 | <u>49</u> | 17,6 | 9,3 | <u>48,6</u> | 41,1 | 690 | 730 | 680 | <u>210</u> | |
| 1974 | 1121 | 464 | <u>31</u> | <u>31</u> | <u>36</u> | 45 | 1 <u>12,2</u> | 11,2 | 43,8 | <u>51,9</u> | 580 | 340 | 570 | <u> 260</u> | |

D'après les résultats rapportés par KALMS (1975), le ruissellement est toujours supérieur sur sol nu non travaillé (0). Le labour favorise donc l'infiltration et le pulvérisage seul (P) ne réduit que modestement et très temporairement le ruissellement par rapport au non travail du sol; l'influence néfaste du pulvérisage sur la structure n'apparaît clairement qu'à partir de la troisième année.

Quant aux pertes en terre, elles évoluent au cours des années. Le labour (L+P) suivi ou non d'un pulvérisage (L), diminue considérablement l'érosion (surtout à partir de la troisième année) en comparaison du sol travaillé superficiellement ou pas du tout. Et pourtant la turbidité moyenne des eaux de ruissellement (charge de particules fines en suspension) est nettement plus élevée si le sol est travaillé (turbidité = 0.34 à 0.73g/litre sur sol travaillé contre 0.21 à 0.26g/litre sur sol non travaillé), car la cohésion du matériau est réduite par cette intervention. Ces résultats reflètent donc à la fois l'augmentation de la porosité du sol par le travail, la diminution de sa cohésion ainsi que la remontée de graviers protégeant, à la manière d'un mulch, la surface des sols de la battance des pluies.

Sur le sol ferrallitique sablo-argileux d'Adiopodoumé, nous avons observé qu'un labour à la houe sur 15cm de profondeur peut absorber

EVOLUTION DU RUISSELLEMENT EN FONCTION DES TRAITEMENTS

Fig. 3.8

10

20

30

40

50

60

70

80

90

100

110

120

130

totalement des pluies de 45 à 80 millimètres et son action sur l'érosion et le ruissellement peut se faire sentir durant 3 à 5 semaines, pendant lesquelles il a plu 50 à 190mm. Son action favorable sur l'infiltration est donc limitée à un mois, mais la baisse de cohésion du matériau travaillé peut entraîner par la suite une érosion plus importante si la couverture végétale n'a pas recouvert le sol pendant ce laps de temps (ROOSE, 1973).

1

Les nombreuses expérimentations au simulateur de pluie, effectuées de 1975 à ce jour par ASSELINE, COLLINET, LAFFORGUE, ROOSE et VALENTIN confirment :

- l'amélioration très temporaire de l'infiltration par le labour : après une pluie totalisant 120 millimètres de hauteur, on ne trouve pratiquement plus trace de cette amélioration sur aucun sol testé entre Abidjan et le lac de Bam au centre de la Haute-Volta;
- l'augmentation de la charge en suspension fine des eaux de ruissellement après travail du sol;
- le rôle extrêmement bénéfique et durable sur la conservation de l'eau et du sol du couvert végétal et des résidus de culture laissés à la surface du sol;
- le rôle très efficace mais temporaire jusqu'au débordement lors d'une forte averse) du billonnage cloisonné et des autres méthodes qui visent à augmenter la rugosité du sol (LAFFORGUE et NAAH, 1976; ROOSE et ASSELINE, 1978; COLLINET et LAFFORGUE, 1979; COLLINET et VALENTIN, 1979).

La figure 3.8 rapporte des observations effectuées sous pluies simulées sur des sols ferrugineux de la zone tropicale sèche au nord de Ouagadougou et sur un sol ferrallitique de la région subéquatoriale d'Abidjan : elle illustre bien l'effet temporaire sur le ruissellement du labour et de l'augmentation de la rugosité du sol, l'action très efficace et soutenue de la présence du couvert végétal, des matières organiques du sol (résidus enfouis) et des résidus de culture disposés à la surface de la parcelle entre les lignes de plantation.

Quelle que soit la technique proposée, elle n'est efficace que dans la

mesure où elle élimine durablement la pellicule de battance superficielle qui commande, pour une bonne part, la dynamique de l'eau dans le profil (sauf s'il existe un horizon colmaté proche de la surface

3 - CONCLUSION SUR LES CAUSES DE L'ÉROSION

Nous avons montré au cours de ce chapitre que les pluies sont très agressives en régions tropicales, beaucoup plus que sous climat tempéré ou même méditerranéen.

Nous avons souligné le rôle essentiel de l'énergie des gouttes de pluie sur le démarrage de l'érosion, car elle seule permet à la fois le détachement des particules, leur transport sur une certaine distance, la destruction de la structure de l'horizon superficiel du sol et la naissance du ruissellement. Sur les versants peu inclinés des vieilles surfaces du bouclier africain, le ruissellement n'a pratiquement qu'un rôle de transport des particules détachées par les pluies (ou par la faune). Mais lorsque l'inclinaison des versants, ou la nature argileuse des sols (argile gonflante) permet aux filets d'eau de se réunir, le ruissellement acquiert une énergie abrasive propre.

Sous végétation naturelle, herbacée ou forestière, le ruissellement reste peu important : il faut des pentes fortes ou des collecteurs artificiels (sentier, fossé) pour que les eaux se rassemblent et ravinent le sol. Par contre, sous culture, le ruissellement peut atteindre des valeurs élevées et constituer une source secondaire d'énergie importante dont il faut tenir compte pour lutter contre l'érosion (voir conclusion de la seconde partie). Cependant, il vaut mieux supprimer le mal à la racine et empêcher la naissance du ruissellement à l'aide de techniques de préparation du sol qui n'exposent pas celui-ci à l'agressivité des pluies (plantes pérennes, plantes de couverture, paillage, résidus de culture, forte densité de semis, etc..). Mais il est clair que plus le climat est sec et contrasté, moins les couvertures végétales sont efficaces et plus il sera nécessaire de freiner le ruissellement par des méthodes mécaniques.

Tableau 3.8 Ruissellement (en % des pluies annuelles ou des pluies unitaires) et érosion (t/ha/an) en Afrique de l'Ouest sous végétation naturelle, cultivée ou sur sol nu travaillé.

| STATIONS | Pente Z | Ru | iss. az. moyen | z | Ruiss. | max. journal | lier % | Er | osion (t/ha/sn | , | _ |
|---|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|--|---|---|
| | | milieu nat. | sol nu | culture | milieu nat. | sol nu | culture | milieu nat. | sol nu | culture | Sources |
| Adiopedoumé: ORSTOM, 1954-75. Forêt dense sempervirente second. Pluie = 2100 mm.en 4 saisons Ferrallitique sur sables III Anguededou: IRCA-ORSTOM, 1966-69 | 4,5 7 11 20 65 29 | 0,1 0,3 0,5 1,2 | 35 33 - 24 - | 0,5 à 30 - hévéa 0,3 à 1 | 0,7 1.3 3.2 12 | 98 95 - 76 - | 60-87 - hévéa 2 à 4 | 0,017 0,034 0,052 0,455 | 60 138 | 0,1-100 - hévéa 0,06 à 3 | Roose 73-79 Roose 1970 |
| Hévéa sur terrases Azaguie: IRFA-ORSTOM, 1966-74. Forêt dense sempervirente Pluie = 1750 mm.en 4 saisons Sol ferrallitique sur schistes chloriteux | 14 | 0,4 à 5,5 md = 2 | - | banane 5,5 à 12 md = 9 | 3 à 39 Md =14 | - | banane 25 à 74 Md = 60 | 0,05-1,4 Md = 0,15 | - | hd = 0.2 banane 0,7-4,5 Md = 1,8 | Roose Godefroy 1977 |
| Divo : IFCC-ORSTOM, 1967-74. Forêt dense semi-décidue Pluie = 1450 mm.en 4 saisons Sol ferrallitique sur granite | 10 | 0,5 à 1,4 | - | cacao 0,3-0,4 | 3 a 6 | - | cacao 1 à 2,4 | 0,1 à 0,6 | - | cacao 0,06-0,1 | Roose, Jadin 1970-79 |
| Bouaké : IRAT-ORSTOM, 1960-73. Savane arbustive dense Pluie * 1200 mm.en 4 saisons Sol ferrallitique sur granite | 4 | Pro.0,03 FP.0,23 | 15-49 | 0,1 à 26 | Pro. 0,2 FP, 1 | 40 à 70 | 5 a 65 | PRO. 0,001 PF 0,050 | 11 à 52 | 0,1 à 26 | Kalms 75 Bertrand 67 Roose et B.72 Berger 64 |
| Korhego: ORSTOM, 1967-74. Savane arbustive claire dégradée Pluie = 1400 mm.en 2 saisons Sol ferrallitique sur granite | 3 | FP. à 5 Md € 3,0 | 25-40 Md = 33 | | 8 à 30 Md = 19 | 67 à 89 | - | 0,01-0,160 Md = 0,110 | 3 a 9 Md = 4 | • | Roose 1975-79 |
| Saria: IRAT-ORSTOM, 1971-74. Savane arborée claire à épineux Pluie = 850 mm.en 2 saisons Sols ferrugineux sur cuirasse peu profonde | 0,7 1,7 | Pro.5-8 Pat. 10 Pro.0,4 | 35 à 43 | 10 a 37 | Pro. 20-30 Pat. 41 Pro. 1 à 8 | 69-71 | 40 à 65 | Pro.0,2-0,7 Pat. 0,17 Pro. 0,10 | 14-35 No = 20 | 3-14 Mo = 7,3 | Arrivets 73 Roose et al. 1974-79 |
| Gonsé/Gampela : CTFT-ORSTON, 67/74. Savane arborée claire à épineux Pluie = 850 mm.en 2 saisons Sols ferrugineux trop. indurés Jur grante | 0,4 | Pro.0,2 FP 2,5 PT 15 | | | Pro , 1 FP. 8-10 FT. 50-70 | | | Pro.0,02-0,05 FP.0,05-0,15 FT.0,41 | | | Roose, Birot, 70 |
| <pre></pre> | 0,8 | | | 2 à 45 | = | • | 50-70 50-70 | 7 | _ 0 a 21 | - 0,6-10 | Roose, 78 CTFT, 72 |
| Séfa (Sénégal): IRAT-ORSTOM, 1954-63. Forêt sèche claire Pluie 1300 mm, en 2 saisons Sol ferrugineux tropical lessivé à tâches sur granite | 1 a 2 | Pro.0,1-1,2 PF 0,3-1,5 | 25 à 55 | 8 à 10 | - | - | - | Pro.0,02-0,2 FP.0,02-0,5 | 30 à 55 | 2 à 20 | Roose,67 Cha rreau, 1972 |
| Agonkamey (Dahomey):ORSTOM,1964-69. Fourré dense Pluie 1300 mm.en 4 saisons Sol ferrallitique/sables III | 4,4 | 0,1 a 0,9 ` | après défrichement 17 | 20 à 35 | 2,5 | 69 | 70-80 | 0,3 à 1,2 | 17 à 28 après dé frichement | 10 à 85 | Verney Volkoff Willaime,67 Roose, 73,76 |
| Ibadan (Nigéria) IITA 1972-73, Savane arbustive dense Pluie 1200 mm_en 4 saisons Sol ferrallitique/granite | 1 5 10 15 | | 31-58 38-62 36-57 30-57 | 0,1-15 3,2-36 3,4-26 2,9-25 | | 70-89 70-100 80-94 70-88 | 20-40 40-50 40-70 30-60 | / | 5-10 43-156 59-233 116-229 | 0-1.6 0,1-11 0,1-7 0,1-43 | Lal, 75 |

Pro = protection intégrale ; FF = feux précoces ; FT = feux tardifs ; Md = médiane ; Mo = moyenne arithmétique ;

Pat = pâturage extensif.

CHAPITRE 4: LES FACTEURS DE L'EROSION

Pour une parcelle donnée, l'érosion est une perte de terre sous deux formes : d'une part, des particules fines en suspension plus ou moins stables dans les eaux de ruissellement susceptibles de les transporter sur de longues distances, et, d'autre part, des sables ou des agrégats qui roulent à la surface du sol et sont souvent piégés sur le versant (terre de fond). Dans les cases d'érosion, la parcelle est complètement isolée de son environnement et les pertes vers l'aval ne peuvent être compensées, comme dans la nature, par les apports venus de l'amont. L'érosion mesurée n'a qu'une valeur relative; elle permet cependant de comparer l'influence de différents traitements sur l'érosion en nappe et en rigole.

Au chapitre précédent, nous avons montré que l'énergie des pluies est la cause première de l'érosion, tandis que le ruissellement assure le transport des particules détachées : nous avons montré les variations géographiques de l'érosivité des pluies tout au long de notre séquence bioclimatique, et en Afrique de l'Ouest en général. Il faut aborder dans ce chapitre l'influence des facteurs qui peuvent favoriser ou minimiser la résistance du milieu (sensu lato) à l'agression potentielle des pluies. Ils sont au nombre de cinq : la couverture végétale et les pratiques culturales, l'érodibilité du sol lui-même, la pente et les techniques antiérosives.

En analysant le tableau 3.8 et les tableaux plus détaillés en annexe I , nous observerons l'importance que prend l'érosion sous végétation naturelle herbacée ou forestière, puis nous discuterons de l'influence de ces facteurs sur l'érosion en milieu cultivé, en nous appuyant sur l'équation de WISCHMEIER et SMITH (1960-1978).

1 - L'ÉROSION DANS LE MILIEU NATUREL

Lorsque le sol est totalement couvert, que ce soit sous forêt dense, sous fourrés ou sous savane protégée, l'érosion s'est toujours avérée très faible (quelques kilogrammes à quelques centaines de kg/ha/an).

a) Variations interannuelles

En analysant les résultats annuels de plus près (voir tableau en annexe II), on est surpris par l'ampleur des variations interannuelles de l'érosion sur chaque parcelle (de 10 à 1 jusqu'à 300 à 1). Certaines de ces variations pourraient se justifier par l'agressivité particulière des pluies ces années là (c'est le cas pour les parcelles R2 et R3 à Adiopodoumé en 1965. Téké et Divo en 1968) ou par l'état de dégradation de la savane avant sa mise en défens contre le pâturage et le feu (cas de Bouaké, Saria et Gonse). Il n'en reste pas moins vrai que les pertes en terre (et surtout en terre de fond) sont nettement plus fortes les premières années qu'après deux à cinq ans d'expérimentation. Le rapport S/E entre les suspensions fines et l'érosion totale augmente systématiquement, ce qui indique que la proportion de sables déplacés à la surface du sol diminue. Il n'y a pas de doute que la stabilisation des terres remuées lors de la mise en place des bordures est à l'origine de ces phénomènes de décroissance systématique de l'érosion observée en milieu naturel. C'est donc parmi les chiffres les plus faibles qu'il faut chercher une estimation réaliste de l'érosion actuelle : nous avons donc retenu au tableau 3.8 la médiane des que nous disposons d'un nombre suffisant de résultats ou bien la moyenne des valeurs significatives dans le cas contraire. A titre d'exemple, l'érosion a été mesurée sur la parcelle forestière P6 de 23% de pente à Adiopodoumé de 1956 à 1965. En 1956, les pluies (2425mm) et le ruissellement (KRAM = 2.2%) furent importants et l'érosion a atteint 2600kg; dès l'année suivante, et malgré des précipitations du même ordre, le ruissellement a diminué jusqu'à 1 à 0.1% (selon les années) et les pertes en terre de 200 à 7kg/ha/an. En 1965, les précipitations atteignirent à nouveau 2300 millimètres, ce qui s'est marqué par une recrudescence du ruissel-1ement (KRAM = 0.6%) et de l'érosion (E = 227kg/ha). Nous avons donc retenu la médiane des neuf valeurs acceptables (soit 52kg/ha/an) comme valeur caractéristique.

b) Différences entre forêts et savanes

Les résultats dont nous disposons ne permettent pas de conclure qu'il y a une différence significative d'érosion entre le milieu forestier et les savanes étudiées, dès lors que celles-ci ont été protégées contre les feux. La comparaison est délicate il est vrai, car c'est l'ensemble du paysage qui change à chaque station (différences de végétation, de sols, de morphologie du versant, de répartition des pluies) et pas seulement le type de végétation. Cependant, les expériences antérieures (ROOSE, 1973-1977) ont montré que, quelque soit le type de végétation, de pente, de sol et d'agressivité climatique, l'érosion est négligeable si le sol est couvert à l'époque des averses agressives.

c) Influences de l'inclinaison de la pente et des feux de brousse

Il est vrai que l'érosion augmente avec la pente (de 17 à 455kg/ha/an) sous la forêt secondaire d'Adiopodoumé, mais cette croissance est bien faible en regard des différences de pente (de 7 à 65%). En milieu de savane par contre, il n'est pas du tout évident que ce soit le segment le plus pentu du versant qui ruisselle le plus. Les essais au simulateur de pluie l'ont montré sur la toposéquence de Puni (COLLINET et LAFFORGUE, 1979) près du lac de Bam. Le cas de Saria est aussi démonstratif car les sols gravillonnaires du haut de versant ont une pente de 1.7%, mais ils sont bien plus perméables et résistants à l'érosion (gravillons) que les sols ferrugineux tropicaux de mi-pente (pente = 0.7%).

Il est rare qu'une forêt soit à ce point dégradée qu'elle laisse le sol assez découvert pour que se manifeste l'érosion. Les savanes par contre, brûlent chaque année sur d'immenses territoires, ce qui a pour conséquence la médiocrité des teneurs en matières organiques des sols sous savane, l'instabilité de leur structure et leur moindre résistance à l'érosion. Dans nos essais, cependant, le niveau d'érosion de parcelles de 1 à 4% de pente sous savanes dégradées par le feu (E = 50

à 700kg/ha/an) n'est guère éloigné de celui des parcelles de forêts secondaires de 7 à 65% de pente (E = 20 à 800 kg/ha/an). On pourrait objecter que sous savane le ruissellement se rassemble dans des ravines et
que cette forme d'érosion doit s'étudier à l'échelle des bassins versants.
Nous verrons plus loin que, même à l'échelle des bassins versants, les
différences d'érosion entre la zone forestière guinéenne et les savanes
soudanaises ne sont pas aussi importantes que les géographes l'ont généralement laissé entendre (BIROT, 1971).

d) Influence du type de sol

Si le type de couvert végétal (forêt ou savane) et la pente n'entraînent pas forcément des différences notables de l'érosion, d'autres facteurs peuvent peut-être intervenir, tel que le type de roche mère, d'altération et de sol. Sous forêt secondaire, il semble effectivement que le ruissellement et même l'érosion soient plus élevés sur les sols ferrallitiques issus de schiste (Téké) que ceux issus de granite ou de sédiments sablo-argileux tertiaires.Le réseau hydrographique y est en effet plus dense et les pentes plus fortes, les taux de sables fins et de limons plus élevés dans le sol et les vers de terre plus actifs que sur les sols riches en sables grossiers issus de l'altération des granites et des sédiments tertiaires : la turbidité des eaux $(t = 700g/m^3)$ est plus forte à Azaguié que partout ailleurs (t = 200)à 500g/m³). De même, les sols ferrugineux tropicaux sont plus sensibles à l'érosion que les sols ferrallitiques, tous deux issus de granite (ROOSE, 1974, 1976, 1977). Cependant, une fois la savane de Gonse entièrement protégée des feux, les transports solides ont été aussi réduits que sous forêt dense (20kg/ha/an).

2 - L'ÉROSION DANS LE MILIEU AMÉNAGÉ

Tant que le sol est parfaitement couvert, qu'il s'agisse de forêt, de pâturages, de plantes de couverture ou d'un simple paillis de quelques centimètres d'épaisseur, les phénomènes d'érosion sont médiocres malgré l'agressivité des pluies, la fragilité des sols et la pente. Mais, lorsque le sol est totalement dénudé, comme c'est le cas

après défrichement mécanisé (Note), les pertes en terre sont multipliées par 100 à 1000 et le ruissellement par 20 à 50.

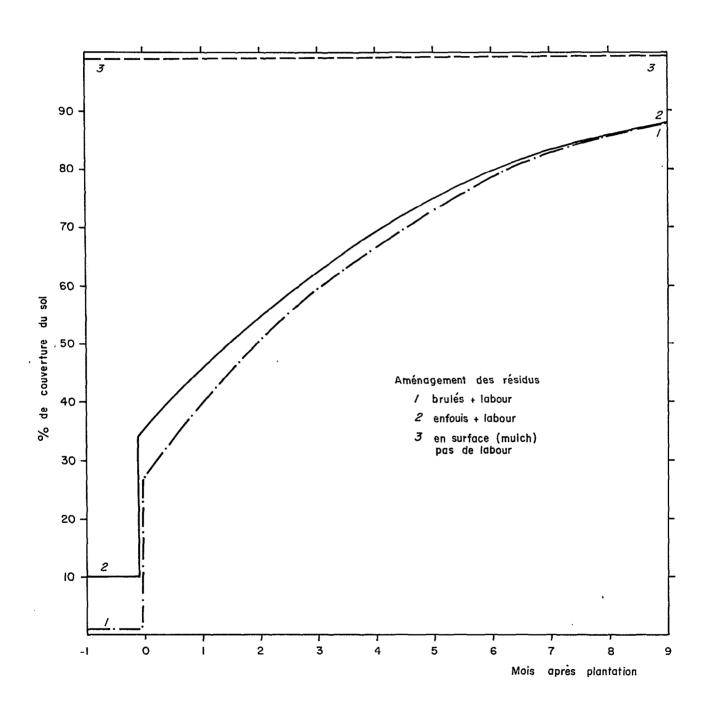
Ce n'est pas le lieu dans cette synthèse d'analyser en détail les innombrables essais qui ont été tentés depuis 25 ans sur les quelques 120 cases d'érosion mises en place en Afrique de l'Ouest. Nous ne donnerons qu'un exemple précis pour illustrer l'intervention des différents facteurs susceptibles de modifier l'expression de l'érosion potentielle. Nous tenterons ensuite de prendre assez de recul pour quantifier l'intervention de chacun des principaux facteurs en nous appuyant sur l'équation de WISCHMEIER et SMITH (1960).

Les problèmes d'érosion sont généralement beaucoup plus Note: aigus après défrichements mécanisés qu'après défrichements manuels. De nombreux auteurs (COINTEPAS et FAUCK en Casamance, ROOSE, BERTRAND et LEBUANEC en Côte d'Ivoire) ont signalé les dégâts causés au sol par les passages répétés des bulldozers pour abattre.puis traîner les arbres sur les andains, désoucher le sol et extirper les racines avant de labourer profondément, pulvériser, herser la surface et semer ; l'horizon humifère superficiel est décapé, partiellement dépouillé de son squelette racinaire et réduit en poudre. Lors du défrichement manuel, certes on supprime la majorité du couvert végétal, mais on laisse en place l'horizon humifère et tout le réseau racinaire qui protège sa structure, sa porosité (autant qu'un labour) et sa capacité d'infiltration. On peut voir au tableau 3.8 et en annexe I que le ruissellement et l'érosion n'ont guère augmenté sur les parcelles ERLO d'Anguédedou et de Divo après défrichement manuel et brûlage ménagé de la forêt, andainage et plantation d'hévéas dans le premier cas et de cacaoyers dans l'autre. COLLINET (1979) a mis ce phénomène en évidence sur un versant de la région de Tai : après défrichement manuel et plantation traditionnelle de riz de montagne, l'érosion n'a pas dépassé 300kg/ha/an, mais le ruissellement a doublé. Cette protection du sol par le réseau racinaire joue pendant deux à quatre années, après quoi, faute d'apports de matières organiques fraiches, la structure se dégrade, les racines pourrissent et les risques d'érosion augmentent.

Fig. 4.1 COUVERTURE VEGETALE TOTALE (Plants + résidus)

DURANT LES PREMIERS MOIS APRES PLANTATION

D'ANANAS



2.1 Première approche : un exemple

Sur douze parcelles d'érosion réparties sur trois pentes (4 - 7 et 20%) on a mesuré pendant trois cycles consécutifs l'influence combinée du travail du sol et de l'utilisation des résidus de la culture de l'ananas. Au tableau 4.1 sont reportées les mesures d'érosion pour le premier cycle qui a été planté juste avant la grande saison des pluies (ROOSE et LACOEUILHE, 1976).

Tableau 4.1.: Erosion (t/ha) sur sol nu, sous ananas en fonction de la pente (%) et des techniques d'utilisation des résidus de culture (Adiopodoumé 1975-1976)

| PLUIE/16mois H = 3336mm | . Sol nu Labouré | <u>ANAN</u> Brûlés | - · | US en surface | MOYENNE/ pour cha- que pente |
|--|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|------------------------------------|
| Pentes 4% 7% 20% | 45 136 410 | 1.2 4.1 69 | 0.7 0.8 33.2 | 0.1 0 1 | 11.8 35.2 128.3 |
| Moyenne pour chaque trai- tement | 197 | 24.8 | 11.5 | 0.4 | 58.4 |

Si on considère au tableau 4.1, les pertes en terre sur parcelle nue travaillée dans le sens de la pente, on observe que l'érosion

^{*} Cet essai fait partie d'une étude plus complète des influences du type d'utilisation des résidus de la culture de l'ananas sur l'érosion et sur la lixiviation des nutriments. Cette étude a fait l'objet d'un protocole d'accord entre l'ORSTOM, l'IRFA et deux Sociétés de production de l'ananas, la Salci et la Socabo.

croît plus vite que l'inclinaison de la surface du sol et cela malgré la diminution du ruissellement : c'est donc que la charge solide augmente très vite avec la pente.

Si on oppose à la parcelle nue, les parcelles cultivées en ananas dont la couverture cumulée des plants d'ananas et des résidus de la culture précédente varie de 30% au moment de la plantation (si résidus brûlés ou enfouis) à 100% (si les résidus sont laissés en surface), il apparaît clairement que le facteur qui a le plus d'influence sur l'érosion est le couvert végétal.

L'enfouissement des résidus de culture a accéléré la minéralisation et l'humification des résidus organiques disponibles, ce qui s'est traduit par une amélioration temporaire de la structure du sol et de sa perméabilité : le ruissellement et l'érosion n'en sont que modérément réduits.

Par contre, l'épandage d'un mulch de résidus à la surface du champ cultivé immédiatement après son labour a supprimé le ruissellement et l'érosion quelle que soit la pente. C'est donc bien la couverture végétale, la protection de la surface du sol contre la battance des
pluies qui tient le rôle principal dans l'expression des potentialités
de l'érosion: l'inclinaison de la pente, deuxième facteur en importance,
ne joue que si la surface du sol n'est pas entièrement couverte. Les
conclusions sont les mêmes si l'on considère que 84 à 98% de l'érosion
se manifeste lors de la première saison des pluies (H mai à juillet 1975
= 705mm), lorsque le couvert végétal est le moins développé, alors que la
deuxième saison est beaucoup plus humide que la première (H mai à juillet
1976 = 1781mm): cela ne peut s'expliquer que par l'évolution du couvert
développé par les plants d'ananas, puisque les résidus disparaissent lentement au cours du temps (Voir figure 4.1).

Les résultats des observations de transports solides sous pluie naturelle traduisent toujours l'influence des interactions multiples existant entre les facteurs principaux de l'érosion. Aussi est-il extrêmement délicat de dégager l'influence de chacun de ces facteurs

sans recourir aux essais systématiques sous simulateur de pluie.

2.2 Définition des facteurs de l'érosion à l'aide de

l'équation de WISCHMEIER

Pour y voir clair et tenter de définir de façon un peu moins empirique les moyens de lutte à mettre en oeuvre pour maintenir l'érosion dans des limites acceptables, l'ensemble des résultats d'expérimentation sur l'érosion sur parcelles et petits bassins versants des U.S.A. ont été fichés sur cartes perforées (WISCHMEIER, 1957) à l'échelle de l'averse élémentaire et réunis à Purdue pour être analysés statistiquement.

Dès 1960, WISCHMEIER et SMITH ont présenté une équation prévisionnelle qui n'a cessé d'être précisée depuis (WISCHMEIER et al., 1960 à 1978)

A = R.K.SL.C.P où Equation 5

- A représente la quantité de terre érodée sur une parcelle ou bien l'érosion prévisible dans des conditions précises (durant une averse, un stade cultural ou une année);
- R est un indice d'agressivité ou d'érosivité des pluies, défini comme la somme du produit de l'énergie cinétique des pluies par l'intensité maximale en 30 minutes (exprimée en mm/heure); R = EI₃₀

Les autres termes sont des paramètres du milieu qui traduisent la résistance de celui-ci face à l'agressivité des pluies.

- S.L est un indice topographique tenant compte à la fois de la longueur (en pieds ou en mètres) et de l'inclinaison (en %) de la pente;
- K est un coefficient représentant l'érodibilité du sol en fonction de ses qualités intrinsèques;
- C est un coefficient exprimant l'influence du couvert végétal et des techniques culturales sur l'érosion;
- P est un coefficient qui rend compte de l'efficacité des techniques qui ont été déployées sur le terrain pour lutter contre l'érosion.

Le but de cette équation est de définir de façon moins empirique les techniques culturales et les aménagements antiérosifs à mettre en oeuvre en un lieu donné dont on connait la topographie, le climat, le sol et les cultures souhaitables de développer sans risquer de ruiner le patrimoine foncier.

Cette équation empirique est valable en moyenne sur un grand nombre d'années et ne concerne que l'érosion en nappe et rigole à l'échelle du champ (ou du versant), à l'exclusion des cas où dominent l'énergie du ruissellement et l'érosion linéaire (cas des sols à argile gonflante, des reliefs montagneux, des ravins et des rivières, des climats désertiques et méditerranéens où l'action des averses exceptionnelles est déterminante). Elle n'est universelle que dans la mesure où chacun des facteurs évoqués joue un rôle important dans le développement de tous les phénomènes d'érosion; ses coefficients varient et doivent être adaptés selon les circonstances (WISCHMEIER, 1976).

Cependant, en ce qui concerne les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux du vieux bouclier de l'Afrique de l'Ouest, cette équation prévisionnelle semble utile pour rationaliser l'aménagement de l'espace rural et également pour définir l'influence relative de chacun des facteurs en cause (ROOSE, 1976). C'est le problème essentiel à cerner maintenant.

22.1 L'Indice d'agressivité des pluies (Rusa)

On a vu au paragraphe 312, qu'en zone tropicale sèche cet indice peut varier de 100 à 500 unités en année moyenne et atteindre 1000 à 2000 unités en zone subéquatoriale (entre Abidjan et Conakry);
1'agressivité des pluies est donc extrêmement élevée comparativement aux valeurs observées aux U.S.A. (R = 20 à 600 : WISCHMEIER et SMITH, 1978) et autour du bassin méditerranéen (R = 50 à 350) pourtant réputé pour son climat érosif. De plus, la répartition des pluies est loin d'être homogène. A Abidjan, par exemple, la moitié des averses tombe en 4 à 8 semaines et l'indice de la pluie décennale peut dépasser Rusa = 300 en 24 heures.

22.2 Le couvert végétal et les techniques culturales (C)

C'est de loin le facteur conditionnel le plus important puisque l'érosion passe de l à plus de 1000 lorsque, toutes choses étant égales, le couvert d'une parcelle diminue de 100 à 0% (comparer les parcelles sous ananas plus résidus en surface et sol nu au tableau 4.1).

Sous culture, les phénomènes d'érosion varient donc dans une très large mesure en fonction du type de plante, de la vitesse avec laquelle elle recouvre le sol et des techniques culturales mises en oeuvre pour favoriser sa croissance. La densité et la précocité de la plantation, un minimum de travail du sol, une fertilisation bien adaptée et la restitution des résidus de culture jouent un rôle prépondérant.

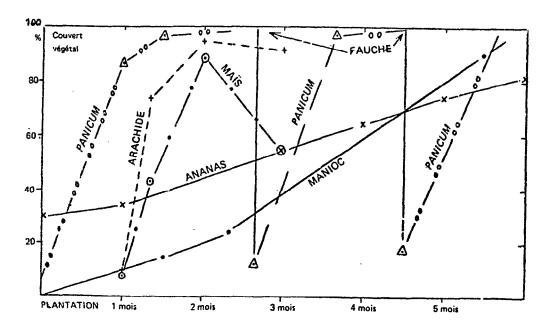


Fig. 4.2. - Evolution du couvert végétal de différentes cultures au cours de l'année. Adiopodoumé, cases d'érosion : 1966 à 1975.

L'influence des divers types de plantes sur le développement de l'érosion dépend de leur date de plantation et de leur faculté d'envahir rapidement le terrain. Pour couvrir 90% de la surface du sol et maîtriser l'érosion, il faut un mois au *Panicum maximum*, six semaines au

Cynodon aethiopicus et à l'arachide, deux mois au maïs et au Stylosanthes guyanensis et six mois au manioc et à l'ananas (voir figure 4.2). Si la saison des orages violents coïncide avec la période de croissance des végétaux, l'érosion'sera très variable d'une plante à une autre. Mais une fois le sol couvert, les pertes en terre sont réduites, quelle que soit l'architecture des plantes (en entonnoir ou en parapluie).

Tableau 4.2: Facteur couvert végétal x techniques culturales (C) pour diverses cultures en Afrique Occidentale (ROOSE, 1977).

| | C annuel moyen |
|--|----------------|
| Sol nu | 1 |
| Forêt, fourré dense, culture bien paillée | |
| Ananas sur billons cloisonnés (pente 7%), plantation tardive | 0.1 |

D'après VALENTIN et ROOSE (1979)

Le facteur C de l'équation de WISCHMEIER (= rapport entre l'érosion sur parcelle cultivée et celle sur une parcelle nue standard) rend bien compte de l'influence fondamentale du couvert végétal et de l'adaptation des techniques culturales aux conditions écologiques régionales. Le facteur C peut être calculé pour les différents stades de croissance d'une culture (du labour au semis, jusqu'au premier mois,

deuxième mois, jusqu'à la récolte, de la récolte au labour - ou plus en détail si on a deux cycles culturaux dans l'année). En ne tenant compte que d'une valeur globale annuelle, ce facteur varie de 0.9 à 0.1 pour les principales cultures de l'Afrique de l'Ouest. Il peut descendre à 0.01 sous prairie et 0.001 sous culture paillée, sous culture arborée avec plantes de couverture et sous forêt dense (cf. tableau 4.2) (ROOSE, 1977).

22.3 La pente (facteur SL)

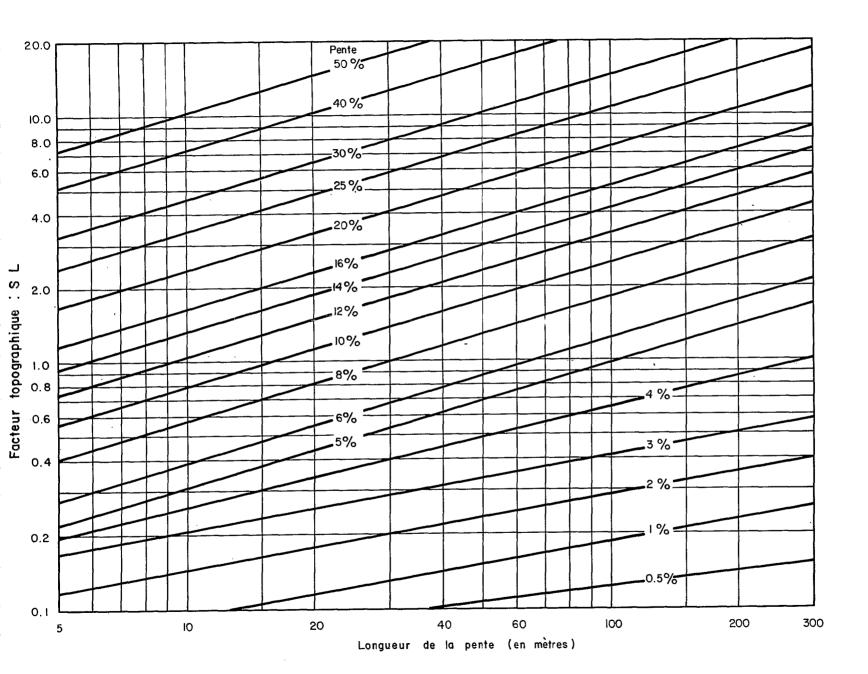
Les auteurs s'accordent pour reconnaître le rôle important que joue la pente (longueur, forme et surtout inclinaison) dans le développement de l'érosion, lorsque le sol n'est pas entièrement couvert (ROOSE, 1973). FAUCK (1956), puis FOURNIER (1967), ont fait cependant remarquer que celle-ci peut quelquefois démarrer sur des pentes inférrieures à 1% et cela a été démontré à Samaru au Nigéria (KOWAL, 1972) et à Gampela et Saria dans la région Centre de la Haute-Volta (CTFT, 1974; ROOSE et al., 1974 et 1979) où l'érosion atteint 8 à 20t/ha/an sur des pentes de 0.5%.

a) l'inclinaison de la pente

ZINGG (1940), résumant les expérimentations effectuées sur des sols des régions tempérées américaines, montre que les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente, l'exposant moyen étant voisin de 1.4.

Au centre Nigéria, LAL (1975) a trouvé que, sur un sol ferrallitique remanié riche en gravier sur arène granitique (=alfisol), l'érosion croît avec la pente selon une fonction exponentielle d'exposant l.2 lorsque le sol est nu et travaillé dans le sens de la pente. Par contre, l'érosion est indépendante de la pente (1 à 15%) si on laisse en surface une quantité suffisante de résidus de culture (mulch tillage). Le système d'aménagement de la surface du sol a donc une incidence considérable sur l'influence de la pente sur l'érosion.

HUDSON (1973) en Rhodésie et ROOSE (1975 en Côte d'Ivoire, trouvent des fonctions exponentielles dont l'exposant est supérieur à 2



pour différents sols tropicaux peu couverts. L'exemple cité au tableau 4.1 fait également ressortir les interactions existant entre le système cultural et l'inclinaison de la pente sur le développement de l'érosion.

WISCHMEIER et SMITH (1960) estiment par contre qu'une équation du second degré s'ajuste mieux qu'une fonction logarithmique à l'ensemble des résultats recueillis sur les 44 stations expérimentales des U.S.A. (VOIT (18, 4.5)).

b) La longueur de la pente

L'influence de la longueur de la pente (L) sur l'érosion totale (E) serait aussi importante pour ZINGG (1940) que celle de l'inclinaison (S):

$$E = C.S^{1.4}$$
. $L^{1.6}$ Equation 6

Parmi les résultats réunis par WISCHMEIER vingt ans plus tard, bon nombre montrent que l'érosion n'est guère influencée par la longueur de la pente ou même que l'érosion diminue lorsque la longueur du versant augmente. L'influence de la longueur de pente étant variable selon les circonstances, un groupe de travail s'est réuni à Purdue qui a finalement adopté pour l'usage courant l'exposant 0.5 pour exprimer l'influence de la longueur de la pente sur les pertes en terre. L'équation liant l'érosion à la pente s'écrit :

facteur S.L. = $\frac{\sqrt{L}}{100}$ (0.76 + 0.53 S + 0.076 S²) Equation 7 où L est la longueur de la pente en pieds et S l'inclinaison en %. L'abaque reproduite à la figure 4.3 permet d'évaluer rapidement le facteur S.L en fonction de la longueur et de l'inclinaison de la pente.

A Adiopodoumé, sur sol nu et en moyenne sur cinq ans, nous avons trouvé des résultats voisins de ceux de la courbe théorique de WISCHMEIER et SMITH, mais très variables d'une année à l'autre (cf. figure et tableau 4.4.1 de ROOSE, 1973). Sous culture, les résultats varient également beaucoup en fonction de la couverture végétale et des techniques culturales (voir tableau 4.1).

A Sefa au Sénégal, sur sol ferrugineux tropical, il semble que de très faibles variations de pente (0.5%) suffisent à entraîner des variations sensibles à la fois de l'érosion et du ruissellement (ROOSE, 1967).

A Adiopodoumé, VALENTIN (1978) a montré qu'en moyenne sur une douzaine de pluies simulées, l'érosion sur des parcelles nues de 6% de pente augmente selon une fonction exponentielle d'exposant 0.3 de la longueur de pente (1 à 10 mètres).

Théoriquement, l'érosion doit augmenter avec la longueur de la pente, car le ruissellement s'accumule, se concentre en filets, prend de la vitesse et augmente son énergie. En pratique, les forces de frottement du sol motteux et de la végétation (importance du nombre de tiges et du chevelu racinaire superficiel) sont telles que l'influence de la longueur de la pente varie considérablement selon les circonstances. Ainsi, WILLAIME et al., (1962, 1965, 1967) ont observé que l'influence de la longueur de pente n'est ni constante ni très élevée au Bénin (Agonkamey et Boukombé).

Cette incertitude sur l'influence de la longueur de pente sur les phénomènes d'érosion en nappe et rigole remet en cause la généralisation de l'usage des techniques antiérosives du type des terrasses, banquettes et fossés de diversion qui sont trop souvent appliquées sans discernement sous des climats très variés. Si ces terrassements se justifient en milieu subdésertique (pluie < 400mm), ils sont avantageusement remplacés par des méthodes biologiques dans les zones où la végétation peut couvrir le sol et intercepter les pluies (ROOSE, 1974). Du point de vue scientifique, ce facteur topographique mériterait d'être précisé, car l'influence de la pente n'est pas indépendante du couvert végétal, des techniques culturales, du sol et probablement du climat (ROOSE, 1973 et 1975). Cependant, en attendant de disposer de données suffisantes, on peut s'appuyer sur l'indice topographique de WISCHMEIER (équation 7) ou sur une équation exponentielle du type

$$SL = C \times L^{0.5} \times S^{1.2 \stackrel{?}{a} 2}$$
 Equation 8, où

C est un coefficient dépendant des conditions locales,

L est la longueur de la pente en mètres et

S est l'inclinaison en %.

Elle devrait donner satisfaction dans la plupart des cas pratiques (HUDSON, 1973,; ROOSE, 1975).

c) La forme de la pente

L'influence de la forme de la pente a trop souvent été négligée, ce qui explique pour une bonne part la divergence des résultats trouvés par différents auteurs en ce qui concerne l'influence de la longueur de la pente. En effet, à mesure que les parcelles d'érosion vieillissent et sont soumises à une forte érosion, elles deviennent de plus en plus concaves puisque la base de la parcelle reste fixe (= canal de ruissellement) tandis que le centre s'érode plus vite que le haut. D'où la nécessité de réajuster chaque année la pente des parcelles pour ne pas fausser les observations par défaut.

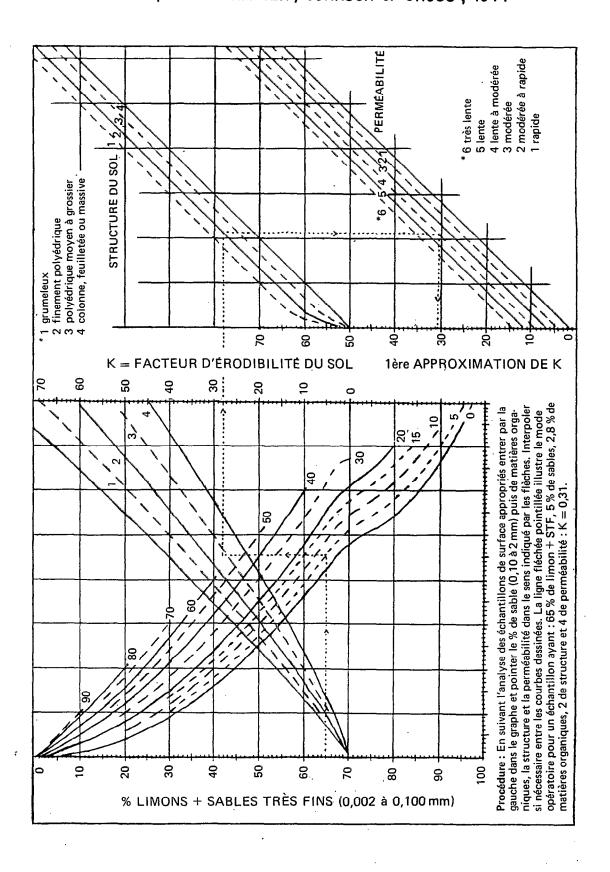
Au Nigéria, LAL (1975), a observé sur des pentes de 10 à 15% que le ruissellement et l'érosion sont plus forts sur des parcelles de 12 mètres de long que sur celles de 37 mètres. Après une étude détaillée de leur topographie, il en a conclu que l'influence de la forme des pentes domine largement celle de la longueur de la parcelle.

D'après WISCHMEIER (1974), à pente moyenne égale, une pente gauchie ou concave diminue les transports solides (sédimentation localisée), tandis qu'une pente convexe l'augmente en fonction de l'inclinaison du segment le plus pentu.

22.4 La résistance du sol à l'érosion (facteur K)

Vers les années 1940-1960, de nombreux agronomes alarmèrent l'opinion publique sur l'ampleur des phénomènes d'érosion en région tropicale (HARROY, 1944). À peine débarrassés de leur végétation luxuriante, ces sols s'épuisent et se dégradent en quelques années par l'érosion,

Fig. 4.4 NOMOGRAPHE PERMETTANT UNE EVALUATION
RAPIDE DU FACTEUR K D'ERODIBILITE DES SOLS
D'après WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS, 1971



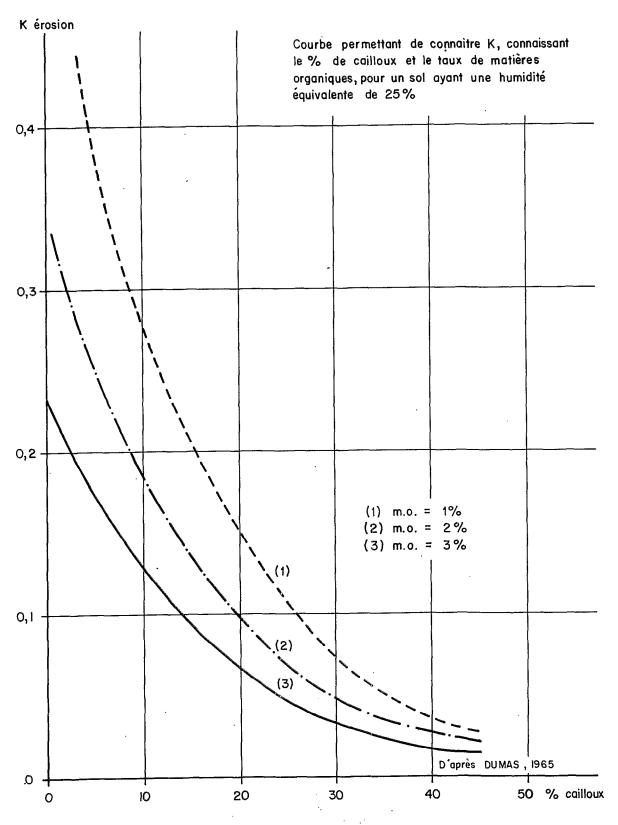
même sur faible pente (cf. les cultures mécanisées de Séfa au Sénégal). D'où la fâcheuse renommée des sols tropicaux d'être extrêmement fragiles.

En réalité, si les réserves en nutriments et en matières organiques du sol évoluent rapidement (et dans les deux sens) en région tropicale (NYE, 1961; MARTIN, 1963; PERRAUD, 1971; BOISSEZON et al., 1973; ROOSE, 1973; GODEFROY, 1974; TURENNE et al., 1976; DABIN, 1976; BLIC, 1976), tous les sols tropicaux ne sont pas particulièrement sensibles à l'agressivité mécanique des pluies. Comme en région tempérée (K varie de 0.03 à 0.60 : WISCHMEIER et SMITH, 1960; WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS, 1971), il existe, en région tropicale, une large gamme d'érodibilité des sols (EL SWAÏFI, 1975).

Certains auteurs ont étudié la résistance à la battance des gouttes de pluie de différents sols sur des échantillons remaniés (ELLISON, 1944; FREE, 1952;;HUDSON, 1961; NGO CHANG BANG, 1967, MOLDENHAUER, 1970; LAL, 1975). Mais aucun test de laboratoire ne peut donner une bonne estimation de l'érodibilité des sols, laquelle dépend non seulement de la résistance au splash (= cohésion) mais aussi de la résistance au cisaillement par l'érosion en rigole; celle-ci nécessite une certaine longueur de parcelle pour se révéler (communication personnelle de HUDSON et MOLDENHAUER, Ibadan, juillet 1975).

WISCHMEIER a donc proposé d'étudier 1'érodibilité du sol directement au champ dans des conditions standards, qui servent de référence en tous points du globe. Il s'agit d'une parcelle de 75 pieds de long (22,16 mètres), 9% de pente, traitée comme une jachère nue, sans apport de matières organiques depuis 3 ans et travaillée superficiellement pour éviter la formation d'une pellicule de battance qui limiterait la détachabilité. Ce protocole a dû être adapté (ROOSE, 1968) aux conditions africaines en choisissant des pentes caractéristiques des types de sol et du paysage et en corrigeant les résultats à l'aide du facteur topographique (non indépendance entre le type de sol et la pente en Afrique de l'Ouest). L'indice d'érodibilité est donc mesuré au bas d'une parcelle nue de référence par unité d'indice d'agressivité des pluies;

Fig. 4.5 INFLUENCE DES TAUX DE CAILLOUX ET DE MATIERES ORGANIQUES SUR L'ERODIBILITE DES SOLS TUNISIENS (facteur K de WISCHMEIER)



log 1000 K = 3,4623 - 0,1695 X_2 - 0,0214 X_3 - 0,0282 X_1 R^2 = 88%

 X_1 = taux cailloux en % de poids

X₂ = matière organique X₃ = humidité équivalente Il se calcule à partir de la formule :

$$K = \frac{A}{R \times SL \times 2.24}$$
 Equation 9

où:

A est l'érosion en tonne métrique/ha/an,

R est l'indice d'agressivité en unités anglaises,

SL le facteur topographique, et 2.24 un coefficient nécessaire pour passer des unités décimales (t/ha) aux unités anglaises (tonne courte acre). Les facteurs C et P égalent l puisque les pertes en terre sont mesurées sur la parcelle nue travaillée dans le sens de la pente.

Aux U.S.A., l'indice d'érodibilité du sol (K) augmente de 0.03 à 0.60 pour des sols de plus en plus fragiles (WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS, 1971). En Afrique de l'Ouest, sur les sols à argile dominante kaolinitique (ferrallitiques et ferrugineux tropicaux) que nous avons testés sous pluies naturelles en parcelles nues standards selon la méthode préconisée par WISCHMEIER, nous avons observé généralement une très bonne résistance mécanique à l'érosion (K voisin de 0.05) pendant les deux ou trois premières années après défrichement (CHARREAU, 1972; ROOSE, 1974). Ensuite, l'index K varie beaucoup d'une année à l'autre mais tend vers des valeurs moyennes s'étalant de 0.02 à 0.30 selon le type de sol (voir tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Erodibilité de quelques sols ferrallitiques et ferrugineux ----- tropicaux (facteur Kusa). .

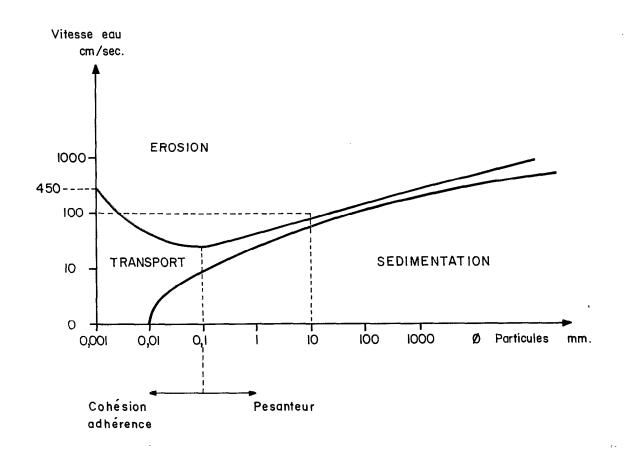
| K = 0.05 à 0.12 | sur des sols ferrallitiques issus de sédiments sablo- argileux tertiaires |
|-------------------|---|
| K = 0.12 à 0.15 | sur des sols ferrallitiques issus de granite |
| K = 0.15 à 0.18 | sur des sols ferrallitiques issus de schiste |
| K = 0.05 à 0.15 | sur des sols ferrugineux tropicaux non dégradés par la culture |
| K = 0.20 à 0.30 | sur des sols ferrugineux tropicaux divers issus de granite, après trois ans de culture |

K = 0.01 à 0.05 sur différents sols gravillonnaires dès la surface

Les sols ont généralement une bonne perméabilité d'ensemble (K = 10 à 120cm/h d'infiltration au Müntz à double anneau), mais forment rapidement une pellicule de battance peu perméable surtout s'ils sont mal couverts, pauvres en matières organiques et riches en limons et sables fins, comme c'est le cas des sols ferrugineux tropicaux. L'application du nomographe de WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS (1971) pour évaluer le coefficient d'érodibilité des sols en fonction de la texture, de la teneur en matières organiques, de la structure et de la perméabilité (figure 4.4.) a donné des résultats satisfaisants sur les sols testés, à condition d'y ajouter un coefficient modérateur tenant compte de la charge en graviers de l'horizon arable (DUMAS, 1965; ROOSE, 1974) (voir figure 4.5).

Fig. 4.6

DIAGRAMME DE HJULSTROM



Le diagramme de Hjulström (figure 4.6) définit les domaines de l'érosion, du transport et de la sédimentation de particules de taille croissante en fonction de la vitesse du courant d'une rivière. Il montre qu'il faut autant de force à la rivière pour éroder des particules d'un diamètre de 1 micron (= argile) et vaincre les forces de cohésion qui les lient à la masse des sédiments, que pour des grains de 1 centimètre de diamètre (force de pesanteur). L'érodibilité du matériau par l'énergie cinétique des eaux courantes (ou du ruissellement) est donc maximale lorsqu'il est composé de particules de 1'ordre de 100 microns. On retrouve le domaine des textures les plus érodibles par la battance des pluies (2 à 100 microns, voir nomographe à la figure 4.4) mais décalé vers des tailles supérieures (voisines des sables fins).

La méthode de détermination du coefficient d'érodibilité du sol sous pluie naturelle préconisée par WISCHMEIER étant très longue (minimum 5 ans), des essais ont été effectués sous pluies simulées à différentes intensités, hauteurs et humidités préalables. L'énergie cinétique correspondant aux diverses intensités simulées a été mesurée et calcu-1ée par VALENTIN (1978). D'après COLLINET et LAFFORGUE (1979) les valeurs du coefficient K d'érodibilité calculées en moyenne sur une dizaine d'averses simulées pour différents sols ferrallitiques, ferrugineux tropicaux et vertiques situés en Côte d'Ivoire et Haute-Volta seraient comprises entre K = 0.01 et 0.11, valeurs extrêmement faibles, de l'ordre des valeurs minimales que nous avons observées sous pluie naturelle lors des premières années d'expérimentation. Les résultats ne sont pas si étonnants si on veut bien se rappeler que les mesures ont été effectuées en pleine saison sèche sur des sols normalement pourvus en matières organiques. Ceci pose le problème de savoir si ces mesures au simulateur, qui n'intègrent pas semble-t-il l'effet saisonnier, peuvent donner des résultats représentatifs de la dynamique de l'érodibilité des sols, ou bien encore si le test de WISCHMEIER. qui exige l'absence d'apport de matières organiques pendant trois ans, est judicieux et s'il peut être amélioré en spécifiant pour chaque valeur expérimentale de K le taux de matières organiques du sol et la saison où la mesure à été effectuée.

En définitive, il semble bien que les phénomènes spectaculaires d'érosion observés en Afrique de l'Ouest soient dus à l'agressivité très élevée des pluies, plutôt qu'à une fragilité particulière des sols tropicaux. Les sols ferrugineux tropicaux dégradés par la culture sont nettement plus érodibles que la majorité des sols ferrallitiques, mais leur résistance à l'érosion peut être améliorée substantiellement en augmentant les restitutions de matières organiques et en évitant la formation de pellicules de battance (travail du sol en grosses mottes sauf dans les lignes de semis, fertilisation bien adaptée et disposition en surface des résidus de culture).

22.5 Les pratiques antiérosives (facteur P)

Le facteur "pratiques antiérosives" dans l'équation de WISCHMEIER est le rapport entre les pertes en terre sur un champ aménagé et celle d'une parcelle voisine non aménagée. Les petits bassins versants (de 1 à 10 hectares) sont mieux adaptés à l'étude de ce genre de problème que des parcelles de petite taille (100 à 250m²). On se bornera donc à comparer les résultats acquis en Afrique de l'Ouest avec les coefficients préconisés aux U.S.A. après de nombreuses études sur bassins (WISCHMEIER, 1958; ROOSE et BERTRAND, 1971; ROOSE, 1973; DELWAULLE, 1973).

Les techniques antiérosives de terrassement pour la diversion ou l'absorption totale des eaux ne figurent pas au tableau 4.4., car elles ne font intervenir qu'une diminution de la largeur des bandes cultivées (cf. longueur de pente dans le paragraphe 422.3). Il existe d'ailleurs très peu d'études démontrant de façon rigoureuse la réduction des pertes en terre des bassins versants après aménagement par terrassement (SPOMER et al., 1973). Les études confondent généralement les effets sur l'érosion des terrassements et ceux de l'amélioration du couvert végétal provoquée en même temps sur le même versant (ROOSE, 1974; GOUJON et BAILLY, 1974).

Tableau 4.4. : Le facteur "pratiques antiérosives" (P) dans l'équation de prévision de l'érosion de WISCHMEIER et SMITH (1960)

| | P |
|--|---|
| U.S.A. . labour isohypse . labour et billonnage isohypse . labour et bandes enherbées isohypses | 0.75 0.50 0.25 |
| Afrique de l'Ouest . billonnage isohypse cloisonné . bandes antiérosives de 2 à 4 mètres de large . mulch de paille de plus de 6t/ha . mulch Curasol à 60g/1/m² (selon pente et culture) . prairie temporaire ou plante de couverture (selon le couvert) . bourrelets de terre armés de pierres ou murettes en pierres sèches tous les 80cm de dénivellée, plus labour isohypse, plus binage, plus fertilisation. | 0.2 à 0.1 0.3 à 0.1 0.01 0.5 à 0.2 0.5 à 0.01 |

a) Bandes antiérosives

En zone suffisamment humide, l'alternance sur un versant de bandes cultivées (de 20 à 50 mètres de large) et de cordons (1 à 4 mètres de largeur) enherbés en permanence, transforme rapidement le paysage en une succession de champs peu pentus et de talus enherbés. Grâce au chevelu racinaire des graminées et aux nombreuses tiges herbacées qui freinent les écoulements, ces cordons absorbent une bonne part du ruissellement (10 à 60% à Adiopodoumé) et provoquent le dépôt des terres érodées dans les champs situés en amont (70 à 90% à Adiopodoumé, cf. tableau 4.4). Des talus de 50 centimètres se sont formés progressivement (par érosion des champs et grâce au labour avec déversement vers l'aval) en cinq ans sur des bandes d'arrêt en plusieurs stations de Côte d'Ivoire (ROOSE et BERTRAND, 1971). Dans la zone sahélienne où les herbes surpâturées en saison sèche ont des difficultés à protéger le sol des premiers orages, DELWAULLE (1973) a montré dans des parcelles d'un demi hectare que des bourrelets de terre armés de

pierres qui jonchent le champ ou des murets en pierres sèches sont légèrement plus efficaces que deux rangées d'herbe (cf.tableau 4.4). Ces méthodes présentent l'avantage de fournir un guide à partir duquel il devient possible de passer d'une agriculture extensive nomade à une agriculture stable et intensive tout en modifiant progressivement la topographie.

b) Travail du sol selon les courbes de niveau

Le labour, le billonnage en courbe de niveau et le billonnage cloisonné (cf. tableau 4.4.) réduisent le ruissellement et l'érosion
sur des pentes modérées en augmentant la rugosité de la surface du sol.
Leur efficacité diminue lorsque la pente augmente (diminution de la réserve utile des "microbarrages") et lorsque l'averse dépasse certains
seuils de hauteur et d'intensité au-delà desquels des débordements localisés provoquent la formation de rigoles profondes et de ravines. Ces
techniques mécanisées ne peuvent être favorables que si le sol luimême est perméable. Elles présentent l'inconvénient de diminuer la cohésion du matériau et d'augmenter localement la pente (tout au moins
le buttage et le billonnage), si bien que la charge solide des eaux ruisselant d'un champ travaillé est toujours nettement plus élevée que
lorsque le sol n'a pas été remué.

c) Mulch naturel

Nous avons déjà noté qu'un mulch de quelques centimètres de paille est aussi efficace qu'une forêt dense de 30 mètres de haut pour absorber l'énergie cinétique des pluies et maintenir l'érosion (30kg/ha/an) et le ruissellement (0.5 à 1%) à l'intérieur de limites acceptables (cf. aussi tableaux 3.8 et 4.4). Il est quelquefois difficile de rassembler l'énorme masse de végétaux nécessaires pour couvrir les grandes plantations industrielles; on peut alors tenter de résoudre le problème en laissant à la surface du sol le maximum de résidus de culture (LAL, 1975; ROOSE et LACOEUILHE, 1976) ou en utilisant des conditionneurs du sol (ROOSE, 1975).

d) Mulch artificiel

En pulvérisant après labour un mince film d'acétate de polyvinyl (=Curasol) à raison de 60g/litre d'eau et par mètre carré, les
pertes en terre ont été réduites de 40 à 90% (cf. tableau 4.4.) et le
ruissellement de 25 à 55% des témoins. La projection de ce type de matière
plastique qui laisse le sol perméable, en mélange avec des graines et
des engrais, est une méthode d'avenir pour la protection des zones industrielles décapées, des talus de route et des canaux. Cependant, cette
méthode est encore trop chère pour être vulgarisée dans le cadre de
l'agriculture courante (ROOSE, 1975).

De la lecture des tableaux 3.8 et 4.4, il ressort que les méthodes biologiques sont les plus efficaces : elles font intervenir les plantes elles-mêmes pour intercepter l'énergie des gouttes de pluie qui provoque la battance, pour ralentir le ruissellement et provoquer la sédimentation de sa charge solide, dessécher le sol entre deux averses, augmenter l'hétérogénéité du sol (macroporosité développée par les racines et la mésofaune qui fouille le sol) et développer la vie microbienne dont le rôle sur la structure des horizons superficiels est bien connu. Cependant, plus le climat est défavorable à la croissance des plantes (froid ou chaud et sec) et plus il est nécessaire de faire appel à des méthodes mécaniques pour pallier les insuffisances du couvert végétal.

3 — CONCLUSIONS SUR LES FACTEURS CONDITIONNELS DE L'ÉROSION

Sous végétations naturelles, les pertes en terre par érosion sont très limitées et les variations interannuelles sont aussi importantes que les différences entre le milieu forestier et les régions de savanes. Par contre, en milieu cultivé, l'érosion est plus variable et plus considérable; aussi est-il plus aisé de distinguer l'influence des facteurs conditionnels de l'érosion en milieu aménagé qu'en milieu naturel.

En analysant les résultats de nos observations à l'aide de l'équation de WISCHMEIER et SMITH (1960), il apparaît que le couvert végétal peut modifier l'érosion de l à 1/1000, la pente de 0.1 à 5 - jusqu'à 20 dans les cas extrêmes, le sol de 0.01 à 0.30 et les techniques antiérosives de l à 0.1. L'érosion est bien le produit de l'influence de quatre facteurs modulant l'érosivité des pluies, et non leur somme, car si l'un d'eux s'annule l'érosion tend effectivement vers zéro. Cette équation de prédiction de l'érosion permet de choisir parmi les différentes méthodes antiérosives celles qui seront les plus efficaces et de combiner au mieux les différentes techniques.

Elle a le mérite de dissocier clairement l'influence de chacun des facteurs, mais néglige forcément certaines interactions existant entre les facteurs, comme par exemple le rôle de la texture du sol sur l'influence de la pente sur l'érosion. En réalité, les facteurs sont hiérarchisés car l'influence majeure de certains facteurs (couvert végétal, aménagement de la surface du sol) efface celle des autres (pente, techniques antiérosives) dans certaines conditions.

CHAPITRE V: DISCUSSION ET CONCLUSIONS SUR LES PHENOMENES D'EROSION

Nous avons déjà souligné aux chapitres précédents, la valeur relative des mesures de ruissellement et d'érosion observées sur petites parcelles : ces dernières permettent de comparer l'influence des différents facteurs du milieu dans des conditions les plus homogènes possibles, à l'échelle du champ. Cependant, on peut se demander avec de nombreux auteurs (ANHERT, BIROT, DUBREUIL, RODIER; communications personnelles) si ces résultats obtenus en parcelles sont extrapolables à l'échelle du versant ou du bassin versant et peuvent servir de base à l'estimation de la vitesse de l'érosion au cours des temps géologiques : recul des versants, dissection des plateaux, taux de dénudation.

Dans ce chapitre, nous allons aborder cette question en comparant les résultats des mesures effectuées en parcelles et sur bassins versants de tailles diverses, puis nous tirerons quelques conclusions générales sur les phénomènes d'érosion des points de vue agronomique, pédologique et géomorphologique.

1 – COMPARAISON DES MESURES DE RUISSELLEMENT ET D'ÉROSION EFFECTUÉES SUR PARCELLES ET BASSINS VERSANTS

Les mesures de ruissellement (KRAM = 0.1 à 6%) et d'érosion (E = 10 à 200kg/ha/an, soit 1 à 20t/km²/an) en petites parcelles montrent que, dans ces conditions, les phénomènes d'érosion sont très limités, tant sous forêt (pente de 5 à 65%) qu'en savane (pente de 0.5 à 4%) protégée des feux de brousse annuels. Mais qu'en est-il à l'échelle des bassins versants de taille croissante où interviennent différents types de sols, de végétations et de pentes ? La faiblesse des phénomènes d'érosion observés en parcelles n'est-elle que le reflet d'un artéfact lié à l'exiguïté des parcelles ? Les effets du ruissellement s'accumulent-ils tout au long du versant et des rivières pour augmenter les transports solides dans les bassins versants, tout au

moins lors des événements rares ? Ou bien les forces de frottement des irrégularités du sol et de la végétation (tiges d'herbes, litières de feuilles et racines superficielles) ainsi que les pièges existant à différents niveaux sur le versant (changements de pente au bas du versant ou en amont des souches) sont tels, que ruissellement et érosion sont des phénomènes discontinus; il en résulterait que les transports solides à l'issue des bassins versants d'une certaine taille pourraient être du même ordré de grandeur, ou même moins élevés, que sur les petites parcelles situées sur des versants caractéristiques, c'est-à-dire quelques tonnes à dizaines de tonnes par kilomètre carré et par an.

1.1 Les transports solides dans les bassins versants en

fonction du climat et de la végétation naturelle

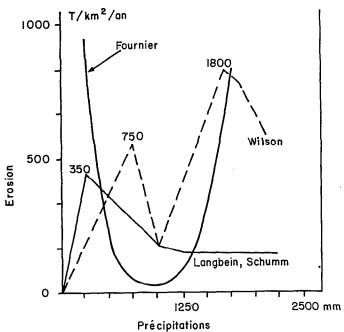
Plusieurs auteurs ont montré qu'il existe une relation complexe non linéaire entre les transports de sédiments par des fleuves (grands bassins versants) et la hauteur de pluie annuelle (FOURNIER, 1949; LANGBEIN et SCHUMM, 1958; WILSON, 1973).

Dans une première série de mesures réunies par FOURNIER (1949), il apparaît que l'érosion est d'autant plus élevée que le climat est contrasté. La courbe de l'érosion spécifique en fonction des précipitations annuelles moyennes est parabolique et passe par un minimum sité vers 900 millimètres de pluie correspondant aux U.S.A. à des bassins sous climats à précipitations bien réparties tout au long de l'année.

A mesure que l'échantillonnage s'est étendu, la courbe s'est complexifiée (voir figure 5.1). Dans la première section de la courbe, correspondant aux zones sèches continentales (jusqu'à 350 à 750mm selon les auteurs), l'érosion croît avec la pluie car la végétation est rare et les sols peu perméables. Ensuite, la courbe décroît et plus les précipitations annuelles augmentent, plus la végétation protectrice est dense (savane soudano-sahélienne comme à Gonse et Saria).

Enfin, au-delà de 900 à 1000mm de pluie annuelle, les transports de sédiments restent très faibles (150t/km²/an) depuis la savane soudanaise jusqu'à la forêt dense guinéenne (cf. LANGBEIN et SCHUMM et tableau 5.1).

Fig. 5.1. - Dégradation spécifique (T/km²/an) en fonction des précipitations annuelles.
D'après Fournier (1949), Langbein et Schumm (1958), Wilson (1973).



WILSON (1969 et 1973) a examiné les données d'un nombre considérable de bassins (1500) situés sous des climats très différents. Il trouve que lorsque le climat est très contrasté, le premier pic d'érosion est décalé jusque vers 750 millimètres et qu'on peut observer des transports solides encore plus élevés pour des précipitations annuelles de l'ordre de 1800 millimètres. Ceci s'expliquerait par le fait que lorsque le climat est très contrasté (saison très sèche assez longue) le couvert végétal a plus de mal à se développer que lorsque les précipitations, même moins abondantes, sont mieux réparties dans l'année. WILSON conclut de son étude qu'il n'existe pas de relation simple entre les transports solides et les précipitations, car il y a trop de facteurs qui influencent le ruissellement et la charge unitaire, en particulier le type de climat contrasté ou non, la surface du bassin versant et surtout le type d'exploitation de la couverture végétale.

Conformément à BRUNE (1948), il estime que le taux d'érosion est réduit de moitié chaque fois que la surface du bassin considéré est multipliée par dix.

L'examen des courbes de FOURNIER (1949) et de LANGBEIN et SCHUMM (1958) montre clairement que c'est dans la zone des steppes sahé-liennes (pluie 300 à 800mm) que les transports solides sont les plus élevés. Cependant, les valeurs d'érosion sur les grands bassins versants sont dix fois plus fortes que celles mesurées sur nos parcelles pour des précipitations annuelles de 750 à 2100 millimètres. Cet écart ne résulte probablement pas de l'effet taille du bassin (cf. BRUNE) mais plutôt de la dégradation généralisée de la végétation (tant aux U.S.A. qu'en Afrique) et de l'érosion linéaire sur le fond et les berges des rivières. Le facteur couverture végétale pèse en effet très lourd et explique les fortes valeurs observées par exemple sur le Loserigue et au Cameroun sur des bassins de différentes tailles.

1.2 Le ruissellement sur bassins versants en fonction de

la pente et de la perméabilité

Sur des bassins versants de moins de 200km², RODIER et AUVRAY (1965) ont observé une augmentation du coefficient de ruissellement en fonction des classes de pente et d'imperméabilité du substrat. Ces auteurs ont classé leurs bassins versants représentatifs en fonction de trois zones écologiques (sahélienne, tropicale et subéquatoriale forestière) correspondant à des types définis de précipitations, de sols, de paysages et de végétations. Ce faisant, ils obtiennent généralement une augmentation des coefficients de ruissellement lorsque les pentes augmentent et lorsque la perméabilité des bassins (conditionnée à la fois par le sol et la végétation) et leur surface diminuent.

Cependant, il existe de nombreuses exceptions (d'après les points reportés sur les graphiques des auteurs) et plus les points d'essais sont proches de la zone forestière (où ont lieu la majorité

de mes essais) plus il est tenu compte d'une "perméabilité globale" du versant où interviennent à la fois la perméabilité du sol et l'interception des pluies par le couvert. Sur les onze bassins discutés en zone forestière, les ruissellements superficiels et hypodermiques sont confondus (voir l'allongement significatif des temps de réponse des crues) : il est donc normal qu'on observe une baisse du ruissellement de pointe et de l'érosion à mesure qu'on se rapproche de la zone équatoriale.

Sous la forêt dense d'Adiopodoumé, nous avons également observé que le ruissellement et l'érosion croissent avec la déclivité des versants. Il convient cependant de souligner les différences d'expérimentation. En effet, les bassins versants comportent différents types de sols en proportions variables : des sols de plateau et des sols de pente souvent assez perméables, ainsi que des sols de basfond, lesquels peuvent être sableux, filtrants et absorbants vis-à-vis du ruissellement provenant des versants, ou, au contraire, très vite saturés et à l'origine des crues. Lorsque l'on dit que la pente d'un bassin versant est forte, cela peut signifier que les versants sont pentus ou bien que la proportion des sols peu inclinés des bas-fonds est faible.

Il est donc difficile de conclure sur le poids respectif de l'effet d'échelle, de la pente et de l'effet bioclimatique.

En ce qui concerne la perméabilité du substrat, il semble que les versants forestiers sur schiste (Azaguié) laissent ruisseler une fraction plus importante des pluies que les versants sur granite ou sur sédiments sablo-argileux tertiaires.

Par contre, sur le plateau Mossi, un bassin sur schistes birrimiens de la région de Kaya, dont les versants étaient couverts de graminées (pente dépassant 30%), n'a pratiquement pas produit de ruissellement ni d'érosion en absence de feu de brousse (BOUGERE, 1976, géographe à la faculté d'Ouagadougou : communication orale en 1974).

TABLEAU 5.1 : Comparaison du ruissellement (% des pluies annuelles et max. journalier) et de l'érosion sur des parcelles et des bassins versants qui diffèrent par leur surface, le climat, la végétation et la roche mère.

| | | | | | RUISSELLEMENT | | DEGRADATION SPECIFIQUE | TURBIDITE SPECIFIQUE | |
|--|-----------------------|---|--|--|---|--|--|---|----------------------------|
| | SOURCE | SURFACE BV | CLIMAT | VEGETATION | ROCHE MERE | KRAM X | KRMAX Z | T/KM ² | G/M ³ |
| COTE d'IVOIRE . Case ERLO Korhogo . . Loserigue . Bandama à Duibo | 1 2 + 6 2 | . 250 m ² 3,63 km ² 32.200 km ² | trop. transition | . Savane dégradée . Savane + cultures Savane + forêt claire | granito-gneiss " | 1 à 5 (3) 1.5à9 CE=33à54% CE =10à17 (13) | (28) 25 à 40 | 1 a 16 (11) 103a182(150)* 13a18 (15) | 210 92 |
| . Nzi à Zienoa . Sakassou {a savane b sav.+forêt | 2 4 4 | 33.150 km ² 0.55 km ² 0.63 km ² | Equat. transition " " . " | Savane boisée + forêt (20%) Savane 94% Savane rônier 57% + forêt 27% | Schiste+granite granite " | CE = 2 à 9 (7) KR=2.5à8.8 KR=0.8à2.7 | - 35 12 23 | 4314 (9) - - | 135 - - |
| Le total Bandama à Brimbo Bandama à Tiassale Amitioro a | 2 2 2 + 7 | 26.2 km ² 60.200 km ² 94.250 km ² 170 km ² | trop.trans.+atténué trop. +equat.trans. Equat.transition | Savane rônier 75% Savane+forêt(15%) Savane+forêt claire Forêt dense méso- phile | Gramite+schiste " Schiste | KR=1.6a3.8 CE=8a15 (12) CE=6a14 (10) CE=2a9 (5.3) | 23 - - 15 à 36 | 8à15 (12.6) 6à16 (11) 3.3à13-29*(7) | 82 92 178 |
| b . Case ERLO Divo . "ERLO Tēké . "ERLO Adiopodoumé R3 | 2 + 7 1 1 | 2 ha 250 m ² 250 m ² 250 m ² | 11 12 13 | For.dens.semi-dec. Foret sempervir | Granite schistes sables III | KR= (7) 0.4 à 1.4(0.5) 0.4 à 5.5(2) 0.1à0.7 (0.3) | 40 à 48 3a6 (5) 3a39(14) 0.7a2.2(2) | 2.5a8.6 (7) 6 a 50 (13) 5 a 85 (15) 1 a 13 (4) | 188 490 700 266 |
| CAMEROUN Risso àS3 Tsanaga à Bogo Djerem à Myakao Mbam à Goura Sanaga à Nachtigal | 3 3 3 3 3 | 32.6 km ² 1535 km ² 20.400 km ² 42.300 km ² 77.000 km ² | Tropical trans. " " " " Tropical pur | Savane arbustive Savane peu dense " " Savane+forêt(25%) " " (60%) | granite Métam + érupt. "" Migm.+Volc. Métam.+Erupt. | - - - - | - | 17 210 59 85 28 | 1200 160 - 58 |
| GUYANE . Ecerex/Sinnamary . Case ERLO/Grégoire | 8 9 | 1 à 1.5 ha 150m² | Equatorial " | forêt dense | Mica schistes | 10à20 18 | 60 a 70 70 a 97 | 30 à 100 33 à 43 | 12 a 46 . 55 |
| DIVERS North Saskatchewan South Oder (Pologne) Meuse, Escaut, Dyle Red (Canada) | 5 5 10 | 119.000 km ² 116.000 km ² 109.000 km ² 20à20000km ² 116.000 km ² | Boréal contin. Steppique Tempéré ocean. "" Tempéré cont. | - - - Cultures, forêts | - - - Sédiment. | - | - - - - | 23 44 1.2 11 à 38 | 190 260 9 - 93 |

Sources: 1 = ROOSE et coll.; 2 = MONNET, MATHIEU, LENOIR (1972)., 3 = NOUVELOT (1969-1972), 4 = LAFFORGUE (1979); 5 = MONNET (1972); 6 = CAMUS et al., 1976; 7 = BOULANGE, 1967; 8 = ROCHE, 1979; 9 = BLANCANEAUX,1979; 10 = BOULINE et al., 1978;

^{() =} moyenne sur 3 à 10 mesures ; * = voir texte.

1.3 Quelques résultats récents

Au tableau 5.1 sont comparés le ruissellement (% des pluies annuelles ou des averses rares), la dégradation spécifique (t/km^2) et la turbidité spécifique (charge solide en gramme par mètre cube d'eau écoulée) de parcelles ou de bassins versants de tailles variables ($150m^2$ à $120.000km^2$), de végétation herbacée ou forestière, de différents pays et climats (tropical, équatorial, tempéré, froid).

Dans la zone des savanes soudaniennes de Korhogo, les valeurs du ruissellement sont voisines quelle que soit la taille du bassin versant (parcelle de 250m², Loserigue = 3.6km² et Bandama = 32.000km²). La dégradation spécifique, par contre, semble dix fois plus forte sur le petit bassin de Loserigue que sur la parcelle et sur le fleuve Bandama. Ceci ne s'emplique que par la mise en culture de la savane et en particulier l'aménagement de rizières dans les bas-fonds en amont de la fosse à sédiments et du lieu d'échantillonnage des suspensions (ROOSE, 1980).

Dans les régions forestières subéquatoriales de Côte d'Ivoire (pluie annuelle moyenne = 1400 à 2100mm) le ruissellement semble légèrement plus faible que sous savane plus ou moins dégradée par les feux et la culture : cela apparaît assez clairement lors des crues principales (KRMAX). Il en va de même pour la dégradation spécifique , mais les différences d'érosion sous forêt et savane sont plus faibles que les variations interannuelles. Il faut d'ailleurs noter que dans les parcelles ERLO sous forêt, on a observé des valeurs d'érosion nettement plus fortes, tout au moins les premières années; cela s'explique par le fait que les versants forestiers sont plus pentus (10 à 65%) et les risques d'érosion artificielle le long des bordures sont plus forts sous forêt que sous savane (pente l à 4%).

La comparaison du ruissellement sur les petits bassins versants sur granite de la savane à rôniers de Sakassou (centre Côte d'Ivoire) montre que la présence de forêt claire (27%) et de culture (15%) entraîne une baisse systématique du ruissellement, principalement lors de fortes crues (KRMAX) (LAFFORGUE, communication personnelle, 1979). Par contre, le ravineau forestier sur schistes, tributaire de l'Amitioro près de Tiassale, ruisselle autant que le petit bassin sous savane de

Sakassou (voir tableau 5.1). Il faut y voir l'influence de la perméabilité de la roche mère et des sols qui se forment sur des couches très épaisses d'altération. Nous avons constaté pareils phénomènes sur nos parcelles forestières : le ruissellement est plus élevé au Téké (schistes chloriteux birrimiens) qu'à Divo sur granite ou qu'à Adiopodoumé sur les sédiments sablo-argileux du tertiaire.

Si on passe alors à des climats beaucoup plus humides (pluie = 3500mm), comme dans le bassin forestier du Sinnamary situé sur les schistes de Bonidoro en Guyane, on observe des ruissellements nettement plus élevés qu'en Côte d'Ivoire, car la structure des horizons peu profonds des sols s'est dégradée et la dynamique verticale de l'eau est ralentie : l'érosion est à peine plus élevée (0.3 à lt/ha/an) et il y a peu de différence entre la parcelle de 150m² et les petits bassins de 1.5ha (BOULET, BRUGIERE et HUMBEL, 1979; BLAN-CANEAU, 1979; ROCHE, 1979).

Au Cameroun, la dégradation spécifique de bassins couverts de savanes mêlées à des galeries forestières est plus accusée, car les pentes y sont plus raides et le couvert végétal plus dégradé qu'en Côte d'Ivoire (NOUVELOT, 1972 et 1973; CALLEDE, 1974). Pour cet auteur, l'érosion en bassin versant est nettement plus faible qu'en parcelle expérimentale, car une fraction importante des terres arrachées aux versants se dépose en bas de pente.

Au Niger, plusieurs auteurs ont montré que l'érosion hydrique en zone sahélienne est relativement plus faible sur les dunes sableuses, mais très élevée sur les longs glacis argilo-limoneux constitués de sols bruns plus ou moins vertiques (VUILLAUME, 1968; DELWAULLE, 1973; HEUSCH, 1975). VUILLAUME a observé sur de petits bassins de 2 à 10 hectares des ruissellements extrêmement élevés (KRAM de 25 à 60% et KRMAX de 50 à 90%) et des dégradations spécifiques sous les steppes arbustives claires (très peu cultivées 0 à 25%), 50 à 100 fois plus élevées que celles observées par divers auteurs en milieu de savane soudanienne (580 à 710t/km² sur 3% de pente, 750 à 1240t/km² sur 12% de pente et 1400 à 2000t/km² sur 11% de pente avec

25% de surface cultivée en mil (voir tableau 5.2).

Tableau 5.2 Ruissellement et érosion (t/km²) en milieu sahélien (P=400 ----- à 600mm) d'après les résultats de VUILLAUME (1968 Kountkouzout (Niger: 1965-1966 - 1967).

| Pluies : - 469mm | B.V. Station. princip. | 1 | PETITS BASSINS ELEMENTAIRES | | | | |
|--|--------------------------------------|-----------------------------------|--|---|---------------------------------------|--|---|
| - 553mm - 391mm | | | F1 | F2 | F3 | F5 | F6 |
| Surface en ha Indice compacité P/S Indice de pente Ind.pente glob. % zone rocheuse | 1.657 1,49 0,100 8.15 31 | 26,5 1,13 0,286 79 63 | 3,5 1,18 0,193 36 15 | 4,7 1,10 0,334 127 45/1até- rite | 2,6 1,11 0,174 32 0 | 10,6 1,11 0,230 127 80 | 9,1 1,24 0,104 10.5 0 |
| Pente moy. % % culture type culture sol dominant Géologie | var. " " | var. | se | 1 | 3 0 step/reg brun hydrom. | 12 5 mil/step brun arg 1imon. éocène | 1 100 mil brun sabl. dune Quatern. |
| Ruissell [±] KRAM % KRMAX% Erosion tot. t/km² Turbidité en susp.g/l. | 15à25 33 - | 30à47 49 - | 53-62 80à98 1200-1320 3 à 3,9 | 45-47 70à87 1400-2000 5 à 6,6 | 42-49 80à92 580-710 | 24-34 45à49 750-1240 | 11-13 23à42 60-220 |

Sur le bassin total, brousse tigrée sur le plateau steppe arbustive sur les versants acacia et cultures vivrières dans la vallée (mil et sorgho)

D'après HEUSCH (1975), les mesures d'envasement de la retenue d'Ibohaman au Niger, montre que les pertes en terre sur ce bassin atteignent 3000t/km²/an en moyenne de 1969 à 1974 : à l'érosion en nappe des glacis s'ajouterait une érosion en ravines non négligeable.

Quant au volume excavé de la vallée de la Zourourou à Keita au cours du Quaternaire, HEUSCH l'a évalué à 90km³ soit une érosion géologique moyenne de 200t/km²/an. Toujours d'après cet auteur, l'érosion spécifique actuelle de ce même bassin versant serait de l'ordre de 800t/km²/an.

Dans les versants forestiers d'altitude de Madagascar, le Centre Technique Forestier Tropical a poursuivi pendant dix ans la comparaison des bilans hydriques sous différents types de couverts (forêts denses, recru après brûlis, Eucalyptus crebra) et diverses tailles de bassins (500m² à 101ha) (BAILLY et al., 1974). Il en ressort que l'effet d'échelle des mesures (taille des parcelles) se fait sentir beaucoup plus sur l'écoulement permanent que sur le ruissellement lors des averses : les infiltrations profondes qui ressortent sous forme d'écoulement de nappe, augmentent rapidement jusqu'à ce que la taille du bassin atteigne 7ha. L'écoulement de base se stabilise ensuite. Par ailleurs, l'influence du type de couvert forestier est nette sur les débits de pointe autant que sur l'écoulement de base. Pour une surface de bassin réduite à 13 hectares, le ruissellement maximum (KRMAX) pour une averse de l'ordre de 200 millimètres atteint 20 à 36% sous forêt, 32% sous plantation d'eucalyptus et 65% sous recru forestier récent (jeune Savoka); la broussaille évapotranspire environ 100 millimètres de moins que la forêt et 250 millimètres de moins que la vieille plantation d'eucalyptus crebra (50 ans). Il n'y a malheureusement pas d'information sur la charge solide des écoulements.

FOURNIER (1969) cité par MONNET (1972), rapporte que la dégradation spécifique de quatre bassins thaïlandais, de superficie allant de 25.000 à 103.000km², varie sans relation apparente de 36 à 318t/km²: nous manquons d'information pour expliquer l'activité notable de l'érosion dans ce pays et ses fortes variations. Il semble cependant que plus les climats sont contrastés et plus la charge solide des rivières est élevée: c'est ainsi que la dégradation spécifique est la plus faible en milieu tempéré océanique (1 à 11t/km²), à moins que la densité de population et le développement de l'agriculture et de l'industrie n'interviennent (30 à 40t/km²/an sur l'Escaut à Gand et la Dyle à Louvain) (BOLLINE et al., 1978).

D'après MONNET, le Bandama, suumis à un régime tropical mixte et coulant au milieu d'une pénéplaine couverte de savane au nord et de forêts denses au sud, présente une dégradation spécifique (6 à 16t/km²/an) voisine de celle du fleuve Congo (9t/km²/an), mais beaucoup plus faible que celle des fleuves d'Amérique comme le Mississipi (64t/km²/an) et l'Amazone (79t/km²/an).

1.4 Conclusions

Aucun de ces résultats ne permet malheureusement de tirer des conclusions générales sur l'influence de la taille du bassin versant sur les phénomènes d'érosion : tout dépend des conditions locales de géomorphologie, de climat, de végétation et de sols. AMERMAN et MC GUINESS (1967) ont montré qu'il ne suffit pas toujours de diviser les grands bassins en aires homogènes et de sommer les ruissellements partiels; si on néglige par exemple de mesurer le ruissellement hypodermique des petits bassins, il ne sera pas possible d'évaluer l'apport global d'eau à évacuer dans la rivière coulant au fond des grands bassins. BAILLY et al.,(1972) arrivent aux mêmes conclusions à Madagascar.

Et il en va de même pour les transports solides, si sensibles aux pièges formés par les variations de pente, de sol ou de végétation.

Ainsi, en Afrique Noire, il est fréquent de voir la turbidité des eaux diminuer lorsque la taille du bassin augmente (exemple: Case ERLO Divo t = 490g/m³; Amitioro ravineau 2ha t = 92g/m³; Amitioro bassin 170km² t = 82g/m³ et Bandama à Tiassale 94.250km² t = 82g/m³).

Par contre, HEUSCH (1970) a montré qu'au Maroc, en climat méditerranéen et dans des reliefs jeunes, l'érosion spécifique tend à augmenter avec la superficie du bassin versant (voir tableau 5) car, dans ce milieu, l'érosion dépendrait moins de l'énergie des pluies que de celle des eaux qui s'écoulent dans les oueds.

Tableau 5.3: Erosion spécifique (suspension + charriage) moyenne sur 30 ans en fonction de la taille du bassin au Maroc d'après HEUSCH, 1970 -

| OUED | STATION | SUPERFICIE en km ² | EROSION en t/km ² /an |
|--|---|---|---|
| Sebou Sebou Sebou Sebou Sebou Inaouène Lebène Ouerrha Ouerrha Sra Aoulaï Aoudour | Pont du Mdez Ain Timedrine Azzaba Pont de Sebou Azib es Soltane Touaba Tissa Bab Ouender Ourtzagh Mjara Pont du Sker Rhafsai Tafrannt | 3 474 4 429 4 736 12 985 16 276 3 322 792 1 756 4 398 6 183 486 776 1 039 | 320 590 530 750 650 1 110 2 250 3 590 3 340 2 460 3 500 2 960 3 850 |

En définitive, s'il est difficile de passer des résultats observés en parcelles aux mesures en bassins, chaque echelle de mesure a son intérêt. En parcelle, on peut analyser les mécanismes d'érosion et quantifier les apports solides des versants, mais l'évacuation définitive de ces matériaux érodés dépend de la capacité de la rivière à les transporter. Ce sont là deux approches complémentaires pour comprendre un même milieu.

De l'ensemble des données quelque peu disparates qui existent sur les transports solides des rivières en Afrique, il ressort que trois milieux naturels sont nettement plus sensibles à l'érosion. La zone des steppes arbustives sahéliennes qui reçoivent 300 à 700 millimètres de pluie par an peut-être la zone de savane peu dense mais sur forte pente et, enfin, la zone des reliefs jeunes en climat méditerranéen, sujet que nous n'avons qu'effleuré.

2 - CONCLUSIONS SUR LES PHÉNOMÈNES D'ÉROSION

Au cours de cette seconde partie, nous avons présenté une synthèse des observations dont nous disposons aujourd'hui sur les phénomènes d'érosion en Afrique. Nous avons d'abord montré que l'énergie de la pluie est la cause première de l'érosion et que l'érosivité des précipitations est très élevée sur la séquence bioclimatique que nous avons étudiée, 2 à 20 fois plus forte que dans la région méditerranéenne. Sur les pentes faibles du vieux bouclier africain, le rôle du ruissellement se limite au transport des particules détachées par la battance des pluies (et par les animaux, cf. plus loin, chapitre 8), mais lorsque la déclivité des versants dépasse certains seuils, le ruissellement se hiérarchise en filets et acquiert lui-même une force abrasive importante. Ensuite, nous avons analysé et quantifié les facteurs qui modifient l'expression de l'érosion potentielle, à l'aide de l'équation de WISCHMEIER. Nous avons montré que certains facteurs sont extrêmement importants, en particulier la couverture végétale puis la pente, et que les techniques antiérosives doivent combiner les influences multiplicatives de chacun de ces facteurs.

Il nous reste à tirer des conclusions plus générales sur les aspects agronomiques, pédologiques et géomorphologiques de nos observations sur l'érosion.

2.1 Conclusions agronomiques

Parmi les facteurs qui modifient l'expression de l'agressivité climatique, le couvert végétal a de loin le rôle principal (variation de l à 1000), puis viennent la pente (l à 50), le type de sol (l à 20) et les pratiques antiérosives (l à 10). Le domaine privilégié d'application des méthodes biologiques de conservation de l'eau et des sols s'étend de la zone des savanes soudaniennes aux forêts équatoriales. En dehors des zones désertiques et sahéliennes où les méthodes mécaniques (travail du sol et terrassements divers) compensent les déficiences du couvert végétal, les conditions écologiques et socio-économiques condamnent l'utilisation généralisée

des diverses méthodes de terrassement lourd qui sont coûteuses à installer, difficiles à entretenir et non rentables.

Dans ce contexte, la conservation des eaux et de la fertilité des sols devrait pouvoir s'organiser autour de trois lignes d'action assurant à la fois une productivité élevée et permanente du domaine agricole.

1 - Aménagement du terroir en fonction des potentialités de production des terres et des risques de dégradation

- Intensification des cultures sur les terres les meilleures et les moins pentues et mise en défens des terres épuisées;
- limitation de la culture mécanisée à des terres suffisamment profondes (60 à 100cm sans excès de gravillons ni hydromorphie) et de moins de 4% de pente sur sol sableux et 7% sur sol argileux bien structuré:
- exploitation des terres pentues par des cultures qui couvrent le sol en permanence (pâturage, verger avec plantes de couverture, forêt);
- entretien du drainage du réseau routier et transformation des ravines existantes en exutoires aménagés.

2 - Fixation de l'agriculture à l'intérieur de structures en courbes de niveau

L'intensification de l'agriculture entraîne nécessairement une augmentation des coûts de production, ce qui est incompatible avec une agriculture itinérante. Sur les pentes cultivables, il faut donc organiser des structures permanentes comprenant un réseau routier bien drainé et engazonné, des bandes cultivées (20 à 50 mètres de large) en suivant la direction générale des courbes de niveau s'appuyant sur un réseau de bandes antiérosives enherbées en permanence.

3 - Adaptation des techniques culturales en vue de la conservation de l'eau et de la fertilité des sols

Il s'agit de développer toute une série de mesures conservatoires simples en vue de développer le couvert végétal, améliorer la fertilité et les propriétés hydrodynamiques des horizons superficiels des sols. Citons :

- plantation précoce et dense de variétés vigoureuses et résistantes aux maladies;
- fertilisation minérale et politique de conservation des matières organiques (fumier, paillage, prairies temporaires et résidus de culture);
- rotation dans le temps et alternance dans l'espace de cultures couvrantes et de cultures sarclées : deux années de jachère améliorée par les légumineuses alternant avec des périodes d'exploitation d'autant plus brèves que les sols sont vite épuisés;
- . association de cultures complémentaires, cultures dérobées et plantes de couverture sous les plantations arbustives;
- préparation du sol adapté au type de culture, au type de sol et aux risques climatiques : labour en grosses mottes de fin de cycle, en plein ou réduit aux bandes de semis, avec retournement ou travail avec des dents rigides sous les résidus de la culture précédente.

C'est l'usage combiné de l'ensemble de ces méthodes simples, à la portée des paysans, qui leur permettra de devenir responsables du maintien et de l'amélioration de la productivité de leur terroir.

2.2 Conclusions pédologiques

L'énergie cinétique des gouttes de pluie qui atteignent la surface du sol provoque la destruction des agrégats, la séparation des particules constituantes en fonction de leur taille et leur projection dans toutes les directions.

Il en résulte tout d'abord une modification de la structure de la surface du sol (liquéfaction de la pellicule superficielle, disparition des macropores) qui aboutit à la formation d'une pellicule de battance peu perméable, laquelle commande pour une très large part la dynamique de l'infiltration et donc de l'érosion.

Le second résultat de la battance des pluies est la redistribution des particules en fonction de leur taille. Les particules les plus fines (matières organiques, argiles et limons) sont susceptibles de migrer sur de longues distances, en suspension plus ou moins stable, soit à l'intérieur du sol avec les eaux d'infiltration qui percolent dans les macropores, soit à la surface du sol avec les eaux de ruissellement qui rejoignent rapidement le réseau hydrographique. Quant aux particules grossières, elles sont piégées temporairement sur place dans les irrégularités de la surface du sol, mélangées aux horizons sousjacents (lors de travaux culturaux ou par l'activité de la mésofaune) ou migrent par bonds successifs jusqu'aux pièges majeurs du paysage où ils forment les colluvions et alluvions.

Si les vitesses de migration de ces diverses particules étaient semblables, ce schéma se traduirait par un simple décapage de l'horizon humifère superficiel entraînant une diminution de son épaisseur. C'est le cas de certains versants cultivés sans protection, où se développent de nombreuses rigoles (= érosion en nappe décapante) effacées lors de la préparation des terres avant le semis.

En réalité, l'érosion décapante (rigole, ravine, reptation), est généralement doublée d'une érosion en nappe sélective vis-à-vis des particules fines et des matièresorganiques et des nutriments du sol. Ce phénomène de sélectivité de l'érosion sera abordé plus loin, mais signalons déjà qu'il est partiellement responsable de la naissance et du développement de l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels de nombreux sols tropicaux. Cet appauvrissement sélectif en particules fines est d'autant plus poussé que la pente est faible, la surface du sol rugueuse, la mésofaune active, la couverture végétale dense et l'érosion décapante réduite.

Il faut retenir de tout ceci l'importance majeure des pellicules de battance sur la dynamique de l'eau dans le profil et sur le versant ainsi que les conséquences sur les migrations de matières (solubles ou solides) à la surface de la toposéquence.

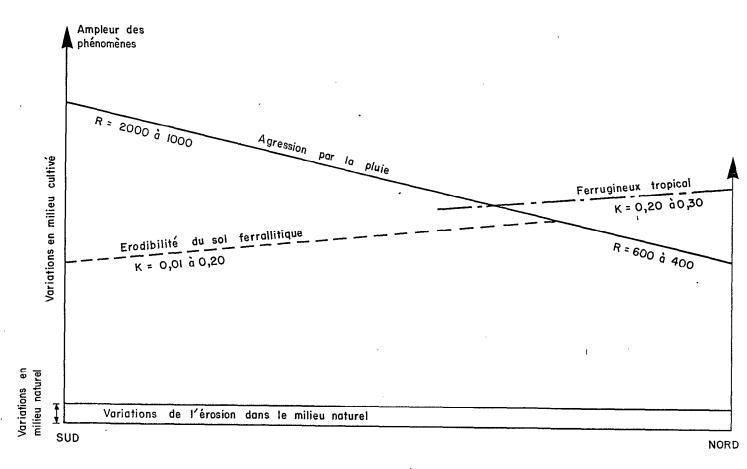
2.3 Conclusions géomorphologiques

Les paysages en dômes, lanières ou plateaux très disséqués, à pentes relativement fortes (10 à plus de 25%) et faibles dénivellées, qui occupent les sols ferrallitiques des régions forestières tropicales humides, disparaissent progressivement dans la région des savanes tropicales sèches en faveur des larges paysages composés de plateaux résiduels reliés par de courts éboulis à de longs glacis mal drainés. Cette coïncidence nous amène à nous poser des questions sur les processus qui ont entraîné de telles différences et sur leur vitesse d'action.

En effet, l'érosion actuelle mesurée aussi bien sur parcelles homogènes que sur bassins versants (voir figure 5.12 transports solides en fonction des précipitations) reste faible qu'il s'agisse d'une forêt ou d'une savane soudanienne tant que le couvert végétal n'est pas dégradé par l'homme ou par le feu. Pour expliquer le décapage de hauteurs impressionnantes de terrain (de 40 à plus de trois cents mètres dans certaines régions comme celle des falaises dogon au Mali), il ne suffit donc plus de faire appel à l'alternance entre un climat subéquatorial entraînant une altération profonde des roches et un climat tropical sec associé à une végétation de savane. Il faut qu'intervienne une période climatique encore plus sèche, du type sahélien, où les précipitations moyennes sont comprises entre 300 et 750mm (selon les auteurs cf. figure 5.1) (= hypothèse des variations climatiques) pour évacuer toute cette masse de matériaux en des temps raisonnables (BIROT, 1979). Ou alors, il faut admettre que l'érosion puisse se développer sous une savane peu dense comme au Cameroun sur des versants assez raides qui reculent parallèlement à eux-mêmes après que le réseau hydrographique se soit enfoncé profondément dans la couche d'altération développée lors de la phase tropicale humide (hypothèse des mouvements tectoniques et de l'enfoncement du niveau de base).

Les paysages de la zone subéquatoriale évoluent actuellement par altération relativement rapide et poussée des roches et par évacuation des produits solubles par la nappe et les rivières : la charge

SCHEMA DE LA REPONSE DES PARCELLES A L'AGRESSIVITE DES PLUIES EN FONCTION DU CLIMAT, DU SOL ET DE LA VEGETATION



FORET DENSE
SUBEQUATORIALE

FORETS SECHES

SAVANE SOUDANIENNE SAVANE PRESAHELIENNE

INFLUENCE DES FACTEURS CONDITIONNELS

_ Couvert végétal | à 1/1000

_ Pente O,1 à 5 (20 except.)

- Erodibilité sol 0,01 à 0,30

_ Techniques culturales anti-érosives là 0,1

L'érosion reste à peu près constante en milieu naturel depuis la forêt dense jusqu'aux savanes présahéliennes protégées des feux, car l'agressivité des pluies diminue alors que l'érodibilité des sols augmente. Par contre en milieu aménagé, l'érosion varie beaucoup plus .

soluble peut y être plus élevée que la charge solide. Il en résulte des formes en dômes enchassés dans des zones planes marécageuses, des versants convexes et quelquefois même des manifestations voisines des karsts (cuvettes sur les sables tertiaires décrites par HUMBEL, 1966 et FAUCK, 1972).

Par contre, les paysages de la frange séparant les forêts claires des steppes sahéliennes portent la marque, à la fois d'une altération très poussée (voir l'épaisse nappe d'argile bariolée à Korhogo, Gonse, Saria), et d'une érosion très active au cours des temps géologiques (larges vallées entre les reliefs résiduels). On pourrait donc penser qu'au cours des alternances climatiques du Quaternaire, des climats de type sahélien auraient sévi jusque dans la zone de Korhogo, de Bouaké ou même en basse Côte d'Ivoire (voir la nappe graveleuse d'Azaguié et les signes de remaniement et d'érosion des sols sur sables tertiaires), mais dans la zone forestière, les climats humides ultérieurs (combinés peut être à une baisse du niveau de base) ont eu le temps de rendre au paysage les formes typiques de l'altération en milieu chaud et humide.

Les études sur l'érosion sont pléthoriques, mais souvent disparates. Nous disposons ici de mesures effectuées selon le même protocole sur une séquence géographique couvrant la zone forestière subéquatoriale, les forêts sèches et les savanes soudaniennes et jusqu'aux savanes présahéliennes. Aussi, avons-nous tenté de montrer sur un graphique l'influence des différents facteurs de l'érosion tout au long de cette chaîne bioclimatique.

Le schéma de la figure 5.2 montre bien pourquoi il ne faut pas s'attendre à des différences significatives d'érosion de la zone forestière jusqu'à la savane soudanaise tant que la végétation n'est pas dégradée. En effet, si les sols ferrugineux tropicaux (les plus répandus dans cette zone) sont plus fragiles que les sols ferrallitiques situés au sud, les pluies, par contre, sont moins agressives. Et, si on observe quelquefois des différences de transports solides entre des bassins forestiers et des bassins couverts par la savane, ou bien il s'agit de différences d'échelle, d'espace et de temps, ou bien de niveau

de dégradation de la couverture végétale, cas le plus fréquent; en effet, plus le climat est sec et contrasté plus la dynamique de la reconstitution d'une couverture végétale complète est lente et aléatoire, sans l'aide d'une protection temporaire.

L'étude en petites parcelles a permis de hiérarchiser les facteurs conditionnels de l'érosion. On voit bien sur ce schéma pourquoi les résultats sont si variables d'un bassin à l'autre et difficile à prévoir à l'aide de régressions simples.

C'est que le facteur dominant tous les autres est l'état du couvert végétal lequel varie amplement sur chaque bassin en fonction des traitements auxquels l'homme le soumet : cela justifie le recours aux méthodes biologiques pour lutter contre les risques que représente l'érosion.

TROISIÈME PARTIE

LES BILANS DE MATIÈRES : Étude des transferts de matières et leurs effets

INTRODUCTION:

Dans les deux premières parties de cet ouvrage, nous avons précisé successivement les conditions générales de l'étude (milieu et méthodes), puis les phénomènes d'érosion, en distinguant les causes et les facteurs qui modifient la quantité des matériaux arrachés à la surface du sol.

Dans cette troisième partie, il sera question de l'ensemble des transferts de matières, tant sous forme soluble que sous forme solide, à la fois à la surface du sol (migrations obliques) et à l'intérieur de celui-ci (migrations verticales et obliques) ou tout au moins à travers la partie supérieure du profil. Cette étude des bilans de matières est menée à l'échelle d'une parcelle homogène, située sur un versant moyen, variant en fonction des conditions climatiques, du type de sol et des aménagements plus ou moins radicaux imposés au milieu naturel.

Les bilans biogéochimiques supposent la comparaison des flux de matières qui entrent dans "la boîte noire", à ceux qui en sortent, ainsi qu'aux stocks d'éléments et aux cycles internes du système "sol-plante". Et pour établir l'importance des flux, il faut connaître d'une part, le débit des vecteurs (en particulier l'eau) et d'autre part, la composition des charges solubles et des charges solides.

Ces transferts de matières ont des conséquences sur la texture des horizons superficiels des sols tropicaux étudiés; nous serons donc amenés à discuter du rôle des processus de lessivage, d'érosion en nappe sélective et de remontée de terre fine par la mésofaune

dans le phénomène d'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels, si largement répandus dans des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux de l'Afrique Occidentale (FAUCK, 1964).

La troisième partie se composera donc des chapitres suivants :

- Chapitre 6 : Bilan hydrique et évolution des flux hydriques en fonction des caractéristiques climatiques dans la zone concernée.
- Chapitre 7: Composition chimique des charges solubles et solides dans les eaux superficielles.
- Chapitre 8 : Bilans biogéochimiques à l'échelle de la parcelle.
- Chapitre 9 : Les aspects granulométriques des transferts de matières et les phénomènes d'appauvrissement.

CHAPITRE VI : LE BILAN HYDRIQUE

L'eau étant identifiée comme 1'un des agents de transport des éléments solubles et solides du sol, nous allons tenter, dans ce chapitre, d'évaluer les flux d'eau qui ruissellent (R) en surface, ou qui percolent à travers les deux premiers mètres du profil, verticalement (D.V.) ou obliquement (D.O).

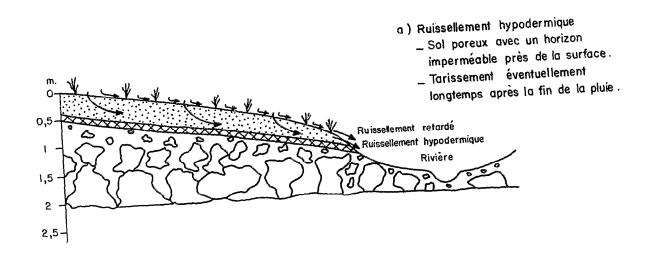
Pour cela, on peut s'y prendre de deux façons :

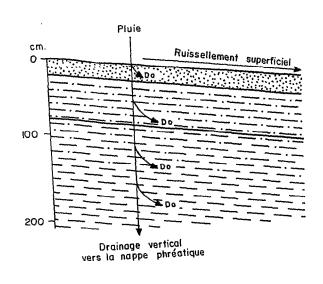
- Mesurer directement les flux (P, R, DO, DV) à l'aide de dispositifs appropriés (cases d'érosion, cases ERLO et DV, bassins versants, mesures de profils hydriques à la sonde à neutrons, mesure du niveau de la nappe dans des piezzomètres) méthode que nous avons appliquée pendant 4 à 11 années en huit stations réparties entre Abidjan et Ouagadougou.
 - Mais, ces mesures effectuées pendant des périodes limitées, ne peuvent correspondre à la moyenne propre à chaque lieu géographique. Il faut donc envisager un second mode d'approche.
- Calculer le bilan hydrique à partir de quelques données facilement accessibles. A l'échelle de la parcelle, l'équation générale s'écrit de la manière suivante :
 - Pluie = RUISS. + DRAIN. (Ob1. + Vert.) + ETR + Var. Stock eau du sol Equation 10

Dans cette équation, on dispose des pluies moyennes (pendant 20 à 40 ans), du ruissellement moyen (4 à 11 ans), des variations saisonnières du stock d'eau du sol et l'on va estimer le drainage (vertical et oblique) ainsi que l'évapotranspiration réelle (ETR) à l'aide de données sur l'ETP et sur les variations saisonnières du stock d'eau du sol.

Le bilan d'eau sera abordé à l'échelle de la parcelle sur six stations situées en zone forestière sempervirente (Adiopodoumé et Azaguié) ou semi-décidue (Divo), en savane guinéenne (Bouaké), soudanienne (Korhogo) et soudano-sahélienne (Saria). Nous passerons d'abord en

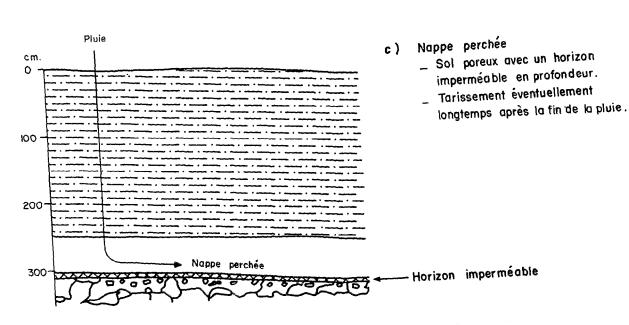
LES ECOULEMENTS INTERMEDIAIRES





b) Drainage oblique

- Horizons successifs de moins en moins perméables
- Tarissement rapide après la fin de la pluie



revue les données d'observation dont nous disposons avant de schématiser le bilan hydrique pour une année où les précipitations sont moyennes, faibles ou fortes (de fréquence décennale). Ensuite, nous comparerons ces résultats avec les bilans mesurés sur de petits bassins versants sur des profils hydriques ou des piezzomètres avant de conclure sur l'évolution des termes du bilan tout au long de notre séquence bioclimatique.

1 - DÉFINITION DES TERMES

Il peut être utile de préciser le sens de chacun des termes de l'équation générale :

PLUIE: Ce sont les précipitations mesurées en absence de couvert végétal (poste météorologique) ou au-dessus de celui-ci. Une fraction des précipitations est interceptée par le couvert. Nous l'avons estimée à 14% sous le couvert forestier d'Adiopodoumé, mais ne l'avons pas mesurée dans les autres stations: l'interception est comprise dans cette équation à l'intérieur du terme ETP, car ces eaux sont évaporées aussitôt après la pluie.

Le RUISSELLEMENT, est un écoulement rapide au-dessus de la surface du sol, directement en relation avec la perméabilité du sol et l'intensité des pluies (refus à l'infiltration) : cet écoulement s'arrête rapidement après la fin des précipitations. Il s'exprimera ici comme le rapport entre la lame d'eau ruisselée annuelle moyenne et la hauteur de pluie annuelle moyenne (KRAMZ= L Ram H Pam x 100).

La NAPPE PHREATIQUE assure l'écoulement de base d'une rivière par l'intermédiaire de sources visibles ou occultes. Elle est nourrie par les eaux de drainage qui percolent au-delà du niveau du sol influencé par l'évapotranspiration (c'est-à-dire le pédon* défini par AUBERT et BOULAINE, 1967). Il existe différents écoulements intermédiaires entre

Par pédon, il faut entendre les couches de sol les plus exploitées par les racines et les plus modifiées par l'homme et la mésofaune. En pratique, nous nous bornons aux deux mêtres supérieurs du sol, à moins qu'un obstacle (cuirasse par exemple) ne limite la dynamique actuelle du sol avant cette profondeur.

les deux types précités : nous distinguerons le ruissellement retardé qui est un écoulement de surface, limité en volume et retardé par les irrégularités de la surface du sol (touffes d'herbes, flaques, litière forestière); il s'effectue à la limite du sol très poreux et de la base de la végétation (voir figure 6.1). Un autre type d'écoulement intermédiaire, le ruissellement hypodermique, se produit sur des sols poreux en surface, mais présentant à faible profondeur un horizon peu perméable (voir figure 6.1). Dans ce cas, le ruissellement ordinaire est peu marqué tant que les horizons superficiels ne sont pas totalement engorgés. Mais, si la pluie persiste, il se forme une nappe temporaire qui s'écoule le long de l'horizon peu perméable : lorsqu'une rupture de pente le met à nu (ravinement ou érosion régressive), cet écoulement se mêle au ruissellement, mais il persiste plus longtemps que lui après l'arrêt des pluies.

Le DRAINAGE OBLIQUE se forme dans bon nombre de sols où la perméabilité des horizons diminue fortement en profondeur. En cas de pluies abondantes et intenses, l'eau de percolation s'accumule au-dessus de ces horizons et si le sol est en pente, ces nappes temporaires s'écoulent le long de cette pente à l'intérieur des horizons poreux du sol : cependant, la durée des écoulements est très limitée (quelques minutes à quelques heures) après la fin de la pluie, car l'infiltration verticale continue (voir figure 6.1b).

Les NAPPES PERCHEES peuvent se développer lorsqu'un sol poreux présente en profondeur une discontinuité notable (cuirasse, lit argileux ou surface d'altération d'une roche) : l'eau d'infiltration s'accumule au-dessus de cette discontinuité et peut alimenter des écoulements pendant plusieurs jours voir pendant des semaines (voir figure 6.1c).

Le DRAINAGE VERTICAL est la fraction des précipitations qui percole librement et verticalement dans le sol au-delà d'un horizon donné. Sauf mention contraire, il s'agit de l'eau libre qui s'écoule au-delà du pédon (au-delà de deux mètres de profondeur) pour rejoindre la nappe phréatique.

L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR) est la somme de l'évaporation du sol et de la transpiration des végétaux en fonction des conditions réelles

d'apports d'énergie et de disponibilité en eau.

Par VARIATION SAISONNIERE DU STOCK D'EAU DU SOL, nous entendons, enfin, la différence de stock d'eau contenu dans le profil (sur 2 mètres) ressuyé en fin de saison humide et le profil desséché en fin de saison sèche : ces variations se mesurent donc sur le terrain.

C'est une valeur plus élevée que la réserve d'eau utile (concept agronomique), car le profil peut se dessécher bien au-delà des points de flétrissement permanent durant la saison sèche.

2 - LE BILAN HYDRIQUE MESURÉ

Les valeurs annuelles des précipitations, du ruissellement ainsi que du drainage oblique (ERLO) et vertical (lysimètres) ont été reportées en annexe 1. Des résultats plus détaillés ont été publiés et discutés dans les rapports concernant chaque station. Nous n'en rappellerons ici que les principales conclusions et nous attacherons à montrer comment évolue chacun des termes du bilan depuis la zone forestière subéquatoriale de basse Côte d'Ivoire jusqu'aux savanes soudano-sahéliennes du centre de la Haute-Volta.

2.1 Les précipitations

Pour chaque station, nous disposons des observations journalières pendant la durée des expérimentations (4 à 11 ans) et d'une série d'observations de longue durée (25 à 40 ans) au poste météorologique voisin.

Tableau 6.1 : Les précipitations annuelles

| | _ | | | | Ţ | |
|---|---|---|---|--|---|-------------------------------|
| | ADIOPO. | AZAGUIE | DIVO | BOUAKE | KORHOGO | SARIA |
| Obs. poste Météo Nbre. années Hauteur . Moyennes (mm) . déc.sèche " . déc.Humide" | 29ans 2131 1636 2705 | 42ans 1775 1390 2160 | 28ans 1453 1077 1829 | 37ans 1202 914 1490 | 29ans 1351 1004 1700 | 29ans 826 650 1050 |
| Source | Monteny- Eldin 1977 | LAFFORGUE 197 9 | LAFFORGUE 1979 | DUBREUIL 1960 | CAMUS 1976 | ROOSE 1979 |
| Nbre années Hauteur Moy.(mm) Nbre années : normales . sèches . Humides | 4 à 11 1802 2 7(1/10) 2(I/3à1/10) | 4 à 8 1670 4 3(1/5à1/10) 1(1/8) | 4 à 8 1334 3 4(1/3à1/5) 1(1/20) | 4 à 7 1134 2 4(1/8à1/10) 1(1/10) | 4 à 9 1280 5 3(1/3) 1(1/10) | 4 678 2 2(1/10) 0 |

(I/5) : signifie fréquence = 1 fois en 5 ans.

Il apparaît au tableau 6.1 que non seulement les précipitations annuelles moyennes diminuent du sud vers le nord, mais également les écarts entre les précipitations pour les années de fréquence décennale sèche et humide (A P1/10 = 1070mm à Adiopodoumé et 400mm à Saria). Une discontinuité apparaît entre Bouaké (HAM = 1202mm) et Korhogo (HAM = 1351mm) dans la région où l'on passe du régime climatique équatorial à deux saisons des pluies, au régime tropical à une seule saison humide (voir carte figure 5.3). Les observations sur le terrain se sont déroulées pendant 4 à 11 années durant lesquelles les précipitations annuelles furent plus souvent déficitaires qu'excédentaires. La quantification des phénomènes observés reste cependant représentative, car presque

chaque station a connu une ou plusieurs années humides (1968-1969 ou 1974) et à l'intérieur de chaque année plusieurs séquences pluvieuses intéressantes. La comparaison des résultats annuels (tableaux en annexe 2) montre d'ailleurs que pour des hauteurs annuelles voisines, ruissellement et drainages peuvent être très différents selon l'arrangement des séquences pluvieuses à l'intérieur de la saison humide : PIEYNS et KLEIN (1964) l'ont montré également pour les petits bassins de la région d'Ouagadougou.

2.2 Le Ruissellement'

Au tableau 6.2 sont présentés les coefficients de ruissellement annuels moyens (KRAM%) réellement mesurés sous végétation naturelle ou cultivée (= var.), ainsi que ceux que nous avons adoptés pour établir les bilans qui vont suivre.

Dans la zone forestière, le milieu naturel correspond à des forêts denses humides secondarisées suite à l'exploitation des essences précieuses: ces forêts présentent une forte densité de végétation tant au niveau des couronnes que du sous-bois. Dans la zone de savane, il s'agit de savanes herbeuses où la densité d'arbustes diminue de Bouaké à Saria; généralement, ces savanes sont parcourues chaque année par les feux et pâturées de façon extensive.

Le milieu aménagé est représenté par des cultures sarclées (maïs à Adiopodoumé, Bouaké et Korhogo, sorgho à Saria). A Azaguié, par contre, il s'agit d'une bananeraie fertilisée et irriguée, tandis qu'à Divo, c'est une cacaoyère fertilisée qui succède à la forêt, sur la même parcelle. A Korhogo, les mesures ont été effectuées sur des parcelles nues, mais les résultats ont été adaptés au cas du maïs faiblement fertilisé.

Tableau 6.2 : Le ruissellement (KRAM% des précipitations)

| | ADIOPODOUME | AZAGUIE | DIVO | BOUAKE | KORHOGO | SARIA |
|--|-----------------------------------|--|--|---|------------------------|--|
| Milieu Naturel . KRAM. var. % . KRAM adopté% en année: sèche moyenne humide | Forêt semper O.1 à 2.5 1 1 1 | forêt semper 0.4 à 5.5 1.3 2 5.3 | For.semi-dec. 0.5 à 1.4 0.5 1 1.5 | Sav. Arbon 0.02 à 0.3 0.1 0.3 0.5 | | l |
| Milieu aménagé . KRAM var.% . KRAM adopté% en année: sèche moyenne humide Type culture | 13 à 30 22 25 27 mais | 5.5 à 12 5.7 7 5.3 ** Bananeraie fert.+irrig | 0.3 à 0.4 0.3 0.5 ^{毫末} 1 cacao fert. | 10 à 26 15 20 25 mais | (24à40)* 15 20 25 mais | 10à37 20 25 30 Sor- gho |

^{* (24} à 40) sur sol nu

On ne peut pas conclure des résultats exposés au tableau 6.2 que le ruissellement est supérieur sous savane que sous forêt. Par contre, il semble plus élevé à Azaguié ou le sol ferrallitique s'est développé sur schiste, à Korhogo où la végétation est très dégradée et à Saria sur un sol ferrugineux tropical à structure instable (peu de matières organiques et beaucoup de limons et sables fins). En

A Azaguié, nous avons indiqué le KRAM réellement obtenu en année humide sous bananeraie. Par contre, à Divo, nous n'avons pas eu d'année très humide lorsque la parcelle fut plantée de cacaoyers; Nous avons adopté des coefficients de ruissellement légèrement inférieurs à ceux observés sous forêt. De toute façon, les variations sont très faibles.

milieu naturel, le ruissellement n'augmente pas toujours nettement avec la hauteur des précipitations annuelles, mais si le sol est cultivé (donc partiellement découvert), le sol souffre d'autant plus de la battance que les pluies sont agressives et le ruissellement augmente sensiblement (la hauteur de la lame ruisselée, sinon le KRAM lui-même). On note enfin que certaines cultures (bananiers et surtout cacaoyers ou hévéa à Anguédédou (voir l'annexe 1) protègent mieux le sol que les cultures sarclées, comme le mais ou le sorgho. Les différences de ruissellement existant entre le milieu naturel et le milieu cultivé vont peser lourdement sur les autres éléments du bilan (surtout le drainage) : pourtant la plupart des auteurs ont tendance à négliger le ruissellement lorsqu'ils tentent de modéliser le bilan hydrique (THORNTWAITE, 1948; FRANQUIN et FOREST, 1977; AUDRY, 1978).

2.3 Le drainage oblique

Lorsque les horizons superficiels du sol sont poreux et que les horizons sousjacents sont de moins en moins perméables, il peut naître des engorgements temporaires à différents niveaux dans le profil au cours des averses importantes. Cette eau libre, accumulée au-dessus des horizons peu perméables, est susceptible de s'écouler obliquement à l'intérieur du sol lorsque celui-ci est situé sur une pente, même légère. Ces écoulements qui ne se prolongent guère plus de quelques heures après la fin de l'averse, ont été captés dans onze cases de lessivage oblique (ERLO). Les circonstances de ces écoulements ont été détaillées dans les rapports de chaque station (ROOSE et al., 1966 à 1980) et les résultats annuels des onze stations ont été réunis en annexe 1.

^{* :} Il n'est pas impossible que le drainage oblique puisse se développer dans des horizons où la porosité oblique est plus forte que la porosité verticale (cf. HUMBEL, 1976). Nous n'avons pas eu l'occasion de le constater malgré des essais dans ce sens.

Tableau 6.3 : Drainage oblique (litre par parcelle de 2mètres de large et de 25 à 50mètres de long).

| Pente | ADIOPO. R2=65% | | DIVO 10% | BOUAKE | KORHOGO 3% | SARIA * 0.5% |
|---|---|--|---|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| I 0-30cm (md var) II 50cm (md var) III 100cm (md var) IV 150/180 (md var) V 200 (md var) V1 210 (md var) | 96 23 - 342 119 1 - 556 86 2 - 220 29 0 - 113 - | 25 3 - 156 100 0 - 203 45 0 - 158 55 27 - 138 | 1.6 0.1 - 46 10 0.1 - 64 37 11 -117 27 3 -144 1.3 0 - 86 | 17 0 - 33 0.1 0 - 14 0 | 33 6 - 188 26 2 - 75 7 | - 0 - 100 - 0 - 261 0 - 250 - 0 - 56 0 - 173 0 - 263 |
| Surf. parcelle | 50m ² | 75m ² | 76m ² | 100m ² | 100m ² | 83m ² |
| Total en md 1/parcelle var KDO annuel md var KDO max/averses | 345 26-1212 0.5% 0.3-1.2 2.4% | 225 53-585 0.2% 0.04-0.5 2.0% | 76 26-437 0.08% 0.03-0.4 I.8% | 28 0-84 0.03% 00.1 0.3% | 230 45-696 0.2% 0.04-0.24 | - 0- 1102 - 0 - 2 - |
| - md - Max.max. | 7 | 4 | 4 | 1 | 2.7 | 7 |

md = médiane

KDO = coefficient de drainage oblique en % des précipitations

Au tableau 6.3 sont présentées les médianes (Md) et la variation total (var) du drainage oblique annuel (en litre par parcelle) recueilli à différentes profondeur sous végétation naturelle en six stations réparties depuis la zone forestière d'Abidjan jusqu'aux savanes présahéliennes de Ouagadougou. En admettant en première approximation l'hypothèse (discutable pour certaines stations) que les écoulements obliques proviennent d'une surface limitée par la parcelle ERLO, il est possible de calculer un coefficient de drainage oblique

^{* =} à Saria il n'est pas possible de calculer une médiane sur 4 ans, d'autant plus que certaines observations sont douteuses (débordements).

à l'échelle de l'averse (KDO Max) ou de l'année (KDO AM) qui se définit comme le rapport entre la lame d'eau drainée obliquement et la lame d'eau précipitée correspondante. Il apparaît que ce drainage oblique existe réellement sur toutes ces parcelles "moyennes et représentatives d'une région" (il peut atteindre l à 7% des averses les plus importantes ce qui représente plusieurs dizaines voir centaines de litres de drainage, sur 2 mètres de front, par niveau de mesure. Cependant, il ne représente pas une part très importante du bilan annuel (à peine 0.03 à 0.5% en moyenne et jusqu'à 1.2% en année humide de fréquence décennale). Ces chiffres sont approchés par excès si la surface collectrice des précipitations déborde la surface de la parcelle ERLO.

Il y a peu de différence de volume de drainage oblique en fonction de la pente du sol (sauf à Adiopodoumé où le drainage oblique disparaît lorsque la pente est inférieure à 10%) et du climat. Par contre, le drainage oblique augmente lorsque le couvert végétal diminue : c'est la cas sous la bananeraie d'Azaguié (irriguée, il est vrai, en saison sèche) et à Gonse (voir annexe 1) lorsque les feux de brousse éliminent une bonne partie du couvert (arbustes et herbes). Les variations sont très élevées d'une année à l'autre (Exemple : en R2 Adiopodoumé var. 26 à 1212 litres par an) en fonction des séquences pluvieuses plutôt que des précipitations annuelles.

L'influence saisonnière est très marquée. Les orages brefs, mais intenses de fin de saison sèche ne donnent généralement lieu qu'à de faibles écoulements limités aux deux premières gouttières : mais les eaux sont très chargées en éléments solubles et colloïdaux. Quand le sol est gorgé et que viennent les grandes averses au coeur de la saison des pluies, le drainage oblique est beaucoup plus important, il est réparti sur l'ensemble du profil (ou tout au moins au-dessus de l'horizon imperméable) et sa charge soluble et solide est beaucoup plus faible (voir plus loin). Lorsque le profil du sol est humecté, l'abondance et l'intensité des averses régissent l'importance des écoulements obliques. En fin de saison sèche par contre d'autres facteurs favorisent la naissance du drainage oblique :

1 - La présence de fentes de desséchement qui permettent au ruissellement superficiel de s'engouffrer jusqu'à un niveau de discontinuité

- (cuirasse par exemple) sans mouiller l'ensemble du profil (Gonse, ROOSE, 1978).
- 2 -la présence de bulles d'air et la rupture des films d'humidité dans les macropores qui limitent la progression à l'intérieur du profil du front d'humectation (Adiopodoumé, ROOSE, 1980).

On pouvait s'attendre à ce que le drainage oblique soit abondant dans l'horizon humifère le plus poreux. C'est la cas dans la plupart des situations étudiées, mais il est souvent plus abondant dans des horizons plus profonds situés au-dessus de celui qui freine le plus le drainage vertical : vers 50 à 100cm à Adiopodoumé au-dessus de l'horizon tassé brun jaune, dans la nappe gravillonnaire au-dessus des niveaux d'argile tachetée à Azaguié, Bouaké et Korhogo, ou même plus bas dans le profil, au-dessus de la cuirasse comme à Gonse et Saria. Les écoulements observés sont généralement brefs (voir figure 6.1). Il peut cependant arriver au cours d'une séquence très pluvieuse qu'une nappe profonde (perchée ou phréatique) se gonfle tellement qu'elle atteigne le pédon et soit drainée par les fosses ERLO : nous l'avons observé à Azaguié (sommet vers 40cm), Divo (moins net vers 150cm), Korhogo (idem) et Saria (vers 120cm en parcelle numéro 7). Les écoulements sont alors très abondants et durent plusieurs jours.

Enfin, deux remarques supplémentaires peuvent être faites :

- Tout d'abord, les mesures systématiques du drainage oblique sont très rares. En Afrique, elles sont uniques en dehors des mesures effectuées pendant 4 ans par COLLINET (1972) au Gabon, sur une case ERLO construite sur notre modèle et par DELHUMEAU et LOYER en Tunisie. Aux U.S.A., WIPKEY, (1965) a tenté de l'estimer sur des modèles particuliers et AMERMAN et al., (1967) sur un petit bassin versant : cependant, il s'agit plus de ruis-sellement hypodermique au-dessus d'un horizon argileux colmaté (clay pan) que de drainage oblique au sens où nous l'avons défini (voir figure 6.1). En Guyane française, BLANCANEAUX a également installé une case ERLO à la Crique Grégoire où les observations se sont poursuivies pendant 9, années.

- Ensuite, beaucoup de pédologues ont observé à l'occasion d'une averse, des eaux gicler par des tubules d'origine animale (ou d'anciennes racines) dans une fosse. On ne peut conclure de ce genre d'observation isolée que le drainage oblique et surtout que les transports par drainage oblique

soient importants pour le développement d'un profil ou d'une toposéquence. Dans les circonstances où se sont déroulées nos mesures systématiques (parcelles moyennes représentatives), des écoulements importants sont survenus à certaines occasions : le drainage oblique et le lessivage oblique sont donc des réalités, mais à l'échelle de l'année, ils ne représentent pas des phénomènes considérables (relativement à d'autres phénomènes comme le ruissellement ou le drainage vertical). Cependant, on peut se demander si les effets du drainage oblique lors des événements rares ne sont pas plus marquants que la somme des effets du drainage oblique en année moyenne. Dans les bilans hydriques qui vont suivre, le drainage oblique sera donc confondu avec le drainage vertical beaucoup plus abondant, sauf en zone soudano-sahélienne où le drainage vertical s'annule à partir d'une certaine profondeur du sol, liée à la texture et à la réserve hydrique.

2.4 Le drainage vertical mesuré en lysimètres

Les résultats détaillés des mesures de drainage dans 91 lysimètres monolithiques cylindriques de 63 centimètres de diamètre et 40 à 180 centimètres d'épaisseur ont été exposés dans les rapports de station (ROOSE et al., 1974 à 1980). Certains bilans annuels sont regroupés en annexe **T** et nous nous limiterons ici à tirer les principales conclusions.

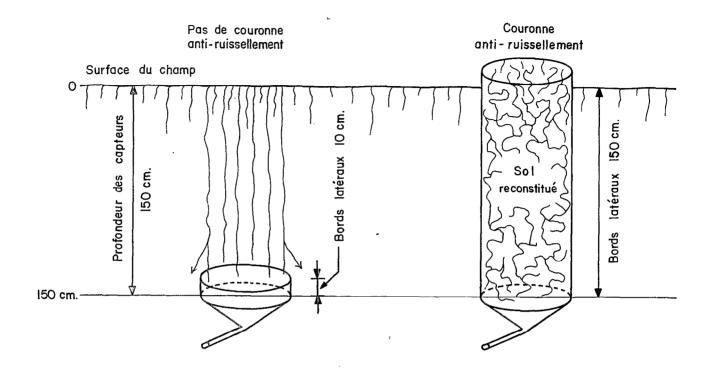
a) Essai méthodologique

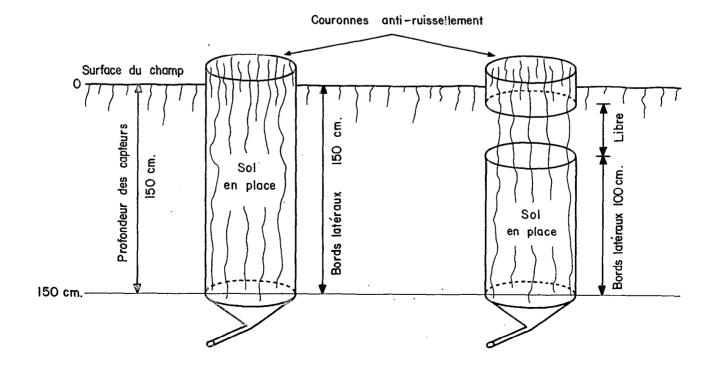
Tableau 6.4 : Drainage vertical (mm) sous 4 types de lysimètres (3 répé------ titions). Végétation: Panicum en 1971 et mais ensuite Adiopodoumé : 12 drains posés à 150cm de profondeur.

| | Pluie mm | Casiers drainants | Lys.remanié Bordure 150cm | Lys. non remanié Bordure 150cm | Lys.non remanié Bordure 100cm | Moy. 3 .derniers % pluies |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------|
| 1971 1972 1973 1974 | 1634 1636 1637 2223 | 95 mm 15 21 128 | 854 mm 764 1115 1296 | 781 mm 735 1082 1363 | 942 mm 820 1021 1200 | 52.6 % 47.2 64.9 57.9 |
| Moy. | 1783 | 65mm | 1007mm | 983mm | 996mm | 995mm/ 56% |

Fig. 6.2

QUATRE TYPES DE LYSIMETRES ETUDE METHODOLOGIQUE





Au tableau 6.4, il est rappelé pourquoi nous avons été amenés à choisir les lysimètres monolythiques plutôt que les casiers drainants enfoncés en profondeur dans le sol, lesquels auraient apporté une solution élégante au problème que pose le respect de l'évapotranspiration réelle en milieu forestier (l'enracinement superficiel est très étendu). Les essais sous Panicum maximum et sous mais (figure 6.2) durant 4 ans montrent que ces casiers captent mal l'eau de percolation (65mm sur 1783mm de pluie au lieu de 995mm pour les autres lysimètres) et uniquement en juin et juillet lorsque les plus grosses averses tombent sur le sol déjà détrempé, ce qui donne une image déformée de la charge des eaux (Adiopodoumé: ROOSE, 1980). Par contre, les différences à l'échelle de l'année sont faibles entre les lysimètres remaniés ou monolithiques, que les bordures remontent jusqu'au-dessus de la surface du sol ou seulement sur un mètre (voir figure 6.2).

La seconde conclusion importante, c'est l'influence considérable des séquences pluvieuses et de leur répartition dans le temps
sur le drainage : celui-ci varie notablement (47 à 65%) d'une année à
l'autre pour des précipitations annuelles très voisines (1634 à 1637mm).
En année humide (H 1974 = 2223mm) le drainage est plus fort qu'en année
sèche (en valeur absolue tout au moins); à Adiopodoumé, il atteint
1300mm dont 75% s'écoulent du 15 mai au 15 juillet avec une légère reprise en novembre.

b) Résultats généraux

Au tableau 6.5, il apparaît que les mesures de drainage ont été effectuées pendant 3 à 5 années comprenant une année normale et plusieurs années déficitaires : les résultats sont donc en général sous-estimés, mais certains sont anormalement élevés (stations forestières) par suite des artéfacts discutés ci-dessous. Globalement, le drainage diminue en valeur absolue (nombre de millimètres) et en valeur relative (% des pluies) du sud au nord de la séquence bioclimatique à mesure que les précipitations diminuent et que l'ETP augmente; Korhogo constitue une exception à la règle, car les précipitations y sont plus élevées qu'à Bouaké et surtout plus concentrées dans le temps.

Tableau 6.5 : Le drainage vertical mesuré en lysimètres de sol non remanié

| | | | | | , | - , |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|
| | ADIOPO. | AZAGUIE | DIVO | BOUAKE | KORHOGO | SARIA |
| VEGETATION NAT. | recru/ forêt2aire | recru / Forêt2aire | recru / Forêt2aire | Sav. Herb. | Sav.Herb. | Sav.Herb. |
| . durée | 1971-75 | 1971-73 | 1971-74 | 1970-73 | 1972-75 | 1971-74 |
| . Pluie(mm) | | | | | | |
| - Moy. Var. | 1708 1405–2223 | 1568 1450-1784 | 1250 946-1388 | 1053 906-1383 | 1190 1155-1241 | 682 616 - 724 |
| Drain.Vertical brut % vers 180cm | 79 | 96 | 53 | 37 | 25 | 23 |
| Ruiss. % | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.1 | 2 | 7.6 |
| . DV.corrigé, % | 78.5 1341 | 95.6 1499 | 52 . 7 659 | 36.9 389 | 23 274 | 15.4 105 |
| | | | | | | |
| CULTURES | | | | | ł | |
| | Mais Fourrag. | BananeIrr. | Cacao | Riz+Mais/ coton* | Maïs | Sorgho |
| . durée | 1973~75 | 1971-73 | 1971-74 | 1973-76 | 1972-75 | 1971-74 |
| . Pluie(mm) | ٠ | | | | | |
| | 1836 1637 - 2223 | 1702 1564-1872 | 1250 946-1388 | 1022 892-1213 | 1190 1155 - 1241 | 682 616 - 724 |
| Drain. Vertical | 61 1 45 | 42.6 | 44.8 | 29 | 45 | 18 |
| vers 120cm | 61 45 | 42.6 | 0.4 | 15 | 20 | 16.5 |
| . Ruiss.% .D.V. corr./ % | 39 1 44 | 35.6 | 44.4 | 14 | 25 25 | 1.5 |
| (-ruis.) mm | 716 789 | 606 | 555 | 143 | 298 | 10 |
| (-1015.) (11111 | /10 /09 | 000 | 555 | . 45 | 270 | 10 |
| | | L | L | | | |

^{*} D'après les rapports annuels de l'IRAT/C.I. (Communication de CHABALIER du 9.12.77). Végétation dans les lysimètres = recru forestier sous voûte foliaire forestière ou grandes herbes mais hors du couvert des arbustes.

c) Analyse critique des résultats

Sous couvert forestier (et bananeraie), ces petits lysimètres isolés ne peuvent donner satisfaction pour plusieurs raisons :

- ils n'englobent pas la maille de l'hétérogénéité de la surface du sol;
- le pouvoir évaporant de la forêt a été réduit à celui de la litière ou du recru forestier développé sous l'ombrage des grands arbres (lysi-mètres totalement fermés);
- les gouttes de pluie sont réparties de façon très hétérogène sous le couvert forestier;
- en se développant, le recru risque d'intercepter de plus en plus de pluie en dehors de la surface du lysimètre (ainsi à Azaguié le DV est passé de 78% la première année à 112% la troisième).

En zone de savane, les risques d'erreur sont moindres, car nous avons écarté les arbustes pour ne couvrir les lysimètres que de hautes herbes (Andropogon): à Bouaké, cependant, les herbes se seraient étalées en formant un entonnoir ce qui expliquerait un drainage mesuré un peu excessif par rapport à ce qu'on a observé sous culture à quelques centaines de mètres de distance.

Sous culture, lorsque la taille et la densité des plantes sont compatibles avec la surface des lysimètres, cette méthode donne des résultats intéressants. Le drainage mesuré au bas d'un lysimètre dépend beaucoup du climat, mais aussi du type de plante, de son architecture (entonnoir ou parapluie), de son développement (influence dépressive des engrais sur le drainage), de son système radiculaire et de la couverture végétale qu'il déploie (dans le temps et dans l'espace).

Pour éviter les variations d'infiltration dues au ruissellement superficiel, nous avons été amené à faire dépasser les
bordures des lysimètres au-dessus de la surface du sol (voir figure
6.2). Mais en forçant toutes les eaux de pluie à s'infiltrer alors
que normalement elles ruisselleraient en partie, on a augmenté artificiellement le drainage. Il faut donc soustraire au drainage brut observé
en lysimètre, le ruissellement observé en parcelles d'érosion ou tout
au moins la majeure partie de celui-ci (que nous avons évalué à partir
d'exemples précis à 80% : en effet, le ruissellement se développe sur

des sols gorgés, en même temps que le drainage. Tant que le ruissellement ne dépasse pas quelques % comme dans le milieu naturel ou sous culture fourragère, cette correction n'a guère d'importance, mais il n'en va plus de même sous maïs ou sorgho (ruissellement de 15 à 30%). Alors que le drainage brut mesuré sous maïs est parfois supérieur à celui de la savane, la situation s'inverse lorsqu'on soustrait le ruissellement (exemple : Korhogo).

Durant cette période où les précipitations furent déficitaires, le drainage vertical moyen mesuré en lysimètres a été de 40 à 45% en zone forestière, 25 à 35% en zone de savane guinéenne, 20 à 25% en savane soudanienne et 2 à 15% sur un sol superficiel de la zone soudanosahélienne. En valeur absolue, le drainage diminue de 800 à quelques dizaines de millimètres sur la même séquence bioclimatique.

d) Influence de la profondeur du sol

Il s'agit là de drainage profond, au-delà de 150 centimètres de profondeur. Mais qu'en est-il du drainage tout au long du profil,
en fonction de la profondeur? Dans la nature, toutes les eaux de percolation passent nécessairement par les horizons superficiels et le drainage
ne circule à travers les horizons profonds qu'après avoir réhumecté
toute la colonne de sol situé au-dessus d'eux: le drainage profond est donc
plus faible que le drainage traversant les horizons superficiels.
Mais, dans un lysimètre ordinaire, le rendement (drainage/pluie) augmente
théoriquement avec la profondeur, car la tension capillaire retient toujours la même hauteur d'eau quel que soit le niveau où l'on sectionne
les capillaires du sol pour poser la tôle réceptrice (HARROLD et
DREIBELBIS, 1958 et 1967).

Dans les conditions expérimentales des sols sablo-argileux souvent riches en éléments grossiers, cette règle a peu joué et le drainage mesuré diminue effectivement en profondeur (exemple : Saria, Korhogo, Divo, Azaguié). A Bouaké, par contre, le drainage a tendance à croître légèrement en profondeur, mais en réalité les variations sont telles d'un lysimètre à un autre qu'il est difficile de trancher. Par contre, il existe une variation notable de la vitesse d'écoulement du drainage en fonction de la profondeur des capteurs : les lysimètres peu profonds se vident en

24 heures après une averse, tandis que les capteurs situés vers 150cm réagissent plus progressivement et les écoulements continuent pendant plusieurs jours.

2.5 Conclusions sur les mesures de flux

Les précipitations furent le plus souvent déficitaires durant les années où se sont déroulées nos observations. Chaque essai a cependant profité d'une année normale (au moins) et surtout de plusieurs séquences abondamment pluvieuses, ce qui est finalement plus important pour les phénomènes de ruissellement et de drainage que la hauteur annuelle des pluies. Toutefois, l'intensité du ruissellement et du drainage mesuré est probablement un peu inférieure à la moyenne.

Le drainage oblique est présent dans toutes les stations, mais en quantité négligeable, par la suite, il sera confondu avec le drainage vertical.

Quant au ruissellement superficiel, il est faible sous végétation naturelle (quelle soit forestière ou de savane, pourvu qu'elle soit protégée des feux), mais il peut dépasser 20 à 40% si le sol est mal couvert par la culture. C'est un point important : la plupart des auteurs qui proposent des équations pour estimer le bilan hydrique, négligent le ruissellement.

La méthode lysimétrique pose quelques problèmes inhérents à l'hétérogénéité du milieu (sol et végétation), mais aussi à la méthode elle-même (discontinuité au niveau des capteurs). Cependant, la diversité des essais a permis de montrer que le drainage vertical est un phénomène très important en zone forestière (plus de 40% du bilan sous culture fourragère) et dans les savanes guinéennes et soudaniennes (25 à 35% du bilan). Le drainage diminue à mesure que les précipitations sont moins abondantes ou moins concentrées dans le temps et que le pouvoir évaporant de l'air augmente : il s'annule en zone sahélienne (pluie <600mm). La durée des observations du drainage (3 à 5 ans) est trop brève pour prévoir l'évolution du drainage en année humide de fréquence décennale.

3 - LE BILAN HYDRIQUE CALCULÉ

Avec 3 à 5 années de mesure de drainage, il est impossible d'estimer le bilan hydrique pour les années où les précipitations sont moyennes ou de fréquence décennale. Aussi sommes-nous amené à calculer ces bilans, ou tout au moins à les schématiser avec une bonne approximation.

3.1 La méthode de calcul

Le calcul précis du bilan hydrique d'une parcelle suppose une information régulière de l'état du stock d'eau du sol. Mais les expériences ont montré (par comparaison entre les résultats calculés et les données lysimétriques ou hydrologiques) qu'on peut estimer avec une précision raisonnable le drainage à partir des données mensuelles (et à fortiori des données décadaires ou journalières) sur les précipitations, le ruissellement, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les variations saisonnières du stock d'eau du sol (cf. Gonse; ROOSE, 1977). Le "drainage brut" est calculé par différence entre la pluie et la somme du ruissellement et de l'ETP.

En saison sèche, il n'y a pas de possibilité de drainage tant que les précipitations sont inférieures à la somme du ruissellement et de l'ETP: toute lame d'eau qui ne ruisselle pas est rapidement évapotranspirée.

Si Pluie (Ruiss. + ETP, on a ETR = Pluie - Ruiss.

En pleine saison des pluies, l'ETR est voisine de l'ETP si le sol est bien couvert par la végétation, ce qui est le cas dans le milieu naturel étudié (mais pas pour toutes les cultures). Le drainage est égal aux précipitations diminuées du ruissellement et de l'ETP, aux variations d'humidité du sol près.

Si Pluie >> Ruiss. + ETP , ETR ≃ ETP et DV = Pluie - (Ruiss. + ETP).

Corrections aux périodes intermédiaires. Après l'arrêt des pluies, au début de la saison sèche, l'ETR n'est pas nulle, car les plantes puisent l'eau qui leur est nécessaire dans la réserve hydrique du sol. Il faut donc ajouter à ETR la différence saisonnière du stock d'eau du sol (stock d'eau du profil à capacité au champ moins celui du profil sec en fin de saison sèche) et la soustraire au drainage brut au début de la saison humide : en effet, avant que l'eau libre percole à travers le profil, il faut ramener celui-ci à une humidité voisine de la capacité au champ.

Cette méthode très simple est voisine de celle utilisée par THORNWAITE (1948). Elle a été précisée par l'adjonction d'une correction due au ruissellement et par l'estimation sur le terrain des variations saisonnières du stock d'eau du sol (au lieu de la correction systématique de 100 millimètres) (ROOSE, 1973). Dans ces conditions, on peut apprécier au tableau 6.6 l'influence sur le drainage du ruissellement, de l'épaisseur de sol concerné et du pas de temps (cas de Gonse). L'allongement du pas de temps conduit à sousestimer le drainage; malgré cet inconvénient, nous avons calculé les bilans à partir des données mensuelles (les plus disponibles). En effet, la comparaison sur chaque station des bilans annuels, calculés à partir des données mensuelles, avec les bilans mesurés aux lysimètres ou les bilans hydrologiques des petits bassins versants voisins, montre que la précision de la méthode est largement suffisante pour préciser le flux d'eau percolant à travers le profil dont nous aurons besoin pour dresser les bilans de matière.

A titre d'exemple, les tableaux de calcul des bilans hydriques en année de pluviosité moyenne et décennale sèche ou humide pour les parcelles d'Adiopodoumé, Korhogo et Gonse ont été portés en annexe x (tableaux 6.7 a,b,c.).

Avant d'aborder les résultats des calculs de bilan sous végétation naturelle et sous culture, il faut encore préciser les données sur l'ETP et sur les variations du stock d'eau du sol.

Tableau 6.6 : Comparaison des estimations du drainage à la savane arborée de Gonse (1968-1973)

| Année | 1958 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1973 | моч. |
|----------------------|-------------|-----------------|------------------|-----------------|-------------|-------------|----------------|
| l - Estimation | | | | | | | |
| D.V. corrigé | 0 0 0 | 97 37 0 | 167 107 49 | 77 17 0 | 0 0 0 | 0 0 0 | 57 27 8 |
| 2- Estimation | à partir d | les donnée | s journa | lières | | | |
| D.V. corrigé | 4 0 0 | 150 56 21 | 224 147 76 | 157 97 20 | 0 0 0 | 0 0 0 | 89 50 20 |
| 3- Mesures sur | lysimètre | s (après | soustract | tion du r | uissell | .ement) | |
| D.V. lys. corrigé | 0 0 | 0 0 | 120-109 3,5 | 150-137 15 | 0 | 0 | 43 3 |
| Pluie ETP | 809 1938 | 759 1951 | 799 1927 | 661 1960 | 698 1952 | 553 1996 | 713 1954 |
| Ruiss. | 24 | 17 | 2,5 | 1,5 | 62 | 89 | 33 |

⁻ Variations du stock du sol = 76mm sur 50cm; 136mm sur 100cm; et 194mm sur tout le profil (180cm).

Au tableau 6.6 sont comparés pour la station de savane de Gonse, trois estimations du drainage : .

Pour chaque estimation, on envisage le volume percolé au-delà d'horizons de profondeur croissante, en corrigeant "le drainage brut" des variations saisonnières de stock d'eau du sol (cas des estimations calculées) ou du ruissellement mesuré sur la parcelle ERLO voisine (cas des lysimètres). On remarque, dans la dernière colonne du tableau 6.6., qu'en moyenne, le drainage observé en lysimètre vers 50 et 100cm de profondeur (DV=43 et 3mm) est du même ordre de grandeur (légèrement inférieur) que le drainage estimé par calcul pour ces mêmes profondeurs. De plus, les estimations à partir des données mensuelles sousestiment le drainage lequel est un phénomène rapide.

^{1 -} une estimation calculée à partir de données mensuelles (de pluie, ruiss., ETP).

^{2 -} une estimation calculée à partir de données journalières (de pluie, ruiss., ETP),

^{3 -} une mesure en lysimètres totalement fermés.

3.2 L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle représente la quantité d'eau maximale susceptible d'être évaporée par un couvert végétal abondant, couvrant bien le sol, en phase active de croissance et alimentée en eau de façon optimale (ELDIN, 1971). L'ETP mensuelle a été calculée par ELDIN selon la formule de TURC (1961).

ETP =
$$\left[0.40 \quad \frac{t}{t+15}\right] \quad \left[(0.62 \quad \frac{h}{H} + 0.18) \quad IgA + 50\right]$$

où ETP est exprimée en millimètres par mois,

t est la température moyenne mensuelle (en degrés centigrades),

h est la durée d'insolation (en heures),

H est la durée du jour du lever au coucher du soleil (en heures dans les tables),

IgA est l'énergie du rayonnement solaire (en cal/cm²/jour) qui atteindrait le sol en absence d'atmosphère (grandeur astronomique donnée par des tables, en fonction du mois et de la latitude du lieu).

Au tableau 6.8 sont réunies les valeurs mensuelles prises par l'ETP moyenne (sur 16 à 28 ans selon les postes météorologiques de l'ASECNA), la déviation standard correspondante et l'ETP mensuelle pour des années où les précipitations sont voisines des précipitations annuelles de fréquence décennale sèche ou humide. L'ETP annuelle varie entre 1200 et 1300 millimètres entre Abidjan et Bouaké, dans toute la zone subéquatoriale à deux saisons des pluies. Ce n'est qu'en zone tropicale à une seule saison des pluies, à partir de Korhogo, que l'ETP augmente sérieusement.

En effet, c'est seulement dans les secteurs de climat tropical à saisons contrastées (voir Ouagadougou au tableau 6.8.) que l'ETP atteint 5 à 7 millimètres par jour en saison sèche et reste aussi élevée en saison des pluies (3.7 à 5mm/jour). En région subéquatoriale par contre, l'ETP n'atteint jamais des valeurs aussi élevées (3.5 à 4.2mm/jour en saison sèche) et devient très faible durant la saison des pluies (1 à 3 mm/jour).

Tableau 6.8.: L'évapotranspiration potentielle mensuelle (mm) calculée selon la formule de TURC (d'après ELDIN et DAUDET, 1967; ELDIN, 1971; et ELDIN, 1979 = communication personnelle).

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| | JANV | FEV. | MARS | AVR. | MAI | JUIN | JUIL | AOUT | SEPT | OCT. | NOV. | DEC. | total Annuel |
| DIOPODOUME (1956-1976) . Moyenne . Déviation standard . An. sec. 1/10 (1972) . An. humide 1/10 (1962) | 109 19 123 96 | 114 13 120 99 | 130 12 140 114 | 123 10 125 110 | 115 12 114 111 | 79 11 90 66 | 83 13 77 70 | 79 7 76 79 | 82 8 83 83 | 110 14 118 97 | 116 12 108 99 | 109 19 111 83 | 1249 1285 1107 |
| AZAGUIE (1955-1976) | | | | | | | | | | | | | |
| . Moyenne . Sec. (1971) . Humide (1968) | 119 86 123 | 119 117 111 | 123 120 125 | 123 125 129 | 124 122 128 | 98· 88 99 | 98 100 102 | 83 79 96 | 90 75 103 | 107 100 118 | 120 95 119 | 113 89 122 | 1314 1196 1375 |
| DIVO=GAGNOA (1953-76) | | | | | | | | | | | | | · |
| . Moyenne . déviation standard . An. Sec. (1973) . An. humide (1970) | 114 6 123 105 | 114 5 113 105 | 128 7 120 134 | 124 · 6 122 114 | 118 8 121 108 | 92 7 93 104 | 86 9 105 86 | 81 9 91 81 | 93 6 96 88 | 111 9 142 116 | 109 5 113 116 | 106 5 114 108 | 1276 1353 1265 |
| BOUAKE (1948-1976) | | | | | | | | | | | | | |
| . Moyenne . Déviation standard . An. Sèche (1973) . An. humide (1970) | 125 25 141 115 | 123 15 131 125 | 132 8 115 135 | 123 11 135 119 | 121 11 127 115 | 93 9 102 107 | 82 9 93 82 | 78 7 83 86 | 91 7 91 82 | 110 9 111 110 | 108 12 115 105 | 105 19 127 104 | 1291 1371 1285 |
| KORHOGO (1953-1976) | | | | | | | | | | | | | |
| . Moyenne : Déviation standard | 169 16 | 157 19 | 154 10 | 143 6 | 146 9 | 129 6 | 116 | 110 9 | 115 9 | 141 8 | 138 5 | 142 17 | 1660 |
| . An. sèche (1974) . An. humide (1969) | 180 150 | 189 140 | 148 157 | 148 141 | 150 157 | 129 131 | 107 126 | 106 118 | 107 118 | 137 131 | 147 138 | 163 136 | 1711 1643 |
| OUAGADOUGOU (1953-1969) | | | | | | | | | | | | | |
| . Moyenne . Sèche (1963) . Humide (1955) | 187 196 178 | 188 180 171 | 216 238 194 | 178 187 143 | 155 153 143 | 136 148 106 | 129 146 97 | 116 131 116 | 126 136 115 | 149 140 144 | 165 186 162 | 160 192 125 | 1905 2033 1694 |

En un site donné, l'ETP est remarquablement stable : l'ETP annuelle augmente à peine de 200 millimètres d'une année humide à une année sèche. De plus, les variations mensuelles de l'ETP sont plus fortes en saison sèche qu'en saison des pluies en raison des oscillations secondaires du front intertropical et des manifestations irrégulières de l'harmattan, vent sec soufflant du désert. En un même site, l'influence de l'ETP sur le bilan sera donc peu différente d'une année à l'autre quelle que soit l'abondance des pluies. Et si le ruissellement reste relativement semblable (ce qui est à peu près le cas en milieu naturel), le drainage vertical augmente proportionnellement à la hauteur de pluie tombée au coeur de la saison pluvieuse. Dès lors, la relation entre le drainage et la hauteur annuelle des pluies n'est pas très étroite en un même site; elle dépend des modes de répartition des averses dans le temps.

D'un site à l'autre par contre, le drainage moyen a tendance à augmenter lorsque les précipitations annuelles moyennes augmentent dans un même régime climatique. A mesure qu'on se déplace vers le nord de la séquence, les précipitations diminuent, l'ETP augmente ainsi que le ruissellement, car les sols sont moins perméables : le drainage profond et le les échanges de matières avec les horizons profonds seront donc moins favorisés en zone tropicale sèche.

3.3 L'Evolution du stock hydrique du sol

Il ne s'agit pas de calculer la réserve théorique d'eau utile du sol (humidité à pF 2.5 - pF 4.2) ni la réserve facilement utilisable des agronomes, mais d'évaluer sur le terrain la différence de stock d'eau du sol lorsque le profil est complètement réhumecté et ressuyé en fin de saison humide (c'est-à-dire à capacité au champ ou lorsque la dynamique de l'eau cesse d'être rapide) et des profils hydriques desséchés en fin de saison sèche (quelquefois bien au-delà du pF 4.2).

Les mesures d'humidité sur les différents profils ont été faites à plusieurs reprises sur le terrain en fin de saison sèche, et en fin de saison des pluies ou après une longue irrigation (600mm). La méthode a été décrite en détail par TRAN THANH CANH (1972). Les profils

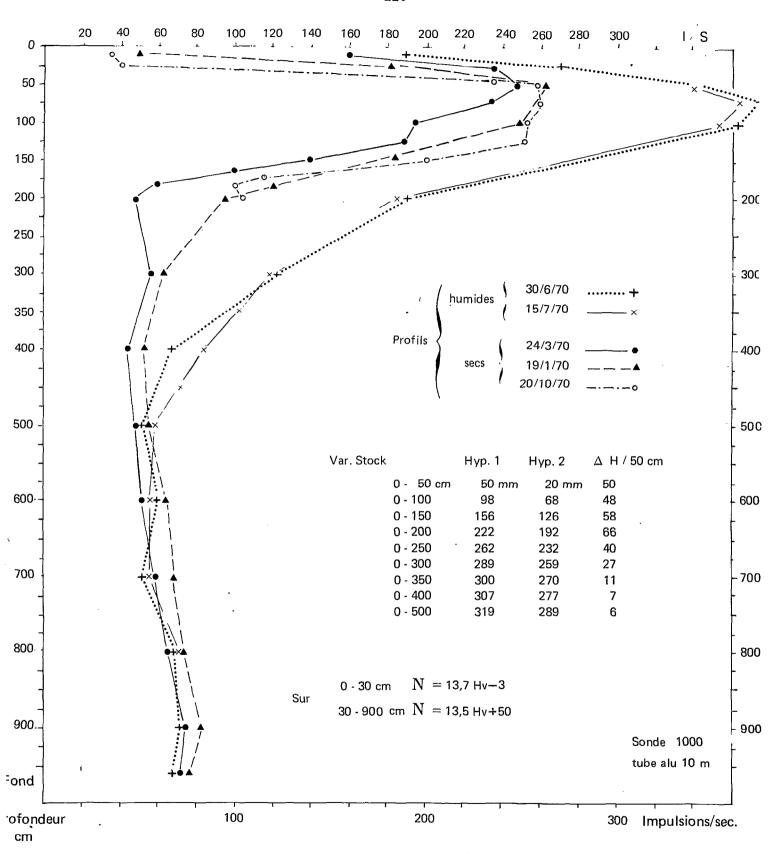


Fig. 6.3 - Profils hydriques sous forêt (case Erlo R2. Adiopodoumé) - <u>D'après</u>
les résultats d'observations à la sonde à neutrons communiqués par
J.F. BOIS (mai 1979) du laboratoire des Radio-isotopes d'Adiopodoumé.

hydriques ont été effectués à la tarière ou à l'humidimètre à neutrons (sonde HP 310 + EC 310), avec la collaboration du Laboratoire des Radio-isotopes d'Adiopodoumé, dans des tubes en aluminium de 2.5 à 10 mètres de long (BOIS et ROOSE, 1978).

Tableau 6.9 : Variation saisonnière du stock d'eau cumulé (en mm) dans les profils des cases ERLO

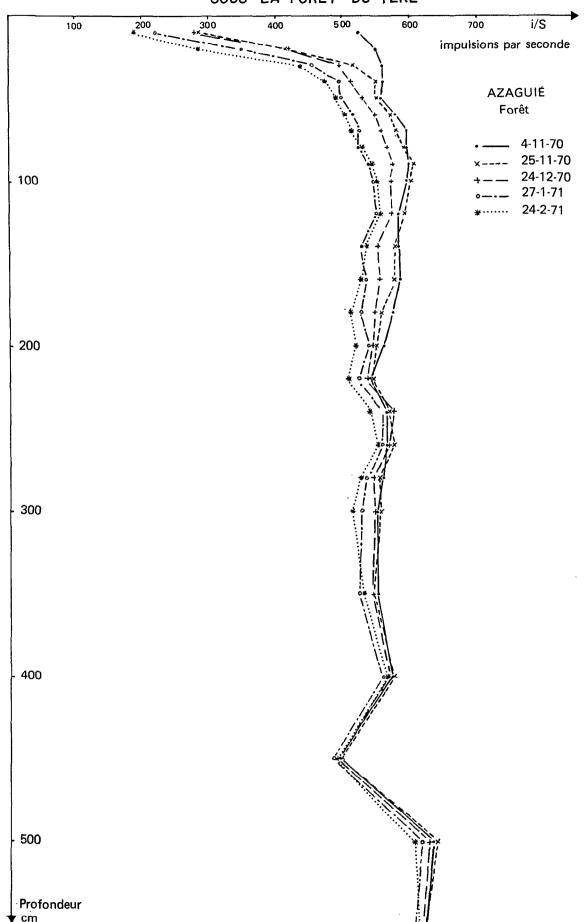
| | ADIOPODOUME | AZAGUIE | DIVO | BOUAKE | KORHOGO | SARIA P7 |
|------------------------|-------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|
| 0 à 50 cm 0 à 100cm | 50 98 | 60 120 | 40 90 | 36 87 | 53 101 | 43 · |
| à 150cm | 146 | 165 | 120 | 120 | 132 | _ |
| à 200cm | 202 | 195 | 150 | - | 151 | - |
| à 300cm | 289 | 225 | ~ | - | 160 | _ |

Il ressort de la lecture du tableau 6.9 que la tranche de sol utilisée comme réserve d'eau par la végétation varie considérablement d'un profil à un autre en fonction de la zone bioclimatique. En zone de forêt sempervirente, des mesures d'humidité systématiques à l'humidimètre à neutrons jusqu'à 5 et 10 mètres ont montré qu'il y avait des différences d'humidité non négligeables jusqu'à 3,5 mètres à Adiopodoumé et 2,5 mètres à Azaguié ou à Yapo (BOIS et ROOSE, 1978, HUTTEL, 1975) (Voir figures 6.3 et 6.4).

Dans la zone des savanes guinéennes et soudaniennes de Bouaké et Korhogo, les variations d'humidité saisonnières des profils sont limitées dès 120 à 150 centimètres de profondeur (en fonction de la densité des arbres qui puisent plus bas). Dans la zone soudano-sa-hélienne, le front d'humectation n'atteint pas 50 centimètres chaque année (voir figure 6.5). A Gonse où la cuirasse est profonde (170cm), lors des années pluvieuses, le front d'humectation atteint 50 centimètres vers le 15 juillet et l'mètre vers le 20 août. Le profil entier ne s'humidifie qu'en septembre, si les pluies ne s'arrêtent pas trop tôt. Dans ces conditions, la nappe phréatique n'est plus alimentée chaque année. A Saria, par contre, dans la parcelle n° 7, la cuirasse

Fig. 6.4

VARIATION SAISONNIERE DU PROFIL HYDRIQUE SOUS LA FORET DU TEKE



1/8

50

1969

1/5

1/6

1/7

PROFONDEUR ATTEINTE PAR 旧 FRONT D'HUMIDITE

(GONSÉ, 1969 - 1970 - 1971 - 1973)

50

1/10

1/9

Fig.

ი .5

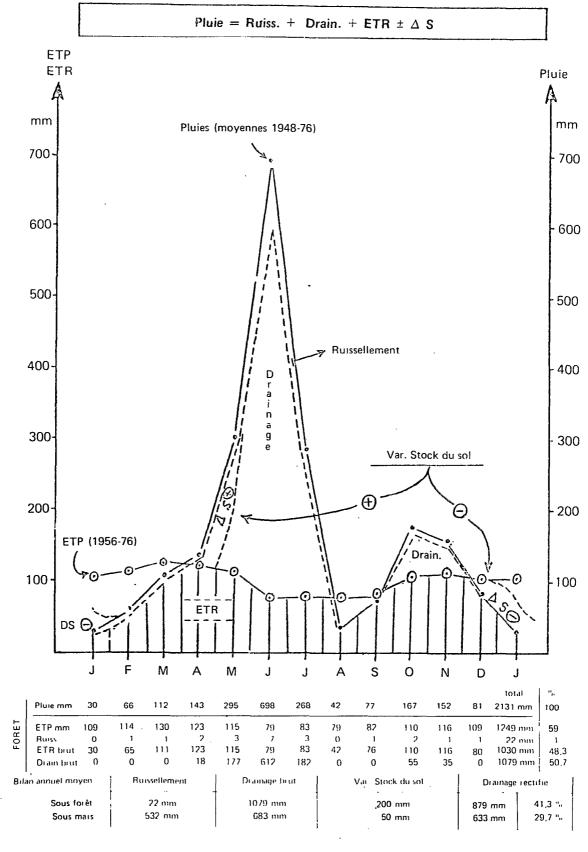


Fig. 6.6.a - Schéma de bilan hydrique pour la région d'Abidjan. Moyennes mensuelles d'Adiopodoumé - D'après les données de pluie et ETP recueillies par MONTENY et ELDIN (1977).

Située vers 60 centimètres de profondeur limite l'enracinement. Le sol étant moins épais, l'alimentation de la nappe est plus facile, même en année déficitaire. Il y a donc une modulation régionale des variations de la réserve hydrique du sol et des modulations locales presque aussi importantes.

Les plus fortes variations d'humidité sont toujours observées dans la tranche des 30 à 50 premiers centimètres du sol : c'est là, en effet, que les racines sont les plus nombreuses, car elles trouvent à la fois des apports fréquents d'humidité par les pluies et la majeure partie des nutriments qui leur sont indispensables et qui sont libérés par la minéralisation des matières organiques.

Quant aux variations du stock d'eau sous mais et sorgho, elles dépassent rarement 50 millimètres dans nos essais.

3.4 Les bilans hydriques calculés en année moyenne, humide

ou sèche

Dans les rapports de synthèses régionales publiés antérieurement (ROOSE et al., 1977 à 1980), il a déjà été montré que les bilans hydriques calculés pendant la période d'observation (4 à 11 ans) à partir des données mensuelles de pluie, de ruissellement et de l'ETP ont donné des résultats voisins de ceux qui ont été observés aux lysimètres ou qui ont été estimés par d'autres méthodes (profils hydriques mesurés à la sonde à neutrons et déficit d'écoulement calculé par les hydrologues). Dès lors, il semble raisonnable de généraliser ces calculs de bilan hydrique à des années de précipitation moyenne et à des années sèches ou humides de fréquence décennale. Pour ce calcul en année moyenne, ce sont les moyennes mensuelles des précipitations, du ruissellement et de l'ETP qui ont été prises en compte, tandis que les données mensuelles réelles ont été utilisées en années sèches ou humides (quitte à modifier légèrement l'abondance des pluies sans changer leur répartition pour se rapprocher au mieux des valeurs calculées sur de longues séries d'observation des pluies).

Les résultats de ce calcul sont présentés aux figures 6.6 aux tableaux 6.10, pour le milieu naturel, et 6.11 pour les cultures. De

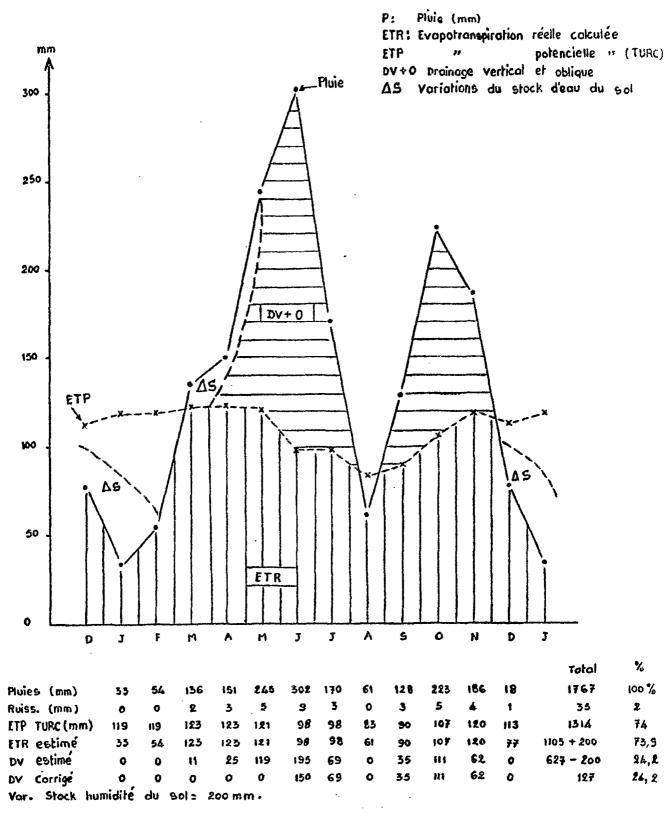
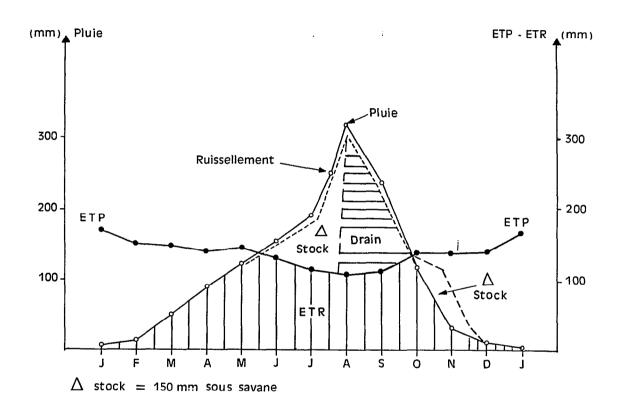


Fig. 6.6.b - Schéma de bilan hydrique moyen sous forêt du Téké.

Fig. 6.6.c - Schéma de bilan hydrique pour la région de Korhogo.

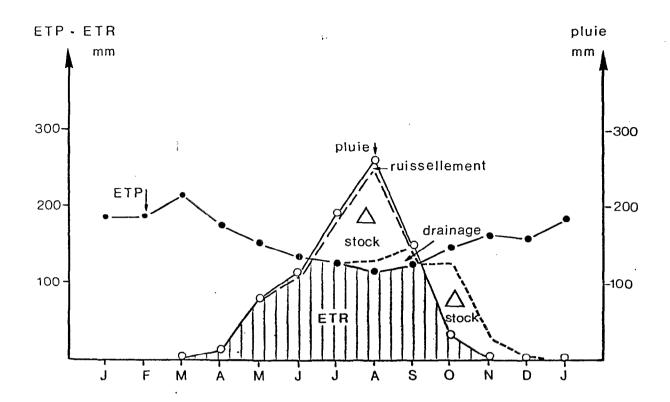
Savane soudanienne

Pluie = ruiss. + drain. + ETR ± Stock



| | J | F | М | A | М | J | J | A | S | 0 | N | D | TO1 | TAL % |
|------------|--------|-----|---------|-----|-----|---------|----------|------------|------------|------------|-----------|----------|-------------------|----------|
| Pluie mm | 6 | 15 | 52 | 90 | 123 | 154 | 193 | 318 | 237 | 118 | 34 | 13 | 1 353 | 100 |
| E.T.P. | 171 | 155 | 149 | 142 | 149 | 132 | 116 | 110 | 115 | 140 | 139 | 142 | 1 660 | 123 |
| Ruiss. | 0 | 0 | 0 | 2 | 4 | 4 | 7 | 11 | 9 | 4 | 0 | 0 | 41 | 3 |
| ETR brut | 6 " | 15 | 52 " | 88 | 119 | 132 | 116 " | 110 | 115 | 114 140 | 34 139 | 13 32 | 914 1 064 | 67,8 |
| Drain brut | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 0 | 70 0 | 197 135 | 113 113 | 0 0 | 0 | 0 | 398 248 | 27,2 |

stock = 150 mm sous savane



| 1 | J | F | - | Α. | | | | | , s | | | | Tot | |
|--------------------------------|-----|-----|-----|------|------|---------------|-------|------|-------------------|------|-----|-----|---------------------|------|
| | ! 0 | ! 0 | ! 1 | ! 19 | ! 81 | !116 | ! 191 | !264 | !151 | ! 37 | . 0 | ! 0 | 860 mm | %! |
| | | | | | | | | | | | = | . • | 1905 mm | • |
| !Ruiss. | ! 0 | ! 0 | ! 0 | 0 | .2 | : ! 3 ! | ! 5 | ! 7 | ! 4 | 0 | 0 | 0 | 21 mm | 2,5! |
| ETR brut corrigé | | | | | | | | | | | | | 620 mm 814 mm | |
| ! !Drain brut ! corrigé! | | - | ! 0 | 0 | | | | | ! ! 21 ! 21 | | 0 | • | ! 219 mm! 25 mm! | - ,- |
| ! | ! | ! | ! ! | | ! | ! | ! | ! | ! | !! | ! | !! | !! | ! |

Fig. 6.6.d - Schéma de bilan hydrique moyen pour la région de Ouagadougou. Savane soudano-sahélienne.

la lecture de ces tableaux, il ressort deux choses :

- 1 Le drainage augmente d'une station à l'autre plus que proportionellement aux précipitations.
 Ainsi, à Korhogo, le drainage moyen s'élève à 248mm (18.3%) pour des précipitations annuelles moyennes de 1353mm; à Abidjan, le drainage moyen atteint 879mm (41.3%) pour des précipitations annuelles moyennes de 2131mm, mais il peut atteindre 1796mm (64.7%) en année humide de fréquence décennale (P = 2776mm).
- 2 Le drainage diminue lorsque la saison des pluies s'étale sur une plus longue période.
 En effet, la comparaison du drainage en année humide à Saria (drain.

= 404mm pour P = 1076mm en 5 mois) au drainage en année sèche à Divo (drain. = 45mm pour P = 1087 mm en 11 mois) montre à l'évidence l'importance de la répartition des pluies sur le bilan : plus les pluies sont étalées dans le temps et plus l'ETR est élevée.

En un même site, toutes les précipitations qui tombent audelà d'un certain seuil (inférieur à l'ETP) se transforment nécessairement en ruissellement ou en drainage; on observe, en effet, que les pluies excédentaires par rapport à la normale ont lieu en majorité au coeur de la saison des pluies (où le sol est déjà gorgé d'eau et où les précipitations sont supérieures à l'ETP) plutôt qu'au début ou en fin de saison humide (tableau 6.12).

Tableau 6.12: Evolution des termes du bilan d'une année sèche à une année humide de fréquence 1/10ans dans le milieu naturel.

| | Var. | Var. | Var. | Var. |
|---------|---------------|-------------|---------------|---|
| | Précipitation | Drainage | Ruissellement | ETR |
| Saria | 459mm | 384mm/ 84% | 61mm / 13% | 14mm / 3% 341mm / 47% 241mm / 31% -176mm / -15% |
| Korhogo | 719mm | 312mm/ 44% | 66mm / 9% | |
| Divo | 792mm | 525mm/ 66% | 23mm / 3% | |
| Abidjan | 1140mm | 1303mm/114% | 12mm / 1% | |

Tableau 6.10 : Bilan hydrique calculé en année moyenne, humide et sèche de fréquence décennale sous végétation naturelle.

| 1 | PLUIE (um) | ETP | RUISS. | ETR corrigé mm % | DRAIN. corrigé mm % |
|--|--------------------|---|------------------------------------|--|--|
| ADIOPODOUME säche 1972 Moyenne Humide 1962 A Stock = 200mm | 2131 | 1285 79 1249 59 1107 40 | 16.4 1 22 1 28 | 1128 68.9 1230 57.7 952 34.3 | 491.6 30.1 879 41.3 1796 64.7 |
| Azaguie Seche 7 1972 7 Moyenue 7 Humide 7 1968 7 Astock=200mm | 1767 | 1196 81 1314 74 1375 67 | 19 1.3 35 2 108 5.3 | 1175 80 1305 74 1370 | 274 19 427 24 574 28 |
| Année Sèche 7 1973 7 Moyenne 7 Humide 7 1968 7 AStock=150mm | 1453 | 1353 124 1276 88 1265 67 | 5.4 0.5 14.5 1 28 | 1036.6 95.4 1204 82.9 1281 68.2 | 45 4.1 234.5 16.1 570 30.3 |
| Sèche 7 1973 7 Année Moyenne 7 Humide 7 1970 Astock=120mm | 1202 | 1371 150 1291 107 1285 85 | 1 0.1 4 0.3 7.5 0.5 | 782 85.6 1028 85.6 1002 66.4 | 131 14.3 170 14.1 499.5 33.1 |
| KORHOGO Sêche 7 194mod.) 7 Année Moyenne (1911) Humide 1969 7 A Stock = 150mm | 1353 | 1711 174 1660 123 1643 95 | 20 2 40.6 3 86.2 5 | 828 82.5 1064 78.7 1169 67.8 | 156 15.5 248 18.3 468 27.2 |
| SÀRIA sèche mm 1971 7 nnnée Moyénne mm 7 Humide mm 1958 7 AStock = 60mm | 617 826 1076 | 2096 340 1905 231 1713 159 | 25 4 41 5 86 8 | 572 93 649 78 . 586 | 20 3 136 17 404 38 |

Ce tableau indique que si un aménagement du milieu entraînait la réduction du ruissellement, la lame d'eau ainsi récupérée serait perdue par drainage sans augmenter beaucoup l'ETR et la production végétale (sauf peut-être dans la zone la plus sèche où l'ETP reste élevée toute l'année : exemple : Korhogo). Il montre aussi qu'en zone équatoriale, toute précipitation supplémentaire diminue l'apport énergétique (lumière) et donc l'ETR (voir Abidjan).

En un même site et pour une même hauteur de précipitation annuelle, on peut observer de fortes variations du drainage en fonction de la répartition des séquences pluvieuses à l'intérieur de la saison humide mais aussi du type de sol et de la végétation.

Influence du type de sol

Plus un sol est sableux, chargé en éléments grossiers fixant mal l'eau et peu épais, plus le drainage est élevé, car la capacité du stockage d'eau est vite atteinte et l'excédent percole jusqu'à la nappe. De plus, les sols sableux ont tendance à former en saison sèche un mulch pulvérulent très sec qui empêche l'ascension capillaire. Les sols argileux, par contre, se dessèchent sur toute leur épaisseur (= effet mèche). (BOURGES, PONTANIER et al., 1979).

L'exemple du tableau 6.13 montre l'importance de la réserve hydrique du sol sur les composants du bilan. Il s'agit de trois sols ferrugineux tropicaux appauvris en particules fines en surface, de la région centre de Haute-Volta. La cuirasse est presque affleurante dans la parcelle "Protection" à Saria, peu profonde dans la parcelle "P7" à Saria et enfouie sous un sol profond et argileux à Gonse. Ruissellement et ETP sont du même ordre, mais les variations de la réserve hydrique augmentent nettement depuis le sol gravillonnaire et cuirassé jusqu'au sol profond : le drainage diminue et l'ETR augmente très sensiblement à mesure que la réserve hydrique augmente

Tableau 6.11 : Bilan hydrique calculé en année de précipitation moyenne, humide et sèche sèche, de fréquence décennale sous cultures

| | PLUIE + Irrig. | ETP | RUISS. | ETR corrigé mm % | DRAIN. corrigé mm % |
|---|--|---|---|---|---|
| ADTOPODOUME seche 1972 Année 1972 moyenne Humide 1962 Astock/mais=50mm | 1636 2131 2776 | 1285 . (79) 1249 (59) 1107 (40) | 360 (22) 532 (25) 750 (27) | 863 (52.8) 966 (45.3) 779 (28.1) | 413 25.2 633 29.7 1247 44.9 |
| AZAGUIE Seche 7 1972 7 Année Moyenne 7 Humide 7 1968 7 A stock/bananeraie 40mm | 1468 +199 [*] 1767 +210 [*] 2052 +89 [*] | 1196 (81) 1314 (74) 1375 (67) | 96 (5.7) 138 (7) 114 (5.3) | 1130 (68) 131.6 (66) 1275 (60) | 441 (27) 523 (27) 752 (35) |
| DIVO Sachemm 1973 Z Année Moyenne Z Moyenne Z Humide Z 1968 Δ Stock/cacao ≈100mm | 1087 1453 1879 | 1353 (124) 1276 (88) 1265 (67) | 3 (0.3) 7 (0.5) 18 (1) | 989 (91) 1156 (79.5) 1183 (65) | 95 (8.7) 290 (20) 628 (34) |
| Sèche (mn 1973 Z Année Moyenne (mn 7 Humide (mn 1970 Z A Stock/mais=50mm | 914 1202 1509 | 1371 (150) 1291 (107) 1285 (85) | 137 (15) 240 (20) 377 (25) | 657 (71.9) 903 (75.1) 859 (57) | 120 (13.1) 59 (4.9) 272 (18) |
| Seche mm 1974 7 1974 7 Mod. mm Année Moyenne 7 Humide mm 1969 7 Astock/mais=50mm | 1004 1353 1723 | 1751 (174) 1660 (123) 1643 (95) | 271 | /02 (70) 876 (64.8) 979 (56.8) | (15) 206 (15.2) 313 (18.2) |
| SARIA Seche | 617 826 1076 | 2096 (340) 1905 (231) 1713 (159) | 206 (25) 323 | 494 (80) 594 (72) 562 (52) | 0 (0) 21 (2.5) 191 (18) |

Note * : Pluie + <u>Irrigation</u> (=chiffre *) à Azaguié seulement.

(): Valeur relative en Z des pluies

Tableau 6.13: Evolution du drainage et de l'ETR en fonction de la réserve hydrique et de la profondeur du sol utilisée par les végétaux.

| PLUIE Moyen. | ETP Moyen. | RUISS. | ETR corrigé | DRAIN. corrigé | VAR. STOCK |
|-----------------|----------------------|-----------------------------------|---|---|---|
| 826 | 1905 | 3 % | 77 % | 20 % | 40mm |
| 826 | 1905 | 5 % | 78 % | 17 % | 60mm |
| 860 | 1905 | 2.5 % | 94.5% | 3 % | 194mm |
| | Moyen. 826 826 | Moyen. Moyen. 826 1905 826 1905 | Moyen. Moyen. 826 1905 3 % 826 1905 5 % | Moyen. Moyen. corrigé 826 1905 3 % 77 % 826 1905 5 % 78 % 860 1905 2.5 % 94.5% | Moyen. corrigé corrigé 826 1905 3 % 77 % 20 % 826 1905 5 % 78 % 17 % 860 1905 2.5 % 94.5% 3 % |

Influence de la végétation

L'influence de la végétation sur le drainage est considérable : d'abord parce que le couvert végétal modifie le ruissellement, ensuite parce que ses besoins en eau sont variables et enfin parce que ses racines exploitent les réserves hydriques de couches de sol d'épaisseurs différentes selon les types de végétation. En général, si les propriétés du sol le permettent, les grands arbres exploitent la réserve hydrique du sol sur une épaisseur plus importante que la savane arbustive ou herbeuse (de même que la plupart des cultures). Mais il existe toute une gamme d'adaptation des plantes aux différents climats. Ainsi le genre Eucalyptus possède des espèces adaptées au régime climatique subdésertique, d'autres au régime tropical et d'autres au milieu équatorial. En Tunisie, les plantations d'Eucalyptus exploitent toute la réserve hydrique disponible et suppriment toutes possibilités d'écoulement dans les rivières. Par contre, le maquis plus ou moins dégradé limite le ruissellement et consomme moins d'eau pour son ETR; il permet à la nappe profonde de se recharger et d'alimenter régulièrement le réseau hydrographique. (DELHUMEAU, 1979).

Dans notre séquence bioclimatique, deux cas peuvent se présenter.

Ou bien la culture n'entraîne pas une augmentation considérable du ruissellement et le drainage augmente dans la mesure ou l'enracinement prélève
moins d'eau que celui de la forêt (ex. hévéa, cacao, bananier, palmier,
etc..)., ou bien le ruissellement augmente considérablement car le sol
est mal couvert pendant une bonne période de l'année (cas du mais, du
sorgho, de l'arachide et du coton) : le drainage diminue en même temps
que l'ETR.

4 – CONFRONTATION AVEC D'AUTRES APPROCHES ET DISCUSSION SUR LA VALIDITÉ DE LA MÉTHODE

En dehors de la mesure lysimétrique et des calculs de bilan hydrique, d'autres approches peuvent donner des indications utiles pour préciser les flux d'eau qui circulent à la surface du sol (ruissellement) et dans le sol (drainage). Nous rapporterons dans ce paragraphe les résultats de mesures de la hauteur de la nappe phréatique à Saria et Korhogo, des bilans hydrologiques évalués sur de petits bassins versants dans les régions où sont situées nos parcelles, et enfin, les conclusions d'études de profils hydriques. A la suite de quoi, nous concluerons sur la validité de la méthode utilisée.

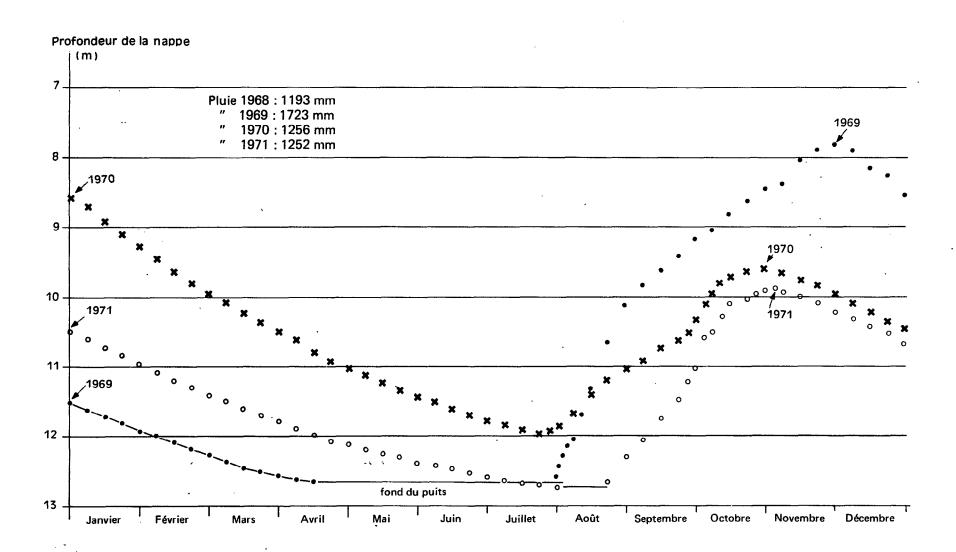
4.1 Précisions apportées par l'étude des nappes

L'observation du niveau de la nappe phréatique dans un point situé à proximité immédiate de la parcelle a été réalisée d'une part à Saria (1971-1974) et d'autre part à Korhogo par le BRGM puis par l'ORSTOM (1962-1971). Ces observations peuvent donner des indications précieuses sur l'époque de l'année où le front d'eau percole à travers le profil pédologique et sur l'abondance du drainage (voir tableau 6.14).

^{*} Note : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

Fig. 6.7 NIVEAU DE LA NAPPE PHREATIQUE AU PUITS n° 10

DU BASSIN DE KORHOGO



EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE AU PUITS n°1. SARIA : PARCELLE 7 CAMPAGNES 1972 - 73 - 74

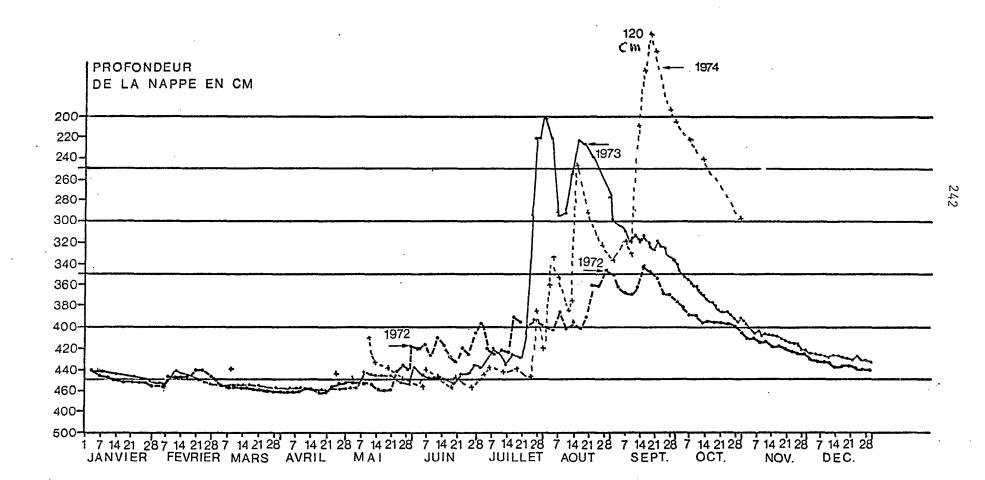


Tableau 6.14 : Variations du niveau de la nappe à Korhogo et Saria

| | KORHOGO ** 1962-1971 | SARIA 1971-1974 |
|--|----------------------------|--------------------------------|
| Niveau le plus bas - Hauteur - date | 9 à 13 m. 25.7 au 20.8 | 4.4 - 4.6 m 10.1 au 5.7 |
| Niveau le plus haut - hauteur - date | 6 à 11 m. 5.10 au 26.11 | (1.20) 2 à 3 m. 1.8 au 21.9 |

^{*} d'après les observations du BRGM et de l'ORSTOM (archives).

A Saria, la percolation atteint le bas des lysimètres en juin et s'arrête fin septembre. Le niveau de la nappe (figure 6.7) oscille quelque peu en juin, mais ne monte régulièrement qu'en fin juillet et pour redescendre définitivement fin septembre : les variations du niveau de la nappe semblent donc liées étroitement au drainage du sol situé au-dessus du point de mesure. D'après les propriétés hydrodynamiques du sol mesurées sur le terrain, la remontée de la nappe sur 250 centimètres représente 100 à 150 millimètres d'eau (porosité totale Hv à capacité au champ = 4 à 6%). Une fois la réserve hydrique du sol rétablie au-dessus de la cuirasse (réserve = 60mm), une faible lame d'eau infiltrée entraîne une forte remontée de la nappe. Lors des grands épisodes pluvieux, on a constaté qu'il fallait quelquefois faire appel à des apports obliques d'eau piégée en amont de la parcelle (sur les sols gravillonnaires dès la surface) pour justifier les fortes variations de la hauteur de la nappe, mais le drainage oblique reste modeste (O à 20mm). On notera à la figure 6.7 le tracé en dents de scie qui indique les variations très rapides du niveau de la nappe : le retard entre la montée de la nappe et la fin de l'averse varie de 10 à 30 heures en fonction de l'état de sécheresse du sol. La décrue de la nappe semble très rapide dans sa première phase, puis le niveau de la nappe se stabilise autour de -460 centimètres. A cause de cette décrue

rapide et des échanges obliques, il n'est pas possible d'estimer avec précision la lame drainée à partir des différences maximales de niveau de nappe (= lame de 40 à 180 millimètres) mais le drainage observé aux lysimètres (0 à 166mm) et le drainage calculé (0 à 116mm) sont du même ordre de grandeur.

A Korhogo, le drainage au bas des lysimètres commence irrégulièrement en mai-juin, mais au plus tard en juillet et se termine en octobre. Par contre, le niveau de la nappe au puits n° 10 (voir figure 6.8) est au plus bas fin juillet (-9 à -13 mètres) et commence à remonter début août. A ce niveau du versant, la montée se fait de façon massive sans qu'on puisse distinguer l'influence des pluies individuelles: la nappe est située très bas et l'onde de pénétration du front d'eau s'écrase de plus en plus en profondeur. (DEGALLIER, 1975; KUCHARKA et MARGAT, 1964). La nappe atteint son apogée (-6 à -11 mètres) entre le 5 octobre et le 26 novembre. Selon les années, les fluctuations de la nappe varient de 1.5 à 5.7 mètres autour d'une moyenne de 3.5 mètres qui correspond à une lame d'eau percolée de l'ordre de 210 millimètres, si on adopte une porosité utile de 6%, valeur couramment observée dans ce genre d'argile bariolée (LELONG et LEMOINE, 1968). Cette valeur (par défaut) qui néglige les écoulements de la nappe durant la montée de la nappe, est sensiblement inférieure au drainage observé dans les lysimètres (274mm) ou calculé (248mm) au niveau de l'argile bariolée (2 mètres) où les variations de l'humidité du sol (mesurées à l'humidimètre à neutrons) sont peu différentes des erreurs de mesure; y aurait peut-être une certaine consommation d'eau dans les tranches profondes du sol (LELONG, 1966).

En conclusion, ces études sur les variations du niveau de la nappe phréatique de Korhogo et de Saria ont montré :

- qu'il y a une bonne concordance (malgré un retard d'autant plus élevé que la nappe est éloignée de la surface du sol) entre le moment où le niveau de la nappe monte et celui où les eaux de percolation traversent les lysimètres les plus profonds,
- qu'il y a une bonne concordance entre le volume du drainage vertical mesuré aux lysimètres profonds (de plus de 150cm) sous végétation herbacée et la lame d'eau représentant les variations saisonnières du niveau

de la nappe (à 50mm près),

- et que donc pratiquement toutes les eaux (à 50 ou 100 millimètres près) qui percolent à travers les lysimètres les plus profonds (180cm) atteignent la nappe au niveau de la parcelle de mesure; les phénomènes de drainage oblique existent mais ne représentent pas une part majeure au niveau du bilan annuel aux lieux de mesure (près des cases ERLO de Saria et Korhogo au tiers haut de la pente).

4.2 Les bilans hydrologiques sur de petits bassins versants

Les bassins versants intègrent généralement des situations hétérogènes (différences de sol, végétation, topographie) et leurs résultats ne sont donc pas directement analogues à ceux des parcelles homogènes. Cependant, il est intéressant de rapprocher les éléments des bilans hydriques sur parcelles et sur de petits bassins versants (quelques hectares à quelques dizaines de kilomètres carrés) typiques des régions où eurent lieu les observations (tableau 6.15) Les données disponibles les plus comparables ont été résumées au tableau 6.16).

Tableau 6.16: Comparaisons des bilans hydriques sur parcelles et petits ----- bassins versants

| REGION et | BASSIN | IS VERSANTS | PARCELLES | | | |
|--|-----------|-------------|-----------|----------|---------|----------|
| COUVERT VEGETAL | Pluie(mm) | K.E (%) | D.E.(mm) | Drain(%) | KRAM(%) | ETR (mm) |
| AZAGUIE Forêt semper- virente | 1800 | 27 à 32 | 1200-1300 | 24 | 2 | 1305 |
| DIVO Forêt semi- décidue | 1350 | 2 a 9 | 820-1320 | 4-16 | 0.5 | 1204 |
| BOUAKE Savane dense- | 1200 | 2 à 15 | 870-1275 | 14 | 0.3 | 1028 |
| KORHOGO Savane dégra- dée par cult. | 1350 | 20 à 30 | 700-1400 | 18 | 3 ` | 1064 |
| OUAGADOUGOU Savane dégradée par cultures | 800 | 1 à 12 | 560- 850 | 3-17 | 2-5 | 650-810 |

K.E = coefficient d'écoulement = Ruiss + Ecoulement de base / précipitation

D.E = déficit d'écoulement = précipitation - écoulement

| | | | | 1 | | | | |
|--|---|---|--|--|-------------------------------------|--|--|---------------------------------------|
| BASSINS VERSANTS | Caract. bassin Surface / roche | Végétation | Climat Pluie / ETP | Coefficient KR MAX % | Coef. Ruis. KRAM % | Coefficient Ecoul. KEZ | Déficit Ecou- lement D.E(mm) | SOURCE |
| Région AZAGUIE . BAFO . SITOU . MANSO | 26.8km ² /schiste 28.8km ² /schiste 92.5km ² /schiste | Forêt dense 90% forêt claire + café forêt dense 70% | Equat. transition P ≃ 1800mm ETP≃ 1250mm | 40 à 60% | - - - | 27 a 32 | 1200-1300 | GIRARD SIRCOULON et al., (1971) |
| Région DIVO . AMITIORO total . " Marigot . " ravineau | 170km²/schiste 2 km²/schiste 0.02 "/schiste | Forêt dense méso. """ | Equat. transition P = 1325mm - 300 Evaporation bac Colcrado = 1170mm | 15 à 36% 40 à 48% | 7 | 2 à 9 (5.3) 3 à 6 5 à 8 | 940-1620 1110 820 - 1320 | MATHIEU (1969) et (1972) |
| Région BOUAKE | 26.2km ² /granite 0.55km ² /granite 0.63km ² /granite | Sav. à ronier 75% Forêt claire 15% Sav. ronier 94% Sav. ronier 57% Forêt claire 27% | Equat. transition P = 1097 & 1270 ETP = 1200 " | 237 357 127 | 1.6 à 3.8 2.5 à 8.8 0.8 à 2.7 | 7 à 11 10 à 21 2.2 à 7.2 | 996 à 1174 996 à 1054 1042 à 1245 | LAFFORGUE (1979) |
| Région BOUAKE . KAN à BOUAKE | 24.5km ² /granite | Sav.arbust.65% gal. forestière 20% | Equat. transition P = 1202 - 300 ETP = 1200mm | 6 a 10% | - | 5 à 15 (11) | 870 à 1275 (1068) | DUBREUIL (1960) |
| Région KORHOGO FLAKOHO - central - Worossantiakaha | 31.5km²/granite 14km² /granite +plateaux cuir. | Savane arbustive. dégradée | Trop. transition "P=!300 ETP = 1800mm | 15a17%((30%)) 3 a 6%((10%)) | <u>.</u> | 5 à 23 7 à 20 | 880 à 1412 | DUBREUIL (1960) |
| Région de KORHOGO LOSERIGUE a DOKA | 3.63km ² /granite | Sav. arbustive dégradée. Cult.20 à 50% | Tropical. Trans. P = 1351 = 350 ETP = 1640 | 25 à ((40%)) | 1:5 à 10 | 30 à 54 | 700 à 1000 | CAMUS et al., (1976) |
| Région OUAGADOUGOU ZACTOULI SELOCEN KAMBOENSE OUAGA 1 NABAGALE LOUMBILA | 11km ² /granite 75km ² /granite 125km ² /granite 285km ² /granite 470km ² /granite 2120km ² /granite | Sav. arborée dégradée + cultures " | Tropical pur P = 850 ETP \simeq 1900 | 50 ((60)) 20 ((30)) 15 ((20)) 20 ((30)) 15 ((20)) 20 ((35)) | | 2 à 14(7.8) 5 à 20(12) 0.6à 5(3.1) 2 à 12(7.1) 3 à 10(6.9) 0.4à6.2(3.1) | 560 à 770 720 à 800 740 à 870 670 à 770 640 à 960 700 à 780 | PIEYNS KLEIN (1964) |
| Région OUAGADOUGOU . TIKARE II . ANSOUR | 2,68km ² /schiste 0.76km ² /quartzi- -le | Sav. arborée + cultures | Trop. sahélien P=725-825mm ETP =2300 | 12 ((18%)) 18 ((25)) | 1 a 5 | 0.8 à 4.9 2.8à6.5 | 639 à 773 639 à 758 | OBERLIN et al.,(1966) |

() = moyenne (()) = valeur décennale.

On constate au tableau 6.16 une bonne concordance entre les bilans hydriques, qu'ils soient observés sur petits bassins versants ou sur parcelles sur l'ensemble de la séquence bioclimatique.

4.3 Bilans déduits des profils hydriques mesurés à l'humi-

dimètre à neutrons

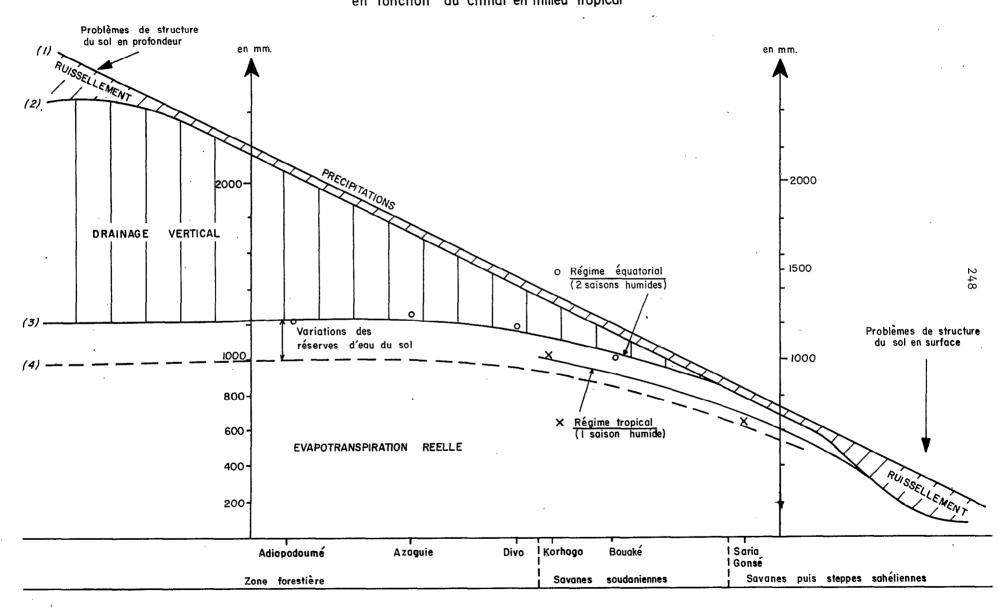
HUTTEL (1975) a trouvé des résultats très voisins des nôtres dans deux forêts de basse Côte d'Ivoire à l'aide de l'humidimètre à neutrons. Dans la forêt du Banco située à une douzaine de kilomètres d'Adiopodoumé sur sables tertiaires, il observe un drainage de 36% pour des précipitations déficitaires de l'ordre de 1800mm (1969 à 1971). En année de précipitation normale, il estime le drainage à 40%. Les variations du stock d'humidité du sol sur 230 centimètres de profondeur s'élèvent à 199mm sur le plateau et 213mm dans le bas fond. Etant donné que l'humidité du sol en-dessous de 230cm est stable de novembre à juin et qu'elle augmente brutalement fin juin pour décroître ensuite progressivement, HUTTEL interprète ces variations d'humidité comme faisant suite à l'infiltration lente des eaux de percolation profonde. De même, en forêt du Yapo voisine d'Azaguié et sur sol ferrallitique issu de schiste, HUTTEL trouve un drainage de 27% des pluies en 1972 et 1973, années déficitaires; il estime que le drainage moyen ne devrait pas dépasser 550mm (31%). Ces résultats obtenus à la suite d'observations du profil hydrique à l'aide de la sonde à neutrons par HUTTEL au Banco et à Yapo ainsi que par nous-même et le Laboratoire des Radioisotopes à Adiopodoumé (BOIS et ROOSE, 1978) concordent bien surtout, si on se rappelle que par cette méthode on confond drainage et ruissellement plus toutes les erreurs de mesure.

4.4 Discussion sur la validité de la méthode des bilans

hydriques calculés

Le drainage moyen tel qu'il a été calculé est certainement estimé par défaut pour plusieurs raisons.

Fig : 6.9 EVOLUTION DU BILAN HYDRIQUE SOUS VEGETATION NATURELLE en fonction du climat en milieu tropical



- 1 Le pas de temps. La majeure partie du drainage s'effectue en 24 à 48 heures après une averse. Le calcul au pas de temps mensuel minimise le rôle des séquences pluvieuses et favorise l'ETR. En se basant sur des données moyennes, on écrase encore les variations des réserves hydriques et de l'ETR à l'échelle journalière.
- 2 L'ETR de chaque espèce végétale. La végétation, en particulier les cultures annuelles et la savane brûlée ou dégradée, ne peut répondre à tout moment à la demande climatique et aligner l'ETR sur l'ETP. Le drainage réel observé au lysimètre commence donc plus tôt que le drainage calculé et corrigé.
- 3 Le stock du sol. Les variations maximales du stock d'eau du sol ne sont pas constantes d'une année à l'autre. L'observation du niveau de la nappe à Korhogo a démontré que l'abondance des pluies d'une année influence le niveau minimum atteint par cette nappe et la répartition du bilan de l'année suivante. Ce phénomène ne vaut plus en zone sahélienne (la nappe de Saria revient chaque année au point minimum pendant plusieurs mois : ROOSE, 1979).

Cependant, la comparaison des résultats obtenus par cette méthode et des diverses observations disponibles montre que l'erreur ne dépasse guère 10%. Le sens général des résultats n'est donc pas modifié.

5 - CONCLUSIONS SUR LES BILANS HYDRIQUES

D'après les observations effectuées sur le terrain à diverses échelles, il semble que le drainage moyen calculé à partir des données mensuelles moyennes soit estimé par défaut (l'ETR est surestimé), mais le sens général des résultats demeure. Le drainage vertical est un phénomène majeur en zone forestière équatoriale (30 à plus de 40% du bilan hydrique) et dans les savanes soudaniennes (20 à 35% du bilan). Il diminue vers le nord de la séquence bioclimatique à mesure que les précipitations sont moins abondantes, que le pouvoir évaporant de l'air augmente et que la perméabilité des sols diminue : il s'annule dans la zone sahélienne où les précipitations annuelles sont inférieures à 600 millimètres (Fig. 6.9.).

En une même région climatique, le drainage peut varier considérablement en fonction du couvert végétal, du type de sol et de l'arrangement des séquences pluvieuses. Le couvert végétal, s'il est abondant, (qu'il s'agisse d'une savane dense, d'une forêt ou d'une culture pérenne) limite le ruissellement en protégeant la surface du sol de la battance des pluies, évapotranspire des quantités importantes d'eau et ses racines explorent les réserves hydriques des couches plus ou moins épaisses du sol. Les cultures sarclées laissent le sol mal couvert pendant une partie de l'année : d'où la diminution de l'ETR, la dégradation des propriétés hydrodynamiques du sol en surface (pellicule de battance) et en profondeur (compaction des horizons non travaillés), la réduction de l'épaisseur de sol explorée par les racines et l'augmentation du ruissellement. Le sol influence le ruissellement par la stabilité de la structure des horizons superficiels et éventuellement par la présence de niveaux pauvres en macropores. Par sa texture plus ou moins grossière et la profondeur exploitable par les racines, il limite les variations saisonnières du stock d'eau du sol et l'évapotranspiration réelle. Enfin, plus les pluies sont concentrées à l'échelle des séquences pluvieuses ou de la saison, plus la fraction écoulée (ruissellement + drainage) est importante : c'est ainsi que le drainage est nettement plus abondant à Korhogo (région tropicale à une saison humide) qu'à Bouaké (région subéquatoriale à deux saisons des pluies).

Les observations effectuées sur des parcelles "moyennes et représentatives d'un type de sol très répandu dans chaque région", ont montré que le drainage oblique existe et se manifeste lors des séquences particulièrement pluvieuses; cependant, il est négligeable au niveau du bilan hydrique annuel moyen et peut être confondu avec le drainage vertical. Par contre, le ruissellement varie considérablement avec la densité du couvert végétal (action des feux de brousse, du pâturage et surtout des cultures) : on ne peut éviter de le mesurer si l'on veut calculer correctement le bilan hydrique. Dans les limites de la séquence bioclimatique étudiée, il semble que le ruissellement dépende plus du type de matériau géologique qui a donné naissance au sol (le ruissellement sur schiste > sur granite sur sédiments tertiaires) que du genre de végétation naturelle (forêt ou savane non dégradée). Mais, en zone sahélienne, le ruissellement est nettement plus élevé suite à la

dégradation naturelle de la végétation et à l'instabilité de la structure des horizons superficiels (steppes avec plages dénudées). De même, en zone équatoriale très humide où les précipitations moyennes dépassent 300 millimètres par an, la dynamique de l'eau devient de plus en plus superficielle à mesure que la structure des horizons profonds se détériore (ex. Guyane française : BOULET, BRUGIERE et HUMBEL, 1979). C'est ce qui a été schématisé à la figure 6.9.

CHAPITRE VII: LA COMPOSITION DES CHARGES SOLUBLES ET SOLIDES DES EAUX DE SURFACE

L'un des buts de cette étude est de préciser la dynamique actuelle de quelques sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux disposés le long d'une séquence bioclimatique et soumis à la culture ou à des conditions voisines de la végétation naturelle. Après avoir souligné l'importance des phénomènes d'érosion à la surface du sol (2ème partie) et quantifié les éléments du bilan hydrique pour chaque station, il reste à définir les flux de matières qui entrent et sortent du compartiment le plus actif du profil pédologique, que nous avons considéré comme une "boîte noire", à comparer ces flux externes aux stocks de matières et aux flux internes au système "sol-plante". Mais, avant d'aborder la question des flux, il est nécessaire de préciser auparavant la nature et la composition chimique des charges solubles et solides des eaux concernées par ce bilan de matières.

1 — COMPOSITION CHIMIQUE DES DIFFÉRENTS TYPES D'EAUX SUPERFICIELLES

De 1966 à 1975, plus de 6000 échantillons d'eau de pluie, de ruissellement, de drainage et de sources ont été analysés au Laboratoire Central de l'ORSTOM à Adiopodoumé. Grâce à la diligence du Bureau de Données Pédologiques de l'ORSTOM à Bondy, les résultats d'analyses (18 variables) de plus de 4500 échantillons ont été consignés sur fiches perforées et analysés statistiquement. En annexe3(Tableaux A7 : 1 à 12) sont présentés pour chaque station et chaque type d'eau, les moyennes des teneurs (t) pondérées par les volumes (v) $(\text{mpv} = \frac{S(v \cdot t)}{Sv})^*$, les valeurs fréquentes (environ 80% de la population totale) et/ou les limites extrêmes des variations observées; pour Adiopodoumé, on a joint

^{*} Note: S = Somme, v = volume, t = teneur, N = nombre d'échantillons.

à titre d'exemple, les moyennes arithmétiques (ma = $\frac{St}{N}$) et les déviations standards. Les méthodes d'analyse ont été décrites par NALOVIC (1968), puis par GOUZY (1973).

Les délais d'analyse sont assez variables (0.5 à 3 mois) mais, d'après nos essais, ceci n'entraîne pas d'évolution notable des caractéristiques chimiques des eaux (à part les formes de l'azote, HCO3 et les gaz dissous non dosés) à condition de respecter certaines règles : il faut en particulier transporter les échantillons dans des flacons en plastique complètement remplis et bien bouchés et les conserver à l'abri de la lumière et des fortes chaleurs.

Devant une telle masse de résultats, et étant donnée l'ampleur des variations observées en fonction du type d'eau, mais aussi des saisons et des années, le problème se pose de définir une valeur moyenée caractéristique et une fourchette de variation pour chaque cas. Faut-il choisir la moyenne arithmétique (ma), la médiane (md) ou la moyenne pondérée par le volume écoulé (mpv) ?. Et pour l'estimation de la variation vaut-il mieux présenter la variation totale, les valeurs les plus fréquentes (environ 80% des observations), l'écart interquartile (50% des observations) ou la déviation standard ?

Dans le cadre d'une étude sur les flux de matières, la moyenne arithmétique tient également compte de toutes les observations (y compris des erreurs de lecture) et, en particulier, des teneurs très élevées observées lors des premiers écoulements à la saison des pluies (peu abondants mais très chargés).

L'usage de la <u>médiane</u> présente l'avantage de passer sous silence les observations qui s'écartent trop des valeurs les plus fréquentes. De ce fait, elle permet de négliger les valeurs aberrantes et les teneurs élevées des écoulements peu abondants; malheureusement, elle oblitère également les faibles teneurs observées lors des averses exceptionnellement abondantes, de fréquence faible, mais les plus importantes car elles président à de grands transports de matières.

Finalement, du fait de l'influence majeure du volume des écoulements sur les teneurs (effet dilution), notre choix s'est fixé sur <u>la teneur moyenne</u>

pondérée par le volume (mpv), qui convient le mieux pour l'étude des flux (en effet, ceux-ci tiennent compte à la fois des volumes et des teneurs des écoulements). La difficulté réside alors dans la définition d'un indice de variation autour de cette valeur caractéristique permettant de procéder à des comparaisons scientifiquement satisfaisantes entre les eaux de différentes origines. Les distributions n'étant pas gaussiennes mais dissymétriques, l'écart interquartile ne convient pas. En l'absence de solution idéale, nous avons retenu le domaine de variation total ou, pour écarter les valeurs aberrantes, les valeurs fréquentes.

Dans ce paragraphe, nous discuterons des caractéristiques moyennes des eaux , de leurs variations saisonnières et interannuelles en fonction des traitements (feu - fertilisation - défrichement et plantations diverses), de la station ou du niveau de captage des échantillons. Nous nous appuierons sur les résultats analytiques exposés:

- au tableau 7.1 pour montrer l'effet de dilution de la charge soluble lorsque les volumes augmentent,
- aux tableaux 7.2 à 7.5 pour comparer la composition des différents types d'eau d'une station à l'autre,
- et, enfin, aux tableaux A7-1 à A7-12 en annexe, qui donnent les résultats moyens et une estimation de leurs variations en chaque station.

1.1: Les variations interannuelles des teneurs moyennes

Les teneurs observées dans les eaux d'une même provenance et même leurs moyennes annuelles (mpv) peuvent varier substantiellement d'une année à l'autre. Généralement ces variations ne dépassent pas des rapports de 1 à 4. Cependant, pour Mg, K, C, N tot., N-NO₃, Fe₂O₃, Al₂O₃ et SO₄, le rapport des teneurs moyennes maximales aux teneurs minimales peut atteindre 7 à 30. Ces rapports sont d'autant plus forts que les valeurs absolues sont faibles. Les variations interannuelles des teneurs moyennes sont plus faibles pour les eaux de source que pour les eaux de ruissellement et de drainage superficiel.

Les teneurs moyennes annuelles n'évoluent pas toujours systématiquement au cours des années d'observation. On constate cependant pour les eaux de ruissellement, de drainage oblique et de source à Adiopodoumé et à Anguédédou, pour les eaux de drainage oblique et drainage vertical sous mais (pas sous savane) à Korhogo que les teneurs les plus élevées apparaissent dans l'ensemble les premières années d'observation (de 1966 à 1969) et les teneurs les plus faibles vers la fin des expérimentations (1971-1975).

Plusieurs explications peuvent être invoquées :

- a) Il faut envisager d'abord le <u>changement de méthodes analytiques</u> à l'occasion de l'automatisation progressive des manipulations de laboratoire qui a débuté en 1969. Cette explication, valable sans doute pour le fer, l'alumine et la silice (floculation partielle des pseudo-solutions par acidification du milieu avant colorimétrie), n'est pas satisfaisante pour l'ensemble des variables et en particulier pour la résistivité dont la méthode de mesure n'a pas été modifiée.
- b) Ces variations interannuelles sont partiellement imputables <u>au mode</u>
 <u>de prélèvement non systématique</u> et aux aléas climatiques qui entraînent
 des écoulements plus ou moins abondants à différentes périodes de
 l'année où les éléments chimiques ne sont pas en état de migrer de la
 même façon (voir plus loin : variations saisonnières).
- c) Dans certains cas, les variations de teneurs systématiques s'expliquent par les traitements imposés au milieu. C'est le cas à Anguédédou où la forêt a été défrichée et brûlée partiellement sur place libérant d'un coup une grande masse minérale contenue dans la litière, les feuillages et les branchages. De même à Korhogo, le sol étant défriché juste avant la plantation de mais, on comprend qu'il s'opère la première année des réajustements au niveau des matières organiques (minéralisation accélérée bien connue les années suivant le défrichement) : aucune variation systématique n'est apparue par contre dans les lysimètres laissés sous savane.

A Adiopodoumé, sous culture de mais, les teneurs observées dans les eaux de percolation sous lysimètres diminuent au cours des années sur les blocs où les apports d'engrais sont nuls ou insuffisants pour

compenser les pertes. En revanche les teneurs augmentent lorsque les apports dépassent les exportations (doses 2 et 4).

d) On peut, enfin, se demander si l'installation des cases lysimétriques et le creusement de fosses à l'aval des parcelles ERLO n'entraînent pas un déséquilibre temporaire entre les minéraux, l'eau, le sol et les végétaux qu'il porte?

C'est en effet lors de la ou des premières années d'observation qu'on constate des teneurs beaucoup plus fortes. Cette hypothèse n'est pas confirmée par les faits, car ce n'est que dans les cas où les échantillons ont été prélevés avant 1970 qu'on observe ces fortes valeurs; dans la forêt du Téké (cases ERLO et DV), dans les lysimètres de Korhogo et à Saria (cases ERLO et DV) à partir de 1971), les variations sont beaucoup moins fortes.

Quelles que soient les explications, les <u>variations des</u> <u>teneurs sont importantes</u>: par conséquent, il n'est pas possible d'évaluer des flux à partir de quelques prélèvements "représentatifs". Pour être valables, les observations tant des teneurs que des volumes doivent nécessairement porter <u>sur de nombreuses années et sur toutes les phases</u> <u>saisonnières</u>. BELOUSOVA (1979), spécialiste des études de pédogénèse à partir de données lysimétriques, estime qu'il faut disposer d'au moins dix années d'observation pour tirer des conclusions fiables. Il faudra donc être prudent, lorsqu'il s'agira de comparer des résultats provenant de divers auteurs ayant procédé de différentes façons pendant des périodes souvent trop brèves.

En ce qui nous concerne, nous avons écarté des tableaux, les valeurs discutables des premières années d'observation pour ne retenir que les moyennes des années où les teneurs sont stabilisées.

Tableau 7.! : Influence du volume des écoulements sur les teneurs en éléments solubles dans les eaux recueillies sous forêt à Adiopodoumé -mpv/ma <! si la teneur baisse lorsque les volumes augmentent (effet dilution)-

| | RESIS. | рН | Ca | Mg | K | Na | C.org | . N Tot | · N-NH4 | n-no3 | PO ₄ | 4 ^{SO} 4 | ·C1 | нсо3 | Fe ₂ 0 ₃ | A1 ₂ 0 ₃ | sio ₂ |
|--|------------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Pluie .ciel ouvert .sous forêt | 1.07 | 1 1 · | 0.9 | 0.67 0.81 | 0.6 | 0.83 0.84 | 0.72 0.77 | 0.93 0.83 | 1.2 0.82 | | 0.91 0.97 | 0.86 0.89 | 0.66 0.68 | | 0.67 0.86 | 1.33 1.22 | 1.40 1.08 |
| Ruissellement . sous forêt | 1.82 | 0.96 | 0.7 | 0.63 | 0.68 | 0.77 | 0.78 | 0.7 | 0,96 | 0.84 | 0.81 | 0.58 | 0.77 | 0.85 | 0.47 | 1.08 | 0.87 |
| Drain. Oblique . supérieur . inférieur | 1.28 1.82 | 0.98 0.97 | 0.58 0.53 | 0.57 0.44 | 0.38 0.57 | 0.7 0.8 | 0.66 0.78 | | 0.59 1 | | 0.48 0.81 | 0.96 0.63 | 0.75 0.80 | | 0.93 1.03 | | 1 0.91 |
| Drain. vertical Superf. ! 2 . Profond ! 2 | 1.08 1.00 0.97 0.86 | 0.97 0.97 0.98 0.97 | 0.76 0.9 1.03 | 0.76 0.86 1.03 1.18 | 0.79 0.83 1 0.76 | | 0.85 0.79 0.95 0.70 | 0.85 (1.16) 1.09 1.39 | 1.09 0.76 1.4 1.18 | 0.91 (1.25) (1.16) 1.45 | | 0.82 0.7 1.12 0.49 | 0.75 0.6 0.93 0.75 | | 1.01 0.6 1 0.67 | 0.92 1.22 1.01 2.21 | 1.06 0.97 1.03 |
| Nombre mpv/ma > 1 . Mpv/ma moyen | 7 | 0 0.98 | 2 0.82 | 2 0.77 | o 0.71 | o 0.76 | 0 0.78 | .3 0.89 | 4 | 4 0.98 | 3 0.94 | 1 0.78 | o 0.74 | 0 0.72 | 2 0.80 | 7 1.24 | 5 |

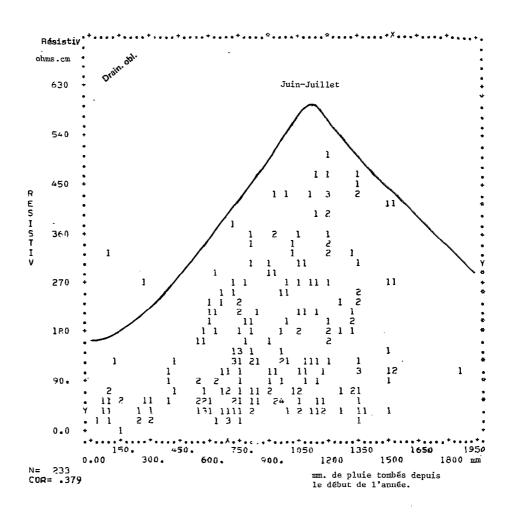
1.2 Evolution des teneurs en fonction des volumes écoulés

et des saisons

Le rapport "mpv/ma" des moyennes pondérées par le volume des écoulements (mpv) sur les moyennes arithmétiques (ma) a été calculé pour chaque élément et chaque type d'eau : le tableau 7.1 donne un exemple des résultats obtenus à Adiopodoumé. Lorsque mpv/ma est plus grand que 1, cela signifie qu'en général les teneurs augmentent en même temps que le volume écoulé : cet élément est abondant et sa solubilité (ou son entraînement sous forme colloidale) augmente en milieu engorgé (cas de la silice). Par contre, si mpv/ma est inférieur à 1, cela signifie que l'élément considéré est peu disponible et rapidement dilué dans la masse des eaux qui circulent.

Ainsi on constate au tableau 7.1 que la résistivité des eaux a tendance à augmenter (mpv/ma > 1) lorsque les écoulements sont forts et par conséquent la charge soluble ionisée diminue. Pour tous les éléments étudiés (sauf l'alumine, la silice et quelquefois le fer et N-NH,) les teneurs diminuent lorsque le volume écoulé augmente. Les éléments les plus sensibles à cet effet diluant des eaux qui circulent sont le potassium, le sodium, le magnésium, les nitrates, les sulfates, les chlorures et les matières organiques (C et surtout N). La silice, le fer et surtout l'alumine ont tendance à se concentrer dans les eaux circulant abondamment, ce qui pourrait signifier que ces éléments migreraient sous forme pseudo-soluble ou complexés à des colloides érodés ou 'lessivés. Il faut remarquer qu'au tableau 7.1, l'effet dilution exprimé par les moyennes de la dernière ligne est sousestimé, car dans les eaux de drainage captées au fond des lysimètres dépourvus de végétation, beaucoup de phénomènes de dilution disparaissent, en particulier au niveau des éléments nutritifs qui sont libérés par la litière, mais ne sont pas prélevés par les végétaux.

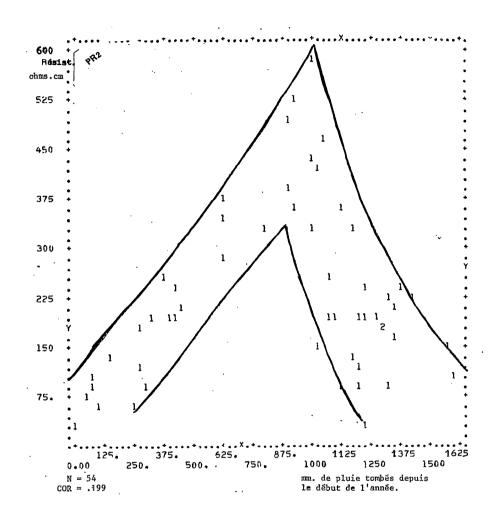
Les différences entre les moyennes (ma et mpv) s'écartent rarement de plus de 10 à 30%, mais si on considère les <u>premiers écoulements</u> de l'année, il n'est pas rare de trouver des teneurs de 10 à 50 fois plus



| \mathtt{MEAN} | ST.DEV. | REGRESSION LINE | RES.MS. |
|-----------------|---------|-------------------|---------|
| X 895.23 | 361.84 | X=1.1163 Y+716.46 | 112561 |
| Y 160.15 | 122.99 | Y=.12898 X+44.678 | 13005 |

FIG.7.1

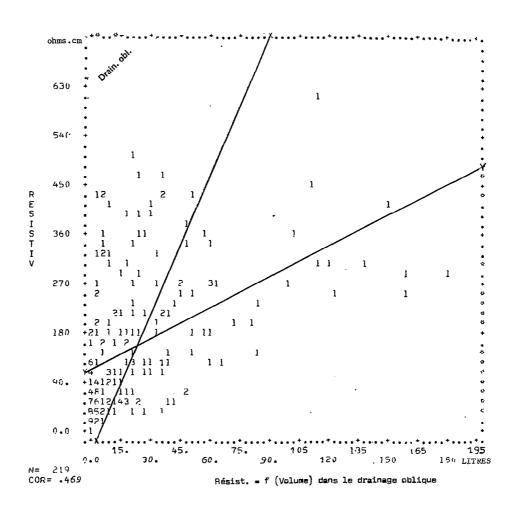
VARIATIONS SAISONNIERES DES RESISTIVITES DANS LES EAUX DE DRAINAGE
OBLIQUE D'ADIOPODOUME (R2)



| MEAN | ST.DEV. | REGRESSION LINE | RES.MS. |
|--------|---------|------------------|----------|
| 862.96 | 456.86 | X=.69661 Y+706.9 | 7 204325 |
| 223.92 | 130.37 | Y=.05673 X+174.9 | 7 16640 |

FIGURE 7.2 (p18 A1)

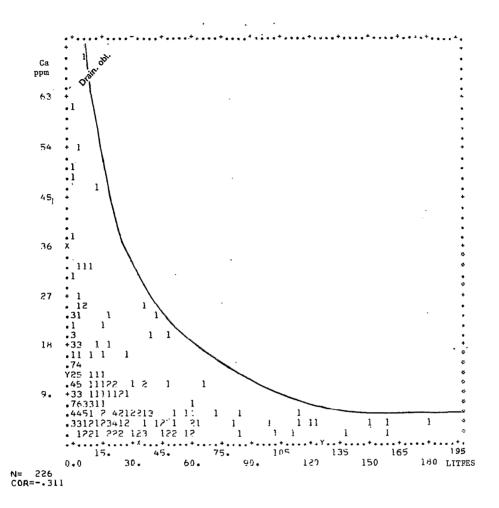
REPARTITION SAISONNIERE DE LA RESISTIVITE DANS LES EAUX DE PLUVIO-LESSIVAGE (PR2) SOUS FORET SEMPERVIRENTE : ADIOPODOUME



| MEAN | ST.DEV. | REGRESSION LINE | RES.MS. |
|----------|---------|--------------------|---------|
| X 23.377 | 32.600 | X=.12129 Y+ 3.8386 | 832.64 |
| Y 161.09 | 126.09 | Y=1.8147 X+ 118.66 | 12457 |

FIGURE 7.3

LORSQUE LE VOLUME AUGMENTE, LA RESISTIVITE A TENDANCE A AUGMENTER



| MEAN | ST.DEV. | | REGRESSION LINE | RES.MS. |
|----------|---------|---|-------------------|---------|
| X 22.782 | 32.266 | • | X=97082 Y+ 32.671 | 944.49 |
| Y 10.185 | 10.340 | | Y=09971 X+ 12.457 | 97.005 |

FIG.7.4

BAISSE DU CALCIUM SI LE VOLUME ECOULE AUGMENTE

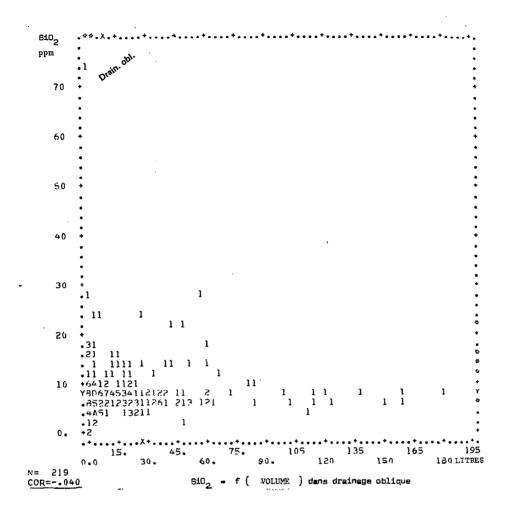
Ca = f(volume) dans eau drain.oblique d'Adiopodoumé

<u>élevées qu'en fin de saison des pluies</u>. Aux phénomènes de dilution se superposent donc des variations saisonnières beaucoup plus importantes qui ont été observées dans chaque station et qu'on pourrait schématiser comme suit :

- Les premiers écoulements sont peu abondants, superficiels mais très chargés; les eaux sont brunes (couleur thé) et les matières organiques et minérales accumulées en surface pendant la saison sèche sont disponibles en grande quantité, de telle sorte qu'on observe une explosion de l'activité microbiologique suite aux premières averses (DOMMERGUES, 1966).
- Ensuite, la flore puise dans cette réserve facilement assimilable, tandis que les eaux de ruissellement et de drainage délavent le sol. Il s'établit alors un nouvel équilibre entre les réserves peu disponibles du sol, le stock d'éléments facilement solubles, les plantes et les eaux circulant dans les pores du sol.
- En fin de saison des pluies, lorsque les écoulements diminuent en importance, la charge des eaux augmente de nouveau progressivement.

L'analyse mécanographique (note 1) de la charge soluble des eaux d'Adiopodoumé en fonction d'un indice saisonnier (défini comme la hauteur de pluie cumulée à partir du ler janvier) montre que cette charge soluble ionisée passe par un ou plusieurs minimum à une période de l'année ou les pluies cumulées atteignent 700 à 1500 millimètres, correspondant à Abidjan à la grande saison des pluies (voir figures 7.1 et 7.2). De même, l'analyse bivariate montre bien comment la charge soluble ionisée augmente lorsque le volume des écoulements diminue, tandis que la charge en silice semble indifférente à ce facteur (voir figures 7.3, 7.4 et 7.5). On notera aussi à la figure 7.4 que lorsque le volume écoulé est faible, les teneurs en calcium (ou en autres éléments) sont très variables, car ces faibles écoulements peuvent

Note l : Le programme BMDPGD "bivariate plotting" a été mis au point et divulgué par le Health Sciences Computing Facility de l'Université de Californie à Los Angeles.



| MEAN | ST.DEV. | REGRESSION LINE | RES.MS. |
|----------|---------|-------------------|---------|
| X 23.482 | 32.536 | X=20926 Y+ 25.254 | 1061.8 |
| Y 8.4662 | 6.2143 | Y=00763 X+ 8.6454 | 38,734 |

FIG.7.5

LA VARIATION DES TENEURS EN SILICE QUAND LES ECOULEMENTS AUGMENTENT N'EST PAS NETTE

SiO₂ = ff(volume) dans le drainage oblique d'Adiopodoumé

Tableau 7.2. - Comparaison interstation des caractéristiques chimiques moyennes des différents types d'eau recueillie sous végétation naturelle.

| pH, résistivité | , , , , , , , , , , , , , , , , , , , | , | | T | | |
|---|---|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| anions | Pluie | Pluie/Couvert | Ruissell. | Drain.sup. | Drain.inf. | Source |
| m p v en ppm | | | |) Frankston | Diam.ini. | boarce |
| pH i | 11. | | | | | |
| Adiopodoumé (R ₂) f | 6,7 | 6,7 | 6,7 | 6,3 | 6,8 | 5,3 |
| Anguededou ' h | - | _ | 6,6 | 6,6 | 6,5 | |
| Azaguie f | | - | 6,6 | 6,7 | 6,8 | - : |
| Divo f | | _ | 6,7 | 6,7 | 7,0 | _ |
| Bouaké s.f | ! ! - : | - | 6,8 | 6,7 | 6,7 | - |
| Korhogo s | 6,0 | 6,2 | 6,9 | 6,7 | 7,0 | 6,1 |
| Saria (P ₇) s | - • | - | 6,4 | 6,5 | - | 6,9 |
| Gonse s | - | - | 6,4 | 7,0 | 6,6 | - |
| | | | | | | |
| Résistivité w.cm | | | | | | |
| Adiopodoumé (R ₂) f | 48.800 | 25.000 | 28.700 | 27.200 | 17.900 | 38.100 |
| Anguededou h | - | - | 32.300 | 21.800 | 19.600 | - |
| Azaguie f | <u> </u> | - | 34.000 | 23.000 | 22.500 | |
| Divo f | | | 18.100 | 9.500 | 6.200 | |
| Bouaké s.f | - | | 27.700 | 32.600 | 25.600 | - |
| Korhogo s | 68.900 | 54.000 | 46.900 | 32.000 | 23.200 | 44.600 |
| Saria (P7) s | | 76.000-20.000(a) | 76.540 | 24.700 | - | 21.800 |
| Gonse s | - | | 31.800 | 27.700 | 25.900 | - |
| 504 | | | | | | |
| Adjanadoumá (D.) s | | 0.5 | 2 1 | - 1 | | 1 1 1 |
| Adiopodoumé (R ₂) f | 1,2 | 2,5 | 3,1 | 5,1 | 6,2 | 1,4 |
| Anguededou h | - | - | 8,8 | 12,6 | 17,6 | - |
| Azaguie f Divo f | | | 3,5 | 5,0 | 3,6 | |
| Bouaké s.f | | | 5,7 | 10,7 | 3,2 | - |
| lize it | 1,0 | 1,7 | 0,8 2,1 | 1,8 | 1,2 | 2,3 |
| Kornogo s Saria (P ₇) s | | | 2,1 | | 5,2 | 1,6 |
| Gonse s | 1,6 | 1,7-1,9(a) | 2,1 1,3 | 3,4 | 6 | 1,0 |
| <u>.i.</u> | | • | 1 5 J | | | |
| Cl | | | | | | |
| Adiopodoumé (R ₂) f | 2,1 | 4,9 | 2,8 | 4,4 | 6,6 | 3,9 |
| Anguededou h | <u> </u> | - | 3,5 | 5,2 | 8,4 | - |
| Azaguie f | | | 1,2 3,2 | 2,8 | 3,7 | |
| Divo f | 0,88(b) | 1,8 à 3,4(b) | 3,2 | 10,4 | 6,4 | - |
| Bouaké s.f | | | 1,1 | 1,6 | 0,8 | |
| Korhogo s | 0,3 | 0,8 | 1,3 | 2,5 | 2,5 | 0,3 |
| Saria (P7) s | 0,3 | 0,6 - 2,2(a) | 0,8 0,7 | 2,3 | - | 1,9 |
| Gonse s | | - | U,/ | 0,4 | 0,8 | - |
| CO ₃ H estimé | | | | | | |
| Adiopodoumé (R ₂) f | 1 1 2 | 10 0 | 28,2 | 14.0 | 49,4 | 5,5 |
| | 4,3 | 18,0 | 14,7 | 14,0 18,3 | 11,2 | J -5 - |
| Anguededou h Azaguie f | | <u>-</u> | 12,5 | 12,5 | 11,4 | |
| Divo f | | - | 18,0 | 12,6 45,0 | 98,6 | |
| Bouaké s.f | | <u>-</u> | 10,0 | 70,0 | | |
| Korhogo s | 4,8 | 6,2 | 9,2 | 9,6 | 20,2 | 8,6 |
| Saria (P ₇) s | 4,3 | 6,2-18(a) | 5,4 | 42,4 | | 24,8 |
| 1 | ', | J=10(u) | 5 , | '-,' | | (27,9)(c) |
| Gonse s | | - | 14,8 | 15,1 | 26,0 | // / |
| 1 | 1 (| 1 | | · | 1 | į . |

f = forêt ; h = hévéa non fertilisé, sf = savane arborée dense ; s = savane.

a) prélèvements sous herbe (Andropogon) - sous arbres (karité et néré).

b) prélèvements à Lamto sous herbe (Hyparrenia) et sous forêt galerie.

c) moyenne arithmétique sur 24 échantillons prélevés à la station de pompage de Saria.

survenir tout au long de la saison des pluies. En revanche, les écoulements abondants ne peuvent se produire qu'au coeur de la saison humide à une période de l'année où les teneurs sont toutes faibles. Une telle disparition des fortes teneurs constitue la variation hydrochimique saisonnière la plus caractéristique du milieu naturel.

Au total, l'évolution importante des teneurs en fonction des volumes écoulés et des saisons justifie le choix de la moyenne pondérée par le volume (mpv) comme valeur caractéristique de chaque type d'eau, dans le cadre d'une étude des flux.

1.3 Evolution de la charge soluble en fonction des différents types d'eau

Il apparaît au tableau 7.2 (et dans les tableaux en annexe A7) que les eaux de surface étudiées sur la séquence bioclimatique, en milieu quasi naturel, sont peu minéralisées (la résistivité moyenne varie de 92.000 à 6.200 ohms.cm). Les eaux de pluie sont presque aussi pures que l'eau distillée (résist. = 0.4 à 0.9 x 10⁶ ohms.cm), elles se chargent rapidement au contact de la voûte foliaire (surtout si celle-ci est composée d'arbres) et des premiers horizons du sol (jusqu'à 2 mètres), puis elles se purifient dans l'épaisse couche d'argile bario-lée et d'altérite avant de ressortir aux sources, moins chargées que les eaux de ruissellement (sauf en silice et sodium).

Les eaux sont légèrement acides (pH = 5.3 à 7). En zone forestière très humide l'acidité augmente en profondeur, tandis qu'elle a tendance à diminuer en profondeur en zone plus sèche (à partir de Divo). Leur température varie généralement entre 22 et 27° centigrades : les eaux s'échauffent de quelques dixièmes de degré à mesure qu'elles percolent dans les deux premiers mètres du sol. Les teneurs en bases sont faibles et augmentent progressivement en profondeur (Ca = 2 à 12ppm; Mg = 0.3 à 10ppm; K = 0.1 à 19ppm; Na = 0.2 à 5ppm).

Les eaux de pluie se chargent en carbone (1 à 15ppm) et azote (0.6 à 6ppm de N tot.) au contact de la végétation (sous forêt plus que sous

savane) et de l'horizon humifère, puis les charges en matières

Tableau 7.3. - Comparaison interstation des caractéristiques chimiques moyennes des différents types d'eau recueillie sous végétation naturelle.

| | -, | | | | | |
|---|---------------|-----------------|--------------|--------------|------------|--------------|
| Cations m p v en ppm | Pluie | Pluie/Couvert | Ruissell. | Drain.sup. | Drain.inf. | Source |
| Cal Adiopodoumé (R ₂) f | 1,8 | 3,8 | 5 , 6 | 3,7 | 6,9 | 2,4 |
| Anguededou h | - | - | 3,7 | 6,0 | 6,5 | - |
| Azaguie f Divo f | 2,4(b) | 2 (5 2 (/5) | 3,6 | 4,3 | 4,1 | - |
| Bouaké s.f | 2,4(0) | 2,4 à 3,4 (b) | 7,0 | 8,2 | 12,0 | . ~ |
| Korhogo s | 1,9 | 2,4 | 4,5 2,1 | 2,0 2,6 | 2,2 4,1 | 1 7 |
| Saria (P_7) s | 2,14 | 2,6 à 4,9 (a) | 2,1 | 7,7 | 4,1 - | 1,7 |
| Gonse s | | (a) | 2,3 4,9 | 4,8 | 7,3 | 3,4 |
| | | | .,,, | 7,0 | 7,55 | |
| Mg Adiopodoumé (R ₂) f | 0.4 | 2 2 | 2.7 | 1.0 | r- 4 | 0.5 |
| Anguededou h | 0,4 | 2,2 | 2,7 2,3 | 1,8 | 5,1 | 0,5 |
| Arguededod 11 Azaguie f | 1 | _ | 0,9 | 1,6 | 3,8 1,4 | _ |
| Divo f | 0,44(6 |) 0,8 à 1,2 (b) | 1,9 | 5,0 | 10,0 | |
| Bouaké s.f | - | - | 1,2 | 0,4 | 0,3 | _ |
| Korhogo s | 0,1 | 0,4 | 0,6 | 0,9 | 1,8 | 0,4 |
| Saria (P7) s | 0,31 | 0,39 à 1,2 (a) | 0,5 | 2,4 | | 0.6 |
| Gonse s | | _ | 0,7 | 0,8 | 1,6 | 0,6 |
| KI | | | | | | |
| Adiopodoumé (R ₂) f | 0,3 | 3,9 | 4,8 | 2,6 | 13,1 | 0,1 |
| Anguededou h | | | 4,6 | 5,3 | 6,7 | |
| Azaguie f | - | _ | 1,4 | 1,3 | | l - |
| Divo f | 0,31(b | 2,5 à 3,5 (b) | 5,1 | 19,6 | 0,9 | |
| Bouaké s.f | | <u>-</u> | 4,1 1,3 | 0,3 | 0,3 | - |
| Korhogo s | 0,3 | 1,3 | 1,3 | 1,8 | 7,1 | 1,0 |
| Saria (P ₇) s | 0,39 | 1,24 à 7,1 (a) | 1,14 | 2,9 | _ | 1,3 |
| Gonse s | - | - | 1,8 | 1,7 | 3,3 | - |
| Na | | | | | | |
| Adiopodoumé (R ₂) f | 0,82 | 1,75 | 1,91 | 2,64 | 3,12 | 2,43 |
| Anguededou h | - | - | 1,2 | 1,85 | 2,00 | - |
| Azaguie f | - | - | 1,0 | 1,8 | 2,4 | - |
| Divo f | 1,0(b | 0,7 à 1,2 (b) | 0,67 | 3,74 | 4,9 | - |
| Bouaké s.f | 0,15 | 0,20 | 0,66 | 0,8 | 1,0 | 1 00 |
| Korhogo s Saria (P ₇) s | 0,15 | 0,14 à 0,3 (a) | | 0,44 | 0,90 | 1,80 |
| Gonse s | 0,12 | U,14 a U,3 (d) | 0,30 | 4,7 | 1,0 | 6,0 |
| UU113E 3 | | | 0,2 | 0,0 | 1,0 | <u> </u> |

organiques diminuent progressivement jusqu'à la source.

Les phosphates sont peu abondants (0.1 à 2.2ppm). Comme les matières organiques, leurs teneurs sont généralement maximales dans les eaux de ruissellement et diminuent en profondeur. Dans les conditions physicochimiques de ces eaux de surface, les phosphates sont très peu solubles : leur présence est liée à celle des colloides minéraux et organiques (BOYLE, EDMOND et SHOLKOVITZ, 1977).

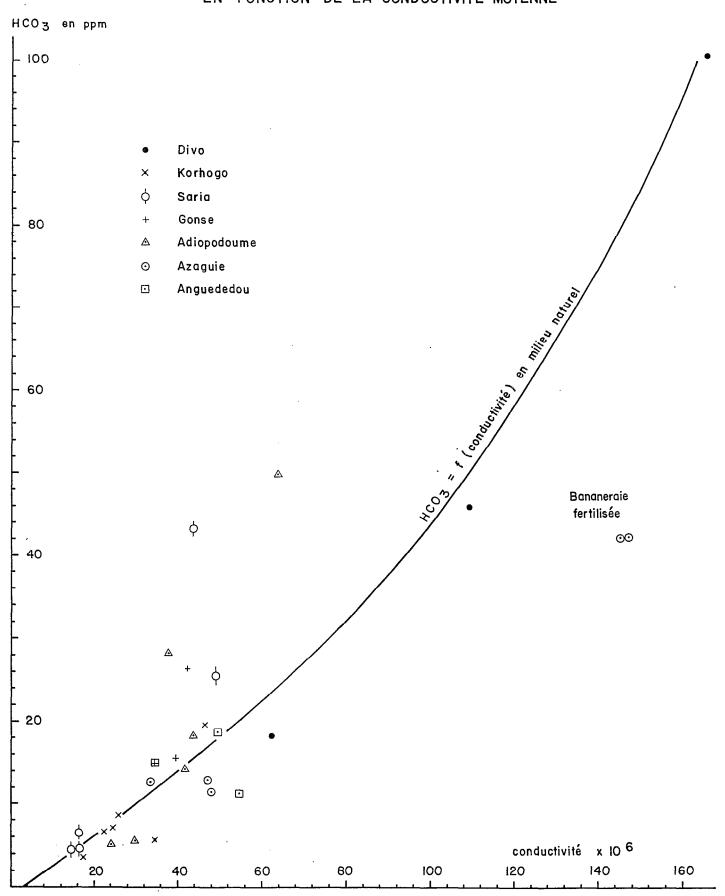
Les teneurs en fer (0.05 à 0.7ppm) et alumine (0.01 à 0.7ppm) sont faibles, elles augmentent au contact du feuillage (surtout le fer sous les arbres) et de l'horizon humifère, pour décroître ensuite dans les eaux de percolation profonde. Les eaux de drainage étant généralement bien oxygénées dans les sols étudiés, la solubilisation de ces éléments est très réduite; leur migration est liée à celle des matières organiques et des argiles et s'effectue principalement à la surface du sol par érosion. Les teneurs en silice sont assez variables (0.3 à 35ppm) : elles croissent à mesure que les eaux entrent en contact avec la végétation et le sol. Avec le sodium, c'est le seul élément qui se concentre dans les eaux jusqu'aux sources.

Nitrates (0.1 à 3ppm), chlorures (0.3 à 8ppm) et sulfates (1 à 12ppm) sont peu abondants dans les eaux du milieu naturel étudié : les teneurs augmentent à mesure que les eaux percolent à travers les horizons superficiels et surtout après mise en culture, si on utilise des engrais.

A cause des longs délais de transport des eaux captées, très peu de déterminations de bicarbonate ont été effectuées. Or, ces quelques résultats disponibles et ceux de divers auteurs (TARDY, 1969, LENOIR, 1972) ont montré que les bicarbonates peuvent représenter dans les eaux naturelles de ces régions tropicales de 20 à 50% de la charge soluble. Nous avons donc été amené à les estimer à partir du calcul de la balance ionique par différence entre la somme des cations (Ca, Mg, K, Na, NH₄) et la somme des autres anions (SO₄, Cl, PO₄, N-NO₃). Les résultats moyens ont été reportés au bas du tableau 7.2.

Il en ressort que les eaux se chargent en bicarbonate au contact du couvert végétal (pluviolessivage) et de l'horizon humi-fère (ruissellement ou percolation), puis se déchargent avant d'atteindre la nappe (Saria) ou la source (Adiopodoumé et Korhogo).

Fig. 7.6 TENEUR MOYENNE ESTIMEE EN HCO3 DANS LES EAUX
EN FONCTION DE LA CONDUCTIVITE MOYENNE



Les teneurs varient de 4 à 100ppm, mais le plus souvent autour de 10 à 30ppm dans les eaux superficielles en milieu naturel. Les teneurs en bicarbonate sont généralement plus faibles sous savane que sous forêt et atteignent les valeurs les plus élevées à Divo; ceci est à mettre en relation avec l'activité biologique qui est beaucoup plus forte sous forêt (et en particulier à Divo) que sous les savanes dégradées par les feux annuels. D'après les calculs de M. LEPILLER, toutes ces eaux sont largement sousaturées par rapport à la calcite (indice -1 à -4) pour les teneurs moyennes des eaux de drainage et de source de Korhogo et Saria (ROQUES, 1972).

Pour vérifier le bien fondé de la méthode d'estimation, nous avons mis les teneurs moyennes estimées de bicarbonate en relation avec la conductivité moyenne des différents types d'eau. A la figure 7.6, il apparaît que la relation est linéaire et étroite, ce qui confirme les résultats de TARDY (1969).

Sous les cultures fertilisées abondamment (la bananeraie d'Azaguié par exemple), les relations sont évidemment moins étroites, puisque dans ce cas, les bicarbonates ne sont plus les anions les plus importants (apports de chlorures, sulfates et nitrates). Les analyses dont nous disposons montrent également une bonne concordance entre les teneurs estimées (25ppm dans la nappe à Saria) et les teneurs mesurées (25 à 31ppm dans le même lot d'échantillons). Faute de données précises, cette estimation par la balance ionique nous semble donc valable dans le

D'une façon générale, les eaux de pluie sont moins chargées que les eaux de ruissellement qui, à leur tour, sont moins chargées que les eaux de drainage superficiel et profond (2 mètres). Quant aux eaux de source, elles sont plus riches en silice, mais plus pauvres en tous les autres éléments (sauf peut-être le sodium) que les eaux de percolation.

milieu naturel.

Tableau 7.4. - Comparaison interstation des caractéristiques chimiques moyennes des différents types d'eau recueillie sous végétation naturelle.

| | végé | tation naturelle | e. | | | |
|--|--------------|-----------------------------|--------------------|--------------|----------------------------|-------------------|
| matières organiques C et N m p v en ppm | Pluie | Pluie/Gouvert | Ruissell. | Drain.sup. | Drain.inf. | Source |
| C organique Adiopodoumé (R ₂) f Anguededou h | 1,3 | 7,4 - | 11,2 11,5 | 8,7 11,3 | 8,1 11,4 | 1,0 |
| Azaguie f Divo f | - | - | 9 12 , 9 | 15 14,6 | 9,7 6,7 | - |
| Bouake s.f Korhogo s | 1,07 | - 3,8 | 8,5 5,2 2,5 | 2,3 3,4 | 1,4 3,0 | 1,2 0,7 |
| Saria (P ₇) s Gonse s | 1,3 | 3,9 à 9,7 (a) | 2,5 3,2 | 1,1 3,0 | - 4,5 | 0,7 |
| N total Adiopodoumé (R ₂) f Anguededou h | 1,4 | 2 , 5 | 4,5 3,6 5,4 | 3,3 4,3 | 3,4 5,9 2,2 | 1,6 |
| Azaguie f Divo f | 1,73(b) | - 2,2 à 2,4 (b) | 4,4 | 2,3 6,1 | 5,9 | - - |
| Bouake s.f Korhogo s | 0,9 | - | 4,5 2,0 | 1,9 1,2 | 1,9 2,1 | - 0 , 8 |
| Saria (P ₇) s Gonse s | 0,63 | 1,1 0,61 à 0,88 (a) - | 1,1 2,8 | 1,9 2,4 | 2,3 | 1,3 |
| N-N03 Adiopodoumé (R ₂) f Anguededou h | 0,26 | 0,74 | 1,17 0,51 | 0,77 1,13 | 1,61 1,70 | 0,17 |
| Azaguie f Divo f | - 0,15(b) | - 0,13 à 0,21(b) | 0,4 2,4 | 0,9 3,5 | 0,9 3,7 | _ |
| Bouaké s.f Korhogo s | 0,48 | 0 ,2 1 | 0,46 0,20 | 0,74 0,25 | 0,93 1,0 | 0,03 |
| Saria (P ₇) s Gonse s | - | - | 1 | - - | - | 0,5 |
| N-NH ₄ Adiopodoumé (R ₂) f | 0,24 | 0,27 | 0,73 | 0,30 0,52 | 0,42 0,60 | 0,16 |
| Anguededou h Azaguie f Divo f | 0 27(b) | - 0,22 à 0,3(b.) | 0,58 0,6 0,7 | 0,32 | 0,00 0,2 0, 2 | - |
| Bouaké s.f Korhogo s | 0,26 | 0,10 | 0,25 0,13 | 0,14 0,14 | 0,13 0,28 | 0,09 |
| Saria (P7) s Gonse s | - | - | | - | - | - |
| PO4 Adiopodoumé (R ₂) f Anguededou h | 0,32 | 0,87 | 2,23 0,84 | 0,67 1,10 | 0,77 0,98 | 1,25 |
| Araguie f Divo f | 0,99(b) | | 1,13 1,27 | 0,8 0,97 | 1,0 0,34 | - |
| Bouaké s.f Korhogo s | 0,30 | 0,38 | 1,02 0,74 | 0,38 0,57 | 0,26 0,90 | 0,92 |
| Saria (P ₇) s Gonse s | 0,77 | 1,1 à 0,4 (a) | 0,91 1 | 0,13 0,8 | 0,7 | 0,15 |
| | | | | | , | , |

1.4 Influence de l'aménagement du milieu et de la fertilisation

sur la charge soluble

L'homme intervient sur la charge soluble des eaux en milieu aménagé par le défrichement (souvent accompagné de feux) qui déclanche une minéralisation rapide des matières organiques, par la plantation d'espèces nouvelles qui ont leurs besoins physiologiques propres, par les techniques culturales et en particulier le travail du sol, la disposition des résidus de culture et la fertilisation. Il n'est pas possible de rapporter ici l'analyse détaillée de tous les essais effectués et publiés ailleurs (ROOSE et TALINEAU, 1973; GODEFROY, ROOSE et MULLER, 1971 et 1975; ROOSE et GODEFROY, 1966, 1967 et 1977; ROOSE, 1974; CHABALIER, 1974; ROOSE, LACOUEILHE et al., 1975 et 1976; ROOSE et COLLINET, 1976; ROOSE, 1972, 1979 et 1980; PIERI, 1979), nous ne relèverons ici que les conclusions générales qui se dégagent de ces travaux.

Les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux dont il est question étant pour la plupart fortement ou moyennement désaturés, on aurait pu s'attendre à ce que les cations apportés par la fumure ou libérés par la minéralisation de la litière ou des matières organiques soient énergiquement fixés par le complexe absorbant du sol. Or, il s'en perd des quantités notables dans les eaux de drainage recueillies en-dessous des horizons contenant la majorité des racines. Si le sol exerce une si faible rétention sur certains éléments, c'est qu'il est très perméable et que sa capacité d'échange des cations est réduite (argile kaolinitique dominante et matières organiques vite décomposées). Par contre, le réseau racinaire des plantes intervient très activement pour prélever certains nutriments dont les végétaux ont besoin pour se développer. La charge soluble des eaux de percolation va donc dépendre non seulement du volume des écoulements (voir paragraphe 71.2), mais aussi de l'équilibre qui s'établit progressivement entre d'une part, l'offre d'éléments solubles (fertilisation, altération des minéraux, minéralisation de la litière et des matières organiques, apports par les eaux de pluie et d'irrigation) et, d'autre part, la demande réelle des végétaux et la capacité de fixation du sol.

Tableau 7.5. - Comparaison interstation des caractéristiques chimiques moyennes des différents types d'eau recueillie sous végétation naturelle.

| Sesquioxydes m p v en ppm | Pluie | Pluie/Gouvert | Ruissell. | Drain.sup. | Drain.inf. | Source |
|---|--|----------------|-----------|---------------------------------------|-------------|--------------|
| Fe ₂ 0 ₃ | | | - | | | |
| Adiopodoumé (R ₂) f | 0,04 | 0,12 | 0,75 | 0,26 | 0,30 | 0,06 |
| Anguededou h | | - | 0,40 | 0,50 | 0,70 | - |
| Azaguie f | - | _ | 0,4 | 0,35 | 0,27 | - |
| Divo f | 0,05(b) | 0,08-0,17(b) | 0,34 | 0,55 | 0,26 | 1 |
| Bouaké s.f | | - | 0,59 | 0,07 | 0,05 | - |
| Korhogo s | 0,13 | 0,12 | 0,30 | 0,20 | 0,18 | 0,14 |
| Saria (P ₇) s | 0,03 | 0,10 à 0,18(a) | 0,15 | 0,07 | - | 0,15 |
| Gonse 's | | - | 0,10 | 0,17 | 0,10 | |
| A1203 | | | | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | | |
| | 0,08 | 0,11 | 0,28 | 0,28 | 0,35 | 0,07 |
| Adiopodoumé (R ₂) f Anguededou h | 0,00 | 0,11 | 0,30 | 0,40 | 0,30 | 0,07 |
| Azaguie f | | | 0,30 | 0,24 | 0,30 | |
| Divo f | 0,06(b) | 0,05-0,08(b) | 0,20 | 0,41 | 0,22 | _ |
| Bouaké s.f | - 0,00(2) | | 0,51 | 0,09 | 0,04 | |
| Korhogo s | 0,07 | 0,07 | 0,38 | 0,68 | 0,63 | 0,16 |
| Saria (P ₇) s | 0,04 | 0,07 | 0,05 | 0,11 | | 0,01 |
| Gonse '' s | - | | 0,08 | 0,30 | 0,06 | |
| Si0 ₂ | | | | | | |
| Adiopodoumé (R ₂) f | 0,7 | 1,3 | 3,5 | 7,2 | 8,3 | 8,4 |
| Anguededou h | 0,7 | 1,3 | 2,2 | 3,8 | 5,2 | 0,4 |
| Azaguié f | | | 4,0 | 5,4 | 5,6 | |
| Divo f | 0,30(b) | 1,2 à 0,4 (b) | 3,6 | 11,5 | 15,5 | _ |
| Bouaké s.f | - = - | | 5,1 | 2,4 | 2,8 | |
| Korhogo s | 0,7 | 1,4 | 3,1 | 6,8 | 6,3 | 19,2 |
| Saria (P ₇) s | 0,68 | 0,78 à 0,9 (a) | 1,06 | 16,3 | - | 35,6 |
| Gonse s | - | - ` ′ | 3,9 | 4,4 | 6,5 | _ |

Voyons brièvement ce qui se passe dans différentes stations.

A Azaguié, il a été démontré que les eaux de drainage (ERLO) recueillies sous bananeraie (forte fertilisation et faible capacité d'absorption des racines) sont nettement plus chargées que sous forêt dense voisine (ROOSE et GODEFROY, 1977) au point de provoquer la pollution des eaux superficielles (plus de lOppm d'azote nitrique). Les pertes par lixiviation des éléments nutritifs représentent 60 à 85% des investissements consentis par la fertilisation : ces migrations s'élèvent à 380kg/ha/an de chaux (95% des apports) 175kg de magnésie (95%), 415kg de potasse (65%), 210kg d'azote (60%) et 5kg d'acide phosphorique (9%) (GODEFROY, ROOSE et MULLER, 1975).

A Adiopodoumé, les pertes par lixiviation sont très variables en fonction du type de production végétale, du niveau de la fertilisation, des éléments considérés et de l'abondance des pluies (voir tableau A7.3). Sous culture peu fertilisée (apports inférieurs aux exportations), les eaux sont souvent moins chargées que sous forêt secondaire (surtout en Mg, K, PO, SiO, C1, CO, H et matières organiques). Mais si les doses d'engrais dépassent certains seuils, l'excédent est rapidement lixivié. Le seuil diffère pour chaque plante en fonction du type de production et du niveau d'exportation par les récoltes. Ainsi, sous Panicum maximum et Stylosanthes guyanensis, des quantités considérables de tiges et de feuilles sont récoltées à chaque fauche (15 à 35t/ha/an de matières sèches) : cela représente une exportation notable de potassium à peine équilibrée par des apports de l'ordre de 500 unités par hectares par an de potassium pour la graminée et 300 unités pour la légumineuse. Les teneurs en potassium restent par conséquent très basses (< lppm) malgré l'importance des apports (ROOSE et TALINEAU, 1973). Sous Zea mais peu ou pas fertilisé (dose 0 et 0.5), la production de grains est si faible que les eaux de drainage sont dix fois plus chargées en potassium que sous cultures fourragères. Lorsque la fumire est équilibrée avec les exportations (dose 1 et 2), les teneurs en potassium des percolats sont faibles et augmentent à nouveau lorsque la dose d'engrais dépasse largement les besoins de la plante (K dose 4 = 3.5ppm). Sous ananas fertilisé correctement, les teneurs en potassium des eaux de drainage restent très faibles (0.1ppm) sauf durant une courte période qui suit la maturité complète des fruits.

Le magnésium peu abondant dans le sol, n'atteint des teneurs élevées (11ppm) que dans les percolats sous ananas (et bananiers). Par contre, les teneurs en calcium qui sont du même ordre dans le drainage sous forêt que sous culture non fertilisée (5 à 10ppm) augmentent énormément lorsque l'usage d'engrais acides (azote, sulfate, chlorures, etc...) est intense : le calcium échangeable est alors chassé du complexe absorbant et atteint dans l'eau de drainage des concentrations de 30 à plus de 100ppm.

Quant à l'azote qui n'est pas retenu par le sol (sauf sous forme combinée aux matières organiques et aux microorganismes), il est extrêmement mobile et serait lixivié plus gravement encore s'il n'était indispensable au développement des plantes. La forêt et la savane retiennent très efficacement l'azote disponible. Le Panicum, graminée hautement productive, en consomme énormément (jusqu'à 500 à 700 unités par an). Le Stylosanthes , légumineuse qui exporte autant d'azote que le Panicum, peut fixer jusqu'à 300kg/ha/an d'azote atmosphérique grâce au rhizobium vivant en symbiose dans ses racines : une partie de l'azote libéré par le sol est lixivié (ROOSE et TALINEAU, 1973). Quant à l'ananas et au mais qui exigent des fumures azotées importantes pour atteindre des productions élevées, ces plantes n'arrivent plus à fixer tout l'azote disponible et les pertespar lixiviation peuvent être considérables. Il semble d'ailleurs que l'azote lixivié provient de la minéralisation des matières organiques du sol plutôt que des engrais (GADET et SOUBIES, 1962, 1963, 1972; CHABALIER, 1976). Les phosphates sont peu solubles. Lorsque les microorganismes les libèrent, ils sont aussitôt captés par les plantes ou insolubilisés au contact du fer et de l'alumine libres. Le phosphate ne migre guère qu'en petite quantité, complexé aux matières organiques ou adsorbé aux colloides minéraux.

A l'Anguédédou, la forêt a été défriché manuellement, légèrement brûlée, puis andainée avant la plantation d'Hevea brasiliensis en courbe de niveau sur de petites terrasses. Les eaux de ruissellement et de drainage dans les horizons superficiels furent assez chargées les deux ou trois premières années, puis les teneurs des eaux superficielles devinrent assez semblables à celles qu'on a observées sous la forêt

secondaire d'Adiopodoumé (sur les mêmes sols, à une douzaine de kilomètres).

A Divo, les observations furent effectuées pendant quatre années sous une haute forêt secondarisée de la station IFCC. Ensuite, la forêt fut défrichée, légèrement brûlée et andainée; des cacaoyers furent plantés en ligne. La charge soluble est très comparable sous forêt et sous cacaoyers légèrement fertilisés, compte tenu des variations interannuelles normales : c'est à peine si on constate une légère augmentation des teneurs en magnésium, potassium, sodium et matières organiques (C et N) dans les eaux de ruissellement après défrichement et dans le drainage deux ans plus tard (K, Mg, NO₃, SO₄ et Cl).

Au Centre de Recherches Agronomiques de Bouaké, 1'ORSTOM a mis en place quatre lysimètres sous une savane à Andropogon tandis que l'IRAT a placé sur le même versant dix lysimètres soumis à une rotation biennale (riz puis mais/coton) recevant une abondante fertilisation (100 + 80 unités de $P_{2}O_{5}$; 150 + 130 K $_{2}^{0}$ = chlorure; 200 + 150kg de dolomie et 100 + 60 ou 200 + 120 unités d'azote) avec enfouissement de 5 tonnes/ha de pailles de riz sur la moitié des lysimètres. D'après les résultats 1973 à 1976 obtenus par l'IRAT et aimablement communiqués par CHABALIER, les pertes en calcium et magnésium furent nettement augmentées par la fumure azotée, ce qui entraîne l'accélération de l'acidification des sols sous culture intensive. Les engrais azotés et potassiques ont été bien utilisés par les cultures ou fixés par le sol. L'enfouissement de pailles n'a pas augmenté la lixiviation : son rôle fertilisant est donc important. Les pertes de nutriments sont nettement plus élevées sous ces cultures que sous la savane herbacée qui ne reçoit aucun engrais et dont le sol est plus pauvre (voir tableau A7.8 - 4 et 5ème colonne).

A Korhogo, les eaux de drainage recueillies sous lysimètres sont moins chargées que celles qui proviennent de la case ERLO pour lesquelles le temps de contact avec le sol a été plus long : la végétation herbacée est aussi plus touffue sur les lysimètres. Sous maïs, l'application d'une dose raisonnable d'engrais (90 N, 20 P, 30 Ca, 15 Mg, 70 K /ha/an) et même du double de cette dose n'a pas

entrainé d'évolution significative de la charge des eaux de drainage à part les teneurs en calcium et surtout en sulfate, qui ont légèrement augmenté. Quant à l'azote total et nitrique, leurs teneurs progressent d'année en année et il faudrait plus de quatre années d'expérimentation pour en tirer des conclusions valables à long terme.

A la parcelle P7 de la station de Saria, la charge des eaux de ruissellement et de drainage est plus élevée sous sorgho normalement fertilisé (97 N, 22 P, 50 K kg/ha/an) que sous la jeune jachère:
les écarts de teneurs apparaissent notables pour le calcium (4 et 13 ppm sous sorgho contre 2 et 8 ppm sous jachère herbacée), l'azote (2 et 8 ppm contre 1 et 2 ppm), le potassium (4 et 3 ppm contre 1 et 3 ppm), les sulfates (11 et 2 ppm contre 2 et 3 ppm) et les chlorures (4 et 2 ppm sous sorgho contre 0.7 et 2 ppm sous jachère). Mais, contrairement aux zones tropicales humides, le drainage et la lixiviation sont faibles tandis que les dangers d'érosion sont plus préoccupants.

EN RESUME, l'azote, le calcium et le magnésium (ainsi que le sodium peu étudié sous culture) sont très mobiles en milieu tropical tout comme en milieu tempéré (COPPENET, 1969; DUTIL et DURAND, 1974; ROOSE, 1974; TOMLINSON, 1971; VOMEL, 1966; LELONG et SOUCHIER, 1970). Il en découle des risques élevés de lixiviation et une acidification rapide du sol lorsqu'on utilise de façon répétée des doses importantes d'engrais concentrés acides. Le phosphore migre peu car il est fixé par le fer et l'alumine libres : c'est le seul élément fertilisant qui puisse, dans une certaine mesure, être stocké dans les sols des régions tropicales humides. Quant au potassium qui est rapidement rétrogradé dans le réseau des argiles 2/1 dans certains sols des régions tempérées (LELONG et SOUCHIER, 1970; COPPENET, 1969), il est particulièrement mobile dans les sols tropicaux à argile kaolinitique dominante, quand il n'est pas prélevé par les racines. Les teneurs élevées en calcium, chlorures et sulfates dans les percolats sont d'excellents indicateurs de l'usage d'engrais minéraux : les nitrates par contre, peuvent provenir de la minéralisation intense des matières organiques du sol. Si les sols ferrallitiques sont des filtres imparfaits vis-à-vis des éléments solubles, les plantes interviennent de façon très efficace (mais

très variable aussi comme nous venons de le voir) en captant les nutriments qui leur sont indispensables pour leur croissance.

En examinant les tableaux 7.2 à 7.5, on peut constater que la charge des eaux superficielles récoltées depuis la forêt dense subéquatoriale (Abidjan) jusqu'aux savanes présahéliennes de la région centrale de la Haute-Volta n'est pas fondamentalement différente dans le milieu naturel; les variations de concentration intra-régionales sont bien plus importantes en fonction des aménagements et en particulier de la fertilisation minérale intensive. Tout au plus arrive-t-on à remarquer que les eaux de pluie sont d'autant moins chargées (en particulier en Na, Cl, Mg, N total) qu'on s'éloigne de l'océan (et de la zone forestière), que les eaux superficielles sont d'autant plus pauvres en éléments solubles qu'elles circulent dans un milieu de savanes dégradées produisant moins de matières organiques et que les différences sont plus accentuées dans les eaux de ruissellement (résistivité = 18 000 à 76 500ohms.cm) que dans les eaux de drainage (résistivité = 6 000 à 32 000 ohms.cm). Il faut noter également que le pluviolessivage est beaucoup plus important sous les arbres (sous la forêt dense humide à Adiopodoumé comme sous les karités et les nérés à Saria) que sous les herbes de la savane : ce recyclage rapide de certains éléments (K, Mg, Ca, C, N, Cl sous les arbres, de K, C, Cl et silice sous les herbes) influence beaucoup plus la composition des eaux de ruissellement que celle du drainage. Parallèlement aux eaux de pluie, les teneurs en Na, Cl, C, N, PO,, fer et alumine (sauf dans les sources) des eaux de ruissellement et de drainage ont tendance à diminuer à mesure qu'on s'éloigne de l'océan, qu'on passe de la zone forestière à une région couverte de savane et que le climat devient plus sec. Par contre, si les eaux de pluie apportent la même quantité de silice tout au long de la séquence bioclimatique, la teneur en silice a tendance à augmenter dans les eaux de source avec l'aridité du climat (SiO, = 8 ppm à Adiopodoumé,

19 à Korhogo et 36 dans la nappe à Saria).

Quelle est l'influence de la roche mère ?

La plupart des stations d'observation ont été installées sur granito-gneiss sauf en basse Côte d'Ivoire où deux sites ont été retenus sur matériaux argilo-sableux sédimentaires (Adiopodoumé et Anguédédou) et un site sur schiste chloriteux lardé de minces filons de quartz. Il s'avère, en définitive, que ces roches mères acides ont peu influencé la composition des eaux superficielles, car la zone d'altération est très épaisse (sauf peut-être à Bouaké) et l'altération si poussée qu'il ne reste plus que du quartz, de la kaolinite et un peu de goethite formant plus de 98% du matériau originel avec localement un peu d'illite (Gonse) de chlorite ou des restes de micas et de minéraux lourds à peine reconnais-sables en lame mince.

Si la roche mère intervient peu sur la charge soluble des eaux superficielles de cette séquence bioclimatique, comment expliquer que les eaux recueillies à la station IFCC de Divo (plus exactement près de Brabodougou) sont de loin les plus riches (surtout en bases, matières organiques et silice) ?. Ni le rapport SiO2/Al2O3 du sol (voisin de 1.9), ni la capacité d'échange de cations (CEC = 4 à 5 mé/100g), ni les réserves de bases totales (S bases totales extraites aux triacides = 3 à 4 mé/100g), ni les taux de matières organiques (M.0% ≈ 1% sur 20cm) ne permettent de supposer que le profil pédologique est spécialement riche en nutriments : et pourtant la forêt primitive y était particulièrement vigoureuse (fûts très élevés). Cependant, le pH (diminue de 6.6 à 5.2 vers l'mètre de profondeur), le taux de saturation du complexe absorbant (V = 88% en surface et 20% vers 1 mètre) et le rapport C/N (10.5 dès la surface) montrent que l'humification s'effectue dans de bonnes conditions et assure un turnover extrêmement rapide des nutriments libérés par la litière sans trop de pertes par lixiviation (puisque les pluies sont relativement peu abondantes et bien étalées tout au long de l'année). Les minéralisations relativement élevées observées dans les eaux superficielles de Divo semblent donc liées à l'activité biologique plus active dans cette zone peu soumise au lessivage intense des nutriments.

Des résultats publiés par COLLINET (1971) au Gabon, par BLANCANEAUX (1979) en Guyane et par NORTCLIFF et THORNES (1977 et 1979) au Brésil (petit bassin amazonien près de Manaüs) sur les caractéristiques des eaux de surface en milieu forestier équatorial encore plus humide qu'Adiopodoumé (environ 3.500 millimètres de pluie annuelle moyenne), on peut tirer des conclusions analogues. Les charges solubles sont semblables, mais généralement plus faibles qu'en basse Côte d'Ivoire: la résistivité du ruissellement atteint 40 à 50 000 ohms.cm et celle du drainage environ 35 000 ohms.cm. L'effet "dilution" joue de plus en plus à mesure que les écoulements de surface se développent puisque 1' ETR plafonne ou même diminue (voir chapitre 6, le schéma en conclusion). Toutefois, l'activité biologique élevée en milieu forestier permet la libération d'une quantité importante d'éléments minéraux immédiatement recyclés par les plantes.

L'ordre de classement des stations en fonction de la charge soluble des eaux superficielles diffère d'un élément à un autre en fonction de l'épaisseur du sol, de la roche mère et surtout de l'état actuel de dégradation de la végétation. Les sols sont tous désaturés et pauvres en éléments altérables, si bien que la végétation — forêt ou savane — vit pratiquement en circuit fermé : les apports par les pluies compensent les faibles pertes par lixiviation et érosion grâce à l'efficacité remarquable du réseau racinaire pour capter les éléments dissous dans les eaux de percolation.

En conclusion, il semble que la composition des eaux superficielles soit liée à l'évolution des matières organiques (production de litière, humification, minéralisation) au prélèvement par les racines et, dans une certaine mesure, aux apports marins (pluie et embruns) ou continentaux (poussières du désert) (ROOSE, 1979, 1980). La composition des eaux profondes serait davantage en équilibre thermodynamique avec le milieu minéral qui l'entoure et où se passent principalement l'altération et les néoformations. (TARDY, 1969; GARDNER, 1970).

L'utilisation du sol intervient sur la chimie des solutions du sol à plusieurs titres : minéralisation accélérée des matières organiques suite au défrichement et aux travaux culturaux, augmentation des risques de lixiviation et d'érosion sur les sols peu couverts pendant

une partie de l'année, apport d'éléments minéraux très solubles et acidification du sol par déplacement de certains cations (Ca, Mg, K), mais aussi développement de la croissance végétale amenant à une immobilisation majorée en certains éléments. Il existe des seuils, variables selon les plantes et les éléments, au-delà desquels les éléments ne sont plus retenus.

L'équilibre est donc difficile à trouver en région tropicale à cause des exportations et surtout des risques de perte par érosion et par lixiviation : les écosystèmes tropicaux sont donc assez fragiles.

2 - COMPOSITION DE LA CHARGE SOLIDE DES EAUX

Après l'étude de la charge soluble des différents types d'eaux récoltées tout au long de la séquence bioclimatique, il nous faut préciser les caractéristiques des éléments colloïdaux lessivés dans les eaux de drainage et des terres érodées en suspension relativement stables (particules fines) ou par traction à la surface du sol (terre de fond formée de sables et d'agrégats plus ou moins dissociés par les gouttes de pluie).

2.1 : Les éléments colloïdaux lessivés

Lors des événements pluvieux les plus importants, il nous est arrivé de recueillir de gros volumes de percolat (5 à 100 litres). Une fraction de ces eaux (2 litres) a été filtrée (filtre rapide plissé plus coton) puis analysée, tandis que que le reste a été consacré à l'étude des colloïdes. Après une filtration rapide, les eaux restaient opalescentes, mais ne présentaient aucune trace de solide en suspension discernable à l'oeil (en particulier aucune matière organique). Un essai préliminaire a montré qu'en accélérant la floculation des colloïdes à l'aide de 1 à 2 cm3 d'une solution de 5% de sulfate d'alumine par litre de percolat, on obtenait 10 à 50% de colloïdes en plus après 15 jours de repos qu'en acidifiant le milieu avec de l'acide chlorhydrique fumant (ROOSE, 1980). Ces colloïdes floculés, séchés à 105° Centigrades et pesés ont ensuite été stockés et accumulés pendant six ans pour obtenir suffisamment de matières pour pouvoir procéder à différentes analyses (voir annexes Adiopodoumé, ROOSE, 1980).

- a) La comparaison des résultats analytiques d'une série d'échantillons d'eau, avant et après floculation, provenant de la parcelle ERLO "R2" à Adiopodoumé, montre que les floculats comprennent des phosphates, du calcium, de la silice, des matières organiques (C et N) et probablement du fer (pas très net). La méthode de floculation ne permet pas de juger de l'évolution de l'alumine.
- b) Vingt échantillons de poudre totale orientée ont été analysés aux rayons X par M. HANRION du Laboratoire de Géologie de l'ORSTOM à

Tableau 7.6 : Analyses de 20 échantillons de floculats par le Centre de Pédologie Biologique du CNRS, Nancy

| - | C % | N % | C/N | Minéraux décelés aux rayons X |
|---|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| ADIOPODOUME R2 | | | | |
| Ruissellement | 15.2 | 1.187 | 12.8 | |
| Drain. oblique . vers 30cm . 60cm 100cm | 7.4 5.4 4.3 | 0.487 0.469 0.365 | 15.2 11.5 11.8 | Kaolinite |
| 150cm Source | 5.7 4.4 | 0.340 0.426 | 16.8 10.3 | Kaolinite |
| AZAGUIE | | | | |
| Ruissellement | 6.5 | 0.602 | 10.8 | |
| Drain. oblique .vers 30cm 60cm 90cm | 6.8 | 0.581 0.557 | 11.7 | Kaolinite + illite + quartz |
| 150cm | 8.0 4.6 | 0.742 0.727 | 10.8 6.3 | Kaolinite + illite + quartz |
| KORHOGO | | | | |
| Ruissellement | 6.7 | 0.367 | 11.8 | |
| Drain. Oblique . vers 30cm 60cm 100cm 180cm | 2.9 3.1 3.6 3.1 | 0.301 0.395 0.447 0.325 | 9.6 7.8 8.1 9.5 | kaolinite |
| Sour ce | 4.0 | 0.378 | 10.6 | kaolinite |
| SARIA | | | | |
| Ruissellement Drain. Oblique | 2.1 | 0.248 | 8.5 | |
| . de 0 à 45cm .de 100 à 200cm | 4.3 3.7 | 0.634 0.794 | 6.8 4.7 | kaolinite kaolinite + illite |

Adiopodoumé en juin 1977. Les diffractogrammes ont été interprétés avec l'aide de Messieurs LELONG et ILDEFONSE de l'Université d'Orléans et PINTA de l'ORSTOM (Bondy) (voir annexe 5 Adiopodoumé, ROOSE, 1980). Pour l'ensemble des échantillons provenant du ruissellement, du drainage ou des sources d'Azaguié, de Divo, Korhogo et Saria, la kaolinite et le quartz dominent largement. Cependant, il apparaît des traces de muscovite, illite, chlorite ou d'autres minéraux 2/1 (surtout à Azaguié et Saria), mais, en l'absence de traitement au glycérol et chauffage, il est impossible d'être plus précis (PINTA, communication écrite en juillet 1979).

c) Pour explorer un peu plus avant les processus de lessivage, nous avons envoyé 20 échantillons de poudre provenant d'Adiopodoumé, du Téké, de Korhogo et de Saria au Centre de Pédologie Biologique du CNRS à Nancy. Celui-ci a procédé au dosage du carbone et de l'azote sur tous les échantillons et à l'analyse aux rayons X de deux échantillons par station après quatre traitements par échantillon (Normal; N. plus éthylène glycol; N. plus hydrazène; N. plus chauffage à 550° C.). D'après le professeur SOUCHIER (lettre du 21.8.79), on peut en conclure que : "Les floculats analysés sont de fines particules de kaolinite, associées plus rarement à quelques fractions micacées, toutes enrobées d'une fraction organique qui paraît très importante.

Quantitativement, les teneurs en matières organiques sont de l'ordre de 10%, alors que les sols tropicaux sont généralement moins humifères que les sols tempérés. Ceci tend à prouver que cette fraction très fine est le support préférentiel d'une matière organique humifiée qui stabilise à l'état dispersé ces fractions argileuses.

Qualitativement, la plupart des rapports C/N sont relativement faibles (8 à 12); ils indiquent généralement des composés organiques riches en azote, à fraction aminées abondantes, souvent d'origine microbienne, ce qui est également une caractéristique intéressante de cette matière organique dont le rôle parait déterminant pour expliquer le comportement des suspensions."

On pourrait ajouter que le rapport C/N augmente avec la durée de la saison humide et l'abondance des pluies (C/N floculats Saria < Korhogo < Téké < Adiopodoumé), et que les teneurs en carbone varient dans le même sens. Par ailleurs, si les teneurs en carbone sont

souvent plus élevées dans les colloïdes captés dans les eaux de ruisellement et de drainage près des horizons humifères, la baisse des teneurs
en carbone (et du C/N) en fonction de la profondeur du drainage n'est
pas toujours très nette. Ceci confirmerait notre hypothèse selon laquelle
les colloïdes en migration proviendraient pour une bonne part des processus liés à la battance des gouttes de pluie à la surface du sol.

En conclusion, il semble que les matières solides migrant dans les eaux de drainage soient composées en majorité de quartz et de kaolinite laquelle est probablement enrobée de matières organiques riches en fonctions aminées qui lui permettraient de rester stable à l'état dispersé. De nombreux auteurs ont en effet souligné le rôle des matières organiques pour maintenir les argiles à l'état dispersé en milieu acide (GREENLAND, 1965; SOUCHIER et al., 1969; GUILLET et al., 1975, 1978 et 1979; NGUYEN KHA et al., 1976). Ces résultats sont en désaccord avec l'hypothèse selon laquelle la fréquence et l'intensité des phénomènes de lessivage diminueraient depuis la zone tropicale sèche (bisiallitique) jusqu'à la zone équatoriale humide (fer-monosiallitique), en raison de la diminution progressive du taux d'argiles 2/1, lesquelles seraient lessivées plus facilement (DUCHAUFOUR, 1977). Il semble effectivement que la kaolinite soit très stable en elle-même et pourtant elle domine indiscutablement la composition des colloïdes migrant dans les eaux de drainage. Il ressort de ces résultats que la kaolinite peut être enrobée de matières organiques et circuler facilement en milieu ferrallitisant, après avoir été mise en suspension stable, grâce à l'énergie fournie par la battance des gouttes de pluie (ROOSE, 1980).

2.2 Composition des terres érodées

Sous l'action de la battance des pluies et du travail de sape du ruissellement, la terre est érodée et migre en deux fractions séparées : les particules fines en suspension plus ou moins stables et les sables associés à des agrégats incomplètement désagrégés tractés à la surface du sol (= terre de fond). La composition chimique et granulométrique de l'horizon superficiel du sol est généralement intermadiaire entre ces deux matériaux.

La comparaison de la composition moyenne des terres érodées dans les sept stations (voir tableaux A7.13 à 19) montre :

- 1) que la part des matériaux fins en suspension (jusqu'à 20 ou 50 microns) par rapport aux terres tractées (terre de fond) augmente régulièrement quand l'érosion devient moins intense. Inversement, plus l'érosion est brutale et moins elle est sélective.
- 2) Les éléments chimiques liés aux fractions fines (C, N, bases échangeables et totales, P_2O_5) montrent le même comportement. Leur proportion dans les terres érodées diminue quand l'érosion est très intense.
- 3) Seule, la silice (= grains de quartz) liée aux fractions grossières varie en sens inverse.
- 4) On remarque que les matériaux remontés par les vers de terre sont enrichis en particules fines et en éléments chimiques liés à celles-ci, mais de façon moins sélective que les matériaux entraînés par une érosion "douce".

L'étude de la sélectivité de l'érosion en fonction du couvert végétal, de la pente, des conditions climatiques, du type de sol et de son utilisation permet de dégager une certaine cohérence dans la composition chimique des matériaux exportés par l'érosion.

A Adiopodoumé, on observe qu'il circule par érosion plus de matières organiques et moins d'argile sur des pentes forestières modérées que sur versants très inclinés (cas de R2 de 65% de pente). Sous maïs (pente 7%), culture peu couvrante si on la mène de façon extensive sans engrais minéraux, l'érosion est beaucoup moins sélective que sous forêt, mais plus sélective que sur sol nu (même pente); on trouve dans les terres érodées plus de sables (billons dans le sens de la plus grande pente), moins de matières organiques et de cations (sol plus pauvre) sous maïs que sous la forêt voisine (ROOSE, 1978). Cependant, il est probable que l'usage répété d'engrais sur les champs cultivés augmente légèrement les teneurs en nutriments des matériaux érodés (N, P, K, mais aussi le calcium et le magnésium chassés du complexe absorbant par les engrais acides) comme l'ont montré une série de tests au simulateur de pluies après fertilisation pulvérisée sur

des parcelles d'ananas (ROOSE, ASSELINE, 1978).

A Anguédédou, sur un versant raide (pente = 29%) de la plantation d'hévéa sur banquettes, les coefficients de sélectivité de l'érosion* (1 à 3.7 selon les éléments) se rapprochent plus de ceux qu'on trouve sous culture à Adiopodoumé que sous forêt; cela provient des perturbations durant les premières années de la surface du sol par le défrichement, l'andainage, la construction des banquettes et la plantation sur ce versant très incliné.

A Azaguié, les coefficients de sélectivité de l'érosion varient de 2 à 6 sous forêt et de 1 à 3 sous bananeraie (pente 14%). En réalité, ces coefficients sont sousestimés, car on a négligé les éléments solubles migrant dans les eaux de ruissellement et surtout les graviers de quartz qui s'accumulent à la surface du sol sous culture. Ces graviers sont ramenés en surface par le labour au trident sous culture, tandis qu'ils s'enfoncent progressivement sous une nappe de terre fine remontée par les vers et les termites sous forêt. Les analyses de l'horizon labouré (25 cm) effectuées par GODEFROY montrent que les teneurs en éléments grossiers (plus de 2 mm) sont passés de 0-2% sous forêt à 10-15% sous bananeraie en 1964 et à 20-25% dix ans plus tard (ROOSE et GODEFROY, 1977). Ces chiffres illustrent bien les rôles respectifs du labour qui mélange les horizons profonds aux horizons superficiels et de l'érosion en nappe qui transporte sélectivement les particules fines.

A la station de Divo, on n'a pas constaté de différence significative dans la composition des terres érodées sous forêt et, après son défrichement ménagé, sous cacaoyers; aussi a-t-on confondu les données. Le coefficient de sélectivité varie de 1 à 10 avec des valeurs élevées pour les matières organiques (C et N) ainsi que pour le potassium échangeable.

^{*} Note: Le coefficient de sélectivité de l'érosion est le rapport des teneurs d'un élément dans les terres érodées et dans l'horizon superficiel du sol en place.

A Bouaké, nous manquons de donnée précise (érosion très faible sous savane mise en défens) mais les terres érodées doivent être très riches en matières organiques et particules fines (argile plus limons).

A Korhogo, la sélectivité de l'érosion est particulièrement élevée sous savane (1 à 60) et même sur parcelle nue (1 à 10) à cause des gravillons ferrugineux qui protègent la surface du sol : l'inclinaison de la pente est également plus faible (3%) que sur les parcelles forestières.

A Saria, les plus forts coefficients de sélectivité de 1'érosion (1.5 à 75) sont observés sur un sol gravillonnaire dès la surface et couvert d'une vieille jachère herbacée, protégée des feux depuis 30 ans. L'érosion est d'autant plus sélective (2 à 35) que le sol est bien couvert et le glacis peu incliné (< 1%) : ceci est vrai pour divers éléments chimiques, mais pas pour la texture pour laquelle les valeurs maximales de sélectivité sont observées sous sorgho butté!

A Gonse, sous la savane arborée, les coefficients de sélectivité sont élevés du fait de la faible compétence du ruisellement sur des pentes de moins de 1% d'inclinaison.

En résumé, on voit que l'érosion est d'autant plus sélective qu'elle est moins brutale, ce qui se produit soit, lorsque le sol est bien couvert (cas des forêts d'Adiopodoumé, Azaguié et Divo), soit, lorsque le relief est peu accentué (cas des savanes soudano-sahéliennes de Saria et Gonse), soit, lorsque la surface du sol est protégée par des éléments grossiers (cas des sols gravillonnaires de Korhogo et Saria protection).

1

3 – CONCLUSIONS SUR LA COMPOSITION DES CHARGES SOLUBLES ET SOLIDES DES EAUX DE SURFACE

Tout au long de la séquence bioclimatique étudiée, la composition des charges solubles et solides des eaux de surface est peu différente d'une station à une autre dans le milieu naturel. Tout au plus peut-on distinguer les apports marins (Na, Cl et parfois Mg) dans les eaux de pluie et de ruissellement et les apports forestiers (C et N plus abondants dans le milieu forestier que dans les savanes brûlées régulièrement des zones étudiées). Les charges solubles des eaux superficielles reflètent la dynamique des matières organiques (végétaux et matières humiques du sol).

Par contre, les charges solubles peuvent changer notablement sur une même station en fonction des divers traitements (surtout fertilisation, type de culture et défrichement), des saisons et du volume des écoulements.

En définitive, ce sont les volumes des écoulements et le poids des terres érodées qui vont entraîner des différences significatives des flux de matières.

CHAPITRE VIII: LES BILANS GEOCHIMIQUES

Après avoir quantifié l'érosion et les éléments du bilan hydrique en milieu naturel ou cultivé, puis traité de la composition chimique des charges solubles et solides, il s'agit maintenant d'évaluer les apports et les pertes du volume de référence du bilan, c'est-à-dire le système sol-plante limité à l'épaisseur du sol la plus exploitée par les racines (maximum 2 mètres). Ensuite, ces flux seront comparés aux stocks contenus dans le sol et la végétation et à quelques cycles internes.

L'influence des flux sur la texture du sol sera traitée au chapitre suivant.

1 - LES FLUX POSITIFS OU FLUX ENTRANT DANS LE SYSTÈME

Il s'agit donc essentiellement d'apports. A cet effet, nous verrons successivement :

- les apports par les eaux de pluie;
- les apports par les engrais sous cultures;
- les apports résultant des remontées biologiques.

1.1 Les apports par les eaux de pluie

De nombreux échantillons d'eau de pluie ont été recueillis à Adiopodoumé (5 ans), Lamto (2 ans), Korhogo (4 ans) et Saria (3ans) dans des capteurs en plastique placés à ciel ouvert ou sous différents couverts d'arbres ou d'herbes. Tous les récipients ont été soigneusement lavés à l'eau de pluie après chaque averse et les échantillons ont été immédiatement filtrés (filtres plissés rapides plus coton). Des essais de stabilisation avec un bactéricide (P.H.B.M. à 5°/...: polyhydroxy-benzoate de méthyl) n'ont révélé aucune différence significative des

Tableau 8.1: Influence de la distance à l'océan du lieu de captage et du couvert végétal sur la composition (moyenne pondérée en ppm) des eaux de pluie et sur leurs apports annuels. moyens (kg/ha/an).

| Teneurs (mpv en ppm) | Ca | Mg | K | Na | d. | N total | N-NH ₄ | N-NO ₃ | PO ₄ . | Fe ₂ ⁰ 3 | A1203 | sio ₂ | C1 | so ₄ | HCO ₃ | Résist. | |
|---|------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|-----|
| ADIOPODOUME :D.O.=15km .ciel ouvert . sous forêt | 1.8 3.2 | 0.4 | 0.3 3.9 | 0.8 1.75 | 1.3 | 1.4 2.5 | 0.24 0.27 | 0.26 0.74 | 0.32 0.87 | | 0.08 0.11 | 0.7 | 2.1 4.9 | 1.2 | 5.1 18 | 48.8 25 | |
| LAMTO/PAKOBO DO=150km . ciel ouvert . savane herbeuse . galerie forestière | 2.4 2.4 3.4 | 0.4 0.8 1.2 | 0.3 2.5 3.5 | 1 0.7 1.2 | <u>-</u> - | 1.7 2.2 2.4 | 0.27 0.22 0.31 | 0.15 0.13 0.21 | 0.99 1.16 2.51 | 0.05 0.08 0.17 | 0.06 0.05 0.08 | 0.3 1.2 0.4 | 0.9 1.8 3.4 | - - - | - | - - - | Ţ |
| KORHOGO DO= 500km . ciel ouvert . savane herbeuse | 1.9 | 0.1 | 0.3 | 0.15 0.20 | | 0.9 1.1 | 0.26 0.10 | 0.48 0.21 | 0.30 0.38 | | 0.07 0.07 | 0.7 | 0.3 | 1 1.7 | 4.8 6.2 | 69 54 | 292 |
| SARIA DO =850km . Ciel ouvert . savane herbeuse . sous arbres | 2.1 2.6 4.9 | 0.3 0.4 1.2 | 0.4 1.2 7.1 | | 3.9 | 0.6 0.6 0.9 | - - - | - - - | 0.77 1.14 0.43 | 0.10 | 0.04 0.07 0.08 | 0.6 0.8 0.9 | 0.3 0.6 2.2 | 1.6 1.7 1.9 | - - - | 91.8 75.9 19.9 | |
| Apports à ciel ouvert (Kg/ha/an) Pluie . Adiopodoumé (2100mm) . Lamto (1100mm) . Korhogo (1350mm) . Saria (860mm) | 37.8 26.5 25.7 18.4 | 8.4 4.8 1.4 2.7 | 6.3 3.4 4.1 3.4 | 17.2 10.8 2 | 27.3 - 14.9 11.2 | 29.4 18.8 12.2 5.4 | 5.04 2.9 3.5 | 5.46 1.7 6.5 | 6.72 10.7 4.1 6.6 | 0.5 | 1.68 0.6 0.9 0.3 | 14.7 3.3 9.5 5.5 | 44.1 9.7 4.1 2.8 | 25.2 - 13.5 13.8 | _ | TOTAL 322 226 173 67 | |

Notes: *CO3H: estimé par balance anions = cations, DO = distance à l'océan Atlantique qui varie de 15 à 850 km à vol d'oiseau Sources: Adiopodoumé (1970-1874) pluie = 2100mm, ROOSE, 1980 - LAMTO (1971), Pluie = 1100mm, VILLECOURT et ROOSE, 1978 Korhogo (1972-1975), pluie = 1350mm, ROOSE, 1979, Saria (1972-1974), pluie:860mm, ROOSE et al., 1978.

⁻ capteurs en plastique ouverts entre les averses, lavés ou changés après chaque pluie; échantillons unitaires ou composites, filtrés, stabilisés au PHBM ou non (pas de différence) stockés dans des flacons de plastique bien remplis et conservés à l'abri de la lumière et des fortes chaleurs.

teneurs en cations et en azote des échantillons traités par rapport aux échantillons naturels.

Au tableau 8.1 sont présentées les variations de la composition et de l'importance des apports par les pluies annuelles moyennes en fonction du couvert végétal, de l'abondance des précipitations annuelles et de la distance à l'Océan Atlantique (15 à 850 km à vol d'oiseau). Ces chiffres reflètent les apports en éléments solubles de la pluie ellemême et en éléments solubilisés des poussières qui ont pu se déposer sur les capteurs (et éventuellement le couvert végétal) entre deux averses. Nous avons déjà traité de la composition des solutions auparavant (paragraphes 71.3 et 71.5). Nous nous limiterons donc à rappeler que les teneurs en Na, C1 et N total diminuent lorsqu'on s'éloigne de plus de 150 km de l'océan, sans qu'il y ait de lien strict avec la présence de la forêt (teneur N total Lamto > N total Adiopodoumé). Signalons également que les teneurs des eaux de pluie observées par BERNHARD -REVERSAT (1975) à la forêt du Banco (15 km d'Adiopodoumé) sont voisines des valeurs présentées ici. En revanche, les teneurs observées à Tiassa-1é (100 km de l'océan, mais en zone forestière) et à Korhogo (à 500 mètres de nos capteurs) sont souvent légérement inférieures aux nôtres (sauf SiO, et Cl), ce qui s'explique aisément par le lavage à l'eau distillée des capteurs avant l'averse (MONNET et MATHIEU, 1970; MATHIEU, 1972) et par le choix exclusif des averses principales au lieu de considérer la somme de toutes les averses de l'année (y compris les petites pluies les plus chargées). Enfin, ce tableau 8.1 montre clairement que les eaux de pluie qui traversent la voûte foliaire s'enrichissent à son contact en presque tous les éléments, mais surtout en K, Mg, carbone organique et fer : nous en discuterons au paragraphe 83.1.

Les charges chimiques acquises par les eaux lessivant les végétaux sont importantes en milieu naturel (MES, 1954), c'est surtout vrai en milieu forestier, mais beaucoup moins marqué sous culture, en particulier quand celles-ci occupent mal le terrain dans le temps et dans l'espace (cas du maïs). Seuls, les apports par les pluies captées à ciel ouvert sont comptabilisés comme flux positif dans le bilan : le pluviolessivage ne constitue qu'un cycle interne au système sol-plante.

| STATIONS | CULTURES | ELEMENTS &) .Kg/ha/cycle | PRESENTATION | FRACTIONS |
|-------------|-------------------------------|--|--|--|
| ADIOPODOUME | Maïs dose l | N 30 + 30 P 10 | Sulfate de NH ₄ OH à 21% de N Supersimple à 15% de P ₂ O ₅ | Semis+floraison Semis |
| | | K 9 + 9 | Chlorure de potassium à 60% K ₂ 0 | 2 fois |
| | 2 fois par an (2 cycles) | Ca 6 Mg 3 | Dolomie à 35% CaO à 18% MgO | Semis " |
| AZAGUIE | Bananiers | N 380 P 20 K K 517 Ca 271 Mg 115 | Urée puis sulfate de NH ₄ OH Complexes divers Chlorure, sulfate et composés Dolomie | 7 à 10/an 1 par an 7 à 10 par an 1 à 2 par an |
| DIVO | Cacaoyers | N 18 P 42 K 84 | 275 g/pied x 1250 pieds 5 - 12 - 24 composé | 1 à 3 fois par an |
| BOUAKE | Riz (I seul cycle) | N 60 P 44 K 125 Ca 25 Mg 9 S 10 | Urée | 2 fois 1 1 |
| | Maïs (ler cycle) | N 100 P 35 K 124 Ca 25 Mg 9 | Urée Supertriple KCl | 2 fois 1 |
| | Coton (2ème cy- cle) | N 60 P 40 K 75 | Urée Supertriple KCl | 2 fois 1 1 |
| KORHOGO | Maïs dose l l cycle par an | N 50+40 P 20 K 30 + 40 Ca 30 Mg 15 | Sulfate d'ammoniaque Supersimple Chlorure de K à 60 % K ₂ 0 Dolomie à 35 % de Ca0 " 18 % de MgO | 2 fois 1 fois 2 fois 1 fois 1'an semis |
| SARIA P7 | Sorgho | N 97 P 22 K 50 S 12 | 150 kg/ha d'urée 100 kg phosphate ammoniaqué 120 kg sulfate de potasse | 2 1 1 |

Etant donnée l'augmentation du volume des précipitations et de leur charge soluble (la résistivité des eaux passe de 92 000 ohms. cm à Saria à 48 800 ohms.cm à Adiopodoumé), les apports par les pluies augmentent en général du pôle sec au pôle humide de la séquence bioclimatique.

Ces apports minéraux et organiques répartis tout au long de la période de croissance des végétaux ne sont pas un élément négligeable du bilan en milieu naturel tropical humide : 25 à 44 kg de chlore, 13 à 25 kg de sulfate et 60 à 110 kg de bicarbonate. Si la plupart des auteurs admettent des apports de 5 à 10 kg/ha/an d'azote minéral par les pluies, bien peu ont étudié les apports d'azote organique (acides aminés des poussières, pollens, spores, etc..) à la faveur des pluies (MATVEEV et BRYZGALO, 1969). Or, ces apports d'azote organique sont très importants en zone tropicale humide forestière (N organique = 2 fois N minéral à Abidjan et 3 fois à Lamto), mais diminuent en zone de savane à mesure que les pluies (et les arbres) sont moins abondants.

1.2 Les apports par les engrais sous cultures

Rappelons d'abord que si les apports d'engrais minéraux sont nuls dans le milieu naturel, ils sont très variables sous les diverses cultures testées, dont le tableau 8.2 ne donne qu'un échantillon réduit. Sous la plantation d'hévéas (jardin grainier de l'IRCA à l'Anguédédou), il n'y a pas eu d'apport minéral. Sous la cacaoyère de l'IFCC à Divo, les apports furent assez réduits les trois premières années (200 à 375 g. par pied de 5-12-24), sauf en potassium (84 Kg/ha/an de K en moyenne). A l'opposé, sous bananeraie (IRFA à Azaguié) et sous culturesfourragères (ORSTOM à Adiopodoumé), les apports en azote et potassium dépassent 300 à 500 unités par hectare, apports fractionnés en 5 à 10 doses par an. Entre ces extrêmes, les cultures de mais et de sorgho que nous avons prises en compte pour les bilans géochimiques ont reçu, selon la fertilité des sols et la destination des résidus de culture (recyclage sur place ou exportation des tiges et feuilles), de 60 à 100 unités d'azote par cycle, de 10 à 70 unités de potassium, de 10 à 35 unités de phosphore et 6 à 30 unités de calcium et la moitié de cette dose de magnésium. Phosphore, calcium et magnésium sont

appliqués en une seule dose avant le semis, tandis que l'azote et la potasse sont distribués en deux doses (moitié avant le semis et moitié à la floraison).

1.3 Les apports résultant des remontées biologiques

Pour tenter d'expliquer la richesse relative des horizons superficiels des sols sous couvert forestier par rapport à ceux qui sont recouverts d'une savane herbacée, certains auteurs font appel aux remontées d'éléments nutritifs par divers animaux et par le réseau racinaire puisant dans les zones profondes des matériaux en voie d'altération pour les concentrer ensuite à la surface du sol (DUCHAUFOUR, 1970; LOVERING, 1959).

De fait, il existe sous forêt un gradient négatif très rapide de concentration en nutriments de la surface du sol vers les horizons profonds. Ce gradient existe également dans les sols sous savane (voir les profils du chapitre 1), mais il est moins marqué; il provient essentiellement de l'apport massif de nutriments par la litière qui atteint 8 à 12 t/ha/an sous forêt et de 1 à 9 t/ha/an sous savane, au cas, fort improbable, où celle-ci ne brûle pas chaque année. (LAUDELOUT et MEYER, 1954; CHARREAU, 1970 et 1972; HUTTEL et BERNHARD-REVERSAT, 1975; ROOSE, 1978, 1978 et 1979). Une fraction des éléments minéraux de cette litière provient sans aucun doute de ces remontées minérales profondes qui vont à contre courant des pertes par lixiviation, mais malheureusement, nous ne disposons à ce jour d'aucun moyen pour les estimer.

Quant aux animaux qui prélèvent à grande profondeur des matériaux fins et incomplètement altérés pour construire leurs édifices épigés (BACHELIER, 1963 et 1973; BOYER, 1956, 1958, 1973; DE PLOEY, 1964; GRASSE et NOIROT, 1959; JOSENS, 1972, LEE, 1974; MALDAGUE, 1959, 1970; NYE, 1955), ils sont actuellement rares (Saria, Bouaké) ou absents (Adiopodoumé, Anguédédou, Azaguié, Divo, Korhogo, Gonse) du paysage. Par contre, l'activité des mille pattes, vers de terre et termites

(Trinervitermes) est importante mais limitée aux cinquante premiers centimètres du sol; cette activité sera discutée au paragraphe relatif aux cycles internes, car ces animaux ne font qu'aérer le sol, brasser les horizons superficiels en les mélangeant aux résidus de la digestion partielle de la litière et influencer l'humification et la minéralisation des matières organiques. Dans les stations étudiées, les horizons contenant des minéraux altérables sont généralement développés à grande profondeur (5 à 40 mètres) et hors d'atteinte des racines (cuirasse imperméable à Gonse et Saria). Il faut noter par ailleurs que sous les cultures sarclées comme le mais, l'activité de la mésofaune est extrêmement ralentie par suite de l'usage répété des pesticides. Comme le réseau racinaire est également limité aux horizons superficiels, les remontées biologiques sont quasi nulles dans le milieu aménagé pour les cultures à cycles courts.

2 – LES FLUX NÉGATIFS OU FLUX SORTANT DU SYSTÈME

Il s'agit essentiellement des pertes sous formes solubles ou solides par érosion, par lixiviation (c'est-à-dire consécutif à l'entraînement par les eaux de drainage profond) et par exportation avec les récoltes végétales. Les pertes par voie gazeuse (CO₂, N₂, NH₃ par exemple) n'ayant pu être contrôlées au cours de ce travail, il n'en sera pas tenu compte.

2.1 Les pertes chimiques par érosion

Les pertes moyennes par érosion comprennent des éléments en solution dans les eaux de ruissellement (voir colonne 5 des tableaux 8.3 à 8.13) représentant les schémas de bilan géochimique) et des éléments liés à des solides dans les terres de fond et dans les suspensions fines (elles sont chiffrées pour une année moyenne colonnes 4 et 5 des tableaux 8.3 à 8.13). Pour avoir des détails sur cet aspect de la question, il faut se reporter aux rapports de synthèse régionnale (ROOSE et al., 1971 à 1980) auxquels nous renvoyons le lecteur.

Sous végétation naturelle (forêts ou savanes protégées des feux) les volumes ruisselés et les masses de terre érodée étant peu importants, les pertes chimiques sont faibles : les pertes par érosion sont nettement plus réduites que les apports par les eaux de pluie, sauf en ce qui concerne la silice, l'alumine et le fer qui sont toujours abondants dans les terres érodées. Les pertes totales par érosion (terres et ruissellement) varient de 8 à 15 kg/ha/an de carbone, l à 3 kg d'azote, 0.1 à 0.3 kg de phosphore, 0.7 à 1.5 kg de calcium, 0.3 kg de magnésium (très constant), 0.7 à 1.6 kg de potassium, 0.1 à 0.3 kg de sodium, 10 à 40 kg de silice, 6 à 30 kg d'alumine, 5 à 10 kg d'oxyde de fer. La masse de la terre érodée est constituée avant tout de quartz, représenté d'ailleurs dans toute la gamme granulométrique.

Sous culture, les pertes chimiques par érosion sont très variables. Dans les plantations d'hévéas (Anguédédou), de cacaoyers (Divo) et de palmiers à huile et là où le sol est protégé par des plantes de couverture ou par un sous-étage de recru forestier, les pertes par érosion sont aussi faibles que sous les forêts voisines. Il peut toutefois y avoir quelques problèmes d'érosion en cas de fortes pentes et lorsque la terre est si pauvre que les plantes de couverture ont du mal à s'installer. C'est un problème temporaire et très localisé : un apport modéré d'engrais minéraux complets permet de le résoudre aisément. Par contre, sous maïs, sorgho et les autres cultures sarclées à cycle court qui couvrent mal le sol, la masse des terres érodées augmente fortement de telle sorte que les pertes chimiques sont considérables, en particulier en carbone (80 à 1900 kg/ha/an), en azote (15 à 180 kg/ha/an), en magnésium (10 à 35 kg/ha/an), en calcium (15 à 70 kg), en potassium (10 à 55 kg) et en phosphate (3 à 30 kg).

Les pertes sont d'autant plus élevées que le climat est agressif, la pente forte et les techniques culturales mal adaptées aux conditions régionales. A cet effet, il faut attirer l'attention sur les risques d'érosion inhérents à la pratique des labours répétés en région subéquatoriale : ils entraînent le mélange des horizons superficiels humifères à des horizons profonds beaucoup moins riches en humus, moins stables et moins résistants à la battance et ils laissent le sol à nu pendant de nombreuses semaines sans aucune protection contre

la battance des pluies agressives. Les importants transports de terre constatés en début des cycles culturaux présentent à la longue un danger réel pour l'équilibre chimique du milieu déjà très pauvre.

2.2 Les pertes chimiques par les eaux de drainage profond

Les pertes d'éléments solubles dans les eaux de drainage seront évaluées à partir des teneurs moyennes (tableaux 7.2 à 7.4) et du volume moyen du drainage profond en année moyenne (tableaux 6.10 et 6.11); elles sont présentées en détail à la colonne 6 des tableaux 8.3 à 8.13 et résumées aux tableaux 8.14 et 8.15.

Tableau 8.14: Evolution des pertes par drainage; des pertes totales par érosion et drainage et de la proportion des pertes solubles par rapport aux pertes totales en fonction de la couverture végétale et du climat.

| | Pertes solubles par drainage Kg / ha / an Vég. Nat. cultivée | | Pertes tot érosion et Vég. nat. | drainage | % de soluble par rapport aux pertes par érosion et drain. Vég.nat. cultivée | | |
|--------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------|---|------------------------|--|
| | 1 . | 2 . | 3 | 4 | 5 | 6 · | |
| Adiopodoumé Azaguié Divo | 646 297 350 | 642 1699 [*] (350) | 704 465 490 | 90.969 3.900 | 93% 68% 73% | 11.% 49%** (73%) | |
| Korhogo Saria P7 Gonse | 143 58 7 | 93 11 - | 254 (574) ^{**} 161 | 5.682 7.381 - | 61% 11% 7% | 3% 1% · _ | |

Notes *: très forte fertilisation et irrigation sur bananeraie

[;] jeune jachère subissant encore une érosion non négligeable

on n'a pas tenu compte des colloïdes lessivés dans les eaux de drainage

Tableau 8.15 : Variation des pertes chimiques solubles dans les eaux de drainage en milieu naturel et cultivé, en fonction de la zone bioclimatique en kg/ha/an

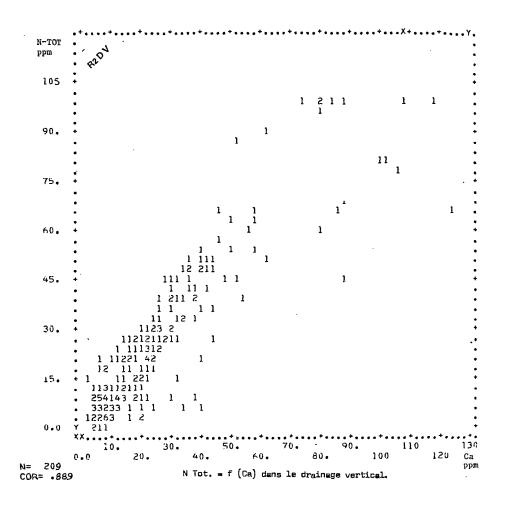
| PERTES en KG/HA/AN | | ZONE FORESTIERE SUBEQUATORIALE milieu | | SOUDANIENNE ieu | SAVANE PRESAHELIENNE milieu | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------|--------------------|--------------------------------|---------------------|--|
| | Natur el | cultivé (divers) | Naturel | cultivé (maïs) | Naturel | cultivé (sorgho) | |
| Carbone Azote Phosphore | (17)64 à 74 12 à 30 0.3 à 2 | 7 à 124 14 à 157 0.3 à 7 | 13 6 1.2 | 3 4 0.3 | 1 - 1.5 0.6 - 2.5 | 0.3 1.6 0.02 | |
| Calcium | 22 à 47 | 28 à 217 | 11 | 8 | l à 11 | 2.7 | |
| Magnésium | 8 à 24 | 24 à 95 | 5 | 1 | 0.3 à 3 | 0.7 | |
| Potassium | (7) 45 à 69 | 45 à 273 | 21 | 1.5 | 0.6 à 4 | 0.6 | |
| Sodium | 10 à 25 | 12 à 22 | 3 | 0.9 | 0.2 à 6 | 1.1 | |
| Silice | 28 à 68 | 35 à 60 | 18 | 12 | 1 à 22 | 3 | |
| Alumine | 0.6 à 2.8 | 0.6 à 3.2 | 2.7 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | |
| Fe ₂ 0 ₃ | 0.8 à 2.5 | 0.8 à 5 | 0.6 | 0.7 | 0.1 | 0.1 | |
| S0 | 22 à 50 | 7 à 243 | 16 | 26 | 1 à 4.6 | 0.4 | |
| C14 | 15 à 48 | 15 à 378 | 9 | 5 | 0.2 à 3 | 0.4 | |

L'examen du tableau 8.14 (colonne 1) fait apparaître que, dans le milieu naturel, les pertes en éléments solubles dans les eaux de drainage augmentent à mesure que le climat est plus humide, ce qui est logique, puisque le drainage profond moyen augmente sans que les teneurs ne changent beaucoup. D'un autre côté, comme les pertes par érosion sont assez voisines sous savane protégée et sous forêt, la proportion d'éléments migrant en solution dans les eaux de drainage et de ruissellement est d'autant plus forte que le climat est humide (voir colonne 5, tableau 8.14). En définitive, les pertes totales par érosion et drainage ont tendance à augmenter dans le même sens (cf. colonne 3); les irrégularités dans l'ordre des pertes sont imputables d'une part, à l'érosion relativement élevée que laisse se développer la jeune jachère herbacée de Saria, et d'autre part, à la faible charge soluble des eaux de percolation recueillies sous la forêt du Téké (Azaguié) (le sous-bois étant souvent exporté pour le paillage des bananeraies voisines et le sol privé des produits de la minéralisation de la litière). Notons cependant qu'il n'est pas tenu compte dans ce tableau des colloïdes migrant dans les eaux de drainage, nous y reviendrons dans le chapitre 12 de la discussion.

Sous culture, les pertes solubles dans les eaux de drainage évoluent dans le même sens, tout au moins lorsque la fertilisation est peu élevée (cas du mais et du sorgho) (cf. colonnes 2 et 4 tableau 8.14). A Azaguié, c'est le niveau élevé de fertilisation qui provoque des pertes solubles si importantes sous la bananeraie.

Comme sous culture, la part de l'érosion sous forme solide (quartz, fer et argile) devient largement prépondérante, la proportion des pertes solubles est toujours plus faible sous culture que sous végétation naturelle (cf. colonnes 4 et 6, tableau 8.14).

Si on examine la variation des pertes chimiques dans les eaux de drainage en fonction de la zone climatique, (tableau 8.15), on constate que les pertes moyennes sont très faibles dans la région des savanes présahéliennes, non négligeables dans la zone des savanes soudaniennes et moyennes à très importantes dans la zone forestière subéquatoriale. Cependant, les risques de lixiviation ne deviennent notables que dans le cas de cultures exigeant de fortes fumures que ni



| MEAN | ST.DEV. | REGRESSION LINE | RES.MS. |
|----------|---------|--------------------------------------|---------|
| x 27.377 | 23.647 | $X = .87717^{*}Y + 3.2651$ | 117.97 |
| Y 27.488 | 23.961 | $Y = .90067^{\frac{1}{x}}X + 2.8306$ | 121.13 |

FIG.8.1 L'azote (surtout NO_3) participe activement à la lixiviation des bases ($NO_3 = \frac{+}{2} 0.9 \text{ de N tot.}$).

le sol, ni le réseau racinaire ne parviennent à fixer (cf. bananeraie, ananas, maïs); nous avons déjà montré au paragraphe 71.4, combien les teneurs en nutriments dans les eaux de drainage peuvent être variables sous culture en fonction du type de végétation, de la quantité, de la qualité et du mode de répartition des engrais en relation avec les besoins physiologiques des plantes et aussi en relation avec les précipitations. Les travaux culturaux et les traitements phytosanitaires (nématicides) peuvent également avoir une incidence sur ces pertes en éléments solubles dans la mesure où ils favorisent le développement des racines en profondeur (GODEFROY, ROOSE, MULLER, 1975).

Il apparaît au tableau 8.15 que des quantités notables de matières organiques (C et surtout N), de silice, de bases et d'anions peuvent migrer dans les eaux de drainage profond en milieu naturel dans les régions tropicales humides. Le phosphore, le fer et l'alumine sont très peu abondants dans ces eaux, mais ils peuvent migrer à la surface des sols ferrallitiques et ferrugineux, associés aux particules fines. Les conditions physico-chimiques de la solubilisation du fer et de l'alumine (ainsi que du phosphore) ne sont pas atteintes dans les eaux qui percolent dans les horizons supérieurs des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux (eaux bien aérées et faiblement acides) (SEGALEN, 1964).

Sous l'influence de fortes fumures minérales, les pertes en solution de sulfates, chlorures, calcium, potassium et dans une moindre mesure de magnésium et de nitrates augmentent considérablement (cf. la bananeraie d'Azaguié ou la culture de mais à Adiopodoumé). L'utilisation des engrais n'a jamais entraîné une augmentation significative des pertes en solution de silice, de fer, d'alumine ni de phosphore.

Les raisons de la mauvaise fixation des bases, et en particulier du calcium, sur le complexe absorbant ne sont pas évidentes: en effet, la capacité d'échange des horizons superficiels est généra-lement peu saturée. La lixiviation du calcium (voir figure 8.1) générale dans tous nos essais, serait imputable à la libération de nitrates et à la formation de HCO₃ lors de la minéralisation des matières organiques du sol en milieu naturel et à l'usage intensif d'engrais minéraux

acides et concentrés sous cultures (sulfates, chlorures et engrais azotés sous toutes ses formes). CRAS (1975) a montré que dans les sols sur calcaire du Liban, la décarbonatation se poursuivait sous l'action du CO₂ et des nitrates apportés par la pluie et par la minéralisation des matières organiques du sol. La lixiviation des bases entraîne forcément une acidification plus ou moins rapide du sol, encore accélérée si on exporte aussi tous les résidus de culture (cas des cultures de sorgho en zone soudanienne).

2.3 Les pertes par l'exportation des récoltes

L'exportation des éléments chimiques (lors des récoltes) ne concerne en général que le milieu cultivé. Cependant, on devrait comptabiliser dans ce paragraphe les herbages broutés par le bétail qui circule dans la savane, le bois de chauffage et de charpente, et les fruits sauvages "cueillis" dans la nature, le sous-bois coupé dans la brousse pour pailler les plantations voisines et surtout les feux de brousse qui minéralisent instantanément les pailles et les branchages. Ces événements, fréquents dans le milieu naturel africain toujours peu ou prou exploité, provoquent des pertes de matières organiques et minérales pour les réserves du sol. Ainsi, le simple passage du fœu dans la savane à Andropogon de Saria a entraîné la perte de plus de 80% du carbone, de l'azote et du soufre constituant les pailles. De plus, les cendres sont partiellement emportées par le vent ou par les premières pluies (violentes tornades de fin de saison sèche) : on connait d'ailleurs la faible teneur en matières organiques des sols de savanes soumises aux feux annuels.

En absence de données précises sur les diverses pertes observées en milieu naturel, nous limiterons notre discussion aux exportations par les cultures (cf. colonnes 7 et 12 des tableaux 8.3 à 5.13).

Tableau 8.16: Exportations minérales par des grains et pailles de céréales ainsi que par les bananes (Kg/ha/an).

| | Adiopo - épis 3t/ha/an | (Mais) Pailles +spathes 6t/ha/an | | - (Mais) Pailles spathes 4t/ha/an | Saria - grains 2t/ha/an | pailles | Azaguié (banane) 35t/ha/an |
|------------------|------------------------------|----------------------------------|----|---|-------------------------------|-----------|----------------------------------|
| С | 1200 | 2400 | _ | | 900 | 2300 | - |
| N | <u>54</u> | <u>48</u> | 38 | <u>50</u> | <u>40</u> | 9 | <u>63</u> |
| P | 9 | 13 | 6 | 5 | 6 | 2 | 3 |
| Ca | 1.5 | <u>15</u> | 4 | 10 | 0.2 | 9 | 7 |
| Mg | 3 | 8 | 2 | 10 | 3.2 | 5 | 8 |
| K | <u>12</u> | <u>54</u> | 10 | <u>45</u> | <u>7</u> | <u>59</u> | 155 |
| Sio ₂ | 4 | <u>15</u> | 1 | 6 | 4 | <u>36</u> | ~ |
| so ₄ | _ | 18 | 1 | 3 | 1 | 2 | |

Note: Les spathes sont les enveloppes qui entourent les épis de mais

: l'exportation par les pailles est souvent plus importante que par les grains.

Il ressort du tableau 8.16 que les exportations minérales par les récoltes (grains et fruits) concernent surtout l'azote, la potasse et le phosphore; ces pertes sont nettement plus élevées que les apports par les pluies. Le déséquilibre est encore plus accentué lorsque les pailles et autres résidus de culture sont exportés (cas le plus fréquent en milieu traditionnel qui ne dispose pas des moyens mécaniques nécessaires pour les enfouir) : les pailles en effet sont relativement riches en azote, potasse, calcium et silice (36kg/ha de silice dans les pailles d'une récolte moyenne de sorgho).

Ainsi del'utilisation des résidus de culture (homologues des litières forestières) va donc dépendre pour une large part la nécessité des apports minéraux (N, P, K et Ca + Mg), le taux de matières organiques du sol, la capacité d'échange de cations, la vitesse de l'acidification des sols sous culture, la stabilité de la structure et la résistance du sol à l'érosion. C'est donc là un point essentiel; tant sur le plan de l'équilibre chimique du sol que pour le maintien des propriétés physiques favorables à la croissance des végétaux.

Signalons enfin que les pertes minérales lors de la récolte des cabosses de cacao, du caoutchouc et de l'huile de palme sont très réduites. Ces cultures sont particulièrement bien adaptées à ces régions humides, dont elles protègent parfaitement les sols (OLLAGNIER et al., 1978) grâce à un sous-étage de recru forestier ou de plantes de couverture.

3 - LES FLUX INTERNES

En dehors des mouvements de matières qui entrent ou sortent de la "boîte noire", il faut aussi considérer l'intervention des cycles à l'intérieur même des horizons superficiels du sol (cf. le mélange des horizons superficiels du sol par la mésofaune) et des échanges accélérés entre le couvert végétal, l'horizon humifère et les végétaux. Nous aborderons ici l'étude de trois de ces flux internes au système sol-plante, ayant trait au lessivage de la voûte foliaire par les eaux de pluie, au recyclage des litières et à l'activité de la mésofaune.

3.1 : le pluviolessivage

En quatre sites couvrant la séquence bioclimatique, des eaux de pluie ont été recueillies à ciel découvert et sous divers couverts végétaux, en vue d'estimer leur charge soluble. Au paragraphe 8.1.1. (tableau 8.1), sont rapportés les teneurs et les quantités d'éléments concernés. Seules les pluies captées au-dessus ou à l'écart du couvert végétal représentent des apports réels au système étudié, mais il suffit d'examiner les résultats du tableau 8.1 pour constater que, lors du passage des gouttes au travers de la voûte forestière d'Adiopodoumé, les eaux de pluie s'enrichissent dans tous les éléments dosés et particulièrement en carbone (teneur 6 fois plus forte), en magnésium (teneur 5 fois plus forte) et surtout en potassium (teneur 13 fois supérieure). Cette augmentation de teneurs, bien connue des auteurs, n'est pas due exclusivement à la diminution des volumes arrivant effectivement au

sol (14% d'interception moyenne par la forêt au même endroit à Adiopodoumé), mais aussi aux poussières déposées sur le feuillage (CROIZAT, 1974), et surtout aux sécrétions minérales et organiques de la végétation (BERNHARD-REVERSAT, 1975).

Ces phénomènes de pluviolessivage sont certainement moins développés sous les cultures sarclées à cycle court (mais) qui occupent beaucoup moins le terrain dans l'espace et dans le temps qu'une forêt. Sous savane, le pluviolessivage est d'autant plus réduit que les teneurs en éléments solubles sont plus faibles sous les herbes et que le volume des pluies diminue vers le nord en même temps que la densité des arbres: or, sous les arbres, la charge soluble des pluies est toujours nettement plus élevée que sous les herbages (cf. Saria, ROOSE et al., 1979). Ces restitutions rapides* de quantités notables d'éléments nutritifs (555 kg/ha/an sous les forêts de la région d'Abidjan et moins de 100 kg/ha/an sous les savanes soudano-sahéliennes des environs de Ouagadougou) n'enrichissent pas réellement le milieu, mais contribuent à maintenir une végétation luxuriante dans les zones chaudes et humides dont les sols sont très pauvres en nutriments. Ces restitutions solubles n'influencent guère la "boîte noire" que nous étudions, car elles sont immédiatement récupérées par le chevelu racinaire très dense à la surface du sol.

Note: Le pluviolessivage a été chiffré à la colonne 14 des tableaux

8.3 à 8.13 : il ne concerne que la quantité d'éléments acquise
lors du passage de la pluie à travers la voûte foliaire.

Tableau 8.17 : Production de litière fine (t/ha/an) dans quelques forêts tropicales
----- - d'après BERNHARD-REVERSAT (1975) -

| | Type de forêt | Pluies annuelles (mm) | Litière fine t/ha/an | SOURCE |
|--|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--|
| Côte d'Ivoire Banco plateau Banco talweg Yapo versant Yapo Framire | Sempervirente " " " Plantation | 2100 2100 1800 | 11.9 9.2 9.6 8.6 | BERNHARD-REVERSAT (1975) " " " |
| Zaire | Sempervirente | - | 12.3 - 15.3 | LAUDELOUT et al, (1954) |
| Ghana | Semi-décidue | 1650 | 10.5 | NYE, (1961) |
| Nigéria | Sèche de plaine | 1200 | 5.6 | MAGDE, (1965) |
| Amazonie | Humide de plateau | 1500 | 6.7 - 7.9 | KLINGE et al., (1968) KLINGE, (1974) KIRA, (1974) WEBB et al., (1969) |
| Amazonie | Humide de plaine | 1500 | 7.5 - 10.7 | |
| Malaisie | Humide | 2700 | 10.5 | |
| Australie | Humide subtropicale | – | 8. 6 | |

3.2 Le recyclage des éléments contenus dans les litières et les résidus de culture

Chaque année, des masses importantes (1 à 20 t/ha/an) de matières végétales mortes se déposent à la surface du sol ou au sein de celui-ci (racines). En région tropicale, aucune litière ne s'accumule d'une année à l'autre. En effet, sous forêt, la minéralisation de la litière est très rapide grâce aux conditions climatiques humides et chaudes. En savane, l'homme (artisanat, habitat), le bétail, les termites et surtout les feux de brousse, consument la majorité des litières produites. Cependant, dans la zone soudano-sahélienne de Saria, nous avons observé dans une parcelle de savane protégée des feux et du bétail, que 25% des matières végétales trouvées à la surface du sol en début de saison sèche (3.3 à 9 t/ha) était constitués de litière datant de l'année précédente; la litière peut donc s'accumuler en zone sèche, mais dans la grande majorité de la région, les savanes brûlent chaque année.

Sous forêt, la litière fine constituée de feuilles, de fruits, de fleurs et de branchettes (à l'exclusion du bois mort) peut atteindre 7 à 15 t/ha/an (cf. tableau 8.17). Nous n'avons procédé à aucune mesure de litière sur les parcelles forestières de notre dispositif, mais BERNHARD-REVERSAT et HUTTEL (1970 et 1975) ont travaillé dans des stations suffisamment semblables aux nôtres (Banco et Yapo) pour que nous puissions nous référer à leurs travaux.

Les chutes de litière fine sont donc très importantes sous les forêts tropicales, beaucoup plus qu'en région tempérée (BRAY et GORHAM, 1964; DOMMERGUES, 1963); elles diminuent dans les forêts dégradées et dans les régions sèches (forêt semi-décidue) ou d'altitude.

En tenant compte d'une production moyenne variant de 8 à 10 t/ha/an de litière sèche en fonction des précipitations et des teneurs mesurées par BERNHARD-REVERSAT (1975) à Yapo et au Banco, on a estimé l'immobilisation temporaire dans les litières de 94 à 218 kg/ha/an d'azote, de 3 à 10 kg de phosphore, de 105 à 68 kg de calcium, de 38 à 19 kg de magnésium et 22 à 59 kg de potassium (cf. tableau 8.3 à 8.8 colonne 12). La libération de ces éléments contenus dans la litière est progressive et variable en fonction des éléments (K beaucoup plus vite libéré que Ca ou N), de l'activité microbiologique ainsi que de leur lixiviation par les pluies. La majorité de ceuxci sont très rapidement recyclés grâce à la densité du chevelu racinaire colonisant l'horizon humifère superficiel.

Sous les savanes de Korhogo, Saria et Gonse, nous avons pesé, plusieurs années de suite, les parties aériennes des végétaux contenus dans des placeaux caractéristiques de 1 à 4m2; en saison sèche, la litière de feuilles d'arbres et des herbes varie de 2 à 9.5 t/ha selon le développement des hautes herbes (Andropogon). L'immobilisation minérale que représente cette masse de matières organiques varie considérablement d'une année à l'autre en fonction de la date de prélèvement, de la taille des herbes et du mode de dissociation du matériel végétal et des éclaboussures de sol qu'il porte (cf. les rapports ROOSE et al., 1978 à 1980). Cette immobilisation a atteint 5 à 15 kg/ha/an d'azote, 0.5 à 5 kg de phosphore, 10 à 36 kg de calcium, 3 à 10 kg de magnésium, 11 à 32 kg de potassium, 27 à 52 kg de silice et 3 à 8 kg de Fe_2O_3 et d'alumine (cf. tableaux 8.9 à 8.13, colonne 12). Aux parties aériennes, il faudrait encore ajouter l'apport des racines dont une bonne partie meurt chaque année et participe à l'humification; malheureusement, nous ne disposons d'aucune estimation précise à leur sujet. Notons enfin que, si la masse végétale accumulée chaque année par la savane peut être aussi forte que celle des litières forestières (soit 9 t/ha/an), les immobilisations minérales sont nettement plus faibles sous savane que sous forêt, en

particulier en azote (immobilisation litières savane/litière forêt = 1/10), phosphore, calcium, magnésium et potassium (Im. sav/forêt = 1/2 à 1/3). En revanche, les teneurs en silice des herbes de savane sont souvent supérieures à celles des feuilles d'arbres; les feux de brousse libèrent chaque année de 25 à 52 kg/ha de silice d'origine végétale en traversant les savanes.

Sous culture, les litières (ou résidus végétaux après la récolte des fruits ou grains) sont le plus souvent brûlées ou exportées comme nous l'avons signalé au paragraphe 82.3 En absence d'information précise sur les litières sous plantation d'hévéas, de bananiers et de cacaoyers, nous nous limiterons à rappeler que l'immobilisation minérale par 4 à 6 t/ha/an de pailles de sorgho et maïs représente 9 à 50 kg/ha/an d'azote, 2 à 13 kg de phosphore, 9 à 15 kg de calcium, 5 à 10 kg de magnésium, 45 à 59 kg de potassium et 6 à 36 kg de silice (cf. tableau 8.16). Du sort réservé à ces pailles dépend pour une bonne part, l'équilibre minéral et organique des sols et les propriétés physiques liées à la dynamique de l'eau et à la résistance à l'érosion.

3.3 Le brassage des horizons superficiels par la mésofaune

On pourrait s'étonner de trouver encore quelques éléments solubles dans les horizons superficiels des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux soumis depuis tant de siècles à la lixiviation par les eaux de drainage. Cela découle en réalité des "remontées biologiques", du recyclage rapide des minéraux immobilisés dans les litières et des remontées profondes par les racines et la mésofaune des éléments minéraux en voie d'altération ou de lixiviation.

Nous avons vu au paragraphe 81.3 qu'il ne nous était pas possible de chiffrer les remontées biologiques profondes. Par contre, nous avons effectué quelques observations précises sur les remontées de terre par la mésofaune et leur rôle de perforation et de brassage des horizons superficiels et des résidus végétaux et animaux que celle-ci rencontre. Des séries d'observations étalées sur 3 à 5 années ont été effectuées sur la production de turricules par les

vers de terre dans la forêt du Téké à Azaguié et sur la dynamique des termitières épigées de Trinervitermes (un genre de termites qui récolte des fourrages et des grains) à Saria et Gonse (cf. ROOSE, 1976). De plus, des inventaires ont été réalisés en fin d'expérimentation à Adiopodoumé (R2 et R3), à Divo et Korhogo, qui indiquent la quantité de matériaux façonnés par divers petits animaux, juste après l'époque de l'année où ils ont été le plus actifs (saison des pluies).

Les résultats de ces études sur l'activité de la mésofaune ont été publiés dans divers rapports (ROOSE, 1976, 1978, 1979 et 1980), dont nous allons extraire ici les conclusions concernant les aspects géochimiques (cf. tableaux 8.3 à 8.13, colonne 13). Au chapitre 9, nous verrons les conséquences de leur activité sur la texture des horizons superficiels (voir aussi tableaux A7.13 à 19 qui comparent la composition moyenne des matériaux remontés à celle des sols voisins).

Rappelons tout d'abord qu'il n'existe pas sur les parcelles étudiées de termites qui puisent à grande profondeur les matériaux nécessaires à la construction de grands édifices aériens, du type des "termitières cathédrales". L'activité des animaux étudiés est réduite aux horizons humifères et limitée par la nappe graveleuse à Azaguié et l'horizon sablo-argileux ocre à Saria et Gonse (30 à 40 cm). En mélangeant la terre fine prélevée à la base de l'horizon appauvri aux résidus de litière, les termites et les vers de terre déposent à la surface du sol des matériaux plus riches que le sol en place. Il n'est pas possible de considérer ces matériaux comme un apport net à la surface du sol, mais seulement comme un cycle interne qui recoupe plus ou moins les phénomènes de minéralisation de la litière.

Tableau 8.18 : Remontée d'éléments nutritifs par la mésofaune en milieu naturel

| Poids de Terre (Kg/ha/an) Animaux Vers | ADIOPO DOUME R3 4000 vers, iules | AZAGUIE 50000 vers | DIVO . 14000 vers | KORHOGO . 5000 vers,iules fourmis | SARIA P7 . 400 termites trinervi- termes | GONSE 1200 termites trinervi termes |
|--|----------------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|---|
| C N P tot. | 122 11 1 | 1565 105 7 | 886 78 6.5 | 98 5.2 2.1 | 6 0.3 0.1 | 18 0.8 0.1 |
| Ca tot. Mg " K " Na | 1.3 1.4 0.8 0.2 | 27 17 127 20 | 77 11 16 4.4 | 4.3 2.9 8.1 | 0.4 0.3 0.5 | 0.8 0.4 0.4 0.1 |

Ces chiffres sont établis d'après les quantités de terre remontées au-dessus de la surface du sol et les compositions de ces terres données dans les tableaux A7 (13 à 19).

Comme on peut le constater au tableau 8.18, ce cycle est d'importance variable selon le site, la formation végétale, la texture du sol et la nature des animaux actifs.

D'après nos observations, la masse de terre transportée par la mésofaune est beaucoup plus importante (5 à 50 t/ha/an contre 0.4 à 1.2 t/ha/an) là où les vers de terre peuvent se développer durant une longue saison des pluies. Pourtant, dans la zone tropicale des savanes soudano-sahé-liennes à saisons très contrastées, nous avons observé de très nombreuses petites termitières (1300 nids/ha), mais les masses de terre concernées restent modérées; sans doute les différences de masse sontelles en relation avec la durée de la saison humide où ces animaux sont les plus actifs et avec le rytime de renouvellement beaucoup plus rapide des turricules de vers (quelques mois) que des termitières (7 à 8 ans pour les nids des Trinervitermes, selon JOSENS, 1972).

La texture du sol semble aussi avoir une grande importance. C'est dans les sols argilo-finement sableux d'Azaguié que la production de turricules est la plus forte. A Adiopodoumé (forêt aussi humide que celle du

Téké), une très forte proportion de sables grossiers dans les horizons superficiels (60 à 70%) semble réduire l'activité des vers de terre.

A Divo où le climat est plus sec qu'à Adiopodoumé et le profil limité par un horizon gravillonnaire (53% de refus) dès 20 centimètres de profondeur, l'activité des vers de terre est élevée (6 à 25 t/ha en décembre 1976) parce que la terre fine est plus argileuse et plus riche chimiquement. Nous avons été très étonné de trouver une moyenne de 5 t/ha de matériaux façonnés par divers petits animaux à la surface de la parcelle ERLO de Korhogo, alors que le sol est chimiquement très pauvre et gravillonnaire dès la surface, que le climat est très contrasté et que les feux de brousse brûlent chaque année la majorité de la production végétale. Des études couvrant plusieurs cycles saisonniers pourraient peut-être nous préciser si les agrégats d'origine animale persistent et s'accumulent pendant plusieurs années de suite.

A Saria et Gonse, nous n'avons étudié en détail que les termitières épigées, très nombreuses dans ce paysage de savane à épineux. La violence des feux de brousse et la sévérité de la saison sèche empêche probablement le développement des populations de vers de terre ou réduisent fortement leur activité, tout au moins dans les horizons superficiels. Dans son étude sur les Bellicositermes et autres constructeurs de grandes termitières cathédrales, BOYER (1973) conclut également à l'importance de la texture du sol sur le développement et la répartition des termitières.

Mais turricules et termitières épigées ne représentent qu'une petite partie des terres remuées par les vers de terre et les termites. Dans la savane de Lamto (Centre Côte d'Ivoire), LAVELLE (1974) a montré que si les turricules représentent 20 à 30 t/ha/an, il faut compter 800 tonnes de terre sèche et 100 kg de litières sèches qui passent à travers le tube digestif de ces animaux qui minéralisent plus d'une tonne de matières organiques par hectare et par an. Cet énorme travail de brassage est à l'origine de la discontinuité qui s'observe, tant aux analyses que sur lames minces, entre ces horizons homogénéisés par la mésofaune et les horizons d'argile tachetée sous-jacents étroitement liés aux produits de l'altération de la roche mère.

L'analyse des nids épigés et des turricules de vers de terre (cf. tableaux A7 13 à 19) montrent que ces matériaux sont nettement plus riches que le sol environnant (cf. ROOSE, 1976). Cela ressort surtout des analyses totales (C, N, P, bases totales), alors que les teneurs en phosphore assimilable (méthode OLSEN) et en bases échangeables de ces matériaux sont assez voisines de celles du sol. Ce sont surtout les matières organiques, le potassium et le calcium qui sont plus abondants que dans le sol (beaucoup moins le sodium); ceci souligne le rôle de brassage joué par ces animaux évoluant en surface et qui mélangent les matériaux fins prélevés à la base des horizons appauvris aux résidus de la digestion plus ou moins poussée des litières.

En conclusion, le pluviolessivage, l'humification et la minéralisation des litières, ainsi que le brassage des matières organiques et des matériaux fins puisés en profondeur par la mésofaune sont des cycles internes qui accélèrent la circulation des nutriments entre le sol et les végétaux, tout en maintenant à la surface de celui-ci un horizon humifère relativement riche en éléments nutritifs, surtout en milieu forestier. Ces cycles internes mettent en jeu des quantités de matières très variables en fonction de l'activité biologique du milieu: en particulier, le brassage du sol par la mésofaune peut concerner des tonnages considérables. Naturellement, cela ne modifie pas directement les bilans considérés globalement à l'échelle de la "boîte noire", mais l'existence et l'intensité de ces cycles l'influencent sans doute indirectement par suite de la mobilisation accrue (ou au contraire par l'immobilisation) de certains éléments , consécutive à des changements d'état. Ceci est vrai surtout pour les nutriments, qui connaissent un "turnover" très rapide en milieu tropical suffisamment humide.

4 - LES STOCKS CONTENUS DANS LA VÉGÉTATION ET LE SOL

Dans les paragraphes précédents nous avons quantifié les flux de matières qui entrent ou sortent de la "boîte noire" ou qui circulent rapidement à l'interface végétation-sol. Il nous faut aborder maintenant l'évaluation des stocks de matières que constituent le sol et la végétation pérenne des parcelles d'observation. En comparant les flux aux stocks, nous pourrons ensuite conclure sur la vitesse d'évolution du sol et sur sa dynamique.

4.1 Immobilisation minérale dans la végétation

Par immobilisation minérale dans la végétation (ou minéralomasse), il faut entendre la masse totale des éléments contenus dans la végétation à son plein épanouissement (en début de saison sèche).

De cette masse totale, il est possible de distinguer plusieurs fractions dont le rôle diffère dans le bilan géochimique.

- . Il y a d'abord des <u>apports</u>, constitués par les remontées biologiques des éléments puisés en profondeur par les racines et la fixation d'azote atmosphérique par divers microorganismes.
- . Ensuite, il y a des <u>pertes</u> : c'est la récolte principale (fruits et graines, latex, etc...). A cette récolte principale s'ajoute bien souvent l'exportation des pailles ou des résidus de culture.
- . Puis, il y a des <u>cycles internes</u> : pluviolessivage, recyclage des litières et des matières organiques du sol.
- . Il reste enfin des parties végétales plus stables, ce sont les stocks proprement dits, qui persistent d'une année à l'autre, tout en étant capables d'évoluer : ce sont les troncs, les grosses branches et les racines des arbres, les souches des touffes d'herbe et des arbustes de savane, les troncs et les souches de certaines cultures pérennes.

Nous garderons dans ce mémoire le sens usuel de l'immobilisation minérale de l'ensemble de la végétation en plein épanouissement tout en négligeant la masse racinaire sur laquelle notre information est trop embryonnaire (estimation par défaut). Nous emprunterons aux travaux de HUTTEL (1971-1975) et BERNHARD-REVERSAT (1975) les estimations de la minéralomasse des forêts du Banco (sur sables tertiaires comme Adiopodoumé) et de Yapo (sur schistes comme la forêt du Téké) très voisines de nos stations. MARTIN-PREVEL (1962 à 1974) nous a aimablement fourni des estimations sur la minéralomasse de la bananeraie d'Azaguié. Nous présenterons nos propres estimations des immobilisations minérales par les savanes herbeuses (peu ou pas d'arbres) et par les cultures de maïs et de sorgho (cf. tableaux 8.3 à 8.13 colonne 10)

Tableau 8.19: Immobilisation minérale dans différents types de végétation.

| · | | FORET DENSE HUMIDE BANCO YAPO [*] | | | | *** S HERBEUSES ,KORHOGO, GONSE) | CULTURES Banane Céréales -raie (ADIO.,KORH., (AZA)** SARIA) | | | | KORH., |
|----------------|------------------|--|------|-----|---|----------------------------------|--|-----|-----|---|--------|
| Masse sèche | Végétale t/ha | 510 | 470 | 2.7 | à | 5 | 17 . 5 | | 4.5 | à | 7 |
| N | kg/ha | 1400 | 1000 | 5 | à | 15 | 250 | | 50 | à | 88 . |
| P | 11 | 100 | 70 | 0.5 | à | 2 | 31 | *** | 8 | à | 11 |
| Ca | 11 | 1200 | 1900 | 9 | à | 36 | 160 | | 8 | à | 14 |
| Mg | 11 | 530 | 180 | 3 | à | 10 | 60 | | 8 | à | 12 |
| K | 11 | 600 | 350 | 11 | à | 24 | 835 | | 55 | à | 66 |

^{* :} d'après BERNHARD-REVERSAT et HUTTEL, 1975

太太太

On constate au tableau 8.19 que la forêt immobilise pour de nombreuses années une quantité considérable d'éléments minéraux et en particulier 1000 à 1400 kg d'azote à l'hectare, 1200 à 1900 kg de calcium, 350 à 600 kg de potassium, 180 à 360 kg de magnésium et

tx: d'après MARTIN-PREVEL et al., (1962 à 1974)

[:] d'après les mesures d'herbes et les analyses sur des échantillons prélevés à Korhogo, Saria (P7) et Gonse (cf. ROOSE 1978, 1979 et 1980). On n'a pas tenu compte des arbustes et des arbres, très peu nombreux.

70 à 100 kg de phosphore. Chaque année 5 à 10% de cette masse minérale retourne au sol sous forme de litière : une quantité équivalente est récupérée par le chevelu racinaire extrêmement dense, après minéralisation rapide des matières organiques et intégration temporaire dans le sol. Sauf pour le calcium, les stocks minéraux sont légèrement plus élevés dans la forêt du Banco que dans celle de Yapo.

En comparaison, les immobilisations minérales par une savane composée de hautes herbes sont très faibles (1/20 à 1/100 de celles des forêts denses), mais les restitutions sont presque de 100% de la production: elles ne représentent que 15 kg d'azote à 1'hectare, 2 kg de phosphore et 20 à 80 kg de bases (Ca + Mg + K). La masse minérale stockée dans les troncs, les stipes et les racines de certaines cultures pérennes peut être importante, comme dans le cas des bananeraies (250 kg d'azote et 835 kg de potassium). A maturité complète, on peut trouver dans un champ de mais ou de sorgho bien développé, 50 à 90 kg d'azote à 1'hectare, 8 à 15 kg de phosphore, calcium et magnésium ainsi que 50 à 70 kg de potassium, soit environ trois fois plus d'éléments nutritifs que dans la savane herbacée voisine.

Il doit être clair que seules les parties pérennes de la végétation (bois et souches) constituent un réservoir, un stock d'éléments nutritifs dans lequel les parties dynamiques en croissance (tiges, feuilles, racines) peuvent éventuellement puiser. Dans le cas des forêts, il faudrait soustraire à la minéralomasse du tableau 8.19, les éléments correspondant aux feuilles ou à la litière (5 à 10%). Cependant, comme l'estimation néglige les racines (10%), nous avons laissé les chiffres tels quels : le lecteur comprendra que ces chiffres sont approximatifs (très large variation dans la nature). Dans les savanes des parcelles d'observation, seule la production herbagère a été étudiée : les arbres sont absents ou peu nombreux (et dans le paysage leur densité est très variable). Il faut noter cependant que les stocks minéraux (surtout N, Ca et K) dépendent essentiellement de la densité des arbres et arbustes, laquelle diminue progressivement du sud au nord, à mesure que le climat est plus sec et plus contrasté. De toute façon, la masse végétale en savane (herbes et arbres) ne dépasse guère 1/5 à 1/20 de celle des forêts denses humides (CESAR, 1971).

Sous certaines cultures pérennes (hévéa, palmier, bananier), la masse minérale stockée dans les parties pérennes des plantes peut être élevée comme sous forêt : elle s'annule dans les cultures de céréales (comme sous savane herbeuse).

Il faut donc retenir le <u>rôle d'accumulateur</u> d'azote, de potasse et des autres nutriments <u>joué par les arbres</u>. En savane, les feux annuels réduisent considérablement les possibilités d'accumulation de l'azote et des minéraux apportés par les pluies.

4.2 La réserve minérale du sol

Le sol contient en réserve quantité d'éléments plus ou moins mobilisables (cf. tableaux 8.3 à 8.13, colonne 11 et fiches analytiques de chaque profil au chapitre 1). La fraction utile de cette réserve dépend de l'enracinement des plantes et du volume de terre mis à sa disposition, naturellement ou artificiellement par les techniques culturales. Que la végétation soit forestière, herbacée ou cultivée, la densité de racines est très forte en surface, mais diminue selon une loi exponentielle avec la profondeur, à moins qu'un obstacle (horizon tassé ou gravillonnaire, acide ou engorgé) n'arrête brutalement le développement du système racinaire. On devrait donc tenir compte de ces différences de profondeur d'enracinement pour comparer les réserves minérales du sol d'une station à une autre et d'une culture à une autre. Mais, en l'absence de données locales précises, il nous a semblé préférable de considérer les stocks dans les 30 premiers centimètres du sol, là où les différences sont les plus sensibles.

Une autre difficulté surgit lorsqu'on compare le milieu naturel et les parcelles cultivées voisines : la densité apparente du sol varie très largement (d.app. = 1 sous forêt et 1.45 à 1.55 sous cultures dans l'horizon 0 à 10 cm à Adiopodoumé). Pour cette raison, le stock sur une épaisseur donnée de sol peut finalement paraître plus élevé sous culture que sous forêt par suite du simple tassement, alors qu'en réalité le milieu s'est appauvri.

Tableau 8.20 : Stock; d'éléments nutritifs dans les horizons superficiels (30cm) des sols sous végétation naturelle ou cultivée - Kg/ha/30cm

| · | С | N | P | | | Ca | 1 | Mg | 1 | K |
|--|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | | | tot. | ass. | tot. | : éch. | tot. | éch. | tot. | éch. |
| Adiopodoumé, forêt dense 2aire | 45.670 | 4.279 | 1.125 | 81 | 1020 | 151 | 1.181 | 151 | 1182 | 66 |
| Azaguié, forêt sempervirente | 26.250 | 2.405 | 637 | 52 | 467 | 27 | 1.131 | 27 | 2300 | 74 |
| Divo, forêt semi-décidue | 29.290 | 2.045 | -5 32 | _ | 1646 | 1221 | 1203 | 417 | 642 | 62 |
| Korhogo, savane arbustive brûlée | 22.570 | 1.096 | 533 | 58 | 777 | 243 | 1860 | 243 | 2.800 | 173 |
| Saría, jachère herbacée | 14.545 | 1.130 | 280 | 40 | 1555 | 1071 | 2968 | 319 | 13.945 | 129 |
| Gonse, savane arborée | 21.400 | 1.451 | 326 | 36 | 2995 | 579 | 2249 | 579 | 1641 | 116 |
| Adiopodoumé . forêt . sol nu . mais dose l | 45.670 34.180 23.310 | 4.279 2.530 2.310 | 1125 1.609 2.093 | 81 131 313 | 1020 411 2676 | 151 29 202 | 1181 923 1083 | 151 144 202 | 1182 1755 1737 | 66 37 70 |
| Korhogo . savane brûlée . sol nu . maïs dose 1 . maïs dose 2 | 22.570 20.583 22.260 22.974 | 1.096 1.241 1.275 1.175 | 533 533 533 533 | 58 49 49 78 | 710 732 800 933 | - 466 435 473 546 | 1860 1828 1814 1805 | 243 227 95 184 | 2.800 2.975 2.996 (4.634) | 99 121 (229) 142 |
| Saria . jachère . sol nu . sorgho fertilisé | 14.545 13.205 15.310 | 1.130 1.124 1.087 | 280 268 410 | 40 40 102 | 1555 1641 1641 | 1071 1142 1199 | 2.968 2.653 2.314 | 319 313 340 | 13945 13242 15427 | 129 110 71 |

Au tableau 8.20 sont consignés les stocks d'éléments nutritifs contenus dans les horizons superficiels (30 cm) des sols sous végétation naturelle et sous cultures céréalières fertilisées, sous différents climats.

a) sous végétation naturelle

Il apparaît que les sols forestiers sont plus riches en carbone et surtout en azote que les sols des savanes soudaniennes et présahéliennes. Par contre, ces derniers sont généralement moins pauvres en bases échangeables et totales (moins de lixiviation). Les stocks en phosphore assimilable (méthode Olsen) sont très réduits partout, tandis que les réserves en phosphore total semblent dépendre plus de la roche mère que du climat actuel (on sait que le phosphore est peu lixivié).

b) sous culture

En zone forestière, si l'on compare les caractéristiques chimiques de l'horizon superficiel (0-10 cm) de trois parcelles voisines à Adiopodoumé (cf. tableau 51.3 page 107 : ROOSE, 1973), on constate que la parcelle dénudée pendant 4 ans est la plus pauvre pour tous les éléments et que les teneurs en carbone et azote sont nettement plus élevées sous forêt. Par contre, en ce qui concerne les bases et le phosphore, la parcelle sous culture qui s'est tassée et qui a reçu quelques engrais minéraux et du fumier, présente des teneurs un peu moins faibles que sous forêt. A Korhogo, l'écart entre les réserves sous savane brûlée chaque année, celles en sol nu depuis 3 ans et celles correspondant à des cultures de mais fertilisées est encore plus étroit et irrégulier d'une année à l'autre et d'un élément à un autre. Après trois années de traitements radicalement différents (savane, sol nù, maïs fertilisé), la comparaison des résultats d'analyses d'échantillons composites est assez décevante. Sur sol nu, on observe une baisse sensible des teneurs en carbone, phosphore assimilable et calcium échangeable, mais le sol sous jachère est très pauvre en azote et potassium échangeable (feu). On observe peu de différence sous mais fertilisé à une dose correspondant aux immobilisations; par contre, sous forte

fumure (180 N, 40 P, 140 K, 60 Ca, et 30 Mg) les taux de carbone, phosphore assimilable, calcium et potassium échangeables sont parmi les moins faibles.

A Saria, la comparaison des stocks minéraux du sol de la parcelle 7 ne montre guère mieux l'évolution chimique du sol après 4 années de traitements radicalement différents : les différences sont peu significatives d'après l'analyse d'échantillons composites de sol en fin d'expérimentation. C'est à peine si le sol nu très érodé est un peu plus pauvre que celui de la parcelle sous jachère où les herbes se sont bien développées en 4 ans (4 tonnes d'herbe produite la dernière année). Le sol de la parcelle cultivée en sorgho et correctement fertilisée est légèrement plus riche en matières organiques, phosphore total et assimilable et en potassium total, mais plus pauvre en potassium échangeable. L'évolution du stock chimique du sol est donc lente tout comme la reconstitution des propriétés biologiques du sol par la jachère.

Tous ces résultats semblent indiquer qu'il n'est pas utopique de conserver, et même dans certains cas d'améliorer, les qualités chimiques de ces sols très désaturés et très pauvres, en pratiquant une exploitation conservatrice du sol et de l'eau et en apportant un minimum d'engrais minéraux immédiatement utiles aux plantes cultivées. Le taux de matières organiques (surtout C) et les propriétés physiques qui y sont liées (structure, réserve en eau et en minéraux) diminuenforcément lors du défrichement (surtout après une forêt). Aussi, faut-il prévoir une politique cohérente de conservation des matières organiques pour maintenir leur niveau le plus élevé possible dans le sol : défrichement progressif, utilisation sur place des résidus de culture, fumier, rotations et jachères cultivées.

5 - TENDANCES ÉVOLUTIVES DU SOL SELON SON UTILISATION

Les données disponibles concernant les apports de matières, les pertes, les stocks et certains cycles internes au système "sol-plantes" ont été réunies dans les tableaux 8.3 à 8.13 et dans les rapports régionaux (ROOSE et al., 1971 à 1980). Ces données sont encore grossières et incomplètes, surtout en ce qui concerne les remontées biologiques, les pertes

gazeuses et les stocks minéraux immobilisés dans les racines ou dans les arbustes des savanes. Elles ne permettent pas d'établir un bilan géochimique complet (il manque, par exemple, les teneurs en bicarbonate dans les eaux), mais elles sont déjà suffisamment précises pour dégager les principales orientations de l'évolution actuelle de la partie la plus active du sol en milieu naturel ou cultivé tout au long de la séquence bioclimatique. Nous présenterons les résultats en considérant successivement le cas des forêts denses, des savanes et des cultures.

5.1 Sous les forêts denses humides, les pertes par érosion sont infimes, même sur de fortes pentes (25%), mais la lixiviation par les eaux de drainage particulièrement abondantes sous les forêts sempervirentes (Adiopodoumé et Azaguié) entraîne une désaturation du complexe absorbant beaucoup plus forte que sous forêt semi-décidue (Divo). Les pertes de matières (400 à 700 kg/ha/an de solubles et solides) ne sont pas totalement compensées par les apports minéraux non négligeables que fournissent chaque année les précipitations (apports solubles par les pluies = 226 à 322 kg/ha/an). Or, les horizons superficiels sont de loin les plus riches; le bilan y est donc positif, grâce à des mécanismes de compensation que nous avons englobés sous le terme de "remontées biologiques", mais que nous n'avons pu quantifier. Il s'agit de la capture par les racines profondes d'éléments en voie d'évacuation de la "boîte noire" (les eaux de nappe sont en effet moins chargées que les eaux de percolation recueillies vers 150 cm de profondeur), de la remontée d'éléments provenant de minéraux en voie d'altération, de fixation de l'azote atmosphérique par différents microorganismes, de remontées de minéraux altérables par la mésofaune qui creuse des galeries à grande profondeur pour assurer son équilibre hydrique, etc... D'autres cycles internes interviennent aussi très activement pour maintenir la fertilité des horizons superficiels des sols forestiers : le pluviolessivage (300 à 550 kg/ha/an d'éléments rapidement recyclés) et surtout la minéralisation des litières qui ne s'accumulent pas sous les forêts tropicales comme dans les forêts des régions froídes ou tempérées. Les éléments minéraux libérés progressivement par les litières sont très rapidement et presque intégralement récupérés par

le réseau racinaire, extrêmement dense et actif au voisinage de la surface du sol.

On note également que <u>les flux sont réduits par rapport aux stocks</u> compris dans le sol (ainsi que dans la végétation arborescente). Ceci est vrai pour l'ensemble des éléments totaux, mais non pour les fractions facilement mobilisables et assimilables par les plantes, en particulier le phosphore assimilable ainsi que les bases échangeables. Par ailleurs, le sodium n'est présent qu'à l'état de trace dans la biomasse et dans les horizons humifères des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux : il n'est pas accumulé par la végétation et se concentre dans les eaux de drainage avec la silice.

Le ramassage du bois mort et l'exploitation d'une centaine de mètres cubes de bois fort ne mettent pas en péril l'équilibre biochimique de ces forêts tropicales. En revanche, le défrichement, l'andainage (mécanisé) et le brûlis des branchettes entraînent nécessairement une baisse sensible des teneurs en matières organiques et en nutriments du sol, rapide durant les premières années, puis beaucoup plus lente une fois que le nouvel équilibre sol-végétation est atteint. Si ces trois opérations, en particulier l'andainage, sont effectuées précautionneusement, comme dans le cas de la cacaoyère de l'IFCC à Divo, ou des palmeraies, cette baisse de potentiel, corrigée par des apports modérés d'engrais et par l'installation d'une plante de couverture (Pueraria, Centros ema, Flemingia), ne met pas en danger la productivité des plantes pérennes (OLLAGNIER et al., 1978). Par contre, si ces trois opérations sont effectuées sans précaution pour protéger l'horizon humifère superficiel et sont suivies d'extirpation des racines avant la culture mécanisée de plantes annuelles, les pertes par érosion et drainage auront vite épuisé les stocks minéraux accumulés pendant des décennies par la végétation forestière.

Le rôle d'accumulateur d'azote, de potasse, de calcium et des autres nutriments par les arbres dans la biomasse et dans l'horizon humifère paraît donc capital.

5.2 Sous les savanes arbustives soudaniennes ou présahéliennes, le bilan entre les pertes et les apports minéraux est à peu près équilibré. En effet, si les apports (67 à 175 kg/ha/an) sont indubitablement plus faibles que sous la forêt dense, les pertes par érosion et surtout par drainage y sont un peu plus réduites également; ceci est surtout vrai pour les sols qui ont une bonne réserve hydrique, car sur les sols gravillonnaires perméables, en zone soudanienne (cf. Korhogo) et même soudano-sahélienne (cf. Saria protection), des pertes modérées en bases peuvent se produire par lixiviation dans les eaux de drainage lors de séquences très pluvieuses.

Si la savane est protégée des feux et du pâturage, le bilan est largement positif, si on considère les remontées biologiques et les remontées d'éléments en solution en période sèche avec l'eau capillaire (difficile à chiffrer). Cela se traduit immédiatement par un enrichissement de la flore (en particulier des strates arbustives et arborées), par une augmentation sensible de la production végétale (cf. Saria P7 et protection), par l'accumulation d'une litière de paille, par l'amélioration des propriétés physiques du sol (surtout la capacité d'infiltration grâce au développement de l'activité de la mésofaune) et, à plus long terme, par une lente augmentation des réserves minérales assimilables des horizons superficiels. Cependant, cette amélioration chimique n'est pas apparue nettement après 3 à 4 ans d'expérimentation; cela peut se comprendre en comparant la faiblesse des flux au regard de l'importance des stocks contenus dans les horizons superficiels (et aussi en raison de l'hétérogénéité du sol).

Si la savane est parcourue chaque année par les feux et par le bétail et que les meilleures pailles sont exportées pour des usages domestiques ou artisanaux, l'espoir d'améliorer le faible taux de carbone, d'azote, de phosphore et de bases échangeables de ces sols est réduit à néant. La protection végétale du sol (d'abord arborée, puis arbustive, enfin herbacée) s'amenuise, le sol se tasse et s'engorge, des pellicules de battance se forment entre les touffes d'herbes, le ruissellement se développe et déclanche une érosion en rigole, et ravine, très active dans les paysages de Korhogo ou dans le plateau Mossi à forte densité de population humaine et animale.

Le paysan traditionnel d'Afrique de l'Ouest ne se trompe pas quand il estime que les sols de savane sont d'autant plus fertiles que la densité et la taille des arbres est élevée. Même si le défrichement lui demande davantage de travail que dans les zones exclusivement herbacées, il préfère s'installer sur les terres boisées. Cela se justifie pleinement puisque, si le bilan chimique est positif, c'est d'abord dans la strate arborescente que s'acculument les nutriments, ce qui réduit les risques de feux et accélère la reconstitution des réserves de l'horizon humifère (naissance d'une litière végétale en surface alors qu'en savane (parcourue régulièrement par les feux) seul, le réseau racinaire en continuelle réorganisation, alimente la réserve organique du sol).

5.3 Sous cultures

a) Sous cultures à cycle court (quelques mois à un an), 1' équilibre du bilan est rompu par l'augmentation des pertes par lixiviation, par l'exportation et surtout par l'érosion.

Si on veut obtenir des rendements significatifs, il faut donc apporter des engrais en quantité suffisante, car sous cultures sarclées, les remontées biologiques tendent à disparaître et les pluies ainsi que la minéralisation des matières organiques du sol ne fournissent ni assez, ni assez vite, les éléments minéraux indispensables au développement harmonieux des plantes cultivées. Certes, le sol contient des réserves importantes en nutriments, mais elles ne sont que très partiellement mobilisables pour les plantes.

La minéralisation rapide des matières organiques du sol, l'exportation par la récolte (surtout si on enlève les résidus de culture) jointes aux pertes par drainage et érosion ont tôt fait, dans les régions tropicales humides, d'épuiser les stocks de nutriments facilement assimilables. Une saine gestion du patrimoine foncier conduit à limiter les pertes (par érosion et lixiviation) et à donner aux plantes cultivées les éléments dont elles ont besoin, au moment où elles en ont besoin, tout en maintenant l'environnement favorable à un enracinement profond. Il est clair cependant que l'apport d'engrais nécessaire dépasse largement les exportations par la récolte vu les pertes par érosion et lixiviation, impossibles à éviter au coeur de la saison

des pluies (cf. bananeraie d'Azaguié, essais ananas et mais à Adiopodoumé

La lixiviation des nutriments

En zone tropicale sèche, la lixiviation des engrais n'est pas un problème majeur (cf. Saria P7). Par contre, en zone tropicale humide, comme le sol ne peut retenir efficacement les éléments minéraux, dès qu'on apporte des doses importantes d'engrais, les concentrations en sulfate, chlorure, Ca, K, NO2, et Mg des eaux de percolation augmentent sensiblement. Ces pertes minérales entraînent une acidification du milieu, d'autant plus rapide qu'on utilise généralement des engrais concentrés très acidifiants (azote, sulfate, chlorure). Sous la bananeraie d'Azaguié, les pertes par lixiviation ont atteint 100% des apports de calcium et magnésium, 60% de l'azote et du potassium et seulement 10% du phosphore. Sous ananas, la lixiviation s'élève à 207 kg/ha/an d'azote, 175 kg de K₂0, 390 kg de CaO, 280 kg de MgO et à peine 2 kg de P₂O₅. Sous maïs, les pertes en N, Ca, Mg ne sont pas négligeables dès qu'on apporte 60 unités d'azote (30 à 50% de pertes d'azote). Ces pertes peuvent être réduites en intensifiant la demande des végétaux (culture dense et hâtive), en augmentant le pouvoir fixateur du sol (conservation des matières organiques) et surtout en fractionnant les apports et en les distribuant en fonction des besoins physiologiques des plantes, des disponibilités du sol et des risques de drainage.

Les exportations minérales

La récolte principale entraîne généralement une exportation notable d'azote et de potasse à laquelle s'ajoutent des pertes non négligeables de bases si on exporte les résidus de culture. Ces dernières exportations sont particulièrement préjudiciables au bilan organique du sol et donc à ses propriétés physiques (structure, rétention en eau et en nutriments).

L'érosion

L'érosion est tellement plus intense sous culture que sous végétation naturelle (1000 fois plus forte sous mais que sous forêt à

Adiopodoumé et 50 à 100 fois plus forte sous sorgho que sous savane à Saria), qu'elle masque complètement les autres flux de matières. Alors que dans le milieu naturel, les pertes en solution dominent, et augmentent d'autant plus que le climat est humide, sous culture la majorité des transports s'effectuent sous forme solide à la surface du sol : il s'agit surtout de sables (quartz) et de colloides complexes auxquels sont liés une part importante de nutriments (fer, phosphore, alumine, matières organiques argiles et cations adsorbés) : d'où les très faibles proportions d'éléments sous forme soluble, et ce pour la plupart des éléments, y compris le potassium (cf. colonne 9 des bilans Adiopodoumé et Saria sous culture).

En conclusion, l'apport d'engrais minéraux et organiques est donc encore plus important en culture intensive dans les régions tropicales humides qu'en région tempérée (BOYER, 1970; POULAIN et ARRIVETS, 1971; CHAMINADE, 1972; LEBUANEC, 1973; DEAT, 1975).

b) sous la plupart des cultures à cycle long (plusieurs années), cultures arborescentes avec sous-étage composé de recru forestier ou de plantes de couverture, ainsi d'ailleurs que sous culture paillée, les phénomènes d'érosion sont aussi réduits que sous végétation naturelle (cf. cacaoyère de l'IFCC à Divo); les bilans géochimiques y sont alors assez voisins de ceux du milieu naturel plus ou moins dégradé. Des apports limités d'engrais permettent dans ces conditions de surmonter les déficiences particulières des réserves du sol (IRHO, 1962; PREVOT et OLLAGNIER, 1959; JADIN, 1972; VERLIERE, 1973).

5.4 Remarques complémentaires

Arrivé à ce stade, il faut encore attirer l'attention sur deux faits de portée plus générale concernant d'une part, le fer et l'alumine, et de l'autre, le bilan des matières organiques.

a) l'accumulation relative du fer et de l'alumine

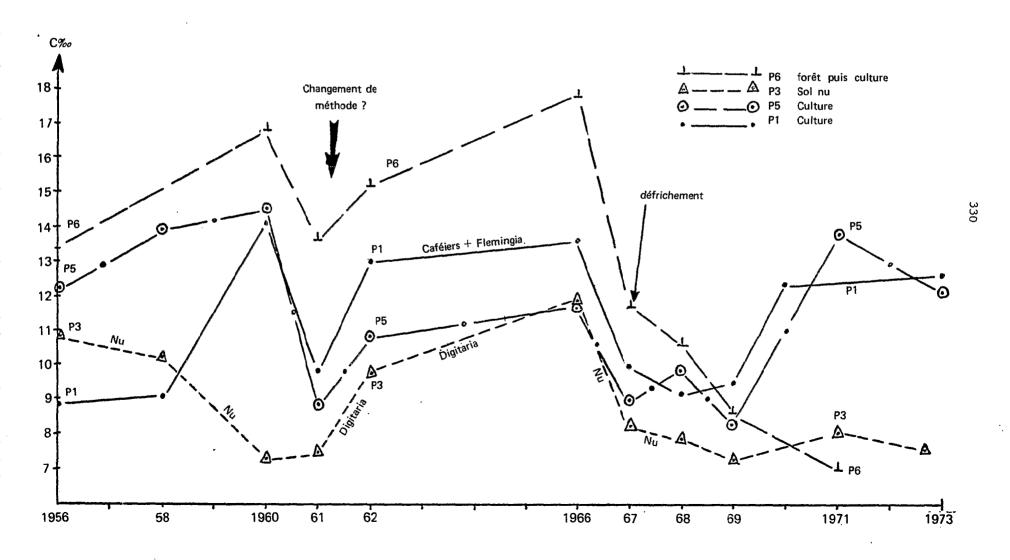
Si l'azote, les bases et les anions migrent en majorité sous forme soluble, le fer et l'alumine (ainsi que le phosphore) ne sont présents qu'à l'état de traces dans les eaux de pluie, de ruis-

sellement, de percolation et de source prélevées tout au long de la séquence bioclimatique; ils migrent presque exclusivement associés aux terres érodées et dans une certaine mesure aux colloïdes lessivés. La silice et le carbone circulent à la fois sous forme soluble dans les eaux de drainage et sous forme solide associée aux terres érodées. Ces résultats sont en accord avec les bilans géochimiques sur colonne qui mettent en évidence des pertes considérables de silice et de bases depuis les niveaux d'altération de la roche mère jusqu'au sommet du profil et une accumulation relative d'alumine et surtout de fer à faible distance de la surface du sol (D'HOORE, 1954; ERHART, 1956; PEDRO, 1965; LELONG, 1969; LEVEQUE, 1975 et 1978; LEPRUN, 1979; BLOT, 1980). Les conditions physico-chimiques qui règnent dans les eaux de percolation (pH = 5 à 7, potentiel d'oxydo-réduction nettement positif, teneurs en matières organiques faible) sont telles qu'il n'est pas possible au fer de migrer en masse sur de grandes distances sous forme so-'luble : tout au plus peut-on prévoir une accumulation absolue limitée par migration à courte distance associée aux colloides lessivés ou sous forme de complexes dans les eaux de drainage et des migrations à l'échelle du versant associé aux terres érodées.

b) le bilan des matières organiques du sol

Une deuxième remarque a trait au bilan des matières organiques du sol. Les apports en matières organiques par la végétation sont considérables (litière, résidu de culture et racines = 2 à 20 t/ha/an de matières sèches), que ce soit dans le milieu naturel ou aménagé. A part le cas où l'érosion est massive, les pertes de matières organiques sont très réduites. Or, une petite partie seulement des matières végétales disponibles s'intègre dans la dynamique des matières organiques du sol. Lors d'un travail précédent (ROOSE, 1973), nous avions d'ailleurs noté que si on cesse tout apport de résidus végétaux au sol (sol nu), les teneurs en matières organiques baissaient rapidement jusqu'à atteindre un niveau constant, fonction du type de sol (sa texture en particulier). Grâce à des cultures appropriées (graminées et légumineuses), il a été possible de ramener en 2 à 4 ans dans le sol un niveau de carbone comparable au niveau de départ (cf. fig. 8-7). La dynamique des matières organiques du sol en zone tropicale humide est donc rapide

Fig. 8.2 EVOLUTION DU TAUX DE CARBONE DE L'HORIZON SUPERFICIEL
EN FONCTION DU TYPE D'AMENAGEMENT
Adiopo doumé, cases d'érosion; 1956 à 1973



(c'est bien connu) et <u>réversible</u> (ce qui est rarement montré) (ROOSE, 1973; TALINEAU, 1974). Cependant, lorsque l'équilibre du carbone dans le sol est stable, comme c'est le cas général sous forêt, plus de 98% du carbone apporté à la surface ou dans le profil s'en échappe sous forme gazeuse (CO₂) (ROOSE et PERRAUD, 1974).

^{*}Note : Tout au moins partiellement réversible.

6 - CONCLUSIONS SUR LES BILANS GÉOCHIMIQUES

De ce chapitre, il est possible de tirer les enseignements suivants:

1 - <u>Dans le milieu naturel</u>, la balance entre les gains et les pertes d'éléments nutritifs est positive; l'excédent de nutriments permet la croissance de la végétation arborescente et l'enrichissement, à plus long terme, et jusqu'à un certain niveau, de l'horizon humifère.

2 - Sous culture, deux cas peuvent se présenter :

Soit il s'agit de <u>cultures arbustives pérennes</u> couvrant parfaitement le sol; la balance est semblable à celle qu'on observe dans le milieu naturel environnant. La correction des carences du sol suffit généralement à maintenir un haut niveau de production.

Soit il s'agit de <u>plantes sarclées qui couvrent mal</u> le sol dans le temps et dans l'espace; le bilan est alors négatif, car les pertes augmentent notablement, alors que certains cycles internes se ralentissent. L'exploitation rationnelle des terres exige qu'on réduise les pertes au minimum (lutte antiérosive, saine gestion des matières organiques) et qu'on les compense par des quantités suffisantes d'engrais minéraux et organiques.

- 3 Les stocks du sol sont nettement plus importants que les flux. Cependant, les flux augmentent lorsqu'on défriche et cultive la terre. A cause de cela, et de l'hétérogénéité du sol, il n'est pas facile de suivre la dynamique du sol à partir de l'analyse successive des terres, surtout dans le milieu naturel, voisin de l'état d'équilibre.
- 4 La végétation a un rôle déterminant sur le bilan géochimique du sol. En tant que couverture végétale de la surface du sol, elle limite l'érosion. Elle fixe des éléments mobiles qui seraient lixiviés sans son intervention. Elle restitue des nutriments par le biais du pluviolessivage et des litières et permet une accumulation de ceux-ci dans les arbres et dans l'horizon humifère des sols forestiers, mais aussi sous culture et sous savane (si toutefois celle-ci est protégée des feux et du

pâturage).

Enfin, après sa mort et son incorporation dans le sol, elle entretient le taux d'humus du sol et les propriétés hydrodynamiques favorables. Nous avons vu qu'elle pouvait encore protéger les colloïdes pendant leur migration à travers le profil.

5 - L'homme modifie considérablement la dynamique du sol, mais pas forcément de façon négative : s'il respecte les lois de la nature, il peut exploiter la terre sans l'épuiser.

S

TABLEAU 8.3 : Schéma de bilan géochimique d'une parcelle sous forêt dense secondaire sur un sol ferrallitique très désaturé sur matériaux argilo-sableux - Résultats exprimés en kg/ha/an - ADIOPODOUME : 1964-1975

| | Pluie 2100mm | APPOR Engrais | <u>T S</u> Remontées Biologi- ques | PErosion (solide) 50kg/ha | R T E S Ruiss. (soluble) 105m3 | | Export. Bois feux | total kg/ha/an | | STO Végét. 510t/h (par dé- faut) | 801 | litière 10 t/ ha/an | Remontée mésofaune 4t/ha/an | Pluvio- lessivage 1800mm en + de l |
|--------------------------------|-----------------|------------------|---|---------------------------------|---|----------------|-------------------------|-------------------|-------------|--|---------------------|---------------------------|-----------------------------------|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Carbone . | 27.3 | 0 | P.M. | 13.04 | 1.18 | 73.92 | P.M. | 88.14 | 85% | _ | 45.670 | _ | 122 | 105.9 |
| Azote | 29,4 | 0 | | 1.07 | 0.47 | 29.48 | | 31.02 | 97% | 1400 | 4.279 | 217.7 | 11 | 15.6 |
| Phosphore | 2.19 | 0 | | 0.034 | 0.08 | 2.07 | | 2.18 | 98 Z | 100 | Ass. 81 Tot.1125 | 10.4 | 1.05 | 2.9 |
| | | | P.M. | | | | | | | | Echang. | | Total | |
| Calcium | 37.8 | 0 | r.m. | 0.21 | 0.59 | 46.64 | P.M. | 47.44 | 99.5% | 1200 | 167 | 68 | 1.3 | 19.8 |
| Magnésium Potassium | 8.4 | 0 | | 0.04 | 0.28 | 30.36 | | 30.68 | 99.8% | 530 | 151 | 38,5 | 1.4 | 31.2 |
| Fotassium Sodium | 6.3 17.2 | 0 | | 0.06 | 0.50 0.20 | 69.08 25.34 | | 69.64 | 99.9% | 600 | 66 | 58.9 | 0.78 | 63.9 |
| DOGICAL | . 17.2 | | | 0.01 | 0.20 | 23.34 | | 25.55 | 99.9% | - | 27 | - | 0.24 | 14.7 |
| sio ₂ | 14.7 | 0 | P.M. | 6.85 | 0.37 | 68.20 | P.M. | 75.42 | 917 | · - | 308.500 | - | 232 | 8.7 |
| A1 ₂ 0 ₃ | 1.7 | 0 | | 6.44 | 0.03 | 2.77 | | 9.24 | 30% | - | 217.900 | - | 180 | 0.3 |
| Fe ₂ 0 ₃ | 0.8 | 0 | | 2.27 | 0.08 | 2.46 | | 4.81 | 53% | - | 137.100 | - | 101 | 1.3 |
| | | | · | | | | | | · | | | | | |
| 50 ₄ | 25.2 | 0 | P.M. | - | 0.33 | 49.72 | P.M. | 50.05 | 100% | - | - | - | | 19.8 |
| Cl | . 44.1 | 0 | | - | 0.29 | 48.40 | | 48.69 | 100% | - | - | | | 44.1 |
| созн | 107.1* | o | | - | 2.9 | 198 | | 200.90 | 1002 | _ | - | | | 217 |
| quar tz | <u>-</u> | 0 | | 19.8 | - | o | · | 19.80 | o | _ | | | 33.50 | - |
| TOTAL | 322.2 | 0 | | 50kg | 7.30 | 646.44 | | 703.56 | 92.9 | 510 t/ha. | 3900 . t/ha. | | 4.000 | 545.2 |

[:] Les éléments colloidaux entraînés dans les eaux de drainage n'ont pas été pris en compte.

Tableau 8.4 : Schéma de bilan géochimique d'une parcelle en mais fertilisé (dose 1) sur un sol ferrallitique très désaturé sur matériaux argilo-sableux, Résultats exprimés en kg/ha/an,

ADIOPODOUME : 1964-1975

| | | PPORT | <u>s</u> | | ERTES | | | | | STOC | K S | CYCLES | INTERNES | • |
|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|--|---|-----------------------------------|--|--------------------------------|---|----------------------------|--|--|------------------------|---------------------|
| | Pluie 2100mm | Engrais | Total | Erosion (solide) 80 + 10 t/ha | Ruiss. (solu- ble) 5250m3 | Drain. (solu- ble) 640mm | Export. 3t/ha/ an épis sec | Tot kg/ha/ an 4+5+6 | al (solu- ble)* % du tot. 5+6/8 | Végét. arbores cente | 4500 t/ha | Résidus culture tiges+ feuilles tspathes ft/hs/an | Remontées mésofaune | pluvio lessivage |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Carbone Azote Phosphore | 27.3 29.4 2.19 | 0 2 x 60 [*] 2 x 10 | 27.3 149.4 22.2 | 1.801,2 143,4 29,89 | 64.79 39.38 3.47 | 7.04 50.56 0.32 | 1.200 54 9 | 1873 233.4 33.7 | 47 397 117 | 0 | 23.310 2.310 Ass.: 313 Tot.: 2093 | 2.400 48 13.2 | o | P.M. |
| Calcium Magnésium Potassium Sodium | 37.8 8.4 6.3 17.2 | 2 x 6 2 x 3 2 x 18 | 49.8 14.4 42.3 17.2 | tota1 47.32 20.35 43.10 9.24 | 22.87 14.98 10.46 5.84 | 124.80 25.60 3.07 19.20 | 1.5 3 12 0.3** | 195.0 60.9 56.6 34.3 | 76% 67% 24% 73% | 0 | Echang 324 202 70 | 8.4 | 0 | Р.М. |
| SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₄ | 14.7 1.7 0.8 | - | 14.7 | 4.520* 2.370* 1.630* | 18.38 ^{*3} 1.47 ^{*8} 3.94 ^{*3} | 1.92** | 1 | 4.573 2.373 1.636 | 12 · 0 · 12 · 0 · 32 | 0 | 308.500 217.900 137.100 | 3.6 | o | Р.Н. |
| SO ₄ C1 CO ₃ H Quartz | 25.2 44.1 107.1 ^x | ? ? | 25.2 44.1 107.1 | 79.385 | 57.8** 21.0** 62.5** | 238.72 33.92 100.48 | | 296.5 54.9 163.0 79.4 | 100X 100X- 100X 0X | 0 | | 18 | o | Р.М. |
| Total | 322.2 | | 516.2 | 90.000 | 326.88 | 642.11 | | 90.969 | 112 | | 4.500 t/ha | | | • |

^{* :} Deux cultures de mais par an

me : Estimations des teneurs par comparaison avec le milieu forestier ou avec des cultures de céréales.

Tableau 8.5 : Scheme de bilan géochimique d'une parcelle d'hévéa non fertilisé à ANGUEDEDOU

Plantation IRCA : 1966-1972

| | AP | P.ORTS | | P | ERTES | , | | | | STOCKS | | CYCLES INTERNES | | |
|--|----------------------------|------------------|---------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|--|-----------------|------|----------------------|
| | Pluie 2100mm | Engrais néant | Remont. | Erosion (solide) 144+54kg | Ruiss. (soluble) | Drain. | Export. Caout- chouc ? | kg/ha/an | tal Soluble [*] % du total | Végéta- tion æbo- rescente | so1 | Litière | | Pluvio- lessivage |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 . | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Carbone Azote Phosphore | 27.3 29.4 2.19 | P.M. | P.H. | 2.98 0.15 0.05 | 1.73 0.85 0.06 | 124.13 78.92 6.85 | Р.М. | 128.84 79.92 6.96 | 982 992 992 | Р.М. | 48.950 4.559 tot.702 01sen : 118 | P.M. | P.M. | Р.Н. |
| Calcium Magnésium Potassíum Sodium | 37.8 8.4 6.3 17.2 | P.M. | P.M. | 0.48 0.09 0.11 0.03 | 0.61 0.28 0.98 0.20 | 31.51 40.81 63.00 14.52 | P.M. | 32.60 41.18 64.09 14.75 | 99Z 99Z 99Z 100Z | Р.М. | echang. 440 277 424 149 | P.M. | P.M. | P.M. |
| SiO ₂ A1 ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ | 14.7 1.7 0.8 | Р.М. | Р.н. | 10.90 8.63 4.67 | 0.60 0.09 0.13 | 44.19. 8.87 10.31 | P.M. | 55.69 17.59 15.11 | 80Z 51Z - 69Z | Р.М. | 385.500 363.500 204.900 | 1 | P.M. | P.M. |
| SO ₄ C1 CO ₃ H Quartz | 25.2 44.1 107 | P.M. | Р.М. | | | | Р.М. | | | P.M. | | P.M. | Р.М. | P.M. |
| Tota1 | 322 - | | | | | | | | | · | 4.300 t | | | |

Tableau 8.6. : Schéma de bilan géochimique d'une parcelle <u>forestière</u> dans la région <u>d'AZAGUIE</u>

sol ferrallitique très désaturé sur schistes - résultats exprimés en kg/ha/an

Forêt du Téké : 1968-1973

| | API | ORTS | | PER | TES | • | *********** | | , | STO | CKS | CYCLES | <u>+</u> | |
|--------------------------------|-----------------|---------|-------------------------|------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------|------------|--------------|--|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | Pluie 1800um | Engrais | Remon- tées biol. | Erosion (solide) 150kg | | Drain. * (soluble) 515mm | Export. bois,feux & paillis | | | forêt Yapo | Sol 30cm Téké | Litières Yapo* 9.6t/ha | Remont. Méso- faune | Pluvio Lessivage Yapo |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | , 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 . | 13 | 14 |
| Carbone Azote | 26.6 23.7 | 0 | P.M. | 11.9 | 3.2 | 63.9 | Р.М. | 79 14.4 | 85% 94% | - | 26.250 2.405 | - | 1565 105 | - 10 |
| Phosphore | 1.8 | ō | | 0.1 | 0.1 | 1.5 | | 1.7 | 94% | 70 | tot:278 Ass: 23 | 4 | tot.7 | 4.2 |
| | | | | | | | | 1 | | | Echang. | | Tot. Echg | 1 |
| Calcium | 33.6 | 0 | P.M. | 0.1 | 1.3 | 21.6 | P.M. | 23 | 99% | 1900 | 104 | 105 23 | 27 11.8 16.8 8.8 | i |
| Magnésium Potassium | . 8 6.2 | 0 | | 0.1 | 0.3 | 7.7 6.7 | | 8, 1 7, 6 | 99% 95% | 180 350 | 27 74 | 23 26 | 16.8 8.8 127 1.8 | 82 |
| Sodium | 14.7 | 0 | | 0.04 | 0.4 | 10.8 | | 11.2 | 99% | - | - | | 19.7 0.5 | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 17 | 0 | P.M. | 30.2 | 1.4 | 28.3 | P.M. | 59.9 | 50% | - | 404.350 | - | 3,350 | - |
| A1203 | 1.7 | 0 | | 24.8 | 0.08 | 1.3 | • | 26.2 | 5% | i | 325.650 | - | 2.800 | |
| Fe ₂ 0 ₃ | 2.4 | 0 | | 8 | 0.14 | 1.6 | | 9.7 | 18% | - | 81.900 | - | 1.050 | |
| so ₄ | - | 0 | P.M. | _ | 1.2 | 22.1 | P.M. | 23.3 | 100% | - | - | - | - | |
| C1 | _ | | | | 0.4 | 16.5 | | 16.9 | 100% | | | ı | | |
| CO ₂ H | _ | | | | (7) | (103) | | 110 | 100% | | | | | |
| Quartz | 0 | | | (74) | | • • • • • | | 74 | 07 | | | | | |
| Total Kg/ha | - | o | - | 150kg | 18kg | 297kg | | 465 | 682 | | | , | | |

^{* :} Extrait de BERNHARD-REVERSAT, 1975

^{**}

[:] Extrait de ROOSE, 1976, p. 13 tableau 1.7

^() CO3H : calculé par balance ionique

Tableau 8.7 : Schéma de bilan géochimique d'une parcelle de bananeraie fertilisée et irriquée à AZAGUIE

Sol ferrallitique très désaturé sur schistes - en kg/ha/an
Bananeraie de l'IRFA, 1966-1973

| | A P Pluie | PORTS | | P E Erosion | RTES | # Drain. | Export. | , , | otal . | S T (Végéta- | OCKS Sol | Litière | CYCLES I | NTERNES Pluvio |
|----------------------------------|------------------|------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------|------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|---------|-----------|-------------------|
| | + irri gation | Engrais | Paillis | (solide) 2000kg | (soluble) 138mm | | | kg/ha/ an 4+5+6 | Soluble* Zdu tot. 5+6/8 | tion ** 17.5t/ ha | (30cm) Téké | Dictor | Mésofaune | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Carbone Azote | (33) | 380 | - 95 | 114.4 8.2 | 19.3 12 | 117 | - 62.5 | 250.7 177.1 | | - 250 | 70.000 5.180 | P.M. | 0 | P.M. |
| Phosphore | 1.8 | 20 | 12 | 1.4 | 0.8 | 2.2 | 3.4 | 4.4 | 68% | 31 | tot.896 Ass.706 | | | |
| Calcium | 44.1 | 271 | 24 | 4.1 | 17.9 | 217.4 | 7 - 1' | 239.4 | 987 | 160 | échan. 3.990 | P.M. | 0 | Р.Н. |
| Magnésium Potassium Sodium | 18.5 11.7 | 115 517 | 28 64 - | 3.2 10 0.7 | 10.8 40 3 | 94.5 274.1 22.1 | 7.6 155 | 108.5 324.1 25.8 | 97 z 97 % - | 60 835 - | 610 574 | · | | |
| | | : | | · · | | | | | | | | | | |
| sio ₂ | . | - | - | 304 | 6.5 | 60 | - | 370.5 | 187 | | 476.700 | P.M. | 0 | P.M. |
| A1203 Fe203 | - | - | - | 240 100 | 0.3 0.8 | 3.2 5 | - | 105.8 | 17 67 | 4 3 8 | 383.600 96.600 | | | |
| so ₄ | - | î | - | - | 34.5 | 242.6 | - | 277.1 | 100% | - | - | P.M. | 0 | P.M. |
| C1 | · - | ? | - | - | 27.6 | 378 | - | 405.6 | 100% | - | - | | 1 | , |
| CO ₃ H Quartz | - | - | - | - (1214) | (27.6) | (126) | - | 153.6 | 1002 | - | _ | | . | |
| | | · | | | | | | | ~ | | | | | · |
| Total en kg/ha | - | <u>-</u> | - | 2000 | 201 | 1699 | - | 3900 | 49 z | - | - | į | | |

^{** :} d'après MARTIN-PREVEL, 1962

Tableau 8.8 - Schéma de bilan géochimique d'une parcelle sous forêt dense semi-décidue secondarisée
sur un sol ferrallitique moyennement désaturé sur granite, Station IFCC près de DIVO : 1967-1974

| | | A | PPORT | s | PE | RTES | | | | | S 7 | OCKS | C. | CLES INTER | NFC |
|---|--|----------------------------|-------------|------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------|
| | | Pluie | Engrais | _ | | Ruiss. (solu- ble) 155m3 | Drain. (soluble) * 235mm | Export. | kg/ha/an 4+5+6 | soluble* Zdu tot. 5+6/8 | Végéta- tion arborée | Sol sur 30 | Litière 8t/ha/ an | Remontée mésofaune | pluvio |
| | | 1 | 2 " | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| | Carbone Azote Phosphore | 20.2 24 1.6 | 0 0 0 | P.M. | 7.91 0.62 0.058 | 2 0.68 0.064 | 17.16 13.87 0.297 | P.M. | 27.1 15.2 0.4 | 71% 96% 86% | P.M. | 29.288 2.045 tot.532 Ass. ? | - 94 3/3 | 886 78 6.5 | P.M. |
| , | Calcium Magnésium Potassium Sodium | 32.6 6.2 4.7 13.9 | 0 0 0 | P.H. | 0.257 0.077 0.140 0.032 | 0.295 0.791 0.104 | 28.20 23.50 45.12 11.52 | P.M. | 29.6 23.9 46.1 11.7 | 997 997 997 997 | P.M. | échang. 1221 417 62 31 | 88 19 22 | 77 11 16 4.4 | P.M. |
| | SiO ₂ A1 ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ | 7.8 1.1 0.8 | 0 0 0 | Р.М. | 19.09 14.14 4.78 | 0.56 0.03 0.05 | 36.43 0.56 0.80 | P.M. | 56.1 14.7 5.6 | 667 47 157 | P.M. | 349.113 321.501 114.332 | - | 2.142 1.652 490 | P.M. |
| 1 | SO ₄ C1 CO ₃ H Quartz | 18.6 15.5 (79) | 0 0 0 | Р.М. | - - - 82.89 | 0.88 0.50 (2.79) | 7.52 15.04 (150) | P.M. | 8.4 15.5 152.8 82.9 | 100Z 100Z 100Z 0Z | Р.М. | | | P.M. | Р.Н. |
| | Total | 226 | 0 | | 130kg | 9.83 | 350 | | 490 | 73% | · | 4.230t/ | | | |

| | | PPORT | r s | PE | RTES | | | | STOCKS | | CYCLES I | NTERNES | |
|--------------------------------|---------------------|---------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|--|--|------|
| | Pluie 1350 mm | Engrais | Remontée biolo- gique | Erosion (solide) 100kg/ha | Ruiss. (soluble) 405m3 | Drain (soluble) *_ 2500m3 | tota kg/ha/ an | soluble % de 8 5+6/8 | Végétation arborée # 0 | Sol sur 30cm 5300t | Litières (5t/herbes) à l'ha. | remontées termites& divers 5t/ha/an | |
| , | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| | | | | | | | | | | | ······································ | | |
| Carbone | 14.9 | 0 | P.M. | 5.46 | 2.11 | 12.63 | 20.20 | 73 % | P.M. | 22.280 | 2.600 | 98 | P.M. |
| Azote | 12.2 | 0 | | 0.46 | 0.81 | 5.88 | 7.15 | 94 % | | 1.208 | 10 | 5.2 | 1 |
| Phosphore | 1.34 | 0 | | 0.12 | 0.10 | 1,22 | 1.44 | 92 % | | tot.533 Ass. 58 | 1.5 | tot.2.1 | |
| | | | | | | | | | | échang. | | tot. | |
| Calcium Magnésium | 25.7 1.4 | 0 | P.M. | 0.059 | 0.85 | 13 | 11.91 | 99 % | P.M. | 466 | 15 | 4.3 | P.M. |
| Potassium | 4.1 | 0 | | 0.117 0.176 | 0.24 0.54 | 5.25 21.25 | 5.50 | 99 % 99 % | ļ | . 216 | 10 15 | 2.9 | |
| Sodium | 2 | 0 | | 0.063 | 0.14 | 2.63 | 2.83 | 98 % | | 13 | 0.5 | - | |
| sio ₂ | 9.5 | 0 | P.M. | 26.36 | 1.26 | 17.88 | 45.50 | 42 % | P.M. | 762.000 | 50 | 645 | P.M. |
| A1 ₂ 0 ₃ | 0.9 | 0 | 0 | 22.45 | 0.15 | 2.68 | 25.28 | 11 % | · | 729,000 | 5 | 560 | |
| Fe ₂ 0 ₃ | 1.8 | o | | 6.34 | 0.12 | 0.58 | 7.04 | 10 % | | 315,800 | 3.7 | 200 | |
| so ₄ | 13.5 | 0 | P.M. | _ | 0.97 | 15.75 | 16.72 | (100)Z | P.M. | - | 7.5 | _ | P.M. |
| C1 | 4.1 | o | [| _ | 0.53 | 8.88 | 9.41 | (100)Z | | _ | - | _ | 1 |
| созн | 64.8 | 0 | | I _ | 3.73 | 37.25 | 40.98 | (100)% | | _ | | l | Ì |
| Quartz | - | 0 | | (38.5) | 0 | - | 38.5 | (O)Z | | | | | |
| Tota l | 173.2 | | | 100 | 11.55 | 142.88 | 254.43 | 612 | | | | | |

() : estimation - P.M. pour mémoire.

Tableau 8.10 : Schéma de bilan géochimique d'une parcelle en mais fertilisé (dose normale) sur un sol ferrallitique ocre gravillonnaire - Bassin de KORHOGO : 1967-1975 -

| 1 | | | · | T | | | | · | 1 | | | | | |
|--------------------------------|--------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|----------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------|----------|---------|
| | Pluie | A P P O R Engrais | T S Rémontée biolo- | Erosion | PERTE Rúiss. | . Drain. | Export. | | tal' Soluble [*] | S T O C K Végéta- | _ sol | litière | remontée | |
| | 1350 1383 | | gique | (solide) 5500kg/ ha | 3375m3 | (soluble) * 2100m3 | colte 2t/ha | kg/ha/ an 4+5+6 | % de 8 5+6/8 | tion | sur 30cm- | 5t/ha de paille de maïs | termites | iessiva |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Carbone | 14.9 | 0 | P.M. | 64.09 | 17.55 | 2.52 | _ | (84.16) | 24 X | 0 | 22.280 | _ | 0 | P.M. |
| Azote | 12.2 | 90 | | 4.38 | 6.75 | 4.20 | 38 | . 15.33 | 71 % . | | 1.208 | 50 | | |
| Phosphore | 1.34 | 20 | | 1.17 | 0.81 | 0.29 | 6 | 2.27 | 48 % | | tot 533 Ass. 58 | 5 | | |
| | | | , | | | | | | · · | | échang. | | | |
| Calcium | 25.7 | 30 15 | P.M. | 3.96 | 7.09 | 7.56 1.26 | 4 | 18.61 | 79% | 0 | 466 | 10 | 0 | P.H. |
| Magnésium Potassium | 1.4 4.1 | 70 | İ | 2.75 6.51 | 2.03 4.49 | 1.47 | 9.6 | 6.04 | 54 % 48 % | | 216 173 | 10 45 | } | |
| Sodium | 2 | 0 | | 2.35 | 1.18 | 0.90 | 0.2 | 4.43 | 47 % | | 13 | 0.5 | | |
| sio ₂ | 9.5 | ·- | P.M. | 811.26 | 10.46 | 11.97 | 1.2 | 833.69 | 3 % | o | 762.000 | 5.5 | 0 | P.M. |
| A1 ₂ 0 ₃ | 0.9 | l ₋ | | 754.06 | 1.28 | 0.46 | 0.2 | 755.80 | 0.27 | | 729.000 | 9 |] | |
| Fe ₂ 0 ₃ | 1.8 | - | | 376.21 | 1.01 | 0.74 | 0.6 | 377.96 | 0.5% | · | 315.800 | | | |
| | | | | | | | | - | | | | | | |
| so ₄ | 13.5 | | P.M. | - | 8.10 | 26.46 | 1 | (34.56) | (100) % | 0 | ? | 3 | 0 | P.M. |
| C1 | 4.1 | - | | _ | 1.69 | 5.25 | - | (6.94) | (100) % | | 7 | ? | 1 | |
| co ₃ H | 64.8 |] - |] | - | 27.34 | 29.82 | - | (57.16) | (100) % | | 7 | ? | ľ | |
| Quartz | - | - | | (3473.26) | - | - | - | (3473.26 | 0 % | | - | - | | |
| Total | 173.2 | | | 5,500 | 89.78 | 92.90 | - | 5682.68 | 3.2% | | | | | |

Tableau 8.11 : Schéma de bilan géochimique d'une parcelle en jachère herbacée à SARIA (P7)

Sol ferrugineux tropical cuirassé vers 50cm - Résultats exprimés en kg/ha/an.

C.R.A. de SARIA (Haute-Volta) 1971-1974

| | | PPORT | | PERTE Erosion | _ | D | T | | | ST(Végéta- | CKS Sol | <u>CYCLES</u> Litière | INTERNES | Pluvio |
|--------------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|--|----------------------------|-----------|
| | Pluie 860mm | Engrais nul | Remontée biolo- gique | | Ruiss. (soluble) 42mm | Drain. (soluble) * 136mm | Export. | tota kg/ha/an 4+5+6 | soluble* Z du tot. 5+6/8 | tion ar- borescen- te = 0 | sur 30 | feuilles +tiges herbes 2t7/ha | termites 400kg/ha an | lessivage |
| | 1 | . 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Carbone | 11.2 | P.M. | P.M. | 8.52 | 1.05 | 1.54 | Р.М. | 11.1 | 23% | P.M. | 14.545 | 1.300 | 5.8 | 20.8 |
| Azote Phosphore | 5.4 2:15 | | | 0.54 0.17 | 0.47 0.12 | 2.54 0.06 | | 3.6 0.35 | 84 % 51% | | 1.130 tot.280 Ass. 40 | 5.4 0.54 | 0.3 | 0 1 |
| Calcium | 18.4 | Р.М. | P.M. | 0.41 | 0.97 | 10.66 | Р.М. | 12 | 97% | Р.М. | échang. | 9.4 | 0.4 | 4 |
| Magnésium | 2.7 | | | 0.21 | 0.20 | 3.25 | , | 3.7 | 94% | | 319 | 2.7 | 0.3 | 0.8 |
| Potassium | 3.4 | | | 1.22 | 0.48 | 3.89 | | 5.6 | 78% | | 129 | 10.8 | 0.5 | 6.4 |
| Sodium | 1 | | | 0.17 | 0.16 | 6.39 | | 6.7 | 97% | | 32 | - | 0.1 | 0.2 |
| SiO ₂ | 5.5 | P.M. | P.M. | 40.29 | 0.45 | 22.17 | Р.М. | 62.9 | 367 | P.M. | 534.000 | 27 | - | 1.6 |
| A1203 | 0.3 | | | 29.89 | 0.02 | 0.15 | İ | 30.1 | 12 | | 464.000 | 4.1 | - | 0.2 |
| Fe ₂ 0 ₃ | 0.3 | | | 10.81 | 0.06 | 0.09 | | 11 | 12 | | 127.000 | 2.7 | 5.3 | 0,6 |
| so ₄ | 13.5 | P.M. | P.M. | _ | 0.90 | 4.57 | Р.М. | 5.5 | 100% | P.M. | _ | 0.8 | - | 0.8 |
| cı cı | 3.2 | | | _ | 0.32 | 3.09 | | 3.4 | 100% | | _ | _ | _ | 2,4 |
| созн | | | | | | | | | | | 1 | | | |
| Quartz | | | | (417.8) | 0 | 0 | | (417.8) | 07 | | | | | |
| Total kg/ha/an | 67.1 | | | 510 | 5.2 | 58.4 | | 574 | 117 | | | | | |

Tableau 8.12 : Schéma de bilan géochimique d'une parcelle de sorgho fertilisé à Saria P7

Sol ferrugineux tropical cuirassé vers 50cm - Résultats exprimés en kg/ha/an - C.R.A. de Saria (1971-1974)

| | . A | APPORT | s | | PERTE | s | | | | STOC | K S | CYCLES | INTERNES | |
|--------------------------------|-------|------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|---|--------------------|---|---------------------|---------------------|
| | Pluie | Engrais | Remon- tée. Biol. | Erosion (solide) 7.3t/ ha | Ruiss. (soluble) 208mm | Drain. (soluble) * 21mm | Exportation grains 2t (pailles 4.5t) | To kg/ha/ an 4+5+6 | soluble* Z du t total 5+6/8 | Végéta- tion arbo rescente - 0 | Sol 8/30cm | Résidus culture =pailles 4.5t/ha | Remont, termites | Pluvio Lessivage |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Carbone | 11.2 | _ | P.M. | 149.7 | 5.4 | 0.3 | 900(+2.300) | 155.4 | 47 | P.M. | 18.840 | 2.300 | P.H. | Р.Н. |
| Azote | 5.4 | 97 | | 11.5 | 3.5 | 1.6 | 40(+ 15) | | 312 | | 1.578 | 15 | | |
| Phosphore | 2.15 | 21.9 | | 2.52 | 1.28 | 0.02 | 6.4(+ 1.8) | 3.8 | 347 | | tot.416 Ass. 20 | 1.8 | | |
| Calcium | 18.4 | | P.M. | 6.1 | 8.4 | 2.7 | 0,2(+9) | 17.2 | 65% | P.M. | échang. | 3.6 | P.M. | P.M. |
| Magnésium | 2.7 | \ <u>_</u> | | 6.9 | 2.4 | 0.7 | 3.2(+5) | 10 | 317 | 1 | 294 | 9.3 | 1 | |
| Potassium | 3.4 | 50 | | 38.2 | 8.6 | 0.6 | 6.8 (+58.5) | 47.4 | 19% | | 148 | 58.5 | | ٠ |
| Sodium | 1 | - | | 5.5 | ı | 1.1 | - | 7.6 | 28% | | 32 | _ | | |
| SiO ₂ | 5.5 | | P.M. | 1.307 | 5.1 | 3.2 | 4 (+36) | 1315 | 0.62 | Р.М. | 534,000 | 36 | P.M. | P.M. |
| A1 ₂ 0 ₃ | 0.3 | _ | İ | 1.055 | 4.1 | 0.1 | 4 (+2.3) | 1056 | 0.1z | | 464.200 | 2.3 | | |
| | 1 | ļ | | 1 | | | | | l i | <u>}</u> | | | . [| |
| Fe ₂ 0 ₃ | 0.3 | - | | 238 | ' | 0.1 | 4 (+2.7) | 239 | . 0.5% | | 127.800 | 2.7 | | • |
| so ₄ | 13.5 | 36 | P.M. | - | 23.2 | 0.4 | 0.8(+2.3) | 23.6 | 100% | P.M. | - | 2.3 | P.M | P.M. |
| C1 | 3.2 | - | | _ | 9 | 0.4 | - | 9.4 | 1002 | | | |]] | |
| CO ⁴ H | | } | 1 | | } | ŀ | | | | [9 | | | | |
| Quartz | | | | (4.480) | 0 | | , | (4.480) | 0.7. | | | | | |
| Tota l kg/ha/an | 67.1 | | | 7.300 | 70 | 11 | | 7.381 | 12 | | | | | |

Quartz évalué.par différence entre l'érosion totale et la somme des éléments analysés,

Tableau 8.13 : Schéma de bilan géochimique d'une parcelle de savane arborescente près de GONSE

Résultats exprimés en kg/ha/an - Forêt de GONSE (Haute-Volta) 1968-1974

| | A | PPORT | s | • ; | PERTE | S | | | 1 | STO | скв | CYCLES | INTERNES | |
|--|---------------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------|
| | Pluie | Engrais nul | Remontée biolo- gique | Erosion (solide) 135+15 kg | Ruiss. (soluble) 22mm | Drain. (soluble) * 25mm | Export. bois feux | t kg/ha/an | otal soluble Z du total | Végétation arborescen- te | 501 30cm | Litière feuilles arbres+ herbes 4.5t/ha | Remontée termites 1200kg/ ha | Pluvio lessivag |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13** | 14 |
| Carbone Azote Phosphore | 11.2 5.4 2.15 | P.M. | P.M. | 8.9 0.5 0.09 | 0.7 0.6 0.07 | 0.9 0.6 0.06 | P.M. | 10.5 1.7 0.2 | 15% 71% 59% | р.м. | 21.400 1.451 Ass.83 | 2.175 15 1.8 | 17.5 0.8 0.1 | P.M. |
| Calcium Magnésium Potassium Sodium | 18.4 2.7 3.4 | Р.М. | Р.М. | 0.2 0.2 . 0.5 0.08 | 1.1 0.2 0.4 0.04 | 1.5 0.3 0.6 0.2 | Р.М. | 2.8 0.7 1.5 0.3 | 93% 72% 67% 75% | P.M. | 1.356 579 116 | 36 9.3 24 | tot. 1.1 0.8 1.4 0.1 | P.M. |
| SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ | 5.5 0.3 0.3 | P.M. | P.M. | 26.7. 19.9 5.01 | 0.9 0.02 0.02 | 1.4 0.04 0.04 | P.M. | 29 20 5.1 | 87 17 17 | P.M. | 288.591 218.628 75.705 | 36.6 · 4.8 4.7 | - 16 | P.H. |
| SO ₄ C1 CO ₃ H Quartz | 13.5 3.2 40 | P.M. | P.M. | - - (8.8) | 0.3 | 1.1 | P.M. | - | <u>-</u> - | P.M. | - | 1.4 | - | P.M. |
| Total | 118 | | | 150kg | 4.55 | 6.75 | | 161.3 | 7% | | | | | |

** : Extrait de ROOSE 1976 tables: 2.5 p.35 colonne 1

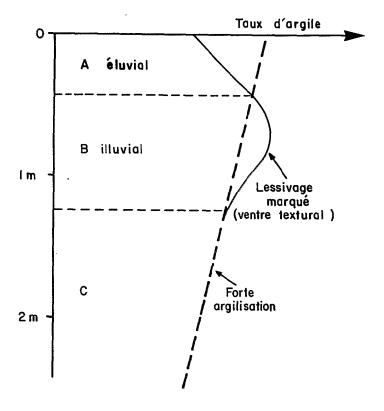
CHAPITRE IX: LES ASPECTS GRANULOMETRIQUES DES TRANSFERTS DE MATIERES ET LES PHENOMENES D'APPAUVRISSEMENT

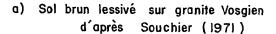
Dans les chapitres précédents, nous avons montré que les pluies violentes qui arrosent les régions étudiées peuvent entraîner des phénomènes d'érosion et de lixiviation d'autant plus importants que les précipitations sont abondantes et regroupées sur quelques mois de l'année. Nous avons vu l'importance du ruissellement et du drainage sur les bilans hydriques et géochimiques des parcelles expérimentales. Il convient d'aborder maintenant les conséquences de l'agressivité des pluies tropicales sur la texture du sol.

Comme bon nombre de sols tropicaux, les profils pédologiques des parcelles présentent en surface un ou plusieurs horizons appauvris en particules fines, sans qu'il soit possible de mettre en évidence une accumulation correspondante dans l'horizon B, par rapport au matériau originel C. Le "ventre" de la courbe texturale des sols lessivés classiques est peu développé, voire inexistant. (cf. figure 9.1 à 9.3).

A Adiopodoumé (figure 9.2) dans le profil de la case ERLO R3, la teneur en argile augmente rapidement de 14 à 22% dans les horizons humifères, puis très progressivement jusqu'à 28% vers 3 mètres de profondeur. Le taux de limons est particulièrement faible tout au long du profil. A Azaguié (profil forêt du Téké), la teneur en argile augmente rapidement de 10% en surface à 36% au bas de la nappe graveleuse (=18% si on tient compte non seulement de la terre fine mais des refus de plus de 2 mm) et plus progressivement jusqu'à 47% dans l'argile tachetée (250 cm). Plus on descend dans le profil et plus le taux de limons est élevé. Dans la zone d'altération (bariolée de rouge et de blanc, vers 3 à 3.5 m) le taux d'argile baisse brusquement de 20%; il pourrait s'agir de la proximité d'un filonet de quartz (sondage à la tarière) qui augmente toujours le taux de quartz de la taille des sables.

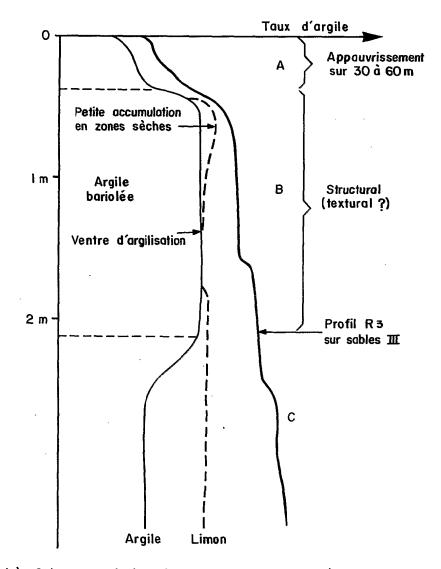
A Divo, le taux d'argile augmente de 25 à 50% dans les soixante premiers centimètres (sommet de l'horizon d'argile tachetée), pour diminuer ensuite





Sol tempéré lessivé classique avec :

- _ ventre textural marqué
- _ argilisation croissant vers le haut du profil
- proportionnalité entre l'appauvrissement et l'accumulation



- b) Sols appauvris ferrugineux ou ferrallitiques en région tropicale _ventre mal défini qui s'efface si on tient compte des limons ou des gravillons
 - _aucune proportion entre le ventre et l'appauvrissement

très légèrement avec des oscillations (extrêmes = 45 à 35%).

A <u>Korhogo</u>, si 1'on ne tient compte que de la texture de la terre fine, on peut observer un profil de sol lessivé avec un ventre bien dessiné entre 30 et 80 centimètres de profondeur (cf. figure 9.3a). Cependant, si 1'on calcule la texture de 1'ensemble des matériaux constituant le profil (y compris les gravillons), le taux d'argile augmente de 5 à 28% sur 70 centimètres pour rester stable ensuite jusque vers 250 cm. Le taux de limon est assez variable (5 à 20%).

A la parcelle 7 de Saria, le taux d'argile augmente de 13 à 34% sur 40 cm : ensuite, il est difficile de suivre la texture au sein de l'horizon cuirassé (20 à 59% de refus).

A <u>Gonse</u>, le taux d'argile augmente aussi brutalement de 7 à 40% en 50 cm, puis, il reste étonnament constant (40%) jusqu'à la cuirasse (170-180 cm). Le taux de limons évolue parallèlement à celui de l'argile pour ces deux derniers sols ferrugineux.

Le taux d'argile croît donc en général très rapidement dans les horizons superficiels (20 à 70 cm supérieurs), puis varie plus ou moins sans qu'on puisse distinguer clairement de "ventre textural".

Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ce genre d'organisation texturale.

1 - Hypothèse géomorphologique

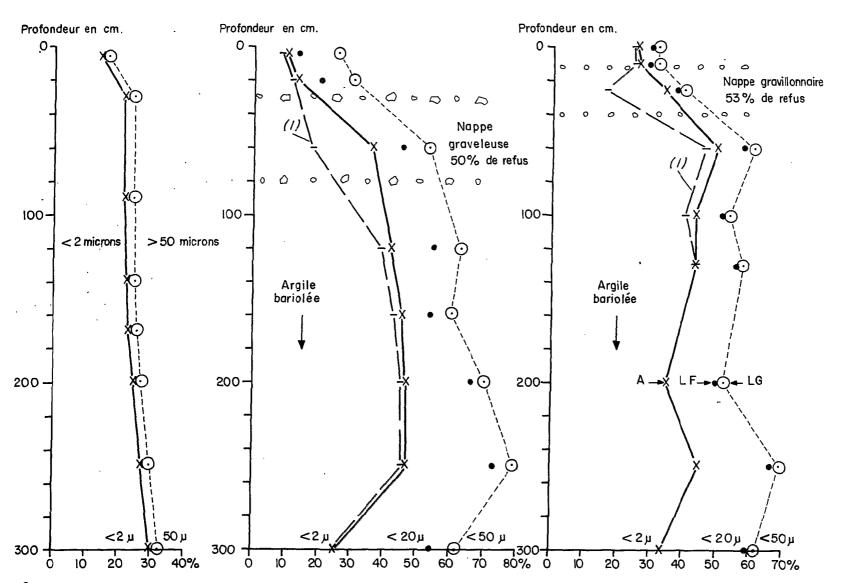
Elle fait intervenir plusieurs périodes morphogénétiques au cours desquelles se succèdent des phases d'altération profonde en milieu chaud et humide, des phases d'érosion en climat contrasté et des phases de sédimentation à différentes échelles. Cette hypothèse sur l'origine allochtone des niveaux meubles situés au-dessus de la "stoneline", des nappes de graviers (Azaguié) ou de gravillons ferrugineux (Divo, Bouaké, Korhogo, Saria) échappe à nos investigations sur la dynamique actuelle des sols, car elle met en cause de longues périodes géologiques (cf. TRICART et CAILLEUX, 1965; DRESCH, 1966; SEGALEN, 1969; ESCHENBRENNER et GRANDIN, 1970; BIROT et al., 1974, MICHEL, 1975).

A : ADIOPODOUME R 3

Sol ferrallitique Sur sables tertiaires B:ERLO TEKE Sol ferrallitique Sur schistes chloriteux

(I) en tenant compte du taux de refus

C : ERLO DIVO
Sol ferrallitique
Sur granito-gneiss



2 - Hypothèse géochimique

La destruction de la kaolinite en milieu acide, au contact de l'humus, a été invoquée pour expliquer l'appauvrissement en argile des horizons superficiels de certains sols ferrallitiques guyanais en milieu équatorial perhumide (DUCHAUFOUR et LELONG, 1967; LELONG, 1969). Le problème de l'équilibre entre les solutions du sol et les minéraux résiduels tels que la kaolinite et le quartz sera discuté au chapitre X. Nous verrons que la charge soluble des eaux superficielles que nous avons étudiées est telle que la kaolinite est stable, sauf peut-être à certaines époques de l'année dans la pellicule superficielle du sol qui subit la battance des pluies.

3 - Hypothèse mécanique : les transports sélectifs particulaires

Le lessivage vertical ou oblique ainsi que l'érosion en nappe combinée à l'activité de la mésofaune, sont autant de mécanismes de transport agissant de façon sélective sur la migration des particules fines des horizons superficiels (AUBERT, 1963; DUCHAUFOUR, 1968; BOCQUIER, 1971; BOULET, 1975; ROOSE, 1967 à 1980).

Dans ce chapitre IX, nous tenterons de chiffrer l'efficience de ces transports particulaires et de voir leur importance dans la dynamique évolutive des sols de cette séquence bioclimatique.

1 – L'ÉROSION SÉLECTIVE

Sous l'action de la battance des pluies et du travail de sape du ruissellement, les mottes de terre sont dispersées et érodées en deux fractions qui migrent à des distances et à des vitesses différentes. Les particules fines en suspension plus ou moins stables sont entraînées aussi rapidement et aussi loin que courrent les filets d'eau ruisselant; par contre, les sables (associés à des agrégats incomplètement dispersés) sont tractés à la surface du sol, progressent par bonds et sont piégés dès que le ruissellement perd de sa compétence

^{*} La compétence d'un fluide en mouvement est le diamètre max. des particules qu'il peut entraîner; la charge est le poids de particules max. qu'il peut déplacer étant donnés sa vitesse et son débit.

LA TERRE FINE

A : ERLO KORHOGO

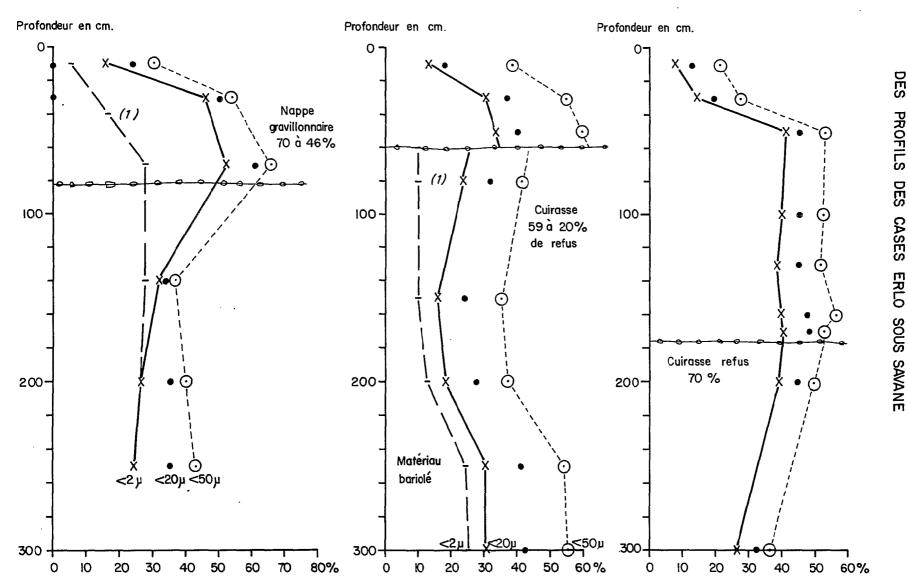
Sol ferrallitique

Sur granito-gneiss

(1) en tenant compte des refus

B : ERLO SARIA P7 Sol ferrugineux tropical Issu de granite

C : ERLO GONSE Sol ferrugineux tropical Issu de granite



(ralentissement suite à une diminution de la pente du sol, à une réduction de l'intensité des précipitations ou à une barrière végétale). Quant aux éléments grossiers de la taille des graviers, ils restent sur place tant que l'érosion est en nappe.

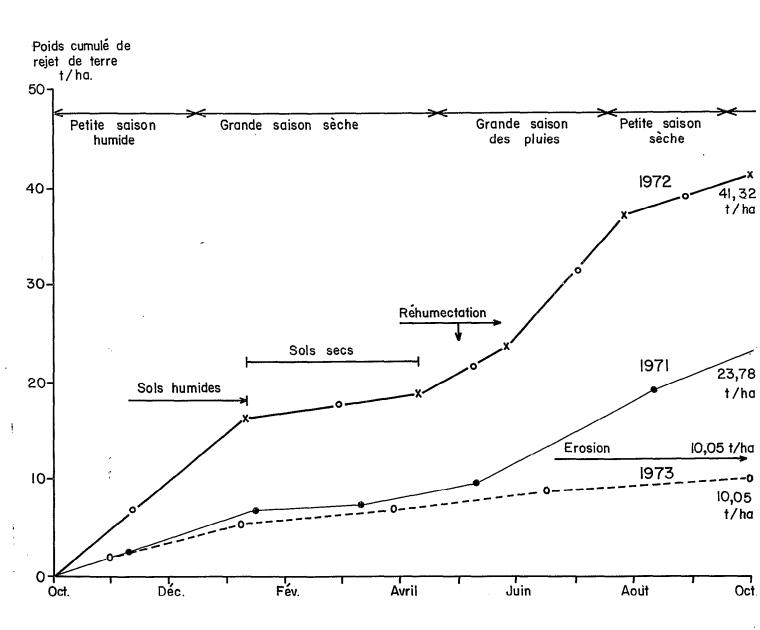
Il en découle que l'érosion en nappe entraîne sélectivement les particules fines de l'horizon superficiel du sol (jusqu'à 20 ou 50 microns : argile + limons), les matières organiques (C et N, surtout les acides fulviques), les bases (totales et échangeables) ainsi que le phosphore total et surtout assimilable), le fer, la silice et l'alumine liés à ces fractions fines. En revanche, les sables s'accumulent sur place (accumulation relative et localement absolue, en bas de pente concave par exemple) (cf. tableaux 7.13 à 19, en annexe).

La comparaison entre la constitution des terres érodées et celle du sol en place a été traitée au chapitre 72.2. Rappelons simplement que plus la pente est douce et le couvert végétal bien développé, plus l'érosion est faible, mais sélective. Les coefficients de sélectivité (teneur dans les terres érodées / teneur sol superficiel en place) sont donc plus forts sous forêt que sous culture et a fortiori sur sol nu, plus élevés sur les glacis ferrugineux tropicaux du plateau Mossi (pente 0.5 à 2%) que sur les versants assez raides des collines de basse Côte d'Ivoire (pente 5 à 40%). La présence de gravillons ou de débris de roche (quartz par exemple) dans l'horizon superficiel exaspère ce caractère sélectif de l'érosion en nappe (Voir Korhogo, Divo et Saria protection).

Du point de vue de la pédogénèse, ces observations signifient que si l'érosion en nappe amincit localement les horizons humifères du sol, elle évacue sélectivement des particules fines et des
éléments liés à la fertilité (argile, matières organiques, bases, phosphore, etc...), laissant sur place une sorte de mulch de sable et de
graviers (ROOSE, 1968). Ce voile d'éléments grossiers protégerait
le sol de l'érosion ultérieure, si des agents d'homogénéisation divers
(brassage du sol par la mésofaune, chute des arbres et surtout travail
du sol sous cultures) ne mélangeaient activement les horizons superficiels : ils rapportent indéfiniment en surface des matériaux riches en

Fig. 9.4

POIDS CUMULE (†/ha) DE TURRICULES AU COURS DE 3 CYCLES ANNUELS MOYENNES DE 15 PARCELLES DE 1 m² TEKE, 1970-1973



particules fines, puisés au sommet de l'horizon B ou près de la nappe phréatique.

Remarquons que la battance des pluies libère aussi bien les sables que les particules fines, c'est donc au type d'écoulement lent, en nappe peu épaisse et peu hiérarchisée, qu'est liée la sélectivité de l'érosion. Quand l'érosion provient en majeure partiè de l'énergie du ruissellement hiérarchisé (érosion en nappe ravinante, rigole, ravine et érosion des rivières) le triage des matériaux s'effectue au moment de la sédimentation et non sur le lieu ou se manifeste l'érosion, dans ce cas, l'érosion se traduit sur le profil par un décapage plus ou moins profond des horizons superficiels et une diminution de l'épaisseur des horizons appauvris.

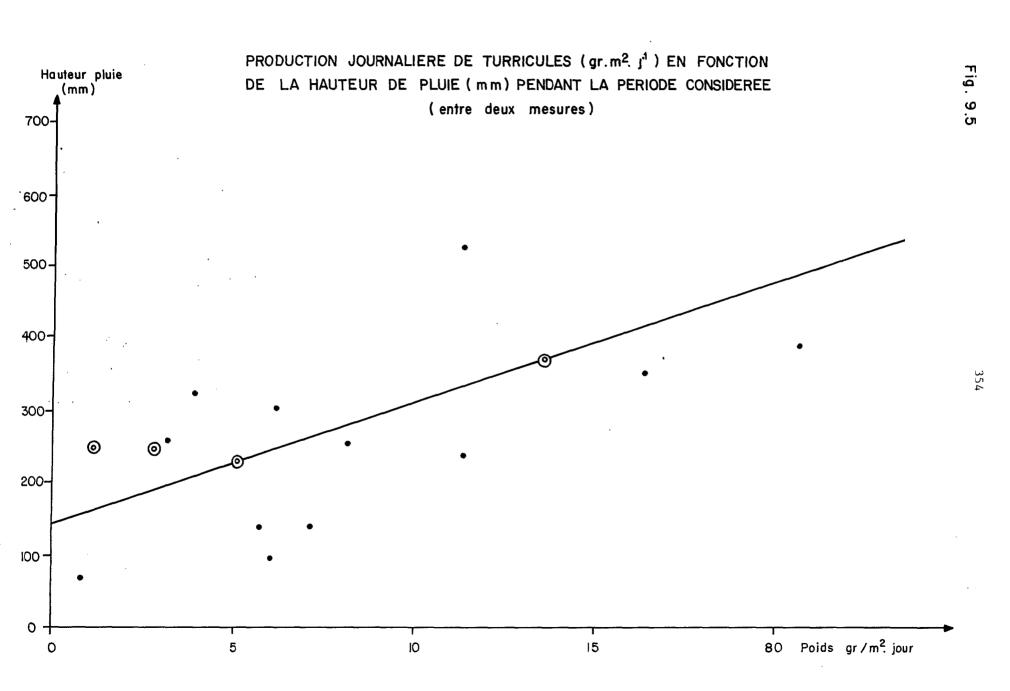
C'est l'équilibre entre l'érosion sélective et l'érosion décapante qui détermine, pour une bonne part, les relations existant entre l'épaisseur des horizons humifères appauvris en fines et la pente topographique.

2 - ROLES DE LA MÉSOFAUNE ET DU LABOUR MÉCANIQUE

Le résultat de l'activité de la mésofaune étant très apparent localement (turricules de vers de terre dans la forêt du Téké et termitières de *Trinervitermes* à Gonse et Saria), nous avons été amené à l'étudier en détail et pendant plusieurs cycles saisonniers dans ces stations (ROOSE, 1976). Ailleurs, nous n'avons procédé qu'à des inventaires évaluant le poids des agrégats façonnés par les mandibules et le tube digestif de divers éléments de la mésofaune, déposés à la surface du sol après la fin de la saison des pluies, période où ils sont le plus abondant (ROOSE et al., 1977 à 1980).

2.1 Travail des vers de terre à Azaguié

Dans la forêt du Téké, nous avons mesuré pendant trois ans (tous les 2-3 mois) les turricules de terre rejetée par les vers au-dessus de la litière, en quinze parcelles de lm² de surface réparties sur toute la toposéquence.



a) Quantité de terre rejetée au-dessus de la litière

Les remontées annuelles de terre dépendent de l'humidité du sol et de la situation de la parcelle dans la toposéquence par rapport à la nappe phréatique et à la nappe de gravier; elles ont varié de 10 à 50 t/ha/an autour d'une moyenne de l'ordre de 32 t/ha/an. Si on tient compte des précipitations déficitaires (environ 15% de jours pluvieux en moins que la normale) et de l'érosion continuelle des turricules entre deux comptages, on peut estimer la production moyenne de turricules à 50 t/ha/an. Ces chiffres sont voisins de ceux trouvés par NYE (1955), dans la région forestière d'Ibadan au Nigéria (46 t/ha/an), mais plus faibles que ceux qui ont été avancés (210 t/ha/an) par KOLLMANNSPERGER (1956) pour les "sols dentellés" du nord Cameroun. Or, l'érosion moyenne au bas du versant (parcelle ERLO) est de l'ordre de 150 kg/ha/an; la différence entre les remontées de terre et l'érosion vient s'accumuler et former l'horizon humifère de terre meuble dépourvu de gravier.

b) Origine des matériaux rejetés en surface

Les observations de terrain (couleurs des turricules, croissance de turricules à l'horizontale dans une tranchée, mais seulement au-dessus de la nappe graveleuse) et les analyses comparées du profil et des turricules montrent que les matériaux rejetés en surface proviennent essentiellement du mélange de la litière et des 20 premiers centimètres du sol; En tout cas, ils ne proviennent jamais des argiles tachetées rouges situées sous la "stone-line".

c) Qualité des matériaux rejetés

Les propriétés physiques et chimiques des matériaux constituant les turricules dépendent pour une bonne partie des caractères des horizons superficiels du sol environnant et de leurs variations saisonnières (cf. ROOSE, 1976, tableaux analytiques 1.4 à 1.11). L'action propre aux vers se traduit par une augmentation des matières organiques, du calcium et du magnésium (totaux et échangeables), du phosphore, de la capacité d'échange de cations, du taux de saturation et de la stabilité structurale (voir tableaux 9.1, 9.2, 9.3). La texture des turricules pose un problème intéressant. En effet, on observe que les teneurs en

| Haut de pente | Sol | ма | Turricules | Md | Comparaison teneurs turricules . | Hørizon le plus voisin |
|--|--|---|--|--|---------------------------------------|---|
| Texture 10 ⁻² A LF LG SF SG | 12 \(\square \) 15 8 \(\square \) 10 15 \(\square \) 20 32 \(\square \) 25 22 \(\square \) 33 | 13.4 9.3 16.3 25.5 32.8 | 12 - 15 6 - 9.1 20 - 24 32 - 43 10 - 15 | 13.7 9.1 21.4 37.6 13.6 | - - + + + | 5 - 10 2 - 10 0 - 2 0 - 2 |
| Matières Organiques 10 ⁻³ C N C/N | 24 ~ 6.5 1.9 ~ 0.5 11 a 13 | 10.2 0.9 12.6 | 31 - 35 2.2 - 2.4 13.8 - 14.4 | 33 2.36 14 | + + + + + + + + | 0 - 2 0 - 2 0 - 2 |
| Bases échangeables mé/100 g Ca Mg K Na Somme CEC Taux saturation | 1 0.1 0.5 × 0.01 0.27 × 0.04 0.28 × 0.1 2.05 × 0.25 8.9 × 4.5 22 × 4.5 | 0.13 0.03 0.05 0.17 0.38 5.2 | 1 - 1.2 0.5 0.1 0.03 - 0.05 1.7 - 1.9 10.2 - 10.9 8 - 19 | 1.13 0.53 0.10 0.04 1.80 10.6 | + + + + + + + + + + + | 0 - 2 0 - 2 15 - 20 5 - 15 0 - 2 0 - 2 |
| Bases totales Ca Mé/100 g Mg K Na Sommes | 1.9 \ 0.5 2.3 - 3.2 2.6 - 4 0.5 - 0.8 5.9 - 9.4 | 0.8 2.8 3 0.7 7.3 | 2 2.3 2.6 3.2 2.5 3.4 0.6 0.7 7.7 9.6 | 2.20 2.9 3 0.7 8.8 | +++ | 0 - 2 0 - 2 - - |
| ^P 2 ^O 5 total 10 ⁻³ Olsen | 0.37 × 0.17 0.07 × 0.02 | 0.19 | 0.34 0.07 | 0.34 0.07 | + + | 0 - 2 |
| Triscide 10 ⁻² SiO ₂ A1 ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ total MnO ₂ TiO ₂ | 7.7 7 9.1 4.5 7 5.9 1.8 7 2.2 1.4 0.01.8 0.56 0.61 | 8.5 4.6 2.1 1.73 0.01 0.59 | 6.2 - 7 4.5 - 7 2.1 1.2 0.02 ¹ .3 0.65 - 0.69 | 6.7 6.1 2.1 1.25 0.02 0.67 | - + - - * + | 0 - 2 15 - 20 0 - 2 - |
| IS Hénin K Hénin | 0.1 à 3.4 22 × 3 | 0.7 11 | 0.1 18 à 21 | 0.1 19.4 | ++ | ' 0 - 2 0 - 5 |

Note: veut dire peu de différence entre les teneurs dans les turricules et l'horizon superficiel du sol augmentation de teneur " voisin doublement de teneur " triplement ou plus de teneur " diminution " nette (1/2)

N " différence peu significative de teneur

Tableau 9.2. : Comparaison des caractéristiques du sol en place (0 à 20cm.) et des turricules:

TEKE, mi-pente, novembre 1970.

| MI PENTE | So1 | md | Turricules | Md . | Remarques | Niveau le + voisin |
|--|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|-----------|--------------------------------------|
| Granulométrie 10 ⁻² | | | | | | |
| A LF | 10 4 23 | 19.2 7.2 | 11 à 15 6 4 12 | 14.4 7.2 | - = | 0 - 5 10 - 15 |
| LG | 13 ~ 17 | 14.3 | 20 • 34 | 25.4 | +++ | > 20 |
| SF SG | 30 × 21 35 × 30 | 25.5 33.7 | 30 * 38 7 * 20 | 30.4 15.2 | + + + | 0 - 2 |
| Atières organiques | | | | | | |
| 10 ⁻³ C · | 18 \ 5 1.3 \ 0.5 | 7.8 | 19 43 | 30 | +++ | 0 - 2 |
| n C/n | 1.3 3 0.5 | 0.7 | 1.5 " 2.7 | 13.6 | + + | 0 _ 2 |
| Bases échangeables | 0.6 à 0.05 | 0.15 | 0.4 à 2.4 | 1.36 | + + + | 0 - 2 |
| ne/100 g Mg | 0.2 " 0.03 | 0.05 | 0.3 4 1.1 | 0.8 | +++ | 0 - 2 |
| K Na | 0.3 " 0.06 0.2 * 0.1 | 0.09 | 0.05 0.2 | 0.13 | + | 15 - 20 15 - 20 |
| Somme CEC | 0.3 4 1.1 | 0.4 | 0.8 4 3.7 | 2.14 | +++ | |
| CEC Saux de saturation | 6.7 % 4.4 | 4.8 | 6 13 | 9.8 21 | + + | 0 - 2 |
| Bases totales Ca | 1.2 0.4 | 0.45 | 1.2 3.6 | 2.6 | + + + | 0 - 2 |
| né/100 g Mg | 2.1 à 4.1 | 2.7 | 2.3 4.8 | 3.3 | + + | 10 - 15 |
| riaci _{des} K Na | 2.1 + 4.8 0.5 + 0.8 | 3.4 0.6 | 2.4 · 5.3 0.5 · 0.9 | 3.3 0.55 | ~ | 15 - 20 |
| Somme totale | 5.1 " 11 | 7.2 | 6.4 • 14.6 | 9.8 | + + | |
| 20 ₅ total | 0.25 🕻 0.17 | 0.19 | 0.27 4 0.42 | 0.34 | + + | 0 - 2 |
| 10 ⁻³ Olsen | 0.06 % 0.01 | 0.03 | 0.05 4 0.1 | 0.07 | + + | 0 - 2 |
| riacide 10 ⁻² SiO ₂ combiné | 7 - 12,4 | 9.7 | 5.6 à 7.4 | 6.7 | - niveau | 0 - 2donc appauvris en surface |
| A1 ₂ 0 ₃ " | 9.8 ح 5 | 8.1 | 5.3 " 6.8 | 6.5 | - | 0 - 5 |
| Fe ₂ 0 ₃ total | 1.7 5 2.4 | 2.1 | 1.8 • 2.8 | 2.1 | ช | 5 - 10 |
| Fe ₂ 0 ₃ libre | 0.8 à 1.9 | 1.2 | 0.9 * 1.5 | 1.3 | N | 0 - 5 |
| MnO ₂ | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | N | |
| TiO ₂ | 0.5 × 0.6 | 0.58 | 0.5 . 0.66 | 0.65 | + | 20 cm |
| S Hénin | 3.6 سر 0.1 | 1.2 | 0.1 à 0.7 | 0.1 | niveau | 0 - 2 cm |
| K Hénin cm/h | 22 ~ 2.5 | 7.2 | 13 , 26 | 16 | = niveau | 0 - 2 cm |

Les turricules ont des caractéristiques voisines de 0-2 ou 0-5 cm = horizon qu'ils forment de 15-20 10-20 = horizon d'où ils viennent

Analyse fine des couches du sol montre { enrichissement par le haut. M.O. bases appauvrissement en A + L, Si, Fer, Al.

Tableau 9.3 : Comparaison des caractéristiques du sol en place (0 à 20 cm) et des turricules:

TEKE, bas de pente; novembre 1970.

| | | , | | | | |
|--|---|--|--|---|--|--|
| Bas de pente | So1 | Md | Turricule | Mi | Remarques | Horizon voisin |
| Granulométrie 10 ⁻² AL LF LG SF SG | 10 16 5 8 15 17.6 21 33 29 40 | 12.8 8 16.8 29.8 33.3 | 10 à 15 8 - 9.6 36 - 56 1 - 26 | 12.6 9.1 45.6 20.9 14.8 | +++ | 0 - 5cm 0 - 2 |
| Matières organiques 10 ⁻³ C N C/N | 17 | 9.3 0.7 12.5 | 20 à 27 1.4 - 1.7 12 - 19 | 23 1.6 14.4 | * + + + + + + | 0-2 0-2 0-2 |
| Bases échangeables Ca mé/100 g Mg K Na Sommes CEC Taux saturation | 0.4 \ 0.08 0.3 \ 0.02 0.07 \ 0.2 0.14 \ 0.29 \ 0.3 6 \ 3.5 9 \ \ 16 | 0.1 0.1 0.07 0.16 0.6 4 | 0.8 à 1 0.7 - 1 0.05 - 0.09 0.04 1.6 à 2.2 6.2 - 7 22 - 32 | 0.85 0.8 0.07 0.04 1.8 6.7 | + + + + + + - - + + + + | 0 - 5 0 - 5 0 - 2 0 - 5 0 - 5 0 - 5 |
| Bases totales Ca Mg K Na Sommes | 0.8 \ 0.4 2.1 2.5 2.2 a 3 0.5 0.9 5.2 7.2 | 0.6 2.2 2.5 0.6 5.9 | 1.4 à 2 3.6 = 4.1 2.8 = 4.6 0.4 = 0.7 8.2 = 11.4 | 1.7 3.9 3.8 0.56 | + + + + + + - + + | 0 - 5 0 - 5 0 - 15 0 - 2 |
| P ₂ O ₅ total 10 ⁻³ Olsen | 0.27 0.16 | 0.20 | 0.31 | 0.31 | + + + | 0 - 2 |
| Triacide SiO ₂ combiné Al ₂ O ₃ " Fe ₂ O ₃ total Fe ₂ O ₃ libre MnO ₂ TiO ₂ | 7.1 | 7.6 7.1 1.7 1.5 0.01 0.55 | 5.4 à 6.2 4.1 " 4.7 1.7 " 1.9 1.10 0.01 0.63 - 0.66 | 5.7 4.5 1.8 1.16 0.01 0.64 | 1 1 1 2 + | 2 - 5 2 - 5 15 - 20 0 - 2 - 0 - 2 |
| IS Hénin K Hénin | 0.1 3 2 | 0.6 | 0.2 à0.4 7 - 9 | 0.3 8 | ٠ | 0 - 5 5 - 10 |

argile et limon fin (0 à 20 microns) sont voisines de celles observées dans les 20 premiers centimètres du sol environnant; par contre, les teneurs en limons grossiers et sables fins des turricules sont nettement plus élevées tandis que les taux de sable grossier sont plus faibles (15% dans les turricules au lieu de 33% dans le sol en place). Si les vers de terre opéraient une sélection des particules fines du sol pour exclure les sables les plus grossiers, on devrait observer une augmentation relative de toutes les tailles des particules plus fines. Or, l'argile et les limons fins n'augmentent pratiquement pas dans la terre rejetée par les vers; seuls, les limons grossiers et les sables fins augmentent. Ces résultats inclinent donc à penser que certains vers de terre sont capables de briser les sables grossiers en fragments de la taille des sables fins et très fins.

Dans la littérature de nombreux auteurs ont constaté l'augmentation du taux de particules fines dans les turricules par rapport au sol environnant. Par exemple NYE (1955) remarque que les turricules ne contiennent pas de particules de taille supérieure à 0.5mm. TRAN VINH AN (1973) trouve que, sur une pelouse du Zaire, les teneurs en particules fines inférieures à 250 microns sont plus élevées dans les turricules de Hypericarilus africanus que dans la terre environnante, tandis que les particules plus grossières y sont moins abondantes. Cet auteur admet avec MEYER (1943) la possibilité pour les sables grossiers ferruginisés la possibilité d'être broyés dans le tube digestif des vers de terre. Nos observations micromorphologiques sur lames minces des horizons superficiels confirment cette possibilité. On peut voir en effet trois types de sables : des sables grossiers peu altérés, des sables grossiers fortement altérés et ferruginisés et des sables fins qui pourraient bien être des fragments des précédents.

d) résultats de l'action des vers de terre

Si, dans les conditions actuelles de la forêt du Téké, les vers ne remontent pas la terre fine des horizons d'argile tachetée à travers la "stone-line", leur action est cependant considérable en quatre domaines :

I - Augmentation de la macroporosité des horizons qu'ils parcourrent et accélération de l'infiltration des eaux superficielles. Nous l'avons constaté sur le terrain en comparant les caractéristiques hydrodynamiques du sol de deux parcelles situées sur deux versants voisins et identiques, l'un sous couvert forestier (où nous avons mesuré 50 t/ha/an de turricules) et l'autre sous bananeraie d'où les vers de terre ont disparu sous l'action des pesticides (cf. ROOSE, 1976; BOIS et ROOSE, 1978; MOULO, 1974). Les résultats sont consignés dans le tableau 9.4

Tableau 9.4 : Comparaison des caractéristiques physiques liées à la dynamique de l'eau d'un sol ferrallitique très désaturé remanié appauvri sur deux versants, l'un couvert de forêt et où les turricules sont très nombreux et l'autre sous bananeraie où les vers ont disparu sous l'action des pesticides (plantation IRFA d'Azaguié).

| | | PENTE SOUS FORET | PENTE SOUS BANANERAIE |
|---|---------|---------------------|--------------------------|
| Horizon humifère (0-5cm) - densité apparente - porosité totale - indice percolation (Hénin) | da | I.08 | I.40 |
| | Por. % | 58 à 61 % | 47% |
| | K cm/h. | 28 | 10 |
| Horizon jaune (5-40cm) | da | 1.18 | 1.40 |
| | Por. % | 37 à 55 % | 44 à 45 % |
| | K cm/h. | 8.4 | O.7 |
| Horizon graveleux (40-80cm) | da | 1.95 | 1.91 |
| | Por. % | 27 à 38% | 28 à 30 % |
| | K cm/h. | 0.8 | 1.9 |
| Horizon tacheté (80-180cm) | da | 1.47 | 1.38 |
| | Por. % | 46 à 48 % | 49 à 50 % |
| | K cm/h. | 1.6 | 1.6 |
| Perméabilité in situ cm/h - après 30 minutes - après 1 heure - après 3 heures | | 12 8 1.5 | 8 4 1.2 |

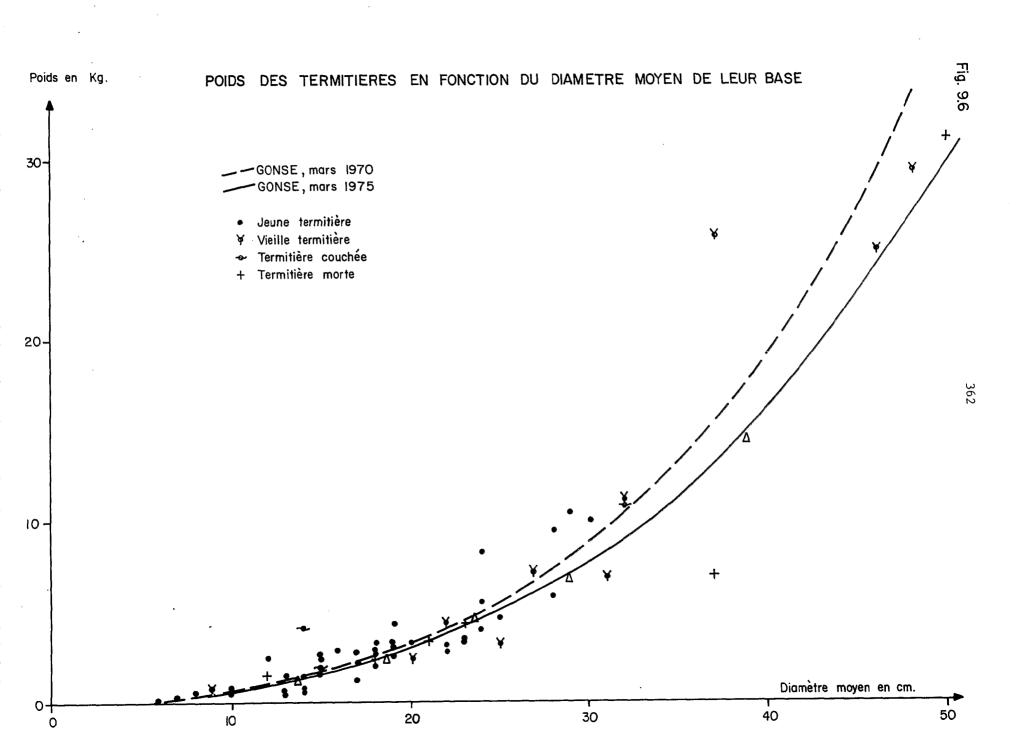
On voit que la vitesse de filtration est multipliée par 3 à 10 fois dans les horizons où les vers de terre exercent leur action.

2 - Rejet en surface d'un matériau fin et fertile, enrichi en sables fins et très fins (ce qui le rend sensible à l'érosion), mais aussi en éléments nutritifs assimilables, en éléments enzymatiques et en micro-organismes (BACHELIER, 1963, 1973). Ce matériau très favorable aux activités biologiques en général se trouve ainsi en contact direct avec le chevelu racinaire très dense sous la litière des forêts tropicales et

prêt à recycler rapidement les éléments nutritifs mis de la sorte à leur

disposition.

- 3 Mélange intime de la matière minérale aux matières organiques fraiches de la litière dans le tube digestif des vers qui, avec la secrétion de calcite par les glandes de Morren, aboutit à un meilleur bilan de restitution des matières organiques du sol et à la formation d'humus stable (BACHELIER, 1963).
- 4 Brassage continuel des horizons superficiels. En prenant comme base de calcul une remontée annuelle moyenne de 50 t/ha/an de terre fine et une densité apparente du sol de 1.1, il faut 22 ans aux vers de terre pour retourner entièrement les dix premiers centimètres du sol. En réalité, les vers de terre remuent beaucoup plus de terre qu'ils n'en rejettent en surface, car ils peuvent vider leur tube digestif dans le sol, en colmatant des fentes ou d'anciennes galeries. L'importance des rejets en surface par rapport à la terre ingérée varie en fonction des espèces et de la nature du sol. Dans les vieilles prairies de la station de Rothamsted, ce rapport serait de l'ordre du tiers (BACHELIER, 1963). Dans la savane à roniers de Lamto située vers le centre de la Côte d'Ivoire, LAVELLE (1974) a montré que les turricules (20 à 30 t/ha/ an) ne représentent qu'une très faible fraction des terres remuées par les vers (moins de 1/25). Les comptages de vers sur le terrain, couplés à la mesure de leur activité en laboratoire, amènent cet auteur à conclure que plus de 800 tonnes de terre sèche et 100 kg de litière sèche passent par le tube digestif de ces animaux, qui minéralisent annuellement près d'une tonne de matières organiques à l'hectare. Cet énorme travail de brassage fait bien comprendre la discontinuité qui ressort des analyses aussi bien que des observations sur lames minces, entre cet horizon sans cesse homogénéisé par la faune et les argiles tachetées



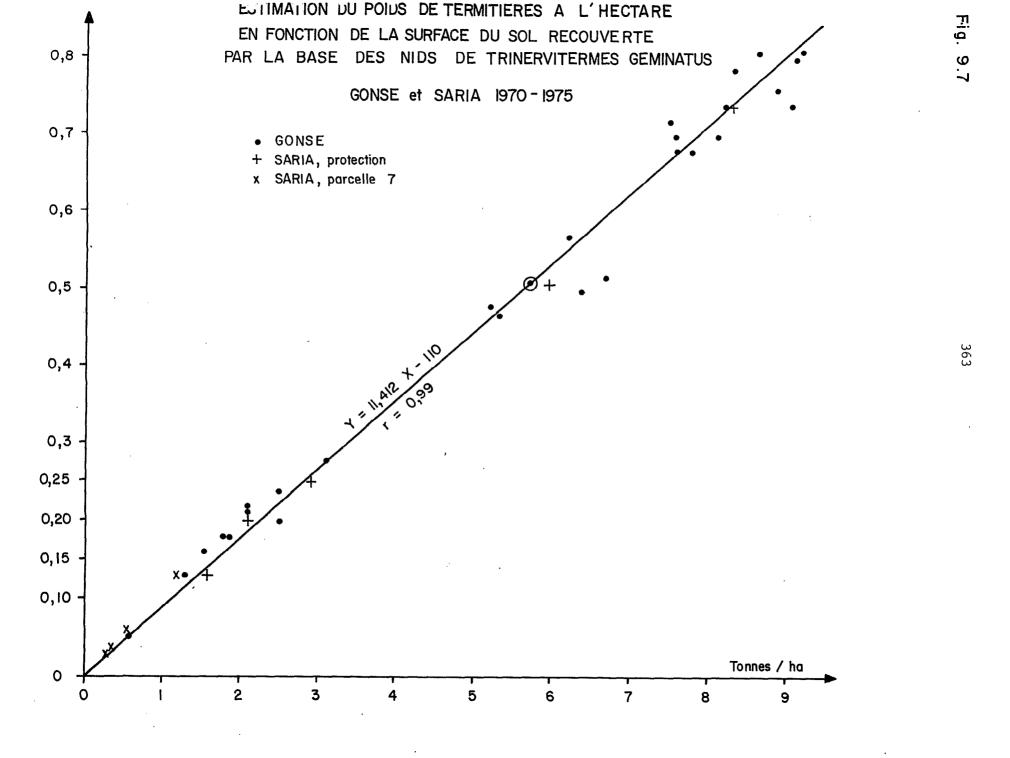


Tableau 9.5 : Caractéristiques d'une population en équilibre de nids de Trinervitermes (GONSE 1970-1975).

| VARIATION | MEDIANE |
|---|------------------------------------|
| Nombre de nids de termitières à l'hectare 1000 à 2000 | 1300 |
| Hauteur totale - moyenne 20 à 24 cm - maximale 40 à 53 cm | 22.3 cm 47 cm |
| Diamètre - moyen 19 à 27 cm - max. 33 à 66 cm | 22.3 cm 49 cm |
| Poids à l'inventaire - termitières 6 à 9 t/ha | 8.1 t/ha |
| Surface basale 50 à 81 m²/ha | 72 m ² / ha |
| Croissance mesurée 100 à 900 kg/ha | 340 kg/ha |
| Erosion des nids abandonnés en milieu découvert 26 à 40% des nids protégés par les herbes sur le terrain (0 à 80 | 33% du stock 0 kg) 10% du stock |
| Rythme de renouvellement en fonction de la croissance et l'érosi | on 7 ans |

Il existe des corrélations hautement significatives entre le poids des termitières et le diamètre moyen à la base des nids ainsi qu'avec la surface couverte (S) par cette base.

⁻P = -0.569 + 1.231 (0.004 $D^2.2456$) r = 0.962 (voir figure 9.6) r = 0.99 (" 9.7)

où P est le poids d'une termitière, P' le poids des termitières réparties sur un hectare, d le diamètre moven (max + mini) et S la surface basale, exprimée en % de la surface de la parcelle couverte par la

sous-jacentes étroitement liées aux produits de l'altération de la roche.

L'action des vers de terre correspond donc à un labour très particulier. En effet, comme le labour mécanique, ce brassage augmente la macroporosité et la perméabilité de l'horizon superficiel; il diminue la cohésion du sol et expose à l'agressivité des pluies des "mottes dénudées" sensibles à la battance. Cependant, à l'opposé de celui-ci, il ramène en surface, non pas des matériaux stériles, mais une terre fertile améliorée sous bien des aspects. De plus, au lieu de remonter les cailloux en surface, les vers ramènent de la terre fine et enfouissent les matériaux grossiers sous une couche de terre fine.

Enfin, le labour mécanique se fait presque toujours à la même profondeur (à quelques centimètres près) avec l'aide d'engins de plus en plus lourds qui tassent le sous-sol; en conséquence, le contraste entre les

horizons superficiels appauvris et les horizons profonds du sol se ren-

2.2 Travail des termites à Gonse et Saria

force.

La parcelle ERLO de <u>Gonse</u> et son voisinage sont parsemés d'un grand nombre de petites termitières cylindriques beiges construites par des termites moissonneuses (*Trinervitermes geminatus WASMANN*) qui y stockent des graines et des fragments de graminées (cf. JOSENS, 1972, 1974). Des observations sur l'importance des matériaux remontés à la surface du sol, sur leurs propriétés ainsi que sur l'érosion des termitières se sont poursuivies pendant 5 ans sur 8 parcelles contigües de 250 à 400 m² (cf. les résultats détaillés dans ROOSE, 1976).

a) Quantité de terre remontée

Il s'agit d'une population de termitières en équilibre, comptant en moyenne 1300 nids épigés à l'hectare, ce qui représente 8,1 tonnes de matériaux fins. En tenant compte de l'apparition de nouvelles constructions d'un inventaire au suivant (400 kg/ha/an en moyenne) et de l'érosion des termitières en place (environ 800 kg/ha/an), les remontées de terre par les termites peuvent être évaluées à 1200 kg/ha/an: le rythme de renouvellement des nids épigés s'établit

Tableau 9.6 : Analyse comparée des termitières de TRINER VITERMES geminatus

et de différents horizons du sol en place:

CONSE, 1968-1975

| | Termitièr e épigée médiane | SOL EN PLACE | | | | | Term/sol | Horizon le |
|--|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------------------|
| | | 0-10cm | 20-30 | 40-60 | 90-100 | 150-160 | | plus compa- rable |
| Nombres échantillons | 5 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0-10 | |
| Ca échangeable mé % | 3.22 | 1.70 | 1.38 | 3.18 | 5.65 | 6.63 | + + | 40-60 |
| Mg " | 2.66 | 1.01 | 0.94 | 1.85 | 2.77 | 3.08 | ++ | 90-100 |
| K " | 0.84 | 0.09 | 0.04 | 0.12 | 0.29 | 0.30 | ++++ | ? |
| Na " | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.08 | 0.08 | N | 10-20 |
| B.E.C. (T) | 6.12 | 3.37 | 4.57 | 6.84 | 8.89 | 9.28 | ++ | 40-60 |
| V = S/T % | 7 100 | 83% | 52 % | 76 % | 99 % | 100 % | + | 90-100 |
| рн 1/2.5 (H ₂ O) | 6.7 | 6.8 | 6.3 | 5.9 | 6.3 | 7 | 18 | 0-10 |
| Ca total mé % | 4.49 | 2.74 | 2.54 | 3.51 | 5.78 | 7.21 | + + | 90-100 |
| Mg " | 5.28 | 3.25 | 3.62 | 6.52 | 7.64 | 10.98 | + + | 40-60 |
| K " | 2.97 | 1.47 | 0.88 | 1.91 | 2.09 | 2.63 | + + | 150-160 |
| Na " | 0.43 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.40 | 0.53 | + | 120-130 |
| C °/ | 14.60 | 5.33 | 4.02 | 2.38 | 1.18 | - | + + | 0-10 |
| и °/。 | 0.71 | 0.42 | 0.28 | 0.23 | 0.15 | - | ++ | 0-10 |
| P205 °/00 total | 0.22 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | + | ? |
| P ₂ 0 ₅ °/ 01sen | 0.05 | 0.02 | - | - | - | - | + | 0-10 |
| A (0-2) % | 16.6 | 7.7 | 14.1 | 41 | 40.1 | 40.3 | ++ | 30-40 |
| L.F. (2-20) Z | 9.1 | 8 | 5.6 | 4.3 | 5.4 | 7.7 | + | 0-10 |
| L.G. (20-50) % | 17.3 | 15.2 | 7.4 | 7.5 | 7 | 8.2 | + | 0-10 |
| S.F (50-200) % | 24 | 30.7 | 35.2 | 22.7 | 21.4 | 21.5 | | 30-40 |
| s.G. (200-2000) % | 31.6 | 37 | 36.8 | 23.2 | 25.1 | 23 | - | 30-40 |
| SF+SG | 0.76 | 0.83 | 0.96 | 0.98 | 0.85 | 0.93 | | |
| Fer total Fer libre | 1.33 | 1.02 0.53 | 1.65 1.03 | 3.15 1.93 | 3.30 2.10 | 4.45 3.39 | + + | 10-20 10-20 |
| K Hénin cm/h IS Hénin | 1.32 1.46 | 9 2.43 | 1.9 | 4.5 4.94 | 2.5 5.44 | 1.4 7.76 | - | 20 - 30 ? |

autour de 7 ans. Si l'activité de cette espèce de termite sur la parcelle est assez modeste par rapport à celle des espèces qui construisent les grandes termitières cathédrales (BOYER, 1973) les *Trinervitermes* n'en déplacent pas moins de 3 à 10 fois plus de terre que l'érosion (cf. tableau 9.5).

b) Origine et qualités des matériaux remontés

L'analyse des termitières a montré que les matériaux dont elles sont constituées, sont plus riches que la terre environnante (horizon 0-10 cm) en particules fines (jusqu'à 50 microns), en matières organiques (C et N), en bases échangeables et totales (Ca, Mg et surtout K) ainsi qu'en phosphore (cf. tableau 9.6).

Les termites puisent leurs matériaux de construction non seulement dans les horizons humifères (couleur grise des jeunes termitières), mais surtout au sommet de l'horizon ocre argilo-sableux : par la suite les Irinervitermes ont l'habitude de tapisser les parois intérieures de leurs nids avec leurs excréments, produits d'une digestion incomplète des végétaux qu'elles ont consommés. Il y a donc, ici aussi, un mélange entre matières minérales et matières organiques évoluées, mais le mélange n'est pas aussi intime que dans le tube digestif des vers. Les observations de terrain dans une dizaine de fosses, les résultats d'analyses et le schéma d'organisation de cette espèce (cf. figure 2.5) indiquent que leur activité est importante dans les 30 premiers centimètres du sol (horizons humifères) et au sommet de l'horizon ocre, mais qu'elle diminue rapidement à l'intérieur de celui-ci et ne dépasse guère le sommet du gley. Les horizons de terre fine situés au-dessus de la carapace ne proviennent donc pas d'une remontée des matériaux bariolés sousjacents à la cuirasse par les termites qui occupent aujourd'hui le biotope. Naturellement, rien ne prouve qu'à l'époque assez ancienne de la mise en place de ces horizons, ce biotope n'était pas occupé par d'autres espèces de termites.

c) Résultats de l'action des Trinervitermes

Dans la zone d'activité réduite aux 30 ou 40 premiers centimètres du sol, la perforation de galeries n'entraîne qu'une faible augmentation de la porosité (à peine 0.33% pour une remontée de 1200kg/

ha/an de terre). Par contre, en moissonnant du fourrage, ces termites sont amenées à perforer la pellicule de battance et leur influence sur l'infiltration des eaux de pluie est remarquable : ainsi, l'infiltration mesurée au double anneau (méthode Muntz) est passée de 120-200 mm/h sur un sol ferrugineux sec et pioché sur 5 centimètres, à 10-20 mm/h sur ce même sol recouvert d'une pellicule de battance et est remontée à 60 mm/h en présence d'un seul orifice (de 3 mm de diamètre) creusé par les termites. De plus, après leur destruction par la pluie, les termitières abandonnées laissent en place une auréole sableuse de couleur claire autour d'une dépression où le ruissellement peut s'engouffrer.

Les quantités de terre remontées par les termites (1200 kg/ha/an) sont nettement supérieures aux transports effectués par l'érosion en nappe sous végétation naturelle (20 à 400 kg/ha/an en fonction du feu de brousse). Il y a donc des dépôts et ceux-ci n'ont pas du tout la même texture, ni les mêmes propriétés que le matériau constituant ces termitières. En effet, les gouttes de pluie dispersent entièrement le substrat et le ruissellement en nappe emporte sélectivement les particules fines : il ne reste sur le terrain que des éléments sableux appauvris chimiquement.

La construction des nids épigés n'est qu'une manifestation visible de l'activité de ces termites qui, à l'intérieur du sol, creusent des galeries, en rebouchent d'autres et brassent continuellement les horizons où elles vivent. Le remaniement continuel des horizons superficiels et de la litière a des conséquences importantes. Il aboutit à une déstructuration et à un appauvrissement poussé du matériau constituant les horizons concernés de ces sols ferrugineux tropicaux. En rapportant en surface des matériaux argilo-sableux puisés à la limite des horizons A et B, les termites favorisent l'approfondissement et l'évolution des horizons A et alimentent l'érosion sélective. Sans les remontées de matériaux fins par les termites, l'érosion en nappe sous végétation naturelle aboutirait à un voile de sable et d'éléments grossiers qui bloqueraient l'évolution ultérieure des phénomènes d'appauvrissement.

A Saria, se retrouvent les mêmes termitières.

En "parcelle de protection", qui se présente comme une savane arborescente

bonne productrice d'herbe (3 à 9 t/ha/an d'Andropogon), mais soumise au pâturage extensif et à l'exploitation traditionnelle des termitières pour nourrir les volailles, le nombre de nids après mise en défensest passé en 1 an de 172 à 808 nids à l'hectare : cela représente une remontée de 1000 à 1340 kg/ha/an de matériaux terreux. En parcelle 7, cultivée en mil fourrager en 1970, le nombre de nids était nul début 1971. Le poids des nids a doublé chaque année (304 - 611 et 1244 kg/ha/an). La croissance atteint donc là aussi 1200 kg/ha/an et les conclusions sont les mêmes qu'à Gonse.

2.3 Remontées par la mésofaune dans les autres stations

Dans les autres stations, nous n'avons pu réaliser que quelques sondages à une époque de l'année où les matériaux façonnés par la mésofaune sont les plus nombreux à la surface du sol (début de saison sèche).

A Adiopodoumé, les sols sont trop sableux pour que l'activité de la mésofaune soit spectaculaire. Nous n'avons repéré en novembre 1976 qu'une seule petite termitière en R2 (100 m²) et aucune en R3 (200 m²): les termites sont pourtant omniprésentes et très actives sous forêts surtout dans les horizons humifères et au-dessus du sol où elles participent à la disparition des bois morts et à la minéralisation de la litière. Nous avons observé par ailleurs, 29 turricules en R2 (soit 16.6 kg/ha) et 355 turricules en R3 (soit 389 kg/ha). Ces valeurs sont très faibles en regard des chiffres observés à Azaguié sur des sols ferrallitiques sur schiste (4 t/ha lors de l'inventaire effectué à la même saison et 32 t/ha/an de remontée moyenne). En additionnant l'activité de l'ensemble de la mésofaune (vers, mille-pattes, termites, fourmis, etc...), on doit atteindre un total de 4 t/ha/an de terre rejetée en surface en R3, ce qui dépasse largement l'érosion (E=50 kg/ha/ an). Ces terres, provenant du malaxage des résidus organiques et du sol prélevé à faible profondeur (couleur gris foncé, jamais brun jaune) sont ici aussi plus riches en matières organiques, en nutriments, en argile, limons et surtout en sables fins que le sol en place (in tableau analytique n° 53, ROOSE, 1980).

A Divo, sur les sols ferrallitiques moyennement désaturés mais gravillonnaires à faible profondeur (12 à 40 cm), on a observé, en décembre 1976 de 0.9 à 2.7 t/ha de turricules sous jeune cacaoyère (moyenne = 1.78 t/ha) et 0.5 à 1.4 t/ha de turricules sous la forêt adjacente (moyenne = 0.825 t/ha) : cependant, cette différence n'est peut-être pas significative (difficultés de repérage des turricules plus grandes sous forêt). Si on multiplie le résultat de cet inventaire par huit comme à Azaguié, on arrive à des chiffres variant de 4 à 21 t/ha/an de turricules (14 tonnes de moyenne), quantité largement supérieure à l'érosion (E=130 kg/ha/an). Ici également les turricules sont plus riches en matières organiques, en nutriments et en particules fines que le sol en place. Le taux d'argile des turricules (40.3%) est voisin de celui qu'on trouve dans le sol environnant vers 40 cm de profondeur, au sommet de l'horizon B à la base de l'horizon appauvri (35%). Par contre, les taux de limons (14.7 et 7.5%) sont 4 fois plus forts et celui des sables fins 2.7 fois plus fort dans les turricules qu'à la base de l'horizon appauvri. Quant aux sables grossiers (10.1%) ils ne représentent plus que 1/5 de leur teneur dans cet horizon. Enfin, les taux de sables fins et très fins (= limons grossiers) sont largement plus élevés que dans les trois premiers mètres du profil. L'action de la mésofaune est donc très nette sur la texture. Les vers de terre augmentent les taux de sables fins et de limons (2 à 100 microns) aux dépens des sables grossiers qu'ils désagrègent; ils puisent l'argile à la base des horizons appauvris.

Il faut remarquer que le taux de fer contenu dans les turricules (3.5%) est nettement plus faible qu'à la base de l'horizon appauvri (5.8% vers 30 cm et 8.9% vers 60 cm). On peut donc penser que, dans le tube digestif des vers de terre, le fer contenu dans les grains de quartz ferruginisés est déplacé par les sucs digestifs produits par l'animal. Ces grains de sables grossiers carriés sont ainsi rendus particulièrement fragiles; ils se cassent en éclats de la taille des sables fins et très fins, lesquels apparaissent en lame mince comme anguleux, peu cariés et peu ferruginisés dans les horizons appauvris. L'érosion en nappe intervient ensuite pour évacuer sélectivement une part importante des argiles et des limons (jusqu'à 50 microns). Une analyse fine de l'ensemble de ces phénomènes serait nécessaire pour confirmer cette hypothèse.

A Korhogo, l'activité de la mésofaune est plus discrète sur la parcelle ERLO. Les termites sont nombreuses dans les horizons humifères, mais il n'y a pas de termitière cathédrale sur le versant et très peu de petite termitière de Trinervitermes, car elles sont exploitées pour nourrir la volaille dès qu'elles sont repérées par les habitants de cette région. Nous avons tout de même recueilli sur cinq placettes de l m² entre 110 et 710 g/m² de terre sèche façonnée par la mésofaune (termites, fourmis, mille-pattes et divers...) soit en moyenne 5 t/ha. Les analyses montrent que cette terre remaniée est plus riche en argile limons et sables fins, en matières organiques et en nutriments que le sol en place. Cette terre est grise ou brune, mais jamais rouge comme le sommet de l'horizon d'argile tachetée : elle provient du mélange plus ou moins intime de la terre fine humifère prélevée entre les gravillons à faible profondeur (moins de 40 cm) et de débris organiques plus ou moins humifiés.

2.4 Conclusions sur l'action de la mésofaune

Toutes ces observations sur l'activité de la mésofaune amènent aux conclusions suivantes :

- 1 La mésofaune joue un rôle considérable sur la macroporosité des horizons qu'elle perfore (horizons humifères dans les cas étudiés mais parfois aussi au niveau des horizons d'argile bariolée où on observe souvent des canalicules), sur <u>l'infiltration</u> des eaux de surface, sur le bilan des matières organiques intégrées au sol (humification de la litière) et surtout sur le brassage des horizons superficiels des sols. Ce brassage intéresse des dizaines voir des centaines de tonnes de matériaux remaniés par ces animaux à l'intérieur des horizons qu'ils fréquentent.
- 2 La mésofaune remonte à la surface du sol des matériaux fins enrichis en limons et sables fins, en matières organiques et en nutriments par rapport au sol environnant ou tout au moins aux horizons appauvris. Dans tous les cas étudiés, ces matériaux représentent une masse beaucoup plus importante que l'érosion en nappe mesurée sous végétation naturelle.

Cependant, cette érosion finit par détruire et étaler les édifices construits par la faune, en disperse les éléments et prélève sélectivement une bonne partie des particules fines (jusqu'à 50 microns), des matières organiques et des nutriments qui y sont liés : l'érosion en nappe ne laisse en place qu'un résidu sableux très appauvri et lixivié par rapport aux matériaux façonnés par la mésofaune.

- 3 L'action conjuguée de la mésofaune et de l'érosion en nappe est donc à l'origine de l'individualisation des horizons désaturés et appauvris en particules fines. Elle permet l'accentuation de ces caractères et le développement de ces horizons en profondeur. En effet, ces petits animaux prélèvent la terre fine entre les éléments grossiers du sol, concentre ces derniers en une nappe graveleuse ou gravillonnaire et forme le niveau de terre fine qui surmonte généralement les niveaux grossiers (gravelon). Ailleurs, ils prélèvent des matériaux riches en fines à la base des horizons appauvris et les remontent à la surface du sol où ils sont exposés à l'agressivité des pluies et perdent une forte proportion d'argile et de limons.
- 4 Les termites du genre Trinervitermes n'ont pas une influence aussi marquée sur la dynamique actuelle du sol que les vers de terre : ces derniers modifient plus profondément la texture des matériaux qu'ils ingèrent (éclatement des sables grossiers en sables fins et limons), ainsi que leur composition chimique (humification influencée par les sécrétions calciques). De plus, la masse des matériaux concernés semble plus grande au sud de la séquence, où les vers sont les plus nombreux et les plus actifs, qu'au nord où les vers sont peu actifs et remplacés par les termites, là où les feux de brousse sont fréquents et la saison sèche très longue et très accusée.

L'activité des vers est favorisée par l'humidité du sol et ralentie par la présence d'un taux trop élevé de sables grossiers ou de graviers. Il semble enfin, qu'une partie des agrégats humifères observés dans les horizons superficiels des sols ferrallitiques proviennent des rejets effectués par les vers de terre, soit à l'abri de la litière, soit à l'intérieur même du sol.

5 - Dans les milieux naturels où l'énergie des pluies est interceptée soit par l'abondance du couvert végétal (litière forestière (IMESON et KWAAD, 1976), ou paillis soit par des éléments rocheux (pavement dans le désert: YAIR et LAVEE, 1976; LAVEE, 1978), soit pour toute autre cause, l'effet splash ne peut être efficace. Dans ces conditions, les animaux fouisseurs jouent un rôle capital dans l'évolution des versants par l'érosion, en préparant au-dessus du niveau protecteur (litière ou lit de caillasse) des matériaux faciles à déplacer (ROOSE, 1978, ROOSE et GODEFROY, 1977).

3 - LE LESSIVAGE VERTICAL ET OBLIQUE

Les cases de drainage vertical (DV) et oblique (ERLO) ontété conçues en vue de mesurer les charges solubles et solides (colloïdales) des eaux de percolation à différents niveaux des profils: on a veillé à perturber le moins possible l'architecture de la porosité du sol.

En dix ans, nous avons prélevé 1700 échantillons d'eau de diverses provenances représentant un volume total de 14.800 litres pour en mesurer la charge colloidale. Ces échantillons de 0.5 à 60 litres sont arrivés au laboratoire dans un délai de quelques heures à deux mois. Ils ont subi successivement une filtration rapide pour écarter les pollutions (insectes, grains de sables érodés), puis une floculation accélérée au sulfate d'alumine, plusieurs siphonages du surnageant pour évacuer la charge soluble, jusqu'à concentration dans un bécher de 250 cc., une évaporation à l'étuve à 105° C et finalement une pesée à 0.1 mg. près. Etant données la variabilité des résultats et l'instabilité relative des pseudo-solutions, les résultats sont très variables et doivent être interprétés avec prudence. Néanmoins, il est possible d'en tirer quelques conclusions qui sont d'ailleurs à mettre en relation avec nos observations en lames minces (cf. paragraphe 9.5).

Les résultats ont été réunis au tableau 9.7 et peuvent se résumer comme suit :

l - La couleur des floculats (concentrés dans un bécher avant séchage à l'étuve) varie autour du gris, du brun, du jaune et du blanc avec tous les intermédiaires et quelquefois une nuance de rouge (Divo). Les

Tableau 9.7 : Charge colloïdale (mg/1) des eaux de percolation recueillies à différentes profondeurs dans les diverses stations

| | ADIOPO- R2 DOUME | ANGUE- DEDOU | AZAGUIE Banane. | TEKE forêt | D I V forêt | 0 cacao | KORHOGO Sav.défr. | S A ERLO | R I A | GONSE |
|--|---------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------|------------|----------------------|-------------|-------|-----------|
| Ruissellement (non filtré) | 384 | 650 | 900 | 700 | 490 | 490 | 209 | 280 | - | 250 |
| Drainage | | | | | | | | | | |
| - vers 30 cm | 70 - | 246 | 57 - | 57 - | 138 | - | 100 | 246 | - | 130 (103) |
| - vers 50 cm | 64(46) | 105 | 65 (78) | 53 (56) | 126(41) | (37) | 118 | 271 | (51) | 94 (52) |
| - vers 100cm | 85(42) | 86 | 38(63) | 87! (61) | 100 (37) | (37) | 168 | 210 | (92) | 212 (178) |
| - vers 150cm | 102(36) | 71 | 24(67) | 45 (76) | 79 (52) | (31) | 269 | 142! | (111) | 212 |
| - vers 200cm | - (37) | - | - (60) | - (48) | 105 (53) | (37) | - | 195 | (116) | 281 |
| Source/nappe | 11 | ••• | - | | - | | 25 | 111 | | _ |
| Charge col loïdale à la base de l'horizon appauvri | 70 | - | 60 | 55 | 130 | - | 110 | 150 | | 100 |

Note: L'auteur estime que les valeurs de charge colloidale provenant des cases ERLO sont plus représentatives (car elles concernent une plus grande parcelle) que celles obtenues dans les lysimètres, présentées: ().

floculats provenant des eaux de pluie et de source sont toujours blancs. La couleur des floculats varie du gris-brun au brun-jaune pour les eaux de pluviolessivage, de ruissellement et de drainage superficiel et du brun jaune au jaune crème ou même au blanc pour le drainage profond. Dans les eaux de percolation issues des lysimètres les floculats sont jaune-crème à blanc. Il existe en réalité deux types de floculats. Les plus abondants sont colorés par les matières organiques et floculent rapidement : ils sont liés aux horizons humifères du sol et se déposent progressivement tout au long du profil (ou tout au moins des horizons A et B). Le second type de floculat est coloré en blanc, de texture très fine, et beaucoup plus stable (il ne se dépose dans le laboratoire qu'au bout d'un mois); dans la nature, la majeure partie des colloïdes de ce type traverse probablement tout le profil pour rejoindre la nappe phréatique.

- 2 La charge colloïdale varie de 2 à 900 mg/litre, mais le plus souvent <u>entre 20 et 300 mg/l</u>: les variations dépendant du type d'eau, de la saison et surtout du volume d'eau écoulé.
- 3 La charge colloïdale diminue lorsque le volume des écoulements augmente (même les médianes sont généralement plus élevées que les moyennes pondérées par les volumes). Nous avons donc choisi de présenter les moyennes pondérées par les volumes (mpv) pour calculer les flux. La diminution systématique de la charge colloïdale lorsque les volumes des écoulements augmentent semble indiquer l'existence d'un stock limité de particules fines mobilisables plutôt qu'une érosion de la matrice même des horizons, laquelle matrice est quasi indéfinie. Les déplacements concerneraient des particules arrachées à la surface du sol et des dépôts abondonnés par les eaux de percolation à la suite d'une averse précédente, lorsque l'avancement du front d'humectation s'est ralenti.
- 4 Les eaux de drainage vertical recueillies au bas des lysimètres sont moins chargées que les eaux recueillies à la case ERLO et les variations de charge et de couleur y sont moins accusées en fonction de l'épaisseur du sol traversé par les eaux de percolation. Sous mais et plantes fourragères la charge des eaux de percolation recueillies dans des lysimètres de plus de 150 cm est du même ordre de grandeur que sous forêt. On peut soupçonner un piégeage des colloïdes dans le bas des lysimètres, au niveau voisin de la couche de sable grossier

qui assure (imparfaitement puisqu'il n'y a pas de tension capillaire possible) le drainage. Cependant, dans les lysimètres démontés, nous n'avons pu le mettre clairement en évidence, alors qu'on a pu observer des taches rouilles dans le sable quartzeux du fond du lysimètre initialement jaune ou blanc, lesquelles taches témoignent du drainage imparfait. Une autre hypothèse explicative pourrait être que le volume réduit des lysimètres (au plus 2/3m³) ne permet pas aux phénomènes cumulatifs de se produire comme c'est le cas sur un versant ou une parcelle non limitée à l'amont (case ERLO).

- 5 La charge colloidale augmente dans les eaux de pluie, lorsqu'elles traversent la voûte forestière (mpv Adiopodoumé = 11 à 27 mg/l) et plus encore lorsqu'elles battent la surface du sol : dans les eaux de ruissellement, la charge solide totale varie de 200 à 900 mg/l, d'après l'état de cette surface, mais après filtration rapide, on ne trouve plus que 50 à 200 mg/l de colloides en suspension stable.
- 6 Lorsque les eaux s'infiltrent, soit la charge colloidale diminue progressivement (cas d'Anguédédou, Azaguié, Téké, Divo), soit elle varie peu et en ordre dispersé (cas d'Adiopodoumé), soit elle a tendance à augmenter (Korhogo, Gonse et Saria, voir lysimètres où les échantillons sont plus nombreux et plus volumineux). Si la charge diminue, il y a forcément des dépôts dans les horizons concernés et on a pu observer des cutanes sur les lames minces correspondantes.
- Si la charge augmente systématiquement, comme à Gonse et Saria où l'évapotranspiration potentielle est très élevée, c'est que le volume d'eau percolant en profondeur diminue, si bien que les colloïdes se déposent dans la masse des horizons chaque fois que le sol se déssèche après une grosse averse (cas de Gonse).

Note * : A Saria, les observations sur la case ERLO sont très discutables car elles ne résultent que de quelques mesures sur de petits volumes recueillis lors de 2 ou 3 grosses averses : par contre, on a pu faire des mesures plus nombreuses et plus valables sur de gros échantillons d'eau captés au bas de huit lysimètres (SVD)

A korhogo, les flux de matières colloïdales augmentent légèrement, mais systématiquement en profondeur : il faut donc faire intervenir des phénomènes cumulatifs tels que le drainage oblique. Cette hypothèse est confirmée par l'observation des lames minces de l'ensemble de la toposéquence. Sur ces lames minces, on observe que les cutanes argileux et ferrugineux sont d'autant plus abondants et situés d'autant plus haut dans le profil, qu'on s'éloigne du sommet de la toposéquence.

7 - L'analyse aux rayons X ainsi que les teneurs en carbone et azote de la charge colloidale floculée indiquent que leur nature est en relation étroite avec celle de l'horizon humifère superficiel.

8 - On constate enfin au tableau 9.7 que la charge colloïdale des eaux de source est toujours nettement plus faible que celle des eaux de percolation profonde (au-delà de 2 mètres) et qu'elle augmente du sud au nord parallèlement à l'ETP ou à la diminution du drainage profond. Il y aurait donc un piégeage important au niveau de la nappe phréatique avant leur écoulement dans les sources : d'où le colmatage des fonds de vallée.

L'interprétation de l'ensemble de ces résultats est bien différente de celle des sols lessivés classiques en région tempérée où les eaux se chargent dans un horizon A (dit éluvial) et se déchargent brutalement dans un horizon B bien défini (dit illuvial) par suite d'un changement net des conditions physico-chimiques ou biochimiques. (DUCHAUFOUR, 1960).

Dans les zones tropicales étudiées les conditions physicochimiques évoluent très progressivement tout au long des profils.

Les eaux de pluie se chargent en colloïdes au contact de la végétation
et surtout de la surface du sol (battance des surfaces dénudées) bien
plus qu'à l'intérieur de l'horizon éluvial : le rôle d'appauvrissement
et de désaturation des horizons superficiels est dévolu, pour une part
variable selon les circonstances au lessivage par les eaux de percolation et pour une autre, majoritaire en milieu cultivé et tropical sec,
à l'action combinée de la mésofaune et de l'érosion en nappe sélective.

Les eaux chargées de colloïdes et de suspensions fines s'infiltrent partiellement dans le sol, abandonnent dès les premiers millimètres les
éléments les plus grossiers (= pellicule de battance) et pénètrent en

profondeur dans les grandes voies de circulation (= macropores), tout en remplissant progressivement les microporosités. Lorsque le profil s'assèche, les pores se vident petit à petit de leur réserve d'eau tandis que la charge colloïdale s'y dépose en couches successives. Lors des averses ultérieures, le front d'humectation chasse les dépôts effectués dans les gros pores et les pousse plus bas (dès lors l'eau libre que nous recueillons au bas des lysimètres s'enrichit en colloïdes). En revanche, les micropores ne se réhumectent que progressivement et les argiles desséchées au fond des tubules (derniers retranchements de l'eau qui s'évapore) ne peuvent en être chassées; les colloïdes s'accumulent donc en lits orientés successifs, de façon d'autant plus rapide que l'horizon est soumis à une alternance d'humectation et de dessication.

Dans les zones tropicales sèches, les eaux de drainage sont peu abondantes et les colloïdes se déposent à faible profondeur, car le front d'humectation ne pénètre que quelques fois par an, au-delà de 50 à 100 centimètres de profondeur (cf. ROOSE, 1978 = Gonse; BIROT et GALABERT, 1970; AUDRY, 1967-1978). Dans ces conditions, nous n'avons pu recueillir des eaux de percolation qu'une ou deux fois l'an et il n'est pas étonnant que ces eaux peu abondantes soient très chargées par tous les colloïdes délaissés lors des petites averses précédentes. Par opposition, en zone subéquatoriale, il est une période de l'année où les pluies sont surabondantes et où les eaux de drainage lessivent littéralement le sol. Ces eaux sont moins chargées et on n'observe plus ces phénomènes cumulatifs propres aux zones chaudes et sèches.

Dans les horizons humifères, pauvres en micropores mais riches en macropores (zone de transit), sans cesse remaniés par la mésofaune, les accumulations de particules fines disparaissent (brassage dans les tubes digestifs et érosion sélective): les pores observés sont bien décapés, dépourvus de cutanes et ne présentent aucune forme de sédimentation, ni d'érosion (ceci est confirmé par les observations de N. FEDOROFF en février 1979).

D'autres schémas de migration et de sédimentation peuvent coexister, en particulier dans les horizons d'argile tachetée et dans les zones d'hydromorphie où le fer peut migrer sous forme réduite et libérer l'argile; on peut y apercevoir de grandes plages où l'argile s'est concentrée (distincte des reliques de feldspaths altérés).

4 - DONNÉES MICROMORPHOLOGIQUES

A plusieurs reprises, nous avons comparé les conclusions des mesures de flux solides (érosion sélective, brassage et remontées de fines par la mésofaune, lessivage) aux observations microscopiques effectuées sur des lames minces fabriquées à partir de mottes prélevées sur les profils des cases ERLO ou de leur toposéquence.

Les descriptions détaillées des lames tirées des profils de chaque case ERLO (et quelquefois de l'ensemble de la toposéquence) peuvent être consultées dans les rapports de synthèse correspondant à chaque station (ROOSE, 1976 à 1980).

Notre propos dans ce paragraphe n'est pas de discuter en détail de chaque lame et des profils de chaque toposéquence, mais plutôt de vérifier si les observations microscopiques effectuées sur des lames minces tirées du sol en place, ne contredisent pas les hypothèses émises d'après les mesures de flux de matières. En d'autres termes, n'y-a-t-il pas de phénomène non contrôlé dans notre étude de bilan qui modifie radicalement le sens de la dynamique actuelle et laisse une trace dans l'organisation du sol?

Les principales observations sont les suivantes :

l - Dans tous les profils examinés, il y a un changement radical de texture et d'organisation, tant à l'échelle macroscopique que microscopique, entre les horizons d'argile tachetée (où chacun s'accorde à estimer que les matériaux sont en général restés en place), riches en matrice fine et en éléments figurés colorés (fer sous différentes formes), et les horizons appauvris superficiels, riches en sables souvent très altérés, colorés par les matières organiques et très marqués par

les activités biologiques de toutes sortes (racines, macroporosité, cavités creusées par la mésofaune). Cette discontinuité ne doit pas forcément être interprétée en terme de migration de masse à l'échelle du paysage; elle peut être la traduction de phénomènes tels que l'érosion en nappe sélective combinée à l'activité de brassage par la mésofaune et complété par les différentes formes de lessivage des colloïdes.

- 2 Dans les horizons superficiels appauvris en particules fines, on n'observe dans les pores <u>aucune forme d'érosion</u> (qui devrait exister dans le cas du lessivage classique où les eaux de drainage se chargent dans les horizons éluviaux), <u>ni d'accumulation</u> (cutanes absents ou non apparents du fait des matières organiques grises qui enrobent les argiles). Ces colloïdes seraient donc mis en suspension stable à la surface du sol (intervention de l'énergie des gouttes de pluie pour dissocier les agrégats et des matières organiques riches en azote pour protèger la kaolinite des agents floculants) et transiteraient à travers les horizons appauvris avant de se déposer progressivement et de façon diffuse (non localisée en un seul horizon) dans les micropores de l'ensemble des profils.
- 3 Par contre, dans les horizons plus riches en particules fines et vivement colorés (argile tachetée ou retichron selon la nomenclature CHATELIN et MARTIN, 1972), on observe souvent des argillanes jaunes bien développées dans les petits pores, les aspérités en cul de sac autour des grains de sable ou autour des agrégats (surtout dans les parties les plus étroites de toutes ces cavités tortueuses). Ces argillanes jaunes recouvrent souvent, en discontinuité, des ferriargillanes rouges formant des liserés autour des agrégats ou des plages à zonation très caractéristiques

Certaines de ces plages semblent intégrées à la matrice.

4 - A Korhogo, où nous disposons des lames minces de sept profils disposés tout au long de la toposéquence, il apparaît que, plus on s'éloigne du plateau sommital, plus les cutanes sont nombreux et se développent dans des horizons proches de la surface du sol. Ceci est à mettre en parallèle avec le profil de la nappe phréatique. Si le flux concerné par le drainage oblique est peu important aux niveaux où nous l'avons

mesuré (2/3 haut de pente et de 0 à 150 cm de profondeur), on peut concevoir que les eaux de percolation profonde qui sont assez chargées (plus de 260 mg/1 vers 150 cm) alimentent la nappe permanente et qu'une bonne partie des colloides qu'elles véhiculent se déposent dans les zones de battance de la nappe et jusque dans les sols des bas-fonds où l'eau de source est encore laiteuse mais beaucoup moins chargée (25 mg/1).

5 - L'analyse chimique des horizons appauvris a toujours mis en évidence une réserve minérale non négligeable en bases. Or, l'analyse aux rayons X révèle comme constituants essentiels la kaolinite, le quartz et diverses formes d'oxydes et hydroxydes; à Azaguié et Saria, on décèle également des traces de micas plus ou moins hydratés. En lame mince, nous avons cherché l'origine de cette réserve minérale, en particulier en potassium.

A Abidjan, Azaguié et Divo, au cune trace de feldspath, mais nous avons observé quelques petits grains colorés d'épidote, de hornblende, des aiguilles de rutile et plusieurs 'lamelles de micas altérés (chlorite ou muscovite). A Saria, en plus des minéraux précédents subsistent quelques rares feldspaths.

En conclusion, ces observations micromorphologiques apportent un complément d'informations très précieux et un moyen de vérification rapide et élégant des hypothèses de travail concernant le rôle respectif du lessivage (actuel ou ancien) et de l'érosion sélective sur l'appauvrissement des horizons superficiels ainsi que dans bien d'autres domaines (structuration, porosités, réserves minérales, altération des constituants).

5 - VITESSE ACTUELLE DE L'APPAUVRISSEMENT EN PARTICULES FINES

Sans vouloir juger de l'influence de l'héritage sédimentologique sur la texture du matériau originel, il nous semble intéressant de tenter d'évaluer *l'efficacité actuelle* des moteurs de l'évolution vers l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels.

Supposons qu'initialement, la texture de tous les horizons

Tableau 9.8 : Evaluation de la vitesse actuelle de l'appauvrissement en particules fines - (A + LF = 0 à 20 microns) -

| Végétation Pente | AD Forêt 7% | Foret 65% | maīs 7% | <u>AZ</u> forêt 14 Z | AGUIE banane- raie 14% | DIVO Forêt ou cacao 10% | n — | RHOGO 8. maīs 3% | SA jeune jachère 7°/00 | RIA Sorgho 7°/00 | GONSE Savane arborée 5°/ |
|--|--------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Appauvrisse ment . épaisseur des horizons appauvris . quantité de fines manquant (t/ha) | 70cm 892t | 40cm 372t | 70cm 892t | 70cm 1260t [%] | 70cm 1594t | 40cm 801 t [%] | 71 | 40cm 30t | 15cm 513t | 15cm 513t | 30cm 1413t |
| Erosion sélective (1) . poids total de terre érodée | 50 55.4 27.7 | 450 26.7 120.15 | 90.000 3.6 3.240 | 150 50 75 | 2000 41 820 | 130 13.9 18.1 | 100 81.7 82 | 5.500 13.4 737 | 510 20 102 | 7.300 45.4 3.314,2 | 150 56 84 |
| Lessivage (2) Drainage au bas des horizons appauvris (nm) Charge colloïdale (mg/1) Appauvrissement par lessivage (Kg/ha/an) | 1030 70 721 | 1030 70 721 | 650 70 455 | 665 55 366 | 630 60 378 | 345 130 448.5 | 380 100 380 | 307 100 307 | 136 150 204 | 21 150 31. 5 | 68 100 68 |
| Appauvrissement total (1 + 2) | 748.7 | 841.15 | 3.695 | 441 | 1.198 | 466.6 | . 462 | 1044 | 306 | 3.345,7 | 152 |
| Temps nécessaire au rythme actuel (ans) | 1191 | 442 | 241 | 2858 | 1330 | 1717 | 3312 | 1465 | 1676 | 153 | 9296 |

^{* :} Dans ces stations on a tenu compte de la présence de 50% d'éléments grossiers dans la masse des horizons apparvris

superficiels était homogène (texture horizons A = texture horizon B). En comparant la quantité de particules fines (A+LF) qui manquent dans les horizons actuellement appauvris aux pertes annuelles moyennes par érosion sélective et par lessivage, on calcule qu'il faut 250 ans sous mais à 2900 ans sous forêt dans la zone forestière subéquatoriale et 150 ans sous sorgho à 9300 ans sous savane arborée protégée dans la zone de savane tropicale sèche pour atteindre, au rythme actuel, le stade actuel de l'appauvrissement en fonction du type de couverture végétale. (voir un exemple de la méthode de calcul en annexe) (ROOSE et al., 1977 à 1980).

Les chiffres présentés au tableau 9.8 ne sont bien entendu que des ordres de grandeur. Ils montrent bien qu'en milieu naturel tropical humide, le lessivage vertical constitue le moteur le plus actif de la migration des solides, car l'érosion en nappe y est très faible. Par contre, en savane présahélienne et sous culture, dès que le sol est découvert, l'érosion sélective prend une part prédominante et accélère très nettement les phénomènes d'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels.

Ces résultats signifient surtout que les phénomènes d'appauvrissement sont très rapides par rapport aux processus géochimiques tels que l'altération ferrallitique (20.000 à 100.000 ans pour l'altération d'un mètre de granite selon LENEUF, 1959 et TARDY, 1969).

CHAUVEL et CHARREAU (1972) ont trouvé des ordres de grandeur voisins à partir des observations de la charge solide dans les eaux de percolation recueillies au bas de lysimètres de sols reconstitués au Centre de Recherches Agronomiques de Bambey (Sénégal).

SIBAND (1974) est arrivé à des conclusions semblables : dès les premières années de culture, il constate une diminution du taux d'argile des horizons superficiels dans des sols rouges de Casamance (Sénégal) soumis au défrichement progressif et à la culture traditionnelle depuis 2 à 90 ans.

Note : Mode de calcul du rythme actuel de l'appauvrissement en particu--- les fines - Adiopodoumé -

1 - Importance de l'appauvrissement

C'est la masse multipliée par la différence de teneurs en argile (A) et limon fin (LF) des horizons appauvris et de l'horizon le plus riche.

1.1 Cases d'érosion

| Horizons | A+LF | dapp. | masse |
|-----------|---------|-------|--|
| 0 - 10cm | 9% | 1 | $1000 \times 1 \times (26-9) = 17\% = 170 \text{ t/ha}$ |
| 10 - 30cm | 13% | 1.4 | $2000 \times 1.4 \times (26-13) = 13\% = 364 \text{ t/ha}$ |
| 30 - 70cm | 20% | 1.49 | $4000 \times 1.49 \times (16-10) = 6\% = 358 \text{ t/ha}$ |
| В2 | 20% | | total 892 t/ha |
| 1.2 Case | ERLO R2 | | |
| 0 - 10cm | 14% | 1 | $1000 \times 1 \times (26-14)\% = 120 \text{ t/ha}$ |
| 10 - 40cm | 20% | 1.4 | $3000 \times 1.4 \times (26-20)\% = 252 \text{ t/ha}$ |
| B2 | 26% | | total 372 t/ha |

2 - Rythme actuel de 1'appauvrissement

| 2.1 Erosion sélective :Poids terre érodée (kg/ha/an) | MAIS Pente 7% 90.000 | FORET Pente 7% 50 | FORET Pente 65% 450 |
|---|----------------------|-------------------------|---------------------------|
| . différence de taux de A+L (érosion - sol en place) | 3.6% | 55.4% | 26.7% |
| . appauvrissement par érosion (kg/ha/an) | 3.240 | 27,7 | 15 و120 |
| 2.2 Lessivage Charge colloïdale x drain. à 40 cm. | | | |
| . drainage vers 40cm (mm) | 650 | 1030 | 1030 |
| . charge colloïdale (g/m^3) | 70 | 70 | 70 |
| appauvrissement par lessivage (kg/ha/an) | 455 | 721 | 721 |
| . Appauvrissement total (kg/ha/an) | 3695 | 8 48,7 | 841 |
| . Tempsnécessaire au rythme actuel | 241 ans | 1191 ans | 442 ans |

6 - CONCLUSIONS SUR LES MOUVEMENTS DE MATIÈRES SOLIDES

L'interprétation pédologique des horizons superficiels des profils des sols ne peut se faire exclusivement en terme de géochimie (altération et migration sous forme soluble) : nous avons souligné dans ce chapitre l'importance du lessivage, de l'érosion en nappe et des remontées biologiques, importance variable en fonction du climat, de la végétation et de l'impact des activités humaines.

L'érosion hydrique entraîne non seulement le décapage des horizons superficiels des sols, mais également un appauvrissement sélectif en particules fines (matières organiques, argile et limons) des horizons voisins de la surface. Les remontées de terre par la mésofaune et le brassage continuel des horizons humifères permet le développement en intensité et en profondeur des phénomènes d'appauvrissement. C'est le rapport entre l'érosion sélective (plus le lessivage) et l'érosion décapante qui va finalement déterminer l'épaisseur des horizons appauvris.

Le lessivage oblique et surtout vertical a été mis en évidence dans toute la zone étudiée non pas seulement par des méthodes macro- ou micromorphologiques déductives ou par l'analyse texturale, mais aussi et surtout, par la mesure in situ des charges colloïdales dans les eaux de percolation et des flux liquides et solides. Le lessivage a une importance très différente selon les stations. Les charges colloïdales des eaux qui percolent au-delà des horizons appauvris augmentent de 60 à 130 mg/l de la zone la plus humide à la zone la plus sèche. Mais, en même temps, le volume du drainage diminue beaucoup plus vite (de 400 à 1200 mm au sud de la séquence à 0-100 m au nord).

Par ailleurs, l'analyse des colloïdes montre que si la montmorillonite est réputée plus mobile (WCHAUFOUR, 1977) que la kaolinite, les matières organiques riches en acides aminés peuvent enrober la kaolinite et la maintenir à l'état dispersé : le lessivage peut donc se manifester aussi bien dans les sols ferrallitiques

que dans les sols ferrugineux. Les processus de lessivage semblent fort différents de celui des sols lessivés classiques en zone tempérée. C'est à la surface du sol et avec l'énergie dégagée par la battance des pluies que les colloides sont dispersés dans l'eau. Une partie ruisselle en surface tandis qu'une autre s'infiltre. Dans les premiers millimètres du sol se déposent les particules les plus grossières (pellicule de battance); les parties les plus fines floculent dans les micropores de tout le profil de façon diffuse et sont finalement piégés dans la zone de battance de la nappe et dans les bas-fonds. C'est le cheminement normal en zone tropicale humide. En zone sèche, le drainage diminue au point que le front d'humectation ne dépasse plus 50 centimètres chaque année; une bonne partie de la charge colloidale se dépose dès que la tension capillaire augmente, c'est-à-dire, le plus souvent entre 30 et 100 cm. Il semble qu'au niveau de la nappe phréatique survienne aussi d'importantes migrations d'argile, mais selon des processus totalement différents.

Il en résulte plus particulièrement que le lessivage des colloïdes est bien plus fort dans les horizons appauvris des sols ferrallitiques des zones subéquatoriales que dans les horizons superficiels des sols ferrugineux développés en zone tropicale sèche. Si, au demeurant ce lessivage est plus apparent en zone sèche, c'est parce que les colloïdes se déposent à faible profondeur (faute d'alimentation du drainage), tandis qu'en zone subéquatoriale les colloïdes vont loin et se déposent très progressivement tout au long du profil par ailleurs beaucoup plus épais.

Selon VIEILLEFON (1977) une partie des colloïdes lessivés rejoindraient d'ailleurs les terres érodées qui migrent en suspension dans les fleuves et précipiteraient dans leurs estuaires au contact des eaux salées.

Entre les horizons d'argile tachetée constitués de matériaux altérés mais en place, et les horizons appauvris en fines (humifères et souvent graveleux ou gravillonnaires) de la surface dont la structure et la texture sont souvent très différentes, apparaît une discontinuité morphologique importante. Pour expliquer cette discontinuité point n'est besoin de faire nécessairement partout appel à de grands transports de matériaux à l'échelle des versants (hypothèse de l'allochtonie). Des déplacements à courte distance comme peut le faire

l'érosion en nappes et en rigoles et le brassage sur place de la terre fine permet d'expliquer simplement, dans bon nombre de cas, la succession des horizons. Nous retrouvons ici les conclusions de l'étude de LEVEQUE (1978) qui s'est attaché à montrer les liens géochimiques existant entre les différentes parties du profil sur plusieurs toposéquences du Togo ou les conclusions de BLOT (1980) au Sénégal.

QUATRIÈME PARTIE

INTERPRÉTATION D'ENSEMBLE

INTRODUCTION

Au cours des deuxième et troisième parties qui constituent le corps de ce mémoire, nous avons exposé les résultats quantitatifs acquis sur de petites parcelles expérimentales : ils concernent l'érosion à la surface du sol ainsi que les bilans hydriques, biogéochimiques et particulaires. Le moment est venu de situer ces résultats expérimentaux parmi ceux des auteurs qui ont tenté, par d'autres voies, des études sur les transferts de matières ou sur les modifications de structure qui ont présidé à la différenciation de deux types de profils bien distincts à partir d'un même matériau extrêmement altéré et constitué pour l'essentiel de quartz, de kaolinite et d'oxydes de fer. Ces deux types de profil sont liés à deux pôles bioclimatiques du domaine intertropical.

- D'une part, dans les zones chaudes et humides se développent des sols ferrallitiques très profonds, bien drainés, peu différenciés et protégés de l'agressivité climatique par une épaisse couverture forestière ou tout au moins arbustive.
- D'autre part, dans les régions tropicales sèches à climat contrasté se développent des sols ferrugineux tropicaux lessivés et hydromorphes, beaucoup moins profonds, très différenciés et mal protégés par la savane qui brûle souvent et laisse le sol découvert à la merci de la chaleur desséchante et de la battance des pluies.

A cela, il faut ajouter l'action de l'homme qui a des répercussions considérables. L'homme est intervenu sur la dynamique de ces sols en modifiant profondément le pédoclimat. Depuis de nombreux siècles, il a transformé la végétation "naturelle" par l'agriculture itinérante ou par l'élevage extensif qui exigent tous deux l'élimination par le feu des arbres et arbustes et qui favorisent l'extension des savanes herbeuses. Avec les puissants moyens mécaniques

dont il dispose depuis deux ou trois décennies pour défricher et travailler la terre, il a accéléré (sinon déclanché) les processus d'appauvrissement en particules fines, de lixiviation des nutriments, de minéralisation rapide des matières organiques, de déstabilisation des structures des horizons superficiels et de compactage du sous-sol (BOISSEZON, 1967; CHARREAU et FAUCK, 1970; FAUCK et al., 1969; ROOSE, 1973; BLIC, 1976; MOREAU, 1978; HUMBEL, 1975; COMBEAU et QUANTIN, 1962-63-64; MOREL et QUANTIN, 1972; MARTIN 1963). Quels que soient le climat et le type de profil initial, les horizons superficiels des sols cultivés sont soumis à des phénomènes analogues, à savoir des engorgements temporaires en saison des pluies et à un dessèchement poussé en saison sèche.

Logiquement, on devrait donc aboutir à <u>l'uniformisation</u> de la pédogenèse. En fait, ce n'est pas le cas, à cause de la résistance plus ou moins grande des différents bioclimats et de leur aptitude à la régénération naturelle. Ainsi, en zone humide, la dynamique forestière est très rapide : elle permet le développement d'une mésofaune variée capable de rétablir la macroporosité et la dynamique verticale de l'eau. Par contre en savane, la dynamique de la végétation est d'autant plus lente que le climat est contrasté et que les réserves hydriques du sol sont limitées : les modifications de compacité et du pédoclimat sont par conséquent plus difficilement réversibles.

On voit donc l'importance de la végétation, soit naturelle en équilibre avec le climat, soit artificielle et liée aux aménagements agricoles. C'est la raison pour laquelle la végétation servira de pivot de notre réflexion au cours de cette quatrième partie, et c'est à partir d'elle que nous développerons les différents thèmes envisagés. Il s'agit essentiellement de :

- l'influence de la végétation sur le bilan hydrique,
- des problèmes pédologiques à proprement parler, vus à partir des migrations solubles, puis des migrations particulaires,
- enfin, une réflexion générale sur les problèmes de l'aménagement agricole dans l'Ouest Africain, à travers les résultats de ces travaux.

CHAPITRE X: INFLUENCE DE LA VEGETATION SUR LE BILAN HYDRIQUE

INTRODUCTION:

Nous avons vu au chapitre VI quelle est l'évolution générale du bilan hydrique tout au long de la séquence bioclimatique étudiée, tant à l'échelle de la parcelle que du bassin versant.

Alors que les précipitations moyennes diminuent de 2100 millimètres (9 mois écologiquement humides) à 850 mm (4 à 5 mois humides), l'évapotranspiration potentielle (ETP) varie autour de 1300 millimètres d'Abidjan à Bouaké, puis augmente en zone tropicale sèche jusqu'à atteindre 1900 mm autour de Ouagadougou. Le ruissellement reste faible (1 à 2 %) sous végétation naturelle, que celle-ci soit forestière ou herbacée. Par contre, le drainage profond diminue de 800 à 50 millimètres représentant 40-45 % des pluies en zone forestière humide,

20-35 % dans la zone des savanes soudano-guinéennes, 2-15 % dans la zone des savanes soudano-sahéliennes.

Cependant les variations locales sont très importantes. Le drainage profond varie d'une année à l'autre en fonction de l'étalement de la saison des pluies et de l'importance des séquences pluvieuses, du couvert végétal, des variations saisonnières du stock hydrique du sol, de la profondeur et de la texture du sol. Cela a été schématisé à la figure 6.9.

Il nous semble utile au cours de cette discussion générale de revenir sur le rôle joué par le couvert végétal dans le bilan hydrique à l'échelle du bassin versant, en fonction du type de climat. En effet la végétation intervient à la fois sur l'évapotranspiration réelle (en fonction du taux de couverture et de la profondeur d'enracinement) et sur le ruissellement (assèchement et protection de la

structure des horizons superficiels du sol), mais avec des intensités différentes suivant la durée de la saison des pluies et la concommitance entre la saison des pluies et la saison chaude où croissent les plantes.

1 - LES IDÉES RELATIVES AU ROLE DE LA VÉGÉTATION FORESTIÈRE

D'après GARCZYNSKI (1980), deux écoles ont des attitudes opposées devant le problème posé par l'influence de la forêt sur les précipitations atmosphériques et le régime des cours d'eau.

- D'une part, HIBBERT (1965) affirme, qu'après coupes rases de bassins boisés atteignant 700 hectares d'un seul tenant aux USA, l'écoulement total augmente de 40 à 400 millimètres par an : les chercheurs américains en ont déduit que la forêt évapotranspire plus que le sol dénudé ou recouvert d'herbes.
- D'autre part, des chercheurs russes contestent cette affirmation. A partir des corrélations existant entre les débits annuels et le taux de boisement de bassins versants de superficies allant jusqu'à 10.000 km², RAKHMANOV (1970) montre que ces résultats s'inversent lorsque la taille des bassins dépasse 10 km².

On se trouve donc en présence d'un problème d'échelle qui a déjà été souligné par de nombreux auteurs, et en particulier par le Centre Technique Forestier Tropical à Madagascar (BAILLY et al., 1974).

En reprenant les résultats disponibles sur 141 bassins du NE des USA, 29 bassins de l'Ouest de l'Oregon et 26 bassins du Sud-Ouest de la Californie, GARCZYNSKI (1980) a isolé l'influence de la forêt sur le débit spécifique annuel moyen par l'analyse des coefficients de corrélation multiple. Il montre qu'au-delà d'une certaine taille, qui est d'ailleurs dépendante du type de climat, l'influence de la forêt sur l'écoulement des bassins est positive, ou tout au moins cesse d'être négative (cf. tableau 10.1). Cette augmentation, qui concerne surtout l'écoulement de base, ne peut trouver d'explication

satisfaisante dans la légère augmentation des pluies constatée dans certaines régions forestières, mais peut-être par l'existence de précipitations occultes (brouillards, givres, rosée) plus abondantes sous forêt qu'en dehors de celle-ci; ces précipitations occultes ne sont jamais prises en compte dans le calcul des bilans hydrologiques (AUSSENAC, 1970).

Tableau 10.1 : Relations entre le débit spécifique moyen annuel et le taux de boisement en fonction de la taille des bassins et de la région des USA. (D'après F. GARCZYNSKI, 1980)

| | Sens des relations | Longueur de talweg limite |
|--|--|---------------------------------|
| . NE des USA (141 b.v.) Climat tempéré humide | influence - ou peu significative de 2,5 à 22 km influence + au-delà de 65 km² | 15 km |
| Ouest de 1'Oregon (29 b.v.) Climat tempéré ? | influence + au-delà de 150 km ² | ·25 km |
| . SW de la Californie (26 b.v.) Climat méditerranéen | influence - de 25 à 130 km ² influence non négative plus de 200 km ² | 30 km |

En dehors de l'influence de la taille du bassin versant sur les relations existant entre le taux de recouvrement de la forêt et l'écoulement spécifique (signalée par GARCZYNSKI) apparaît un deuxième facteur plus complexe où se combinent le type de climat et le type de forêt ou de végétation qui s'y développe. Il semble en effet évident à priori qu'une maigre forêt végétant sur un sol peu profond en milieu méditerranéen où les pluies tombent en majorité en dehors de la période de pleine croissance, ne peut avoir le même effet sur l'ETR et sur le ruissellement qu'une haute futaie de chênes ou de hêtres en climat tempéré océanique et, à fortiori, qu'une forêt dense humide sempervirente en région équatoriale. De plus, parmi les différentes cultures auxquelles sont opposées les forêts, il est indispensable de dissocier celles qui couvrent le sol toute l'année et lui gardent une bonne infiltration, mais diminuent l'ETR (ex. certaines prairies), des cultures sarclées qui protègent mal le sol, favorisent le ruissellement et n'utilisent

qu'une faible partie de la réserve hydrique du profil (ex. maĭs), Nous allons donc tenter d'analyser plus en détail l'évolution des écoulements en fonction des situations climatiques extrêmes existant dans la séquence bioclimatique étudiée (et un peu au-delà pour mieux faire ressortir les différences), sans pour autant nier l'existence de nombreux cas de transition.

2 – INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION EN MILIEU TROPICAL HUMIDE OU ÉQUATORIAL

Si on prend comme exemple la région subéquatoriale d'Abidjan.on constate que :

- les précipitations sont plus élevées ou presque égales à l'ETP pendant 7 à 9 mois de l'année,
- 1'ETP est relativement faible pendant la saison des pluies (80 à 110 mm/mois),
- le ruissellement n'est significatif sous forêt (et abondant dans certaines cultures) que lorsque le sol est déjà gorgé d'eau, si bien qu'il n'a guère d'influence sur l'évapotranspiration des plantes, mais bien sur le volume du drainage,
- la profondeur de sol exploitée par les racines, par contre, peut être nettement plus importante sous forêt (2 à 3,5 m représentant des variations de stock d'eau de l'ordre de 200 à 250 mm) que sous patûrage (var. stock 75-150 mm) et surtout sous culture sarclée (40 à 60 mm).

Il en résulte que la croissance de la forêt n'est ralentie que pendant 1 à 2 mois en saison sèche, car, lorsque la pluie est limitée (3 à 4 mois), les arbres puisent dans les réserves du sol l'eau dont ils ont besoin. L'ETR de la forêt est donc à peine plus faible que l'ETP dans ces régions chaudes et humides (soit 1100 à 1250 mm); le ruissellement étant très limité, l'excédent (soit 40 % environ) des eaux atmosphériques traverse le profil pédologique et l'épaisse couche d'altérite pour rejoindre la nappe. Au cas où la forêt est remplacée par une palmeraie, une plantation d'hévéas ou tout autre culture arbustive pérenne combinée avec des plantes de couverture et qui maintient une ambiance forestière, l'ETR baisse d'abord, favorisant le drainage (ou l'hydromorphe s'il existe un niveau colmaté ou tassé dans le sol); mais au bout d'une dizaine d'années, le bilan tend à ressembler à celui de la forêt.

En revanche, sous culture sarclée, le bilan est profondément modifié. Sous mais par exemple, le sol est occupé à deux reprises pendant 4 mois, puis abandonné aux mauvaises herbes qui le couvrent rapidement.

La profondeur du sol exploitée par les racines est réduite à 20-50 centimètres et les variations saisonnières du stock hydrique oscillent autour de 50 millimètres. Le ruissellement, très modeste pendant la période de jachère, nul pendant 3 à 4 semaines après labour, peut atteindre 30 à 60 % pendant la courte période de végétation (mai à mi-juillet et octobre à mi-décembre) pendant laquelle le sol est saturé. Il y a donc compétition entre ruissellement et le drainage : les pertes d'eau par ruissellement sont compensées au niveau du champ par un moindre drainage et non par une baisse de l'ETR et de la production de matière végétale.

Globalement, l'ETR sous culture sarclée est donc à peine plus faible que sous forêt (150 mm environ). L'écoulement annuel total au niveau du bassin versant de taille supérieure à la surface critique (à définir), est légèrement plus abondant sous culture que sous forêt, mais le type d'écoulement est considérablement modifié. En pleine saison des pluies, le ruissellement et les débits de crue sont très élevés une fois la forêt disparue. Par contre, en saison sèche, le débit de base (nappe) est nettement moindre. De même, la qualité des eaux diminue avec la disparition des massifs forestiers; les eaux de ruissellement provenant des champs cultivés sont nettement plus chargées que les eaux originaires des forêts et les rivières en crue prennent des couleurs en rapport avec celle des particules fines des sols érodés (chocolat, jaune, rouge).

Ces conclusions ont été déduites des observations sur parcelles d'érosion effectuées pendant vingt ans en basse Côte d'Ivoire (ROOSE, 1973-77). A Madagascar, BAILLY et al. (1974) sont arrivés à

des conclusions analogues à partir des résultats chiffrés sur une dizaine de bassins de 1 à 101 hectares dans la zone forestière d'altitude du Périnet. On peut les résumer de la façon suivante :

- 1) Effet d'échelle : lorsque la taille du bassin croît au-delà de 7 hectares, la part de l'écoulement permanent dans l'écou-lement total augmente, car les eaux de drainage profond résurgissent.
- 2) L'écoulement total d'un bassin recouvert de brousse secondaire repoussant après défrichement et culture (Savoka) dépasse d'environ 100 mm.celui d'un bassin sous forêt naturelle de même taille et de 250 mm.celui d'un bassin recouvert d'un vieux peuplement d'Eucalyptus. Les auteurs en déduisent que les Eucalyptus évapotranspirent plus que la forêt typique régionale et surtout que les premiers stades de reconstitution de la forêt après la culture itinérante.
- 3) Les débits de crues exceptionnelles sont 1,5 à 2 fois plus forts sur les bassins dont la végétation naturelle est dégradée que sous forêt. La forêt régularise donc l'écoulement des eaux.
- 4) Les techniques culturales ont aussi une influence notable à la fois sur le ruissellement et sur la qualité des eaux. Ainsi l'aménagement d'un bassin cultivé a provoqué un ruissellement qui ne représente que 60 % de celui qui a été observé sur le bassin traditionnellement cultivé en riz après brûlis (Tavy) et 40 % du témoin laissé en recru forestier (vieille Savoka). Le nombre de crues et les débits de pointe sont également plus élevés sur les champs de riz de montagne traditionnels. Quant à l'érosion, elle totalise 0,234 t/ha sous vieux recru forestier, 6,6 t/ha sur le bassin aménagé en vue de la culture et 15,6 t/ha sur le bassin soumis au tavy : une grande partie de ces terres sont érodées la première année (comme sur nos parcelles !) et migrent sous forme de suspensions fines qui vont être évacuées au loin par les rivières.

En résumé, dans ces zones tropicales humides où le ruissellement ne se développe que lorsque le sol est déjà réhumecté sur une
grande épaisseur, l'ETR varie relativement peu avec le couvert végétal,
mais la qualité des eaux et la répartition des écoulements changent
considérablement. Ces changements qualitatifs du régime des écoulements
sont particulièrement importants pour le calcul des déversoirs des

barrages, des ponts et de divers ouvrages d'art qui doivent tenir compte des débits de pointes, des risques de sédimentation de la charge solide ; des rivières (comblement des barrages, encombrement des lits des rivières en plaine et risques d'inondations) et du débit d'étiage (alimentation en eau des villes et possibilités d'irrigation).

3 – INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION EN MILIEU TROPICAL SEC, EXTENSION AUX MILIEUX MÉDITERRANÉEN OU ARIDE

Si on se réfère à la région centre Haute-Volta (Saria et Gonse par exemple) on observe que :

- les précipitations sont plus rares et moins abondantes : elles ne dépassent l'ETP que pendant trois mois par an en moyenne, au cours desquels il peut se présenter des périodes déficitaires atteignant 6 à 15 jours ;
- 1'ETP reste forte pendant la saison des pluies (115 à 140 mm/mois);
- le ruissellement démarre très vite lors des premières averses et s'amplifie à mesure que la structure de l'horizon superficiel du sol se dégrade (pellicule de battance) : le ruissellement retarde la reconstitution des réserves hydriques du sol et influence notablement l'évapotranspiration réelle des plantes qui manquent souvent d'eau;
- la profondeur du sol exploitée par les racines des savanes herbeuses et des cultures est faible (un mois après la dernière pluie utile, les herbes fanent); par contre, les arbres et certains arbustes restent verts pendant toute la saison sèche, puisent l'eau dans les niveaux d'argile tachetée (même sous la cuirasse), réduisent leur surface évaporante mais dessèchent le sol en profondeur.

Il est clair que, dans ces conditions, les formations arborées (savane Parc) ou arborescentes évapotranspirent nettement plus que les savanes herbacées ou que les cultures, car les arbres puisent plus profondément dans les réserves hydriques du sol et limitent les pertes par ruissellement. De même, sous culture, si on réussit à éliminer le ruissellement par un aménagement antiérosif (ou plutôt

antiruissellement), on observe une amélioration notable des rendements des cultures (sorho par exemple) suite à l'augmentation de leur alimentation hydrique (donc de l'ETR).

Pour étayer cette partie de la discussion, nous allons envisager plus en détail quatre cas dans des climats différents. L'un concerne la Casamance (CHARREAU et FAUCK, 1970), l'autre la région centre de la Haute-Volta (Saria : ROOSE et al., 1979) et les deux dernières ont trait à la Tunisie (DELHUMEAU, 1979; BOURGES et al., 1979).

a) - En Casamance (Sénégal)

CHARREAU (1970) résume les observations effectuées sur parcelles d'érosion de 1954 à 1968 à Séfa où il pleut en moyenne 1300 mm.en 6 mois par an et où les sols sont profonds.

Tableau 10.2 : Ruissellement (% des pluies) et érosion (t/ha/an)
----- en fonction du couvert végétal. Moyennes sur un nombre
variable de répétition.

| | Ruissellement KRAM moyen % | Erosion t/ha/an moyen |
|--|-------------------------------|--------------------------|
| Forêt sèche | 1 | 0,18 |
| Jachères herbacées | 17 | 4,88 |
| Cultures (mil, riz, sorgho, arachide, coton) | 21 | 7,3 |
| Sol nu | 40 | 50 |

On voit au tableau 10.2 que le couvert végétal a une influence très forte sur l'érosion (rapport l à 295) et sur le ruis-sellement (l à 40); les jachères herbacées et les cultures occupent des places voisines en ce qui concerne le ruissellement, situées entre deux pôles extrêmes consitutés par la forêt sèche + dégradée par les feux et le sol nu. CHARREAU (1970) précise d'ailleurs que ce sont les techniques culturales associées à chaque culture qui ont une influence réelle sur l'infiltration de l'eau dans le sol, plutôt que le type de couvert végétal.

"De ces observations sur les sols de Séfa, on aurait pu déduire que le défrichement de vastes superficies (10.000 ha d'un seul tenant à la S**é**da**ï**ca) conduirait à un assèchement progressif de la

zone déforestée et à un abaissement de la nappe phréatique, l'infiltration étant inférieure de 20 % en moyenne sous culture par rapport à la forêt. Or, ainsi que le rapportent CHARREAU et FAUCK (1970), une vingtaine d'années après le défrichement, le niveau de la nappe s'est élevée de 8 mètres, donnant naissance à des sources nouvelles. Les vallées entaillant le plateau déboisé, qui étaient autrefois à sec dès le mois de décembre, sont maintenant en eau toute l'année; les vallées voisines, dont le bassin versant est entièrement boisé, ne présentent pas de modification de leur régime d'écoulement, Après avoir écarté différentes hypothèses, CHARREAU pense que finalement, c'est la réduction de l'évaporation dans les champs en saison sèche qui paraît être le mécanisme déterminant de ce changement de régime hydrologique de la région. En effet, dès que le terrain est débarrassé des récoltes, le champ cesse vite d'évaporer : il se forme en surface un mulch naturel qui réduit à néant l'évaporation du sol. Au contraire, la forêt n'est jamais tout à fait défeuillée et continue à puiser de plus en plus profondément les réserves hydriques du sol. La réduction de 1'ETR sous culture serait ici aussi de l'ordre de 160 mm.par an par rapport à la forêt.

DAGG et BLACKIE (1965) ont abouti à des conclusions analogues en Afrique de l'Est, suite à la comparaison des bilans hydriques de nombreux bassins situés sur oxysols et soumis à différents traitements. Les bassins cultivés donnent environ 450 mm.d'écoulement en plus que les bassins forestiers, d'une part parce que le ruissellement est important sous culture, et d'autre part, parce que la forêt continue à pomper l'eau du sol en saison sèche (alors que les cultures annuelles sont mortes).

b) - En Haute-Volta, nos observations en parcelles et lysimètres ont permis d'établir des schémas de bilans hydriques pour la région de Ouagadougou où les sols sont indurés à faible profondeur et la pluviosité normale (800 mm) beaucoup plus faible qu'en Casamance.

L'examen du tableau 10.3 montre que le ruissellement est nettement plus élevé sous culture (sorgho) que sous la savane herbeuse piquetée de rares arbres (climat plus sec, sol peu profond et forte action de l'homme) qui caractérise la région du plateau Mossi.

Tableau 10.3 : Schéma de bilans hydriques en année sèche (1971), normale (1946-70) et humide (1958) sur la parcelle P7 de Saria.

| | Savane herbacée jeune Sorgho moyennement fertilisé Année | | | | |
|---|--|-----------------|-----------------|--|--|
| | sèche | normale | humide | | |
| Pluie (mm) | 617 | 826 | 1076 | | |
| Ruissellement (Sav. Kram % (Sorg. | 4 20 | 5 25 | 8 30 | | |
| ETR corrigé {Sav. % Sorg. | 93 | <u>78</u> 72 | <u>54</u> 52 | | |
| Drain.Vert. corr. {Sav. au-delà de 60 cm {Sorg. | 3 0 | 17 2,5 | 38 18 | | |

Ceci a une incidence sur le drainage au-delà de 60 cm, mais aussi sur l'ETR, en particulier durant les années sèches (93 % d'ETR sous savane, contre 80 % sous culture). Cependant les sols sont peu profonds et la réserve hydrique du sol se trouve complètement épuisée un mois après la dernière pluie utile, quelle que soit le type de végétation ; il en résulte que dans ce cas, le débit de base n'est plus augmenté suite au défrichement et à la culture. Les bas fonds sont inondés en saison des pluies et desséchés en saison sèche.

c) - En Tunisie du Nord

Dans le cadre d'une étude d'un bassin versant du Nord de la Tunisie sous climat méditerranéen subhumide, à saisons très contrastées, DELHUMEAU (1979) a suivi les variations saisonnières du stock d'eau du sol sous trois types de maquis plus ou moins dégradés par l'exploitation et sous une plantation d'Eucalyptus de 15 ans. Il constate que sur ces sols lessivés hydromorphes, les fluctuations d'humidité sont très grandes (400 mm sur 240 cm de profondeur de sol) au regard de la pluviosité (800 mm). Au cours des quatres années de mesure, les sols ont atteint le même état de saturation en hiver à l'exception de la parcelle sous Eucalyptus où la consommation d'eau immédiate ne permet pas une reconstitution complète des stocks. En été, il a constaté un dessèchement d'autant plus précoce et prononcé du sol que le

couvert végétal est important. Le couvert forestier souffre donc plus que le maquis du manque d'eau estival. Aussi, malgré les fortes intensités des pluies, le ruissellement et le drainage restent très limités lorsque la végétation n'est pas trop dégradée : toute l'eau disponible est évapotranspirée lorsque le couvert forestier est complet.

d) - En Tunisie du Sud

Dans la région de Gabès qui jouit d'un climat méditerranéen aride, les précipitations sont faibles (180 mm), très irrégulières (pluie de 250 mm en 18 heures 1e 12-12-73). Les précipitations ont lieu en hiver, tandis que la végétation se développe au printemps. La végétation naturelle est une steppe à Armoise, composée de quelques plantes pérennes, réagissant peu à la mise en défens (croissance du couvert de 3 à 10 % en 6 ans) et d'herbes annuelles dont le développement dépend essentiellement des précipitations et qui influencent notablement le ruissellement. Celui-ci peut atteindre 60 à 85 % lors des averses importantes (10 à 20 % 1'an). Comme les sols sont limono-argileux.il n'y a pas de drainage profond et toute l'eau infiltrée est finalement évapotranspirée (pas de nappe), car il ne se forme pas de mulch, contrairement aux sols sableux de Tunisie ou du Sénégal*. La seule façon d'accumuler assez d'eau pour pratiquer la céréaliculture. c'est d'épandre les crues des oueds qui se forment dans les collines (djebel) ou d'améliorer le ruissellement de certains impluvium pour alimenter de petits champs en contrebas (Segui) (BOURGES, FLORET, GIRARD et PONTANIER, 1979).

En définitive, dans ces zones très arides, toute l'eau infiltrée est évapotranspirée ; la végétation pérenne est trop dispersée pour influencer notablement les écoulements, mais les pailles des herbes annuelles peuvent limiter temporairement le ruissellement.

Note: COLOMBANI, VACHAUD et VAUCLIN (1980) ont une opinion plus nuancée: ils estiment que les 2/3 du volume d'eau infiltré lors des averses importantes (100 mm) pourraient être stockés en profondeur dans les sols sableux comme ils l'on constaté lors d'une irrigation en condition contrôlée (lysimètre, sonde à neutrons et sensiomètres). Ce type d'averse ne serait pas si rare en milieu désertique.

4 - CONCLUSIONS

Les exemples cités montrent combien la végétation intervient puissamment sur les éléments du bilan hydrique. De plus, il apparaît clairement que les résultats diffèrent en fonction de la réserve hydrique du sol, de la nature de la végétation et surtout du climat.

Sous climat tropical humide à équatorial, la différence entre le milieu forestier et le milieu aménagé porte plus sur le régime des écoulements et la qualité des eaux que sur l'écoulement total; seule la différence de réserve hydrique de l'épaisseur du sol concerné par l'enracinement diffère (soit environ 150 mm).

Lorsque <u>le climat tropical devient plus sec</u>, le ruissellement qui se développe abondamment dans le milieu cultivé diminue l'évapotranspiration réelle du bassin. En plus des différences de régime et de qualité des eaux, l'écoulement total (ruissellement plus débit de base) et l'alimentation des nappes peut diminuer sérieusement lorsque se développe une végétation arborée (en particulier certains Eucalyptus).

<u>Dans la zone aride</u>, il est difficile d'accumuler l'eau dans le sol (cf. les méthodes de dry farming) à moins qu'il soit sableux; pour alimenter les plantes cultivées, il faut épandre dans les plaines les eaux de ruissellement provenant des collines dénudées.

Deux points de vue sont sous-jacents à cette discussion.

- Les hydrologues recherchent des bassins à forte hydraulicité (c'est-à-dire qui fournissent beaucoup d'eau) pour subvenir aux besoins des collectivités (eau, électricité, irrigation) situées en dehors du bassin ; la végétation leur apparaît quelquefois comme un concurrent qui gaspille l'eau en l'évapotranspirant.
- Les agronomes limitent le ruissellement pour éviter les risques d'érosion et surtout pour fournir aux plantes cultivées toute l'eau nécessaire pour produire le maximum de matière verte ; par le travail du sol et un ensemble de techniques biologiques, ils maintiennent l'eau dans les bassins qu'ils mettent en valeur.

Dans la zone tropicale recevant plus de 600 millimètres de pluie, il est généralement souhaitable pour la protection du patrimoine foncier que les uns et les autres favorisent la couverture du sol*, même si celle-ci consomme une fraction des eaux disponibles, compte tenu des avantages fournis par cette couverture végétale qui régularise les variations saisonnières des débits et qui permet la fourniture d'une plus grande quantité d'eau de bonne qualité en saison sèche (nappe).

^{*}Note : Pas forcément la forêt.

<u>CHAPITRE XI</u>: <u>DYNAMIQUE DES PROFILS PEDOLOGIQUES</u>: ASPECT GEOCHIMIQUE DES TRANSFERTS

INTRODUCTION:

En région tropicale, l'altération hydrolytique étant relativement rapide et très caractéristique, on a pris l'habitude de définir la pédogenèse par ses aspects essentiellement géochimiques (HARRASSOWITZ, 1926; AUBERT et SEGALEN, 1966; PEDRO, 1966-1979). Les autres données pédologiques auxquelles on se réfère, ailleurs où les sols sont moins épais, (cycle biogéochimique, migration en phase solide, etc...) ont été longtemps négligées.

A l'issue de ce travail réalisé sur les couvertures kaoliniques de la zone intertropicale présentant différentes nuances depuis le climat subéquatorial humide jusqu'aux climats contrastés des savanes soudaniennes, il nous paraît intéressant de faire le point à ce sujet et de bien situer, surtout en ce qui concerne les niveaux supérieurs, l'aspect géochimique de la pédogenèse par rapport à la redistribution de matière en phase solide. Nous envisagerons donc successivement ces deux aspects dans les deux chapitres qui vont suivre.

Au chapitre XI, nous discuterons de l'intérêt et des limites de l'étude géochimique pour appréhender la dynamique actuelle de ces couvertures kaoliniques en milieu tropical. Au chapitre XII nous soulignerons la réalité et l'importance des transferts de matières solides.

Classiquement, l'aspect géochimique de la pédogenèse est envisagé d'un point de vue fondamental, à partir de la composition chimique des eaux de percolation. On essaie de déterminer les processus géochimiques mis en jeu, au cours de l'altération, soit en se référant à la composition des roches en voie d'altération (c'est la méthode des bilans : PEDRO, 1964-1966 ; TARDY, 1969), soit en considérant les concentrations à l'équilibre (c'est la méthode des

diagrammes de stabilité basée sur les équilibres thermodynamiques (GARRELS et CHRIST, 1965; FRITZ et TARDY, 1973).

Or, dans ce travail, nous disposons de toutes les données chimiques concernant la composition de toutes les eaux superficielles. Nous pouvons donc envisager l'aspect géochimique de la pédogenèse dans les milieux considérés (mais de façon succincte, car ce n'est pas le fond de notre problème).

1 - APPLICATION DE LA MÉTHODE DES BILANS

Plusieurs auteurs ont montré qu'il était possible de prévoir le sens de l'évolution géochimique d'un substrat minéral à partir de la composition chimique des eaux qui percolent à travers ce substrat (PEDRO, 1964; TARDY, 1969; LENOIR, 1972; DEJOU et MORIZET, 1977). Or, les eaux superficielles dont il est ici question. ruissellent à la surface ou percolent dans les horizons superficiels du sol et non dans la zone d'altération des roches. Il faut donc d'abord se poser la question de savoir s'il reste dans le sol assez de minéraux primaires pour intervenir dans l'équilibre des solutions ? Les analyses chimiques ont toujours montré que les réserves en bases (bases totales - bases échangeables) sont faibles mais significatives. Les diagrammes de diffraction des Rayons X confirment le fait qu'endehors du quartz et de la kaolinite qui constituent la majorité de la masse minérale des horizons superficiels étudiés, il existe des traces d'illite, de muscovite ou de chlorite (cf. § 7.2.1.). Enfin l'étude micromorphologique de lames minces a montré l'existence de quelques minéraux lourds dans presque tous les horizons étudiés et en outre, de quelques feldspaths dans les sols de Saria. Il ne nous paraît donc pas absurde d'appliquer les paramètres de PEDRO (1966) et de TARDY (1969) non seulement aux eaux de nappe, auxquelles ils s'appliquent naturellement, mais également aux eaux superficielles qui entrent en contact avec la partie supérieure des profils : en effet,

Note:

Pour que cela ait un sens, il faut soustraire les teneurs observées dans les eaux atmosphériques de celles des eaux de percolation. Voir note complémentaire en fin de chapitre.

il pourrait suffir de peu de minéraux primaires pour imposer une certaine charge chimique (toujours très faible) dans les eaux étudiées. Nous les avons calculés pour trois stations situées sur granito-gneiss (Saria, Korhogo et Divo) et une station sur sédiments argilo-sableux issus de l'altération ancienne de granites (Adiopodoumé).

a) - Utilisation des paramètres de G. PEDRO

PEDRO (1964-1966) a constaté durant ses expériences de percolation en soxhlet, qu'il était possible de définir trois grands domaines géochimiques en comparant les rapports moléculaires entre la silice et la somme des bases du substrat rocheux (R) et des eaux de percolation (L).

| Conditions | Domaine géochimique | Néoformation de |
|-------------------------------|--|---|
| si: L > R L > RK L < RK | allitisation mono-siallitisation bi-siallitisation | gibbsite kaolinite Montmorillonite ou argile 2/1 |

où L =
$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{CaO+MgO+K}_2\text{O+Na}_2\text{O}}$$
 dans les eaux de percolation
$$R = \frac{\text{SiO}_2 \text{ combinée}}{\text{CaO+MgO+K}_2\text{O+Na}_2\text{O}}$$
 dans le substrat minéral de départ
$$RK = \frac{\text{SiO}_2-2\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO+MgO+K}_2\text{O+Na}_2\text{O}}$$
 dans le substrat minéral de départ

Ces paramètres expriment le fait que dans l'altération des feldspaths, micas et amphiboles composant les granites et les basaltes, si la silice est évacuée plus vite que les bases en milieu drainant, la néogenèse aboutit à la formation de gibbsite, ou tout au moins de la kaolinite. Par contre en milieu peu drainant, la silice est piégée en plus grande quantité par l'alumine libérée lors de l'altération des feldspaths : les bases sont alors évacuées plus vite que la silice.

Tableau 11.1 : Variation des paramètres d'altération L et R définis par PEDRO en fonction de l'aridité du climat et du type d'eau.

| | Roche mère et | | $L = \frac{\text{Silice}}{\text{somme des bases}}$ | | | | |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|--|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--|
| | pluviosité moyenne (mm/an) | R et (RK) | Ruiss. | Drain. sup. 0 à 100cm | Drain. inf. 150 à 200cm | Source ou nappe | |
| Adiopodoumé | Sédim.Sable III P = 2100 mm | $44,9^{*}$ (RK = 2,25) | 0,16 | 0,47 | 0,22 | 1,04 | |
| Divo | Granito-gneiss P = 1550 mm | 3 à 5 ? - | 0,18 | 0,26 | 0,24 | - | |
| Korhogo | Granito-gneiss P = 1350 mm | 5,18 ^{**} (RK = 3,31 | 0,51 | 0,79 | 0,22* | 2,88 | |
| Saria | Granito-gneiss P = 830 mm | 3 à 5 ? - | 0,17 | 0,45 | _ | 2,31 | |

- Notes : * En absence de précision sur la roche sédimentaire d'origine nous avons pris en compte les résultats d'analyse du sol vers 3 mètres de profondeur (Roose, 1980, p. 17).
 - D'après la médiane des teneurs mesurées sur les granites de Korhogo (Tardy, 1969).
 - La teneur inhabituellement élevée des eaux de drainage en K diminue le paramètre L.

Du tableau 11.1 on peut tirer les conclusions suivantes :

- 1) Quelque soit le type d'eau, le rapport moléculaire de la silice sur la somme des bases dans l'eau (L) est nettement plus petit que dans le substrat (R). Par contre, dans les eaux de nappe ou de source, L se rapproche de RK.
- 2) Le paramètre L n'est pas plus faible dans les eaux de percolation recueillies en zone tropicale sèche (Korhogo et Saria) que dans les eaux drainant en milieu subéquatorial, alors que le premier milieu est plus proche du domaine bisiallitique que le second.
- 3) Cette valeur anormalement basse du paramètre L résulte soit d'un déficit de silice dans les eaux (ce qui est peu probable, étant donnée la masse de quartz présente qui se dissout lentement voir plus loin), soit d'un excédent de bases sans commune mesure avec

les minéraux primaires existant dans les horizons superficiels des sols étudiés.

On peut en conclure que l'influence des minéraux sur la charge soluble des eaux de ruissellement et de percolation n'est sans doute pas prépondérante, soit que le temps de contact entre l'eau et les minéraux est trop faible, soit qu'il n'y reste plus assez de minéraux altérables dans les horizons superficiels (contrairement aux horizons superficiels des sols tempérés), soit surtout, parce que la concentration en surface des éléments biogènes modifie les équilibres (apport de bases).

b) - Utilisation des paramètres de Y. TARDY

TARDY (1969) a montré que le rapport SiO₂/Al₂O₃ des produits résiduels ou néoformés au cours de l'altération des granites et des basaltes pouvait être évalué à partir de la seule connaissance de la composition des eaux de nappe ou de source. Il se base sur le calcul du résidu silico-alumineux de l'altération des feldspaths (et des autres minéraux altérables dans le cas du basalte). Il suppose que la majorité des bases libérées sont évacuées, mais que l'alumine (et le fer) reste en place. Dans ces conditions, la silice libérée, mais fixée par l'alumine pour former une phyllite, se calcule facilement par la différence moléculaire entre la silice libérée (= 6K₂O + 6Na₂O + 2CaO) et la silice éliminée dans les eaux de source. Dans le cas des granites le paramètre s'écrit :

$$RE = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3} \text{ phyllite} = \frac{\text{Silice liberée-Silice évacuée}}{\text{Alumine liberée}}$$

$$= \frac{6\text{K}_2\text{O} + 6\text{Na}_2\text{O} + 2\text{CaO} - \text{SiO}_2 \text{ évacué}}{\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}}$$

Cette méthode présente l'avantage de pondérer l'influence de chaque base en fonction des teneurs moyennes en différents feldspaths (potassique, sodique ou calcique) dans les roches des environs et de ne pas exiger la connaissance précise de la composition des roches (quelquefois difficiles à atteindre sous l'épaisse couche d'altérite). Travaillant sur le même bassin granitique de Korhogo que nous, TARDY a montré que dans la zone tropicale humide les solutions se renouvellent bien : la monosiallitisation (et parfois l'allitisation)

domine. Cependant, lorsque la saison sèche se prolonge, les solutions peuvent se concentrer en bas de pente et donner naissance à une mont-morillonite éphémère. Nous avons calculé le paramètre RE de TARDY pour les mêmes eaux que celles du tableau précédent.

Tableau 11.2 : Evolution du paramètre RE d'altération de TARDY (1969)

pour les roches acides en fonction de l'aridité du
climat et du type d'eau.

| | Roche mère | Précipitation (mm) | $RE = \frac{SiO}{Al_2}$ | $\frac{2}{0_3} = \frac{6K_20}{K_1}$ | +6Na ₂ 0+Ca0-Si0 ₂ ₂ 0+Na ₂ 0+Ca0 | | |
|-------------|---------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------------|--|--------------------|--|
| | | - | Ruiss. | Drain. sup. | Drain. inf. | Source ou nappe | |
| Adiopodoumé | Séd. III | 2100 | 3,46 | 3,31 | 3,97 | 2,65 | |
| Divo | Granito-gneis | s 1550 | 3,02 | 4,12 | 3,77 | - | |
| Korhogo | 11 11 - | 1350 | 2,61 | 2,67 | 4,01 | 0,82 | |
| Saria | 11 11 | 830 | 2,35 | 2,86 | _ | 1,97 | |

Du tableau 11.2, on peut tirer les conclusions suivantes :

- I) Tous les rapports RE calculés pour les eaux superficielles sont très supérieurs à ceux qu'on pourrait attendre, étant donnée la nature kaolinitique des minéraux résiduels qu'on trouve dans les horizons au sein desquels percolent les solutions.
- 2) Seules les eaux de nappe donnent des valeurs normales, voisines de celles calculées par TARDY (en particulier à Korhogo).

 Dans la nappe de Saria (prélèvement d'octobre à fin mars, durant la phase de décroissance rapide de la nappe) l'indice est déjà plus élevé et se rapproche de la zone bisiallitique. En réalité, si la kaolinite est largement majoritaire dans les matériaux bariolés où circule la nappe, on y trouve également des traces d'illite. Par contre, dans les sédiments argilo-sableux tertiaires d'Adiopodoumé l'indice calculé sur les eaux de source (dans le jardin botanique) indique un déficit de silice par rapport aux bases. En fait, la roche sédimentaire très siliceuse n'a plus rien à voir avec une roche granitique: l'indice ne peut pas s'y appliquer.
- 3) Comme pour les paramètres de PEDRO, RE n'augmente pas (bien au contraire) pour les eaux de percolation depuis la zone subéquato-

riale vers la zone tropicale sèche, alors qu'on y trouve, à côté de la kaolinite, de faibles quantités de minéraux 2/1.

Si différents auteurs (cf. DEJOU et MORIZET, 1977, dans le Massif Central) trouvent dans les eaux de drainage recueillies dans des lysimètres de moins de un mêtre de profondeur en région tempérée de bonnes concordances entre les paramètres définis par PEDRO et TARDY et la genèse des minéraux argileux secondaires, sans doute faut-il l'attribuer à une différence essentielle de la vitesse d'altération : en région tempérée, on trouve des minéraux altérables en quantité non négligeable jusqu'à la surface du sol (même dans les sols bruns acides et les podzols : cf. GUILLET, ROUILLER, VEDY, SOUCHIER, 1971 à 1980) tandis qu'en région tropicale humide les minéraux facilement altérables ont généralement disparu dès la base de l'horizon d'argile tachetée, à plusieurs mètres de la surface du sol.*

c) Conclusions

Dans le milieu tropical étudié, ces paramètres ne s'appliquent qu'aux eaux de nappe profonde en contact avec les minéraux primaires. Les eaux de ruissellement et de drainage, même jusqu'à deux mêtres de profondeur, ne rencontrent pas suffisamment de minéraux altérables. L'altération étant pratiquement terminée, la géochimie n'est pas discriminante : elle est identique dans tous les horizons superficiels de la zone étudiée. Dans la tranche supérieure des profils dont il est question ici, l'influence du milieu minéral semble estompée par celle de l'activité biologique (y compris celle de l'homme) : la haute teneur en bicarbonate (10 à 98 ppm) des eaux de percolation, bien plus élevée que celle des eaux de nappe (5 à 25 ppm) en est un autre indice. Il reste encore à vérifier si les eaux de percolation sont en équilibre avec les minéraux résiduels : le quartz et la kaolinite.

^{*} Note : Si la roche-mère n'intervient pas directement sur la charge soluble des eaux de percolation en milieu tropical humide car l'altération y est trop rapide, elle peut intervenir indirectement par le biais de la texture : le taux d'argile en effet est souvent étroitement lié au taux de matières organiques (ROOSE et CHEROUX, 1966 ; de BOISSEZON, 1973) et par là, à la capacité d'échange de bases et aux propriétés hydrodynamiques et structurales des sols ferrallitiques (BOYER, 1975).

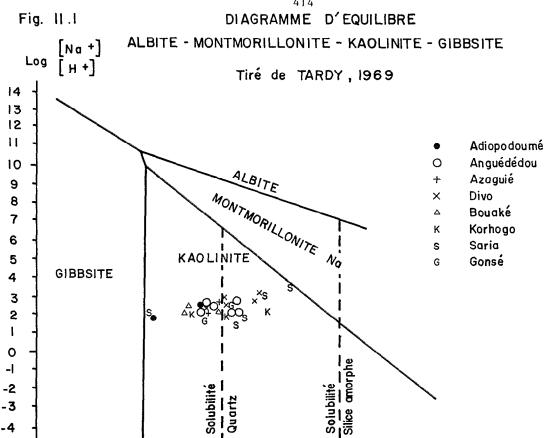


Fig. II.2 SOLUBILITE DU QUARTZ (Q), DE LA KAOLINITE (K) ET DE LA GIBBSITE (G)

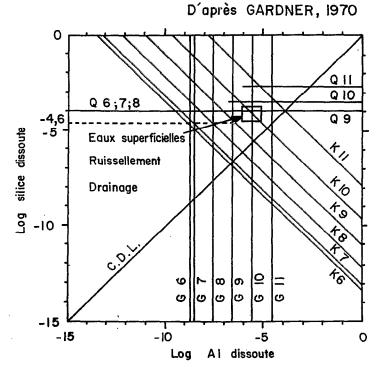
10

-4 -5

C.D.L.: ligne de dissolution congruente de la kaolinite

50 100 200

SiOz mg/L.



Teneur Al 203 = $1\dot{a}6$ 10 -6 moles/L. $Si O2 = 10^{-4} a 10^{-5} moles/L.$

2 - UTILISATION DES DIAGRAMMES D'ÉQUILIBRE

Nous envisagerons successivement le diagramme complet mettant en oeuvre des minéraux primaires altérables (albite), puis un diagramme simplifié ne comportant que l'intervention du quartz, de la kaolinite et de la gibbsite.

a) Diagramme d'équilibre de l'altération de l'albite (d'après TARDY, 1969)

A la figure 11.1, on a reporté les points représentatifs des différents types d'eaux analysées. On n'a considéré que les moyennes pondérées des teneurs (mpv cf. tableaux 7.2 à 7.5) exprimées en concentrations molaires et non par les activités, ce qui entraîne une légère erreur par excès compte tenu de la faible force ionique des solutions.

On voit que toutes les eaux sont situées au milieu du domaine de stabilité de la kaolinite, espèce effectivement très stable dans la majeure partie du milieu supergène. Les eaux de ruissellement et de nappe de Saria ayant respectivement les teneurs les plus faibles (1 ppm) et les plus fortes (35,6 ppm) observées en silice, sont les plus rapprochées des limites du domaine de stabilité de la kaolinite.

En revanche, les points représentatifs des eaux étudiées chevauchent la limite de stabilité du quartz (10⁻⁴ moles/litre ou 6 ppm de SiO₂). Les tableaux A7.1 à A7.12 en annexe montrent que :

- <u>les eaux de ruissellement</u> sont en moyenne sous saturées vis-à-vis du quartz (SiO₂ varie de O,5 à 10 ppm et en moyenne de 1 à 4 ppm),
- <u>les eaux de drainage</u> peuvent être sous-saturées ou sursaturées selon les stations et les saisons (SiO₂ varie de 1 à 20 ppm et en moyenne de 5 à 16 ppm),
- <u>les eaux de nappe</u> sont sursaturées (SiO₂ varie de 7 à 37 ppm).

D'où la possibilité de distinguer <u>deux niveaux géochimiques</u>, l'un au voisinage de la roche où l'altération s'effectue en milieu plus ou moins saturé et où les grains de quartz devraient être conservés (LELONG, 1969) et l'autre, dans la partie superficielle des sols dépourvus de minéraux altérables, où le quartz peut être périodi-

quement dissous (FAUCK, 1972).

b) <u>Diagramme concernant l'équilibre Quartz-Kaolinite-</u> Gibbsite

D'après GARDNER (1970), la solubilité de la kaolinite est une fonction de l'acidité et des teneurs en silice et en alumine de la solution. Les limites de stabilité sont pratiquement les mêmes dans la gamme des pH qui nous concerne (pH = 6 à 7). La kaolinite est d'autant moins hydrolysable que les eaux sont plus chargées en silicium et en aluminium.

On peut remarquer sur 1e diagramme (fig. 11.2) que 1es eaux dont la teneur en silice est voisine de la saturation vis-à-vis du quartz (soit 6 à 0,6 ppm ou 10⁻⁴ à 10⁻⁵ moles de SiO₂ par litre) ne seraient agressives vis-à-vis de la kaolinite que pour des teneurs en alumine dissoute inférieures à 0,1.10⁻³ ppm. Comme l'ensemble des eaux analysées présente des concentrations au moins mille fois plus fortes (0,1 à 0,6 ppm), on peut considérer que la kaolinite est stable dans ces milieux. Certes, il est probable que l'alumine dosée dans les eaux filtrées rapidement comprend une certaine proportion d'alumine complexée ou même particulaire, ce qui doit nuancer notre conclusion. D'ailleurs en milieu équatorial plus humide très désaturé en silice, LELONG (1969) a montré que la kaolinite pouvait être détruite (traces de gibbsite secondaire) dans les horizons superficiels.

c) Conclusions

Dans les conditions climatiques et lithologiques où s'est déroulée cette étude, ce n'est qu'au contact des premiers centimètres du sol que les eaux atmosphériques (sous saturées en silice) peuvent quelquefois être agressives vis-à-vis de la kaolinite. Par la suite, les eaux qui percolent dans la partie supérieure du profil sont capables d'attaquer le quartz, tout au moins à certaines périodes de l'année, mais pas la kaolinite. Enfin, les eaux de nappe qui circulent à proximité ou dans les altérites sont sursaturées vis-à-vis du quartz et président à la néoformation d'argile dont le type (1/1 ou 2/1) dépend de l'aridité du climat et de l'efficacité du drainage. Cependant, si la charge soluble des eaux de surface n'est donc pas indépendante

du milieu minéral qui le compose, elle ne peut s'expliquer sans faire appel à l'activité biologique qui influence très profondément l'aspect morphologique et les propriétés physiques et chimiques des horizons superficiels.

3 – ROLE DE L'ARIDITÉ CLIMATIQUE ET DE L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE SUR LES PHÉNOMÈNES GÉOCHIMIQUES

Plusieurs auteurs (SCHOELLER, 1941 et 1962; TARDY, 1969) ont montré que la charge soluble dans les eaux naturelles se concentre à mesure que le climat devient plus chaud et plus sec.

Ainsi en milieu tempéré, les eaux de source et des rivières non polluées sont peu chargées (SCHOELLER, 1941; BERTHOIS, 1964; TARDY, 1969; BOURRIE, 1978). Les eaux se chargent à mesure qu' on se rapproche du Sahara (SCHOELLER, 1941; TARDY, 1969) puis deviennent à nouveau moins chargées dans les zones tropicales de plus en plus humides.

De même, les eaux de nappe du Ghana ; pays beaucoup plus sec que la Basse Côte d'Ivoire, sont nettement plus chargées (AKITI, 1980) que celles que nous avons observées depuis la Basse Côte d'Ivoire jusqu'au centre de la Haute-Volta. Par contre, les eaux de ruissellement, de drainage et des rivières sont encore moins chargées en zone équatoriale perhumide (pluviosité moyenne de l'ordre de 3000 mm/an) que dans la zone forestière subéquatoriale de Côte d'Ivoire : cela s'est vérifié au Gabon (COLLINET, 1971), en Guyane française (BLANCANEAUX,1979) et dans la région amazonienne du Brésil (NORTCLIFF et THORNES, 1977).

Cependant, si on reporte sur un graphique (fig. 11.3) la teneur en divers éléments solubles dans les différents types d'eau recueillie dans chacune des stations en fonction de la lame moyenne de drainage profond, on n'observe pas clairement l'augmentation systématique des teneurs avec l'aridité du climat. Bien souvent, les teneurs les plus élevées sont obtenues à Divo, dans la zone des forêts semidécidues où l'activité biologique est la plus élevée, alors que le rapport de concentration pluie/drainage est nettement plus fort à Gonse (ROOSE et LELONG, 1980). Seule la charge en silice des eaux de

Αn

Fig. 11.3, EVOLUTION DE LA CHARGE SOLUBLE (SiO2, Na, SO4, Ca en ppm) Through fall EN FONCTION DU DRAINAGE PROFOND (log de mm.) Runoff waters Drainage waters Spring waters SiO₂ ppm Na ppm 20 -10 -• 0 0 0 10-5 0 0 00000 0 0 2,23 2,372,39 2,63 log drainage 2,13 2,23 2,37 2,39 2,63 2,94 log drainage SO4 ppm Ca ppm 0 0 0 10 -10 -8 0 0 5 5 8 00 0 0 9 0 Φ 0 2,13 2,23 2,37 2,39 2,63 2,94 log drainage 2,13 2,23 2,37 2,39 2,63 2,94 log drainage Go Во Αz Ad Di Ko Go Bo Di Ko Αz Ad Sa An Sa

nappe augmente systématiquement avec l'aridité climatique.

Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer la faible relation existant entre l'aridité climatique et la charge soluble des eaux superficielles du transect bioclimatique étudié :

- 1) Les pluies sont plus chargées près de l'Océan et l'influence des embruns marins se fait sentir sur plus de 150 km à l'intérieur des terres. MATHIEU (1972) l'avait pressenti en comparant la composition des pluies prélevées à Korhogo et près de Tiassalé (non loin de Divo et Lamto).
- 2) Le pluviolessivage est beaucoup plus efficace sous les arbres que sous les herbes. Les eaux météoriques qui arrivent au sol sont donc plus chargées dans la zone des forêts denses humides que dans les savanes où la densité des arbres diminue à mesure que le climat est plus aride.
- 3) Les stations étudiées ne correspondent pas parfaitement au milieu naturel; la végétation est dégradée et les sols appauvris par les feux de brousse (Gonse, Korhogo) ou une exploitation extensive (pâturage à Gonse, Korhogo, mulch à Azaguié, jeune jachère à Saria).
- 4) L'activité biologique, qui diminue lorsque l'aridité augmente, est modifiée très largement par la dégradation du couvert végétal.
- 5) Rôle de l'hétérogénéité topographique. TARDY lui-même, tout en observant une augmentation nette de la salinité des eaux à mesure qu'on se rapproche du désert, a constaté des variations locales importantes. Son indice RE varie par exemple de 2 dans les eaux de nappe prélevées sous les sols ferrugineux du haut de la toposéquence étudiée par BOCQUIER (1971) au Tchad, à 2,6 (zone bisiallitique) dans les sols vertiques mal drainés de bas de pente.

Dans son étude sur la charge soluble du fleuve Bandama qui prend sa source en Haute-Volta et se jette dans l'Océan à une centaine de kilomètres d'Abidjan, Lenoir (1972) constate également que la charge soluble varie peu en fonction de l'aridité des bassins secondaires, mais augmente légèrement (en silice en particulier et en bases) à mesure qu'il se rapproche de l'Océan.

Dans les limites de la séquence bioclimatique étudiée, nous constatons donc peu de différence de la charge soluble en fonction de

de l'aridité du climat, mais des variations notables à l'intérieur de chaque région climatique en fonction de l'état de dégradation du couvert végétal (et surtout de l'aménagement du milieu comme nous le verrons plus loin). Par conséquent on pourrait se demander si, à mesure qu'on se rapproche du Sahel, la réduction des activités biologiques ne compense pas la concentration des solutions par l'évapotranspiration et la diminution de l'entraînement par le drainage. Peut-être faut-il passer certains seuils d'aridité (et de type de roche ou sol) pour constater des différences sensibles?

En tout cas, compte tenu de la faible concentration des solutions dans toute la séquence bioclimatique étudiée, il est clair que les flux dans le milieu naturel ou perturbé vont dépendre essentiellement du volume des écoulements, comme l'on déjà signalé plusieurs auteurs (DABIN et LENEUF, 1958; ROUGERIE, 1960; ROOSE, 1967-73; LENOIR, 1972).

4 - INFLUENCE DE L'AMÉNAGEMENT DU MILIEU SUR LA CHARGE SOLUBLE

Nous avons vu au § 7.1.4. que l'homme peut modifier considérablement la charge soluble des eaux de surface en aménageant le milieu en vue des productions végétales qui l'intéressent. En effet, il déclanche la libération rapide du stock minéral accumulé dans la biomasse et dans les matières organiques du sol lors du défrichement, du feu et du travail du sol (BEIRNAERT, 1941; AUBERT, cours 1963); par ailleurs, il exporte des quantités non négligeable d'élements contenus dans les récoltes et apporte des engrais pour favoriser la production.

Comme la capacité de stockage des éléments nutritifs solubles dans les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux est très limitée (argile kaolinitique et matières organiques évoluant rapidement), la charge soluble des eaux de percolation dépend du volume des écoulements et de <u>l'équilibre</u> qui s'établit entre l'offre d'éléments disponibles (éléments échangeables, fertilisation, minéralisation des matières organiques, apports par les eaux de pluviolessivage et d'irrigation) et la demande réelle des végétaux transmise au niveau des racines. L'apport répété d'engrais acides concentrés chasse certains

cations du complexe absorbant et provoque une accélération de l'acidification.

Il en résulte des variations considérables de teneurs des eaux de percolation en fonction des éléments, des plantes cultivées et des techniques culturales, en particulier du niveau de fertilisation. (ROOSE, 1974). C'est ainsi qu'on n'a observé que des différences mineures de la charge des eaux de percolation dans la cacaoyère de Divo plantée après défrichement ménagé de la forêt dense, de même que sous des cultures fourragères (forte exportation) ou des cultures diverses peu fertilisées, par rapport à celle de la forêt voisine. Par contre, sous culture intensive de maïs (cf. Adiopodoumé et Bouaké), ou sous les bananeraies d'Azaguié, les pertes furent considérables (ROOSE, 1980; GODEFROY, ROOSE et MULLER, 1975; ROOSE, GODEFROY, 1977).

Il ressort des nombreux essais tentés en Côte d'Ivoire, Haute-Volta et Sénégal (PIERI, 1979, BLONDEL, 1971, TOURTE et al., 1964) que <u>l'azote, toutes les bases et les anions</u> (C1, SO₄, NO₃) <u>sont très mobiles en milieu tropical</u>. En revanche, le phosphore migre peu et ses teneurs sont très faibles dans les eaux, car il est rapidement insolubilisé au contact du fer et de l'alumine libres, abondants dans ces sols.

En région tempérée, l'analyse des observations lysimétriques effectuées pendant de longues années à Versailles (DEMOLON et BASTISSE, 1946; PEDRO, 1961), Clermont-Ferrand (DEJOU et MORIZET, 1977; COLLIER et ROBELIN, 1959), Châlon-sur-Marne (BALLIF, DURAND, DUTIL et MULLER, 1975) et Quimper (COPPENET, 1969), aboutit aux mêmes conclusions sur les fortes variations des teneurs en éléments solubles dans les eaux de percolation selon l'utilisation du sol, à trois nuances près:

- 1) les sols ont des réserves minérales importantes jusqu'à leur surface : ces réserves sont progressivement libérées dans les eaux ;
- 2) l'altération de ces minéraux (feldspaths, micas, amphiboles) donne naissance à des argiles secondaires du type 2/1 qui ont une forte capacité d'échange de bases; le complexe absorbant peut retenir une partie plus grande des ions (PEDRO, 1971; DEJOU et MORI-ZET, 1977);
 - 3) le potassium est moins mobile, car il peut

rétrograder entre les feuillets de divers phyllites 2/1.

L'influence de l'homme sur la charge soluble des eaux de percolation s'avère donc très importante au point de risquer la pollution des nappes sous-jacentes (ROOSE, 1974; GODEFROY, MULLER, ROOSE, 1975; HEBERT et GRAFFIN, 1971), mais elle n'est pas inéluctable.

5 - CONCLUSIONS SUR LA CHARGE SOLUBLE DES EAUX DE SURFACE

Dans la zone bioclimatique étudiée la charge soluble des eaux superficielles dépend donc relativement peu du milieu minéral qui l'entoure et de l'aridité du climát : en revanche, elle est étroitement liée à la dynamique des matières organiques et à l'aménagement du milieu par l'homme.

Dès lors, on peut distinguer trois étapes dans l'acquisition de la charge soluble des eaux :

- 1 la mise en charge des eaux de pluie au contact de la masse végétale, des litières, des matières organiques et des nutriments des horizons humifères;
- 2 le transit à travers une épaisseur souvent considérable de matériaux altérés ; seules les charges en silice et en sodium augmentent progressivement, tandis que les autres éléments sont piégés plus ou moins vigoureusement ;
- 3 une nouvelle modification de la charge soluble dans la zone d'altération des minéraux primaires.

A cet étagement dans l'espace correspondent des variations qualitatives de la charge soluble des eaux. En effet, les pluies se chargent au contact de la végétation et de l'horizon humifère (battance) en éléments biogènes (peu disponibles dans les milieux dégradés), en métaux et en oligo-éléments complexés à la matière organique du sol (LENOIR, 1972; MATHIEU, 1972; LEPRUN, 1979). A mesure que ces eaux pénètrent dans le profil, s'opère une évolution différente selon les éléments:

- les nutriments sont absorbés sélectivement par les racines et les microorganismes,

- le fer, l'aluminé, le titane et le manganèse sont piégés dès qu'ils dépassent les horizons humifères;
- les taux de silice et de sodium augmentent progressivement tout au long du profil,
- enfin, le taux de bases s'accroît sensiblement dans la zone d'alté-

Il en résulte que les eaux de ruissellement des petites rivières sont plus chargées, en phosphate, fer, alumine (et oligoéléments selon LENOIR, 1972) que les eaux de nappe, lesquelles sont plus riches en bases (surtout Na) et en silice.

En dehors de la zone superficielle du sol où interviennent des phénomènes biologiques, l'analyse géochimique n'est pas discriminante. L'altération a conduit à l'individualisation d'une couverture kaolinique monotone constitué de quartz, de kaolinite et d'oxydes de fer. Or, il existe deux sortes de profils pédologiques bien typés : les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux tropicaux.

Il en résulte que d'autres processus sont intervenus dans la différenciation des profils, en particulier les transferts de matière sous forme particulaire.

Nous allons donc les aborder dans le chapitre suivant.

Note complémentaire au § 11.1

Pour que l'étude des bilans géochimiques ait un sens, il faut soustraire des teneurs observées dans les eaux de percolation les apports atmosphériques (pluies et poussières). Or ces apports dépendent de la proximité de la mer et de l'origine continentale ou non des vents dominants : leur influence est bien connue, tant en milieu tempéré que tropical (WOODCOCK et MORDY, 1955; VISSER, 1961; WHITEHEAD et FETH, 1964; VILLECOURT et ROOSE, 1978)

En côte d'Ivoire, MATHIEU (1972) distingue l'influence prépondérante de l'océan, des poussières continentales ou du matériel organique selon les éléments de la charge dissoute par les eaux de pluie.

| Influence prépondérante pour les éléments suivants | |
|--|---|
| océanique des poussières continentales | Cl, Na et Sr, SiO ₂ ,Ca,Fe,Al,Ba,Ti,Cr et ^M n |
| des matières organiques | SO ₄ ,PO ₄ ,K,Mg,Li,Rb,V, Ni, Cu |

WHITEHEAD et FETH (1964) ont étudié séparément la charge soluble des eaux de pluie récoltées dans des récipients neutres qui ne s'ouvrent que pendant les averses et par ailleurs, les apports de poussières solubilisables tombées sur le collecteur entre les averses (= dry fallout). Ils appellent "bulk precipitation" la somme des deux précédents et constatent que cette dernière représente mieux les apports atmosphériques à la charge soluble des eaux naturelles. Ces "précipitations chargées" sont évidemment beaucoup plus minéralisées que les eaux de pluie recueillies dans des récipients ouverts seulement durant l'averse. C'est la raison pour laquelle la charge soluble des eaux de pluie que nous avons recueillies est plus élevée que celle des pluies recueillies par LENOIR, MATHIEU et MONNET (1976).

On peut observer au tableau 8.1. que la proximité de la mer entraîne une augmentation très nette de la charge ionisée (la résistivité passe de 48.800 à 91.800 ohms.cm pour des postes éloignés de 15 à 850 km de l'océan) et en particulier du chlore et du sodium et dans une moindre mesure du magnésium et de l'azote total. Mais dans le

cas de la séquence bioclimatique étudiée, à l'influence océanique se superposent des variations de climat (volume des pluies et températures) ainsi que de la végétation.

De plus, leur passage à travers la couverture végétale arborée, les eaux de pluie se chargent en pratiquement tous les éléments (teneur doublée) et spécialement en potassium, magnésium et matières organiques (teneurs multiplées par 5 à 6). Sous la végétation herbacée (ANDROPOGON) des savanes, le pluviolessivage est nettement moins important (sauf en ce qui concerne la silice) que sous les formations arborées qu'elles soient de la zone guinéenne ou soudanienne. Le type de végétation a donc, dès ce stade, une influence notable sur la charge soluble des eaux de surface.

CHAPITRE XII : DYNAMIQUE DES PROFILS PEDOLOGIQUES :

IMPORTANCE DES TRANSFERTS PARTICULAIRES

INTRODUCTION :

. En milieu tempéré, il existe des relations étroites entre la végétation (forêt feuillue ou lande à bruyère ou conifères) et le type de sol (brun acide ou podzol) pour une roche mère donnée. La désagrégation étant plus rapide que l'altération, il se trouve des quantités importantes de minéraux altérables jusqu'à la surface du sol; la végétation peut donc influencer le type d'humus et, par là, orienter toute la pédogenèse actuelle (cf. AUBERT, 1959; LOSSAINT, 1959; SOU-CHIER, 1971; DUCHAUFOUR, 1977; GUILLET, ROUILLER, SOUCHIER, 1978).

. En Afrique occidentale, on peut penser que la végétation intervient beaucoup moins dans la pédogenèse, puisque l'altération est beaucoup plus rapide en milieu tropical et qu'une couche de plusieurs mètres, sépare les horizons d'altération des niveaux où se déroulent les activités biologiques (DUCHAUFOUR, 1970-77).

. Cependant, dans la séquence étudiée, les couvertures kaoliniques s'organisent selon deux profils dont les caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques sont bien distinctes en fonction du bioclimat .

Après un bref rappel des travaux antérieurs, nous examinerons les résultats expérimentaux concernant les transports particulaires issus de la présente étude.

1 - LES ÉTUDES ANTÉRIEURES : BREF RAPPEL

a) - Réorganisation de la nappe kaolinique à la faveur d'un déséquilibre bioclimatique ou tectonique

ERHART (1955) a émis l'hypothèse selon laquelle la succession des séries sédimentaires correspond à de longues phases de stabilité sur le continent et d'altération profonde des sols

(= biostasie où les migrations seraient limitées aux bases et à la silice dissoute) entrecoupées de courtes périodes de déséquilibre bioclimatique ou tectonique pendant lesquelles la couche altérée serait érodée (= rhe-xistasie). Les transferts de matière dans les paysages tropicaux seraient donc constitués alternativement de matières solubles et de résidus so-lides.

ROUGERIE (1960) a étudié le façonnement actuel des versants forestiers de la basse Côte d'Ivoire. Il en a conclu que les transports particulaires ne sont pas négligeables par rapport aux transports solubles, même en phase de biostasie.

BOCQUIER (1971) a montré comment s'organisent les sols le long de deux toposéquences particulières du Tchad, par transfert latéral de matières (soluble et solide), depuis les sols ferrugineux occupant le haut du paysage jusqu'aux sols colmatés de bas de pente. Là se produisent des néoformations de montmorillonite, laquelle gagne petit à petit le haut des profils et remonte progressivement le long des versants.

BOULET (1974) a observé en Haute-Volta deux types principaux de toposéquences. Les unes sont homogènes et présentent des profils vertiques avec altération uniforme du type montmorillonitique. Les autres sont hétérogènes et sont composées d'une nappe kaolinique qui évolue suite à des modifications de structure plasmique et à des transferts de matières vers des profils vertisoliques dans les fonds de vallée. Il constate que les couvertures kaoliniques se généralisent sur granite dans les régions où les précipitations sont supérieures à 1100 mm et où la saison humide est suffisamment prolongée pour permettre la croissance d'une végétation arborescente assez dense. En revanche, en zone soudanienne où le climat est contrasté, il observe un déséquilibre pédo-bio-climatique qui se manifeste par la destruction des structures plasmiques, par l'évacuation d'une quantité importante de plasma et par la réorganisation du squelette quartzeux, lequel devient jointif.

CHAUVEL (1977) constate que ce phénomène de déséquilibre est très général dans la zone de contact entre la zone tropicale humide et les régions sèches sahéliennes et il en précise les conditions. Ce

déséquilibre intervient lorsque le drainage vertical cesse d'être suffisant pour évacuer les particules du plasma libérées par ultra-dessication.

- Lorsque la rupture entre le plasma et le squelette est progressive en saison sèche, l'évacuation des particules fines libérées est assurée au début de la saison des pluies. Les grains de sable grossier prennent le relais des structures micro-nodulaires et le processus d'appauvrissement peut se continuer. L'arénisation est alors accélérée par l'érosion éolienne jusqu'à donner naissance aux sols rouges sableux dénommés ferrugineux peu lessivés.

Par contre, lorsque la saison sèche est suffisamment marquée pour provoquer la rupture brutale entre le plasma, les liens ferrugineux et le squelette quartzeux, et que le drainage vertical n'est plus suffisant pour évacuer toute l'argile libérée, il se produit un colmatage et une hydromorphie secondaire, laquelle accélère la dissociation entre le fer et l'argile. Les flux verticaux vont être limités par ce niveau colmaté, tandis que se développent les flux latéraux (ruissellement élevé et possibilité accrue de ruissellement hypodermique sans qu'il y ait de transfert important de matière). On observe alors une évolution rapide (en quelques dizaines d'années) des sols rouges ferrallitiques vers les sols beiges ferrugineux lessivés à taches et concrétions : la transformation complète des horizons supérieurs prendrait un millier d'années.

CHAWEL et CHARREAU (1972) ont observé que les eaux de drainage récoltées au bas des cases lysimétriques de Bambey (sols sablo-argileux reconstitués) ne sont légèrement chargées d'argile qu'au début de chaque période de drainage. La mobilisation ne concerne que de petites quantités d'argile "facilement exportables et préparées au cours de la précédante saison sèche" : elle correspond en moyenne sur 12 ans de 2 à 7 grammes d'argile par m² et par an.

b) - Réorganisation sous l'influence de la culture

En dehors de l'intervention climatique sur le déséquilibre de la couverture kaolinique, le rôle de la végétation et de son évolution suite aux interventions humaines, a été maintes fois souligné par divers auteurs. BOISSEZON (1964) a observé sur les plateaux Bateke (précipitations = 1800 mm) de la république du Congo que les sols les plus appauvris correspondent à d'anciennes jachères recouvertes par une savane basse peu arbustive. L'appauvrissement en particules fines, accéléré par la mise en culture, s'est étendu jusqu'à la limite de la couche de sol qui reste constamment fraiche; un niveau compact s'est développé dans les horizons atteints par le front de dessication.

RAUNET (1971) a constaté au Togo et au Bénin (P = 800 mm avec 5 mois secs) que les parcelles témoins forestières de différentes stations situées sur Terre de Barre sont nettement plus riches en argile que les parcelles cultivées depuis le début du siècle.

Cependant ce phénomène d'appauvrissement n'est pas toujours discernable sur les essais mis en place depuis une dizaine d'années : la vitesse du processus d'appauvrissement dépendrait donc du mode d'exploitation des terres.

SIBAND (1972) a effectué une enquête sur l'évolution des sols en milieu traditionnel de Casamance (pluie:1300 mm avec 5 mois secs) en fonction de la durée de l'exploitation depuis le défrichement. Il a noté que les sols cultivés s'acidifient et s'appauvrissent en argile, en matières organiques et en nutriments. L'appauvrissement en matières organiques est rapide lors des permières années, puis les teneurs se stabilisent, tandis que l'appauvrissement en argile et en limon fin se poursuit tout au long de l'exploitation.

CHARREAU, FAUCK et al. (1970) ont étudié l'évolution des sols de Séfa (Sénégal) dès le défrichement et pendant vingt années d'exploitation. Ils ont souligné les perturbations majeures de la structure des horizons superficiels survenues suite au défrichement brutal, à l'andainage, l'extirpation des racines et lors des labours et de la préparation du lit de semence. Alors que sous forêt les sols sont perméables et l'infiltration verticale est assurée (le coefficient de ruissellement dépasse rarement 2 % sous forêt, mais atteint 40 % sous culture), après quelques années de culture mécanisée, des phénomènes de tassement et d'hydromorphie en profondeur, ainsi que la formation de pellicules de battance en surface, ont augmenté le ruissellement et déclanché des phénomènes d'érosion tels qu'il a fallu renoncer à exploiter mécaniquement des pentes supérieures à 2 %.

HUMBEL (1974) a montré que, dans les sols ferrallitiques du Cameroun, la compacité hors quartz* de la tranche superficielle du sol croît du Sud forestier au Nord du pays comme la rigueur de la saison sèche. La savanisation, tout comme les défrichements et la culture de plantes annuelles dans la zone forestière, augmentent cette compacité. Dans cet horizon de structure, la porosité grossière semble liée à l'activité biologique animale ou racinaire ; elle apparaît comme un facteur important de la diminution de compacité. Dans le Sud forestier, la saison sèche est courte et l'activité biologique intense aboutit à un allègement des horizons superficiels. Dans le Nord, la savane protège moins bien le sol contre les variations climatiques : l'activité biologique est moins intense dans les horizons superficiels où se développe un horizon compact jusqu'à la limite de dessication du sol. En revanche, les termites allègent le sol plus profondément dans la zone qui reste humide toute l'année. Alors que sous forêt le drainage vertical est très intense, une tendance à l'engorgement et à une dynamique oblique de l'eau se développe vers le Nord.

c) - Conclusions

Il ressort de l'ensemble de ces observations que des réorganisations se manifestent dans les couvertures kaoliniques et que des migrations de matière s'observent dans la zone superficielle des profils dès qu'intervient un déséquilibre naturel (climat ou tectonique) ou artificiel (culture peu couvrante).

De là provient le concept général d'appauvrissement développé par FAUCK (1964) qui rend compte d'un fait morphologique très fréquent en Afrique : l'existence d'horizons supérieurs moins riches en argile granulométrique, en fer et en titane que les horizons B profonds.

^{*} Note : Pour mieux faire ressortir les différences de porosité, on soustrait de la masse du sol le poids de quartz étroitement lié à la roche mère.

2 - APPORTS DE CETTE ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Nous les présenterons selon trois rubriques concernant l'érosion, les transferts hydriques et les transferts de matière en phase solide.

a) - L'érosion et sa variation en fonction des conditions du milieu

- L'agressivité des pluies est beaucoup plus élevée qu'en zone tempérée, mais elle diminue du Sud au Nord de la séquence bioclimatique.
- Le couvert végétal reste complet en milieu naturel ; il ne diminue en zone de savane que là où les feux de brousse passent chaque année et surtout dans les steppes sahéliennes.
- Les sols ferrugineux tropicaux sont plus pauvres en matières organiques, mais plus riches en limons et sables fins que les sols ferrallitiques : ils sont donc moins bien structurés et moins résistants à l'érosion, surtout après quelques années de culture.
- Les pentes sont plus faibles dans les paysages des savanes soudaniennes sur granite : cela se traduit en milieu naturel par une érosion en nappe plus sélective en milieu tropical sec à saisons contrastées qu'en région subéquatoriale. Dès que les cultures à cycle court sont introduites dans le système (ou l'exploitation extensive par pâturage après passage des feux), les risques d'érosion augmentent considérablement. Cela se traduit par le décapage des horizons humifères sur les pentes fortes, un appauvrissement accéléré en particules fines et souvent un tassement du sous-sol, suite à la diminution des apports de matières organiques sur les pentes faibles, les plus fréquentes en zone soudano-sahélienne.

b) - <u>Variation du volume et de la direction des</u> transferts hydriques en fonction des conditions du milieu

En zone subéquatoriale, le drainage vertical atteint 40 à 45 % des précipitations annuelles ; comme par ailleurs ce drainage est concentré sur quelques mois de l'année, il entraine jusqu'à la nappe (et de là à la rivière) un flux considérable d'éléments solubles et de particules fines (effet de chasse). En revanche, en zone

tropicale sèche, l'ETP est beaucoup plus élevée et reste forte en saison humide. Les pluies étant moins abondantes et le ruissellement plus important, le drainage vertical en profondeur est d'autant plus réduit que les réserves hydriques du sol peuvent être notables : l'alimentation de la nappe tend à s'annuler vers 600 millimètres de précipitations annuelles.

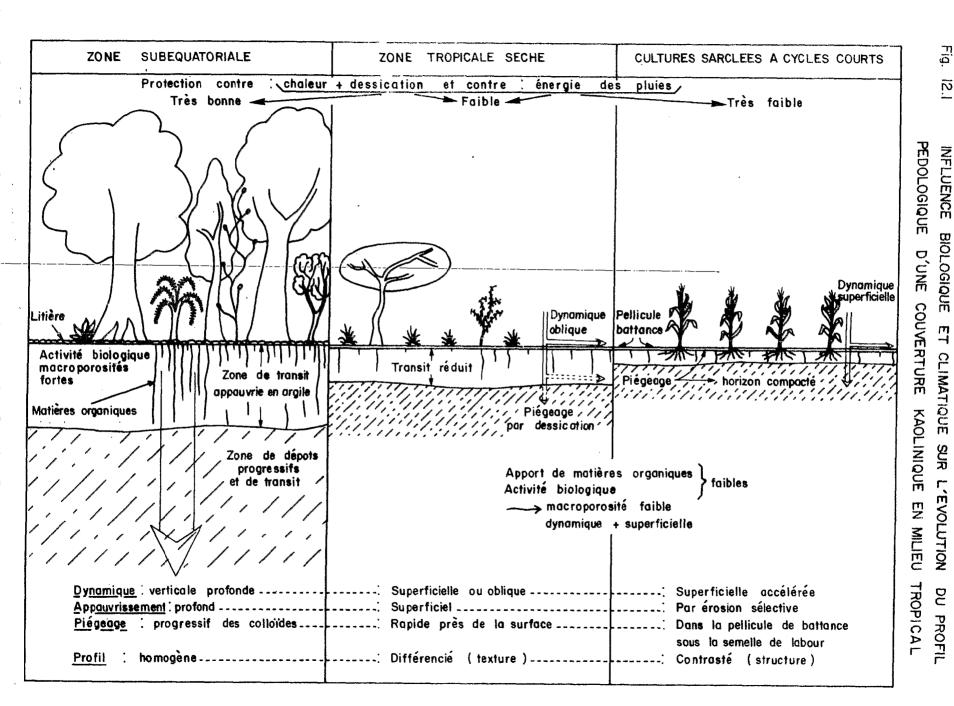
Sous culture sarclée, le ruissellement croit considérablement ce qui diminue d'autant le drainage. L'importance du ruissellement sur la pédogenèse est plus marquée en zone sèche, car il réduit la profondeur atteinte par le front d'humectation dans les profils, bloquant ainsi les échanges de matières, à l'intérieur des horizons peu profonds (30 à 80 centimètres).

c) - Réalité des tranferts de matières, notamment en phase solide

En zone subéquatoriale, la charge soluble des eaux superficielles est à peine inférieure à celle qu'on observe en zone soudano-sahélienne. Etant donné le volume du drainage vertical, l'entrainement en profondeur des éléments solubles est considérable (350 à 700 kg/ha/an). Ce qui est moins connu, c'est que le transport particulaire par les eaux de drainage est tout aussi considérable. En dehors des 100 à 200 kg/ha/an de terre fine érodée (suite à la remontée de matériaux fins au-dessus de la litière par la mésofaune), 370 à 700 kg/ha/an de particules très fines percolent à travers la partie appauvrie du profil et rejoignent pour une large part la nappe phréatique; environ 10 % de ces particules rejoignent les marigots avec le débit de base et quittent le paysage.

En zone tropicale sèche, les échanges en profondeur tendent à diminuer à mesure que l'aridité augmente. Les pertes par percolation dans la région de Ouagadougou (P = 800 mm) se réduisent à 7-60 kg/ha/an de solubles et 68 à 200 kg de colloides lessivés. Cependant l'érosion sélective augmente (80 à 102 kg/ha/an).

Au total, la proportion d'éléments solubles croît depuis la zone tropicale sèche jusqu'à la zone subéquatoriale, ce qui ne signifie nullement que sous la forêt il n'y a que les élements solubles qui migrent.



Si l'observation morphologique du profil et l'analyse granulométrique ne permettent que rarement de mettre ne évidence le lessivage intense auquel sont soumis les sols ferrallitiques de cette zone forestière, c'est en raison du dépôt très progressif des colloïdes tout au long du profil très profond ; en effet, ces colloïdes ont été mis en suspension stable grâce à l'énergie libérée par la battance des pluies et grâce à la protection offerte par des matières organiques du type des acides fulviques (GREENLAND, 1965; FAUCK, 1972), abonbantes dans les eaux de percolation (ROOSE et PERRAUD, 1974) et dans les suspensions colloïdales (SOUCHIER, 1980, comm. écrite). Il en résulte des profils homogènes, peu différenciés, à dynamique verticale de l'eau entretenue par une activité biologique très intense qui maintient une forte macroporosité dans les horizons superficiels. Le drainage vertical est si intense durant quelques mois par an que tous les élements colloïdaux libérés peuvent être évacués en profondeur où les matières organiques se détruisent progressivement (voir fig. 12.1.).

En revanche, dans la zone tropicale sèche, les profils sont différenciés, les horizons appauvris sont relativement moins épais, plus compacts, moins riches en matières organiques et moins bien structurés. La dynamique de l'eau est beaucoup plus superficielle (plus de ruissellement et drainage moins profond). La plupart des éléments colloïdaux qui migrent dans les eaux de drainage sont rapidement piégés, lorsque le front d'humectation ralentit (d'autant plus vite que le climat est aride) (fig. 12.1.).

Donc les sols ferrugineux de savanes ne sont pas plus lessivés que les sols ferrallitiques des zones forestières, mais leurs profils sont *plus contrastés* du fait que les zones d'appauvrissement et de transit des colloïdes sont plus étroites.

3 – DISCUSSION SUR LES TRANSFERTS DE MATIÈRE EN PHASE SOLIDE

Les transferts de matière nécessitent simultanément :

- a) une source d'énergie pour rompre les liens des structures initiales,
- b) un vecteur permettant le transfert,
- c) une protection contre une floculation ou un dépôt prématuré.

a) - Nécessité d'une source d'énergie

Très peu de chercheurs se sont souciés de définir la source d'énergie capable de rompre les liensdes particules fines constituant le plasma entre elles et avec le squelette quartzeux. CHAUVEL (1977), ayant remarqué avec HUMBEL et d'autres pédologues de l'ORSTOM le développement d'un horizon compact de plus en plus superficiel à mesure que se développe la sévérité de la saison sèche, a montré que l'ultra-dessication -source calorifique- pouvait être à l'origine d'une redistribution localisée du fer associé aux particules argileuses, puis de la rupture des structures et de la dislocation des pseudo-particules (micronodules) caractéristiques des sols ferrallitiques. A l'appui de cette hypothèse, CHAUVEL rappelle que les eaux de percolation de Bambey ne présentaient de troubles colloïdaux qu'au début des épisodes pluviaux.

Il est clair que l'intervention d'une source calorifique d'énergie de ce type pour libérer les colloïdes, peut se manifester dans les zones sèches, mais il y a bien d'autres sources d'énergie qu'on peut évoquer. Ainsi la battance des pluies ainsi que le travail mécanique des sols par l'homme (cf. accélération des phénomènes en cas de culture mécanisée) ou par la mésofaune (qui expose la terre nue audessus des litières protectrices) peuvent apporter une contribution importante à la mise en charge des eaux de percolation, comme des eaux de ruissellement. Ceci expliquerait également les fortes charges solides observées dans les premiers moments du ruissellement (cf. ROOSE et ASSELINE, 1978 ; COLLINET et VALENTIN, 1980) ainsi que du drainage récoltés aussi bien en zone subéquatoriale qu'en région tropicale sèche (cf. variations saisonnières sur la charge soluble et solide au chapitre 7). Cette double source d'énergie (battance de la pluie et travail du sol) expliquerait même seule qu'en région tropicale humide forestière, la mise en culture sans précaution entraîne, autant qu'en région sèche, l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels et la naissance d'horizons tassés et d'engorgements observés au Sénégal par CHARREAU et FAUCK, au Cameroun par HUMBEL et en Côte d'Ivoire par nous-mêmes et nos collègues agronomes (BONZON, TALINEAU, HAINNAUX de RICAUX, etc...) sur les plantations mécanisées d'ananas de la région d'ONO. Des phénomènes analogues peuvent d'ailleurs être observés en France dans les régions où l'on abandonne l'élevage et les prairies temporaires pour développer la culture mécanisée de la betterave sucrière, de différents légumes, du mais et des céréales sur des sols bruns acides sur loess. La chute du taux de matières organiques du sol et le passage répété d'engins de plus en plus lourds entraînent une déstructuration des horizons superficiels, un compactage du sous-sol sur 10 à 60 centimètres et une augmentation sensible du ruissellement et l'érosion (ex. Val de Canche en Picardie).

Si la battance des pluies et le travail mécanique des sols sont des causes énergétiques des migrations solides à travers les horizons appauvris, la charge solide des eaux de percolation devrait être plus forte sous culture sarclée que sous forêt (indépendamment de l'ultra-dessication). Or, à Adiopodoumé, la charge solide des eaux de percolation recueillies vers 150 centimètres de profondeur dans 15 lysimètres monolithiques est du même ordre de grandeur sous mais que sous forêt (50 à 80 mg./1. x 1000 mm de drainage = 50 à 80 kg/ha/an, donc beaucoup plus fort qu'à Bambey). Cependant, la charge solide des eaux de ruissellement est nettement plus forte sous culture, si bien qu'après quelques averses (représentant 100 à 150 mm de pluie) une pellicule de battance se développe sous mais (et pas sous forêt) montrant qu'une large part de la charge solide a été piégée dans les premiers millimètres du sol. Il n'est pas illogique de penser qu'une autre fraction se dépose sous la semelle de labour, participant ainsi à la naissance et au développement de l'horizon compact observé par HUMBEL (1974) (et bien d'autres) sous culture en zone tropicale humide forestière.

b) - Existence d'un vecteur

Nous avons vu <u>qu'en région subéquatoriale</u>, le drainage vertical est abondant et concentré sur quelques mois de l'année : à Abidjan, 80 % du drainage annuel sont récoltés du 15 mai au 15 juillet. Ce drainage est capable d'évacuer en profondeur quantité d'éléments solubles (d'où la désaturation notée par tous les pédologues), mais aussi de particules fines libérées par la battance des pluies, par le travail de la mésofaune ou de l'homme. Le flux liquide est alors si abondant qu'il peut chasser en profondeur les particules délaissées dans les grandes voies de circulation (macropores) lors des averses précédentes et celles qui ont franchi le premier tamisage au niveau de la pellicule de battance.

Quant aux particules piégées dans les micropores avec l'eau d'humectation, elles vont se déposer au fond des anfractuosités les plus fines. Si on ne retrouve pas ou très peu de cutanes dans les horizons appauvris, c'est que ces horizons sont continuellement remués par la mésofaune, et en particulier par les vers de terre entrêmement actifs dans les sols forestiers. En outre, le dépôt des éléments colloïdaux est très progressif tout au long du profil et probablement même plus important au niveau de la nappe (engorgement et diminution des teneurs en matières organiques des eaux de nappe).

A l'opposé, en zone tropicale sèche, le drainage profond tend à disparaître, sauf dans les sols sableux ou gravillonnaires. Le front d'humectation du sol dans la région de Ouagadougou par exemple n'atteint pas 50 cm chaque année (pour des précipitations de 700 mm). Lorsque les eaux de pluie s'infiltrent et traversent les horizons appauvris, elles sont vite absorbées dans les micropores et le front d'humectation est rapidement arrêté. Les colloïdes sont donc piégés à peu de distance de la surface du sol. De plus, comme l'alternance d'humectation (remplissage de suspensions colloïdales des micropores) et de dessication (dépôt des colloïdes orientés) est beaucoup plus fréquente en zone tropicale qu'en zone subéquatoriale, les dépôts des éléments colloïdaux sont abondants et localisés dans les horizons B assez proches de la surface.

En conclusion, si les causes énergétiques des migrations peuvent être semblables dans les deux types de profil, on constate une différence fondamentale dans la profondeur des transferts, en raison des différences de profondeur de pénétration de l'eau dans le sol.

c) - Intervention d'un agent protecteur : le rôle matières organiques

Plusieurs auteurs ont montré que certaines argiles du type 2/1 (montmorillonite, illite) migraient plus facilement que la
kaolinite, élément très stable surtout en présence de sesquioxydes,
généralement abondants dans les sols ferrallitiques et ferrugineux
tropicaux (DUCHAUFOUR, 1977; NGUYEN KHA, ROUILLER, SOUCHIER, 1976).
Or. les colloïdes observés dans les eaux de percolation (aussi bien

dans 91 lysimètres monolithiques que dans 10 cases Erlo) sont composés en majorité de kaolinite, de quartz, de fer (parfois quelques traces d'illite ou de micas hydraté) et d'une quantité notable de matières organiques riches en azote. C'est cette matière organique, des acides fulviques en majorité, qui permettrait aux particules fines de migrer en neutralisant leurs charges et en complexant les sesquioxydes (le processus exact reste à préciser). Cependant, on sait qu'en région tropicale les matières organiques sont rapidement détruites par la microflore et que par ailleurs, la quantité de matières organiques et la proportion d'acides fulviques fournis au sol sont nettement plus élevées en zone subéquatoriale qu'en zone tropicale sèche (laquelle favorise les polymérisations). On peut donc admettre que dans les sols ferrallitiques des zones subéquatoriales, des quantités importantes d'acides fulviques protègent les particules argileuses durant leur migration à travers la zone de transit (horizons appauvris, mais aussi horizons B pauvres en cutanes). Ces acides fulviques n'étant détruits que très progressivement en profondeur, les éléments colloïdaux ne se déposent également que très progressivement tout au long de l'épais profil. En revanche, en zone tropicale sèche, le taux de matières organiques et d'acides fulviques est plus faible dans le sol ; les colloïdes captés dans les eaux de percolation sont également moins riches en carbone. La distance de transit des colloides est donc plus réduite, d'autant plus que le front d'humectation est généralement immobilisé à faible profondeur.

4 - CONCLUSIONS

Pour assurer le développement des phénomènes d'appauvrissement, il faut une source d'énergie, un vecteur et des conditions physico-chimiques permettant l'isolement des particules fines aptes à migrer (faible compétence des eaux de percolation).

En zone tropicale à saison contrastée, <u>la dessication</u> extrême participe à la déstabilisation des micronodules et à la préparation des particules fines susceptibles de migrer. Cependant d'autres sources d'énergie plus répandues sous différents climats sont envisageables. Ce pourraît être la battance des gouttes de pluie qui

détruit les agrégats à la surface su sol, ou encore <u>le travail du sol</u>, par les animaux ou par l'homme, qui prépare l'exposition des mottes à l'agressivité des pluies et diminue la cohésion du matériau.

Si le lessivage est un phénomène peu apparent dans les sols ferrallitiques des régions tropicales humides, c'est que tous les éléments sont réunis pour favoriser un entraînement profond à la fois des éléments solubles et des particules colloïdales : forte énergie des pluies, forte activité de la mésofaune, teneur élevée en acides fulviques, fort drainage vertical et faible dessèchement en saison sèche. L'appauvrissement en particules fines est important, profond et généralisé.

En revanche en zone tropicale sèche à saisons contrastée, les pluies sont moins abondantes et moins agressives, le ruissellement et le pouvoir évaporant de l'air sont élevés si bien que le drainage profond est réduit. La production de matières organiques est faible (surtout en présence de feux de brousse). L'entraînement est donc moins abondant, mais les profils sont plus contrastés, car la zone de transit des colloïdes peptisés est plus courte qu'en région subéquatoriale : les colloïdes sont piégés à faible distance de la surface du sol.

Dans toute la séquence bioclimatique étudiée, des indices de mouvements de colloïdes ont également été observés dans les horizons profonds toujours humides (argiles tachetés), soit sur les lames minces, soit directement sur les mottes extraites des puits. L'étude de ces migrations profondes n'a pas été abordée, mais l'influence des activités biologiques sur la différenciation de la partie supérieure des nappes kaoliniques s'avère essentielle, comme cela ressort de la figure 12.1.

A la lueur de ces données, il est clair qu'on ne peut plus appréhenser la pédogenèse tropicale à partir des seules données géochimiques. Du fait de l'agressivité hydrolysante des climats, l'évolution géochimique est en effet rapide et totale, en sorte que dans la dynamique pédogénétique, elle intervient dans les horizons profonds des profils d'altération.

En revanche, la pédogenèse actuelle se marque au contact de climats très pertubants du point de vue énergétique, par une <u>redistribution importante</u> des <u>minéraux secondaires</u> néoformés (éléments colloïdaux), dont la variabilité est suffisante, comme on l'a vu ci-dessus, en fonction des conditions bioclimatiques et de la mise en culture, pour servir de critère discriminant en pédologie.

Quoi qu'il en soit, il est clair maintenant que <u>même en</u> période de biostasie, la pédogenèse ne se fait pas qu'en phase soluble.

Il reste encore à montrer quelles sont les conséquences de tous ces transferts de matière sur la mise en valeur agricole de ces immenses surfaces. Ce sera l'objet du dernier chapitre.



Photos 16 et 17 - Cultures traditionnelles dans la région de Korhogo (Nord Côte d'Ivoire)

Noter - le défrichement incomplet du terrain après brûlis (maintien de quelques arbustes utiles),

- la plantation d'igname sur des grosses buttes coiffées d'une touffe de feuilles, - l'important travail du sol réalisé par les Sénoufo sur les sols gravillonnaires,

(Roose)

- le riz semé entre les touffes d'igname qui profite des éléments fins érodés sur les buttes et limite sérieusement le ruissellement.



CHAPITRE XIII : L'AMENAGEMENT DU MILIEU TROPICAL OUEST

AFRICAIN

INTRODUCTION

Le milieu tropical ouest africain, qu'il soit humide ou sec, est soumis à une agressivité climatique élevée du fait de l'intensité des pluies et de l'énergie cinétique développée par les averses ; pour les régions les plus sèches, il s'y ajoute l'ambiance chaude et desséchante de l'air durant 2 à 6 mois de l'année. Aussi les sols étudiés sont-ils en équilibre fragile tant du point de vue chimique, que du point de vue structural. Cet équilibre ne se maintient que par le jeu de l'ensemble des activités biologiques. Les premiers colonisateurs qui cherchèrent à mettre en valeur ces terres, se trompèrent fortement sur leur fertilité potentielle, en l'évaluant à partir de la luxuriance de la végétation. En réalité, la forêt vit sur ses propres débris et réutilise sans arrêt les éléments nutritifs que diverses activités biologiques concentrent à la surface du profil. La masse du sol ferrallitique n'est plus qu'un squelette complètement altéré, un milieu de culture généralement favorable, mais presque dépourvu de réserves nutritives (minéraux facilement altérables). De plus, sa structure se dégrade rapidement en absence d'un apport régulier de matières organiques fraîches.

Tant que subsiste le milieu forestier, le recyclage des éléments contenus dans la litière permet une alimentation minérale régulière, l'entretien de la structure et un bon équilibre entre les réserves hydriques et l'aération du sol. Dès que la forêt disparaît pour laisser la place à une culture sarclée ou à la savane, les risques de feu se développent, le taux de matières organiques du sol diminue, l'activité biologique est réduite, tandis que la structure et la macroporosité se dégradent.

La mise en valeur du milieu naturel entraîne forcément une certaine dégradation du sol. Au demeurant un aménagement progressif permet de ralentir l'évolution, de maintenir le plus haut possible l'équilibre entre les processus de dégradation et de restauration, enfin de tirer le meilleur parti des réserves minérales et organiques accumulées pendant des décennies par la forêt en installant des cultures adaptées aux conditions écologiques et socio-économiques régionales.

Il faut donc prendre des précautions à tous les stades de la mise en valeur et notamment lors du défrichement, de l'aménagement général et de l'exploitation routinière des terres. C'est à l'analyse de ces éléments que va être consacré cet ultime chapitre.

1 - LE STADE DU DÉFRICHEMENT

De nombreux auteurs (FAUCK, 1956; VAN DEN ABEELE et VAN-DEPUT, 1956; JURION et HENRY, 1967; CHARREAU et NICOU, 1971; ROOSE, 1972,1973) ont attiré l'attention sur les risques de dégradation du sol lorsqu'on utilise de gros engins pour défricher de vastes surfaces, arracher les souches des arbres, traîner les troncs pour les empiler sur les andains, extirper les racines, labourer profondément le sol puis le pulvériser finement en surface pour préparer le lit de semence. Il en résulte généralement le décapage de la litière et d'une bonne partie de l'horizon humifère (accumulés sur les andains), la destruction du réseau racinaire qui tient en place les horizons superficiels dans les défrichements traditionnels, la pulvérisation du sol et souvent le tassement du sous-sol, surtout si les opérations n'ont pu se terminer avant le retour des pluies. La suite de cette utilisation massive d'énergie est facile à prévoir (cf. Sodaica à Séfa en Casamance). Après une première récolte moyenne (minéralisation rapide des réserves organiques), la seconde récolte est médiocre, les champs sont envahis par les plantes adventices , la structure du sol est terriblement dégradée et on peut observer des cuvettes où les sols sont engorgés (empreintes des souches), des horizons compactés, des rigoles d'érosion suite au développement rapide du ruissellement sur les pellicules de battance (ruissellement = 1 à 2 % sous forêt et 20 à 40 % sous culture mécanisée). Ces terres ravagées sont généralement abandonnées à la jachère naturelle

au bout de 3 à 4 ans, ce qui se solde par une perte économique considérable et un net recul de "l'agriculture moderne" dans l'esprit des paysans locaux. Des exemples de cette succession navrante peuvent s'observer tant au Sénégal et en Côte d'Ivoire qu'en Tanzanie.

Il existe pourtant des exemples de défrichement ménagé, parfaitement réussis, qui n'ont entraîné qu'un minimum de modification dans les équilibres naturels. On peut citer la méthode utilisée en Côté d'Ivoire par l'IRHO pour les petites plantations de palmiers à huile, par l'IRCA pour les plantations d'hévéa et par l'IFCC pour les nouvelles plantations de cacaoyers (cf. la parcelle ERLO de Divo). Cette méthode plus douce prévoit la succession des opérations suivantes : nettoyage du sous-bois puis abattage à la scie mécanique, débitage de la couronne, puis un mois plus tard brûlage léger sur place du petit bois, enfin piquetage des lignes de plantation et rangement des bois encombrants résiduels toutes les deux lignes (palmiers) ou entre les lignes de plantation (cacao). Le recru forestier ou des plantes de couvertures assurent la protection complète du sol pendant l'installation de la plantation. Ainsi l'ambiance forestière et la production de matières organiques ont été préservées.

Dans le Nord de la Côte d'Ivoire, près de Korhogo, des expériences de défrichement progressif ont été tentés avec succès en milieu paysan encadré (colonisation de la zone peu dense près du Bandama) qui laisse le soin à l'exploitant de dégager et brûler le petit bois la première année, d'installer une rotation traditionnelle (igname ou riz sec, sorgho, maïs, arachide et jachère) avec un travail du sol réduit au minimum, puis 3 ou 4 ans plus tard, abattage au treuil du gros bois restant et rangement des troncs et souches résiduelles sur des andains tous les 25 à 50 mètres servant de bandes d'arrêt et de repères pour l'aménagement général du versant. Enfin, au bout de 5 ans, lorsque le réseau racinaire a eu le temps de pourrir, labour aux disques (puis aux sacs ou aux dents rigides) avec enfouissement de la jachère plus ou moins pâturée à base d'une légumineuse (Stylosanthes guyanensis).

En zone forestière où le sol n'est pas dégradé avant la mise en valeur, la macroporosité du sol est satisfaisante et la <u>densité</u> apparente souvent inférieure à celle que l'on observe dans les champs

cultivés après labour ; elle reste d'ailleurs plus longtemps favorable qu'après un labour (environ l mois ou 100 à 150 millimètres de pluie). On peut donc envisager quelques années de culture avant labour, ce qui évite l'obligation de détruire le réseau racinaire qui sert d'armature à la structure du sol.

Sous savane par contre, et là où l'état de la structure du sol n'est pas satisfaisante par suite d'un horizon compact en profondeur, il est nécessaire de travailler profondément le sol et de faire éclater cet horizon tassé (passage croisé de deux dents rigides vers 40 à 60 cm de profondeur en saison sèche) ; la végétation met en effet beaucoup de temps à percer un horizon tassé sans l'aide mécanique d'un premier travail profond et grossier.

Différentes méthodes de défrichement plus ou moins doux sont actuellement à l'étude au Nigéria (Centre I.I.T.A. à Ibadan), mais on peut retenir les principes généraux suivants :

- a) Eviter de minéraliser trop rapidement (feu brutal et travail poussé du sol) une grande masse de matières organiques (végétation et matières organiques du sol) car le complexe absorbant des sols ferrallitiques et ferrugineux retient peu d'éléments nutritifs.
- b) Respecter la litière et l'horizon humifère superficiel, car l'activité biologique y est maximale. Les horizons du soussol sont moins fertiles et beaucoup moins résistants à l'érosion : il faut éviter de mélanger ces couches presque stériles aux horizons humifères.
- c) Déplacer le moins possible le gros matériel végétal en limitant la largeur des bandes cultivées entre les ándains : tronçonner sur place les gros arbres, rouler les fûts ou les porter et ne tirer les souches et les grosses branches qu'après les avoir allégées au maximum en brûlant sur place tout le petit bois.
- d) Respecter la structure du sol lorsque celle-ci est favorable en arrêtant les travaux aux engins lourds dès le retour des pluies. Si la compacité du sous-sol l'exige, faire éclater le niveau compact en saison sèche : cette pratique a donné de bons résultats pour la plantation d'arbres dans la région de Ouagadougou (BIROT et GALABERT, 1970).

e) Couvrir le sol le plus rapidement possible pour éviter la battance des pluies.

Il est fréquent de constater que l'érosion est bien plus développée sur les terrains défrichés mécaniquement dans les grandes plantations que sur champs voisins défrichés manuellement en respectant les horizons humifères superficiels et le réseau racinaire (cf. les plantations d'ananas à Ono et les résultats de COLLINET et ASSELINE à Taï).

2 - L'AMÉNAGEMENT AU NIVEAU DU VERSANT

Puisqu'on a reconnu que le milieu tropical est fragile et donc délicat à mettre en valeur, il faut prévoir son évolution, éviter ou retarder sa dégradation et organiser une alternance entre des périodes d'exploitation et des périodes de reconstitution. L'aménagement général doit s'organiser à l'échelle du versant et tenir compte des causes principales de l'érosion dans la région et des risques de dégradation en fonction de la pente et du type de sol (AUBERT et FOURNIER, 1958).

2.1. Tenir compte des causes de l'érosion

La définition du type d'aménagement dépend des conditions socio-économiques de la mise en valeur, mais aussi des causes de l'érosion (ROOSE, 1972 et 1978).

a) - Cas où l'énergie du ruissellement domine

Là où le ruissellement entraîne la majorité des dépôts (montagnes, région méditerranéenne, vertisols), il faut commencer <u>par</u>

l'aval c'est-à-dire par stabiliser les berges des rivières et le bas des versants (seuils empierrés) et remonter de proche en proche jusqu'à ce que l'ensemble des terres soit stable ; ensuite, ou à la rigueur en même temps, il faut songer à la couverture végétale du sol.

b) - Cas où l'énergie des pluies domine

Dans la séquence bioclimatique étudiée et sur le vieux bouclier ouest africain, c'est l'énergie des pluies qui est à l'origine de l'érosion; dans ce cas, les aménagements doivent commencer à la partie amont du bassin, viser la couverture complète du sol et s'étendre finalement jusqu'à l'aval du bassin.

Dans la zone tropicale sèche, les pentes sont faibles (souvent inférieures à 2 %), les pluies sont peu abondantes quoique violentes et les sols sont particulièrement sensibles à la battance des pluies et au colmatage du sous-sol (peu de matières organiques, beaucoup de limons et de sables fins). Quoique des pertes notables de terre fine peuvent être observées sur les glacis (10 t/ha à Saria sur une pente cultivée de moins de 1 %), c'est surtout la conservation de l'eau qu'il faut viser, car son influence sur les rendements est plus importante encore que les carences minérales du sol. Sur les plateaux cuirassés et les glacis formés de sols gravillonnaires à faible profondeur, les cultures et les herbages viennent mal à cause des faibles réserves en eau de la couche du sol exploitée par leurs racines. En revanche, les arbres s'y développent bien lorsque leurs racines ont réussi à traverser la nappe gravillonnaire et jouissent de l'excellente réserve d'eau située sous celle-ci (cf. Korhogo et Saria). Plus bas sur le versant, les sols sont plus épais. Le sorgho, le mil, le coton, l'arachide et divers haricots donnent des résultats satisfaisants avec un minimum d'engrais, si toutefois la saison des pluies est suffisamment longue et abondante. Cependant le ruissellement se développe très vite à cause de la faible stabilité structurale de ces terres pauvres en matières organiques. Il faut donc organiser des bandes de cultures étroites (10 à 20 mètres) en courbe de niveau, isolées des voisines par un gros billon protégé par des graminées (= sorte de casier d'infiltration) et améliorer l'infiltration par des labours d'enfouissement de matières organiques. Un chemin d'eau, autre que les routes d'accès, doit être éventuellement prévu et aménagé pour évacuer les excès d'eau au cas peu fréquent d'averse exceptionnelle (150 mm en 24 heures tous les 20 à 50 ans). Enfin les bas fonds peuvent souvent être aménagés en rizière avec ou sans maitrise de l'eau (ARRIVETS, 1979), en jardin potager ou en culture fourragère intensive.

La clé de cet aménagement se trouve dans le cloisonnement des parcelles, la fertilisation minérale et surtout dans l'amélioration de l'infiltration par le travail du sol et la restitution du maximum de matières organiques (fumier, pailles, résidus de culture) (CHARREAU et NICOU, 1971; CHARREAU, 1972; ROOSE, 1971).

Dans la zone tropicale humide (ou subéquatoriale), les pluies sont souvent excédentaires pendant la saison culturale, de telle sorte qu'en plus des techniques biologiques déjà préconisées pour développer au maximum le couvert végétal et conserver le sol en place, il faut prévoir des chemins d'eau suffisamment fréquents et bien protégés pour évacuer les excès d'eau. Il faut remarquer toutefois que la plupart des cultures arbustives à cycle long (15 à 40 ans) supportent un sous bois de recru forestier ou de plante de couverture permettant une infiltration quasi totale des eaux et l'évacuation sans danger des eaux excédentaires : il en va de même pour les cultures paillées (cf. essais Ananas : VALENTIN et ROOSE, 1980).

2.2. Tenir compte des risques (pente et type de sol)

Aux U.S.A. et dans les territoires d'expression anglaise, cinq à huit classes de terrains sont distinguées en fonction de risques croissant d'érosion (surtout en fonction de la pente), de limitations imposées par la nature du sol (hydromorphie, rochers, niveaux gravillonnaires) et de l'importance croissante des aménagements à prévoir en cas de mise en valeur (cf. BENNET, 1939; FAO, 1967; HUDSON, 1973). Depuis 1960, les aménagements antiérosifs conseillés par le "Soil and Water Conservation Service" tiennent compte des cinq facteurs définis par WISCHMEIER et SMITH (1960): l'érosivité des pluies, l'érodibilité du sol, la pente, la végétation et les techniques culturales, l'aménagement de la surface cultivée en fonction de l'érosion tolérée.

En France et dans les territoires d'expression française, la classification des terres est beaucoup moins systématisée. Les principes d'utilisation du sol en fonction de leur potentialité et des risques sont connus (HENIN, 1956; FOURNIER et AUBERT, 1958; FEODO-ROFF, 1965; FOURNIER, 1967); ces principes ont été énoncés, mais n'ont

donné lieu à <u>aucune</u> classification ou cartographie systématique (sauf peut-être dans la méthode de cartographie présentée par KILIAN (1974) et par ESCHENBRENNER. En général, chaque cas est laissé à l'initiative de celui qui est chargé du développement d'une culture ou d'une région, et les critères de potentialité sont définis en fonction des risques de dégradation du sol et surtout des caractéristiques physiques du sol dont on suppose, à priori, qu'elles peuvent gêner le développement d'un type de culture (ex. sols acceptés pour le plan palmier, les plantations d'hévéas, de cocotiers, canne à sucre, coton, riz en Côte d'Ivoire).

Par contre, il est souvent prévu un cadre général de protection en courbes de niveau isolant des bandes cultivées plus ou moins larges. Celles-ci sont isolées, soit par des bandes d'arrêt enherbées (ROOSE et BERTRAND, 1971), soit par différents types de fossés ou de terrasses (définies en d'autres régions et sous d'autres climats, mais appliquées empiriquement). Nous avons montré ailleurs (ROOSE, 1978) que ces terrasses sont souvent mal adaptées au rôle de protection antiérosive qui leur est dévolu et aux conditions écologiques et socioéconomiques de l'Afrique occidentale. Leur utilisation, prévue pour les régions sub-arides où la végétation est rare et les précipitations inférieures à 400 mm. par an (SACCARDY, 1950; HEUSCH, 1971) et pour les régions tempérées où les pluies sont peu intenses et peu agressives, a été abusivement étendues jusqu'aux régions tropicales humides où ces conditions ne sont pas remplies et où les méthodes biologiques sont plus efficaces. Leur unique justification est celle d'uneultime défense des sols en cas d'accident (par exemple, averse exceptionnelle tombant sur un sol qui vient d'être préparé pour la plantation) ; en réalité, il vaudrait mieux repenser l'ensemble des techniques culturales importées des régions tempérées et les adapter (ou en créer de nouvelles) aux conditions climatiques agressives des régions tropicales. Dans cet esprit, la méthode des haies enherbées ou des bandes antiérosives isolant des bandes cultivées en courbe de niveau, semble un moyen efficace, facile à vulgariser, car il fait partie des vieilles techniques traditionnelles utilisées depuis longtemps en Europe (on peut en observer en Bretagne, dans le Poitou, la Picardie, etc...) et en Afrique (Maroc, Tunisie, Haute-Volta); elles peuvent être associées ou non aux tas de pierres extraites des champs et disposés en cordons isohypses (DELWAULLE, 1973). Leur efficacité a été démontrée depuis la

zone sahélienne du Niger (où il faut lui associer un bourrelet de terre ou de cailloux) jusque dans la zone subéquatoriale. La bande enherbée absorbe une grande partie du ruissellement, le ralentit et provoque le dépôt de la majorité des terres érodées. Le paysage se transforme progressivement, sans intervention majeure, en une suite de champs en pente douce et de talus enherbés dont la dénivellation peut atteindre 50 à 100 cm. en cinq ans, si on pratique simultanément le labour versé vers l'aval. Cet aménagement simple et facilement réalisé par le paysan l'attache à sa terre et peut servir de base à un cadre foncier ; il est une étape importante du passage d'une agriculture semi-nomade à une agriculture moderne intensive, laquelle exige des investissements (fertilisation, drainage, irrigation, travail du sol) et un surcroît de travail impensable dans le cadre foncier communautaire de la tradition africaine. Les terrassements par contre sont coûteux, peu rentables et nécessitent l'intervention du capital et des techniciens étrangers, ce qui provoque le désintéressement du paysan pour le problème de la conservation des sols qui semble, dans ce cas, dépasser ses possibilités.

3 - L'EXPLOITATION DU PATRIMOINE FORESTIER

L'exploitation intensive des sols en région tropicale n'a heureusement pas toujours abouti à des échecs. Des exemples précis de culture arborée en zone subéquatoriale (OLLAGNIER et al., 1978) ou de culture vivrière (LE BUANEC, 1972) ont montré qu'après une brève période de dégradation des propriétés du sol, s'instaure un nouvel équilibre en relation avec les nouvelles conditions biologiques imposées (ROOSE, 1973, voir fig. 51.1 à 3). Après le défrichement de la forêt, le niveau de fertilité du sol baisse plus vite qu'après défrichement d'une savane (milieu plus pauvre mais plus stable), si bien qu'après quelques années de culture, le niveau de fertilité est assez voisin.

Quatre éléments nous paraissent présenter une importance capitale pour assurer au sol un niveau de productivité acceptable :

- a) la fertilisation minérale, tenant compte de la lixiviation ;
- b) le maintien d'un taux raisonnable de matières organiques dans le sol;

- c) l'adaptation des techniques culturales et en particulier du travail du sol;
- d) le choix raisonnable des espèces cultivées et leur succession dans l'espace et dans le temps.

Dans les climats chauds et humides, la protection phytosanitaire et la lutte contre les mauvaises herbes (encore qu'on en soit revenu des bienfaits du clean-weeding : cf. DU PLESS|X, 1969, pour la culture des hévéas) ont également une grande importance, mais ce n'est pas le lieu d'en discuter. De même, nous ne ferons que citer pour mémoire la sélection de plantes vigoureuses, bien adaptées aux conditions écologiques et en particulier aux carences minérales et à l'acidité généralisée des sols cultivés. Un grand pas sera fait dans le développement de l'agriculture des pays en voie de développement lorsque les généticiens auront sélectionné des variétés de toutes sortes de plantes cultivées (pas seulement des légumineuses) capables de satisfaire une bonne partie de leurs besoins en azote, en fixant cet élement dans l'atmosphère grâce à une association symbiotique avec diverses bactéries (microorganismes).

Nous allons envisager maintenant les quatres éléments dont il a été question ci-dessus.

a) - La fertilisation minérale

Nous avons vu au chapitre 8 que sous culture (en tous cas les cultures sarclées) les pertes de nutriments par l'exportation des récoltes, mais aussi par érosion et drainage sont beaucoup plus élevées que dans le milieu naturel, de telle sorte que le bilan est négatif : cela signifie que les stocks s'épuisent et en particulier les éléments nutritifs facilement assimilables par les plantes. Les apports minéraux sont donc indispensables à court terme pour équilibrer le bilan, mais aussi pour corriger les déficiences du sol (pauvreté ou déséquilibre entre les divers élements).

Il serait bien prétentieux de vouloir résumer en quelques pages les innombrables travaux réalisés en Afrique sur la fertilisation adaptée aux différentes espèces cultivées par le GERDAT, l'ORSTOM et la F.A.O., d'autant plus que les spécialistes eux-mêmes précisent que chaque champ est un cas particulier et qu'il est très difficile de

proposer des conseils de fumure d'application régionale (LEBUANEC, 1973). Nous nous en tiendrons donc à une discussion de principes sur la fertilisation des cultures sarclées en rapport avec les deux pôles bioclimatiques de la séquence étudiée, étant entendu que tous les intermédiaires existent.

Une stratégie de la fertilisation a été proposée (CHAMINADE, 1972) qui comprend trois stades :

- la détermination des carences minérales du sol (essais soustractifs au champ ou en pots, avec des plantes témoins);
- la correction des carences du sol (= investissements possibles par l'aide internationale);
- la détermination de la fertilisation d'entretien (maintien de la production et de la fertilité du sol = fonctionnement).

Cette méthode a trouvé un vaste champ d'application dans la zone tropicale sèche où les pertes par drainage et érosion sont relativement modestes (tant que les pentes sont faibles), les carences assez généralisées (N-P et rarement K) et les besoins propres à chaque plante relativement bien connus dans le cadre d'une rotation classique (céréale, coton, arachide, jachère): cf. JENNY (1965), TRAT H.V. (1970), POULAIN et ARRIVETS (1971), POULAIN (1975 et 1978), pour la Haute-Volta, le Mali et le Sénégal.

En région tropicale humide, cette stratégie qui consiste à "nourrir le sol" pour que la plante y trouve un environnement favorable, s'est avérée inapplicable, d'abord parce que les plantes cultivées et leurs besoins physiologiques propres sont beaucoup plus variables (cf. fertilisation du riz, manioc, palmier, bananier) et surtout parce que les pertes minérales par érosion et drainage sont si élevées qu'il devient trop coûteux, voir techniquement difficile, de stocker des nutriments dans le sol à l'exception du phosphore (cf. lixiviation de 100 % des apports de Ca et Mg, 60 % de N et K, 10 % de P sous la bananeraie de l'IRFA à Azaguié: GODEFROY, ROOSE, MULLER, 1975). Aussi en est-on revenu au principe de "nourrir la plante" quand elle en a besoin et autant qu'elle peut stocker de nutriments et de maintenir le sol dans un état aussi proche que possible du milieu qui convient à la culture (pH supérieur à 4,5 ou 5,5 en fonction des plantes et des risques de toxicité aluminique et manganique). De plus, il s'est avéré possible

dans bon nombre de cas, de confondre la fumure de correction des carences du sol, avec la fumure d'entretien pour la plupart des cultures entrant dans diverses rotations classiques entre une céréale (riz, maïs, sorgho, mil), une plante industrielle de rente (coton, tabac), une plante à tubercule (manioc, igname, patates douces) et une légumineuse (arachide, pois de terre, haricots divers ou soja) (cf. POULAIN et ARRIVETS, 1971 : 60 à 120 unités d'azote, 30 à 60 kg/ha/an de P_2 O_5 ; 0 à 60 kg/ha/ an de K20, un peu de soufre et divers oligo-éléments dans des cas particuliers). Contrairement à ce qu'on a observé en Amérique latine (ADAMS et PEARSON, 1967; KAMPRATH, 1972; BOYER, 1976), il est rare que les sols d'Afrique de l'Ouest soient devenus si acides que la toxicité aluminique (l'aluminium du réseau argileux devenu échangeable) présente une barrière infranchissable aux racines ; en dehors de quelques cas particuliers (usage répété et intensif d'engrais acidifiant en bananeraie par exemple), on constate rarement une réponse significativement positive aux apports de chaux (cf. Lacoeuilhe sur ananas ; IRAT sur mais).

Sous culture arborée, le problème de la fertilisation minérale se pose en d'autres termes que dans les cultures à cycles courts où les apports nutritifs doivent être évalués en majorité avant la culture. En effet, la plante arborescente constitue en elle-même dans ses organes permanents, un stock important d'éléments nutritifs qui peuvent être redistribués vers les parties les plus actives de la plante. En suivant la croissance des individus et le niveau nutritionnel des feuilles (échantillonnage standardisé pour chaque espèce), on peut évaluer l'état nutritionnel des plantes et apporter les éléments qui font défaut en cours de végétation soit par pulvérisation, soit dans la solution d'irrigation (cf. JADIN sur cacao à Divo, IRFA sur ananas), soit par l'intermédiaire du sol. Il semble que pour les cultures arborées, l'équilibre entre les différents nutriments joue autant que leur teneur absolue (JADIN, 1972). On en arrive donc à corriger la disponibilité du sol en chaque élément en fonction des besoirs physiologiques de chaque type de plante et à établir des seuils de teneur du sol en éléments assimilables pour chaque culture.

Tant que le prix des engrais minéraux était modeste, la part qui lui revenait dans le coût de production était faible. Depuis le renchérissement de l'énergie il n'en va plus de même, car la fabrication

des engrais (en particulier azotés) consomme énormément d'énergie (MERCIER, 1978); d'où un souci plus élevé de rentabiliser les apports minéraux et de les économiser. Il ne peut plus être question de tenter de maintenir le taux de matières organiques du sol en apportant uniquement des éléments minéraux, lesquels favorisent la croissance des plantes et donc augmentent la masse des résidus organiques retournant au sol. Les apports massifs de fumier ont généralement donné d'excellents résultats tant sur le volume des récoltes que sur la fertilité du sol; mais il est rarement possible d'en produire suffisamment pour compenser les pertes minérales des cultures intensives. En revanche, une attention particulière est portée depuis 1970 (cours AUBERT à ESAT depuis 1950), à l'utilisation rationnelle des résidus de culture (et de récolte), car ils contiennent souvent des quantités appréciables d'éléments fertilisants (bases, N, P et surtout K). L'exportation des résidus accentue sévèrement le déficit du bilan minéral sous culture ; elle accélère l'acidification des sols et la dégradation de la structure. Un effort particulier devrait être entrepris pour établir le meilleur moyen de restituer les éléments contenus dans ces résidus et mettre au point les techniques de travail du sol, s'il se confirme que leur enfouissement (méthode appliquée jusqu'ici) n'est pas la méthode la plus judicieuse (le paillage entraîne une économie d'énergie, de temps, et constitue une excellente méthode de lutte antiérosive). (Voir convention ananas: ROOSE et LACOEUILHE, 1975-76; VALENTIN et ROOSE, 1980).

Quoiqu'il en soit des économies réalisées, la fertilisation minérale, plus ou moins abondante, est une nécessité à court terme si l'on veut obtenir des récoltes appréciables, indéfiniment : en effet, il y a toujours des pertes, plus ou moins sévères, au système. Les exportations minérales par les récoltes augmentent inexorablement avec les rendements. Les pertes par érosion sont relativement faciles à contenir dans certaines limites tolérables. Par contre, il est beaucoup moins aisé d'éviter les pertes par lixiviation des éléments mal retenus par le complexe absorbant (kaolinite à faible capacité d'échange) et littéralement délavés par la masse des eaux peu minéralisées qui percolent à travers le sol à certaines périodes de l'année. Ces pertes par lixiviation sont très variables en fonction du type de culture, du niveau et des méthodes de fertilisation ainsi que des conditions pluviométriques. Sous culture arborescente, les pertes sont rela-

tivement faibles (voir cacaoyère IFCC à Divo, hévéas IRCA à Anguédédou) car les apports sont faibles et le réseau racinaire est dense; le fractionnement des apports n'est pas toujours nécessaire pourvu que l'épandage ait lieu après la saison la plus humide et sur une surface suffisante.

Sous cultures exigeantes en nutriments quelques règles doivent être observées pour limiter les pertes par lixiviation :

- fractionner les apports (2 à 10 doses) pour répondre aux besoins physiologiques des plantes au moment où elles en ont le plus besoin, en dehors des périodes les plus arrosées,
- éviter de dépasser les seuils de concentration dans le sol à partir desquels les "réservoirs du sol débordent" : ces seuils sont largement inférieurs à la capacité d'échange des cations de la terre fine ;
- maintenir un taux de matières organiques suffisant, lequel augmente la faible capacité de stockage de nutriments du sol, augmente les réserves d'eau utile aux cultures et diminue le temps de contact en favorisant l'écoulement rapide des eaux de percolation dans les macropores;
- éviter les apports massifs de nutriments, en particulier au début de saison des pluies ou à la plantation, à une époque où beaucoup d'éléments nutritifs sont libérés par minéralisation des matières organiques du sol, des résidus de culture ou des amendements organiques;
- augmenter la demande des plantes en réalisant des plantations denses et précoces sitôt que les pluies le permettent;
- éviter de laisser le sol nu après la récolte, prévoir une plante de couverture ou une culture dérobée pour absorber les nutriments libérés par le sol.

Les engrais enrobés à libération lente ne peuvent rendre service que dans certains cas précis où la culture exige un apport modeste mais régulier de nutriments assimilables ; ce n'est pas le cas le plus courant, car la plupart des plantes cultivées ont des besoins plus élevés à certains stades de leur développement qu'à d'autres.

b) Problème des matières organiques

Dans tous les sols, et plus encore dans les sols chimiquement pauvres, il est essentiel de conserver un taux de matières organiques suffisant, car celles-ci contiennent une réserve importante en nutriments (N, P, S), participent au stockage temporaire de plusieurs éléments fertilisants (les bases) et de l'eau, ainsi qu'à de nombreux cycles biologiques (N, P, S). Elles sont, d'autre part, liées à la stabilité de la structure, à la porosité, donc à la dynamique de l'eau ainsi qu'à la résistance du sol à l'érosion. L'une des causes de la différence de fertilité entre les sols ferrallitiques forestiers et les sols ferrugineux de savane (souvent dégradée par les feux) réside justement dans la différence de teneur et de répartition des matières organiques dans le sol; les taux de carbone et d'azote organiques sont nettement plus élevés à la surface des sols ferrallitiques ce qui les rend plus filtrants et plus résistants à la battance des pluies.

Or, au moment du défrichement, on aère le sol et on accélère de ce fait la minéralisation des matières organiques du sol tout en supprimant la source de matières organiques fraîches (sous forêt, apport de 8 à 12 t/ha/an de litière répartie tout au long de l'année). Si le sol est maintenu dénudé, le taux de carbone du sol diminue d'abord rapidement, puis progressivement jusqu'à atteindre un nouvel équilibre (aux cases d'érosion d'Adiopodoumé diminution de 1,6 à 0,7 % de carbone : ROOSE ,1973). Si on installe une culture, le taux de carbone se stabilise plus haut, en fonction des apports de matières organiques de la culture. Pour certaines cultures (bananier, ananas, etc...), les résidus de culture sontsi abondants que le taux de carbone du sol est voisin de celui qu'on observe sous la forêt sans pour autant que les propriétés structurales soient aussi bonnes que sous forêt (GODEFROY, 1974). Pour d'autres cultures (arachide, coton, etc...) les résidus de culture sont très réduits ou exportés (ex. pailles du sorgho, du mil et du riz en région soudanienne). Il convient donc d'alterner les cultures "dégradantes" et les cultures protectrices des matières organiques du sol, d'introduire dans la rotation des sols de régénération (jachère naturelle, culture fourragère ou d'engrais vert), d'apporter des amendements organiques (fumier,

paillis ou compost) ou de restituer sur place le maximum de résidus de culture. On retrouve ce problème de <u>l'utilisation des résidus de culture en tant que source des matières organiques du sol, en tant qu'élément du bilan biochimique et plus loin en tant qu'élément protecteur du sol et de la structure des horizons superficiels, en relation avec le travail du sol.</u>

c) Le travail du sol

Nous avons déjà discuté au chapitre 4 du problème que pose le travail du sol pour la conservation des sols en région tropicale. Rappelons seulement ici qu'il existe deux écoles :

- La première insiste sur le fait que les sols tropicaux sont extrêmement fragiles, sensibles à l'érosion et qu'il vaut donc mieux les remuer le moins possible : c'est ce que nous ont enseigné nos maîtres vers les années 1960-65 (BAYENS, Cours 1961; AUBERT, Cours 1963). Plus récemment, LAL (1975) a reposé le problème au Nigéria : il a montré la dégradation rapide des propriétés physiques d'un sol ferrallitique riche en gravier, soumis au labour conventionnel, alors que dans le champ voisin non labouré mais recouvert d'un mulch, la capacité d'infiltration persiste beaucoup plus longtemps grâce à une forte activité biologique à l'interface résidu/sol.
- La deuxième école (CHARREAU et NICOU, 1971) a montré que sur les sols ferrugineux tropicaux sablo-argileux du Sénégal, les rendements sont amputés de 50 % en absence d'un labour profond dont le rôle est d'améliorer l'infiltration, la profondeur de l'enracinement et l'alimentation hydrique, mais aussi de contrôler les mauvaises herbes et d'enfouir les résidus de culture.

La différence de position de ces deux écoles pourrait s'expliquer par des différences de sols (mauvaise structure des sols ferrugineux en relation avec une faible teneur en matières organiques et des teneurs plus élevées en limons et sables fins) et aussi de climats (carences hydriques très fréquentes en zone soudanienne même en saison des pluies). Cependant, les études en parcelles d'érosion réalisées par 1'ORSTOM tant sous pluies naturelles (ROOSE, 1973-1977, VALENTIN et ROOSE, 1980) que sous pluies simulées (LAFFORGUE et NAAH,

1976 ; ROOSE et ASSELINE, 1978 ; COLLINET, LAFFORGUE, VALENTIN, 1976 à 1980) montrent que le <u>labour</u> n'améliore l'infiltration que pendant une <u>durée limitée</u> (environ 100 à 150 millimètres de pluie), mais diminue la cohésion du sol. Ensuite, dès que la pellicule de battance est constituée, le ruissellement dépasse légèrement celui qu'on observe sur le sol nontravaillé et les transports solides sont nettement plus forts (forte charge solide après travail du sol). Les risques d'érosion sont donc plus élevés sur le terrain labouré, à moins que le développement accéléré de la culture, grâce au travail du sol, protège plus rapidement ce dernier.

Il n'est reste pas moins vrai qu'en année sèche, un labour profond des sols sablo-argileux du Sénégal (CHARREAU, 1972) et même de basse Côte d'Ivoire (VALENTIN, ROOSE, 1980) assure un meilleur enracinement et une meilleure production. Nous en concluons que le travail du sol est actuellement un mal nécessaire au développement profond de l'enracinement, tout au moins dans les sols tassés cultivés depuis longtemps. Par ailleurs, il nous semble urgent qu'un effort de recherche soit fait pour adapter les techniques de travail du sol aux conditions tropicales, en particulier par la mise au point de méthodes permettant d'aérer le sol sous le couvert d'une litière de résidus de culture, de limiter la pulvérisation des terres, de ne travailler que les lignes de plantation ou même de ne procéder à un labour que tous les 2 à 4 ans (cf. minimum tillage aux U.S.A.).

d) - Le choix des espèces cultivées et leur rotation dans le temps et dans l'espace

Tout au long de ce mémoire, nous avons distingué deux types de culture :

- Les unes recréent une ambiance naturelle, couvrent le sol, produisent de fortes quantités de matières organiques, sont capables de fixer les éléments nutritifs disponibles, d'assurer une forte activité biologique et de protéger le sol contre l'érosion et la dégradation de la structure; ce sont essentiellement des cultures fourragères (graminées ou légumineuses) et des cultures arborescentes associées à un sous-étage (recru forestier, plantes de couverture) et

menées selon des techniques bien adaptées aux conditions écologiques régionales.

- Les autres sont des cultures à cycle court (3 à 24 mois) qui couvrent mal le sol (pendant le temps de la culture ou entre les cycles culturaux), retiennent mal les nutriments (risques élevés de lixiviation), laissent en général peu de résidus organiques dans le sol, exigent l'usage abondant de pesticides pour lutter contre les maladies et de ce fait détruisent certaines formes de l'activité biologique (par ex. les vers de terre), protègent mal les propriétés physiques du sol qui se dégrade plus ou moins rapidement en fonction des techniques culturales adoptées (maïs, arachide, coton).

Entre ces deux pôles, il existe évidemment toute une gamme de cas intermédiaires et on peut se demander si la dégradation du sol sous certaines cultures n'est pas due, pour une large part, au choix du type de culture ou à la mauvaise adaptation des techniques culturales à l'agressivité climatique (abondance des pluies, forte chaleur, dynamique rapide des matières organiques). Il est clair en effet que des essais en zone soudanienne de cultures de palmiers à huile qui réclament beaucoup d'humidité, sont voués à l'échec et que les terres ainsi malmenées vont se dégrader. Inversement, certaines plantes sarclées, associées aux techniques qui leur conviennent en zone soudanienne, sont mal adaptées à la culture pure en zone subéquatoriale; c'est le cas du mais et du sorgho qui couvrent mal le sol, souffrent de la battance des pluies, exigent une fertilisation minérale suffisante, restituent peu de matières organiques au sol et laissent la terre dégradée.

En dehors de considérations purement économiques (les meilleurs sols à banane, sont ceux qui se trouvent près des ports d'exportation) ou bioclimatiques (besoins vitaux de durée d'éclairement, d'humidité ou de température), on peut se demander s'il ne faut pas repenser l'aire de distribution des principales cultures en fonction des risques de dégradation du sol ou tout au moins, modifier radicalement les techniques culturales habituelles (ex. maïs en culture associée en zone humide pour mieux couvrir le sol et exploiter l'eau et les nutriments disponibles). Choisir un système de culture non seulement pour des raisons économiques, mais aussi en fonction de

l'adaptation des plantes et des techniques culturales habituelles aux conditions écologiques, nous semble un gage de productivité élevéet durable, comportant des risques réduits au minimum de dégradation du sol.

Parmi les techniques bien connues des agronomes, la rotation des cultures dans le temps et dans l'espace nous semble mériter une plus ample réflexion. Que ce soit pour des raisons phytosanitaires, pour permettre une exploitation plus poussée des réserves hydriques et minérales des différents horizons du sol (besoins différents des plantes et différences du système racinaire), pour la protection antiérosive du sol ou le maintien de son stock de matières organiques, il s'avère intéressant de changer de plante cultivée à chaque cycle et d'alterner dans l'espace des bandes de cultures différentes protégeant plus ou moins bien le sol. Or, dans le système traditionnel africain de culture associée, ce souci d'alternance est poussé beaucoup plus loin puisqu'une fois la parcelle défrichée, le sol est couvert sans arrêt d'une succession précise de plantes aux exigences différentes.

Des esprits cartésiens ont rejeté ces méthodes désordonnées qui rendent difficile l'établissement d'une densité de plantation optimale, l'épandage à temps des engrais et l'exécution des soins phytosanitaires que chaque espèce réclame dans un système d'exploitation intensif. Il semble cependant que, depuis quelques années, la culture associée de certaines espèces cultivées ait été testée en parcelles et que les rendements obtenus en culture associée soient quelquefois largement supérieurs à ceux obtenus en cultures pures (DUPRIEZ, 1980).

En résumé, un effort particulier reste à faire pour adapter les techniques culturales (dans le sens le plus large du terme) pour se rapprocher des modèles naturels que présentent la forêt et dans une moindre mesure la savane, modèles complexes à haute activité biologique qui parvient à assurer une haute productivité (voir la luxuriance de la forêt), opposée aux modèles simplifiés actuels de production à haut niveau d'intervention qui n'ont pas réussi à éviter le gaspillage de nutriments et finalement la dégradation du substrat pédologique.

4 - CONCLUSIONS

A une époque où resurgit le spectre de la famine dans bon nombre de pays africains (Ethiopie, Soudan, Niger, Haute-Volta, Sénégal, Mali, Mauritanie et actuellement Ouganda), on peut s'interroger sur l'avenir de la production agricole de ces immenses territoires généralement peu peuplés.

Nous avons vu au chapitre 8 que les équilibres dans les milieux tropicaux secs et humides sont fragiles, soumis à la fois à l'agressivité des pluies abondantes (érosion et lessivage) et à la chaleur de la saison sèche (ultra-dessication) pendant 2 à 6 mois de l'année. Il en résulte que les sols sont pauvres chimiquement, leur structure délicate et que leur équilibre dépend de leur activité biologique. Par conséquent, dans le milieu naturel, les sols forestiers sont généralement plus fertiles que les sols de savane souvent dégradés par les feux de brousse.

Le défrichement entraine presque toujours une dégradation chimique et physique des sols, dégradation plus rapide en milieu forestier (on tombe de plus haut !) de telle sorte qu'au bout de quelques années, les sols cultivés sans protection se retrouvent tous à un niveau assez bas quelle que soit leur couverture naturelle à l'origine.

Pour des raisons socio-économiques (peu de main d'oeuvre, grandes surfaces et mythe de la mécanisation libératrice de l'homme), les colonisateurs ont introduit les méthodes de production agricole mécanisées en honneur dans les régions tempérées; ils ont souvent abouti à des échecs parce qu'ils ont négligé d'adapter ces méthodes de production aux conditions écologiques de l'Afrique (HARROY, 1944). Devant ces échecs, des recherches ont été entreprises en particulier dans le domaine de la fertilisation, des techniques culturales et de la dynamique de l'eau et des sols. De nouveaux schémas de développement agricole ont été testés qui montrent que la mise en valeur de ces régions est non seulement possible, mais prometteuse à conditions de respecter les lois de la nature. En particulier:

- lors du défrichement, de respecter la structure des horizons humifères, les plus actifs biologiquement et essentiels pour l'avenir

- des réserves nutritives et hydriques de ces sols pauvres ;
- lors de l'aménagement du terrain, de répartir les cultures en fonction des potentialités des terres et d'organiser l'exploitation en fonction des risques de dégradation;
- lors de l'exploitation, de corriger les carences minérales du sol, de compenser les pertes minérales et organiques, d'éviter de travailler et d'exposer le sol nu pendant la période la plus humide et enfin de prévoir la restitution des résidus de culture et des périodes de reconstitution de la fertilité.

Dans les régions sèches, l'attention se portera tout particulièrement sur <u>la conservation des eaux</u>. Dans les régions humides, toutes les techniques seront mises en oeuvre pour <u>protéger le sol</u> à l'époque où les pluies sont les plus agressives et répartir les éléments nutritifs complémentaires au moment où la culture en a besoin. Une saine gestion des matières organiques disponibles devrait pouvoir assurer, avec un minimum de travail du sol, une structure correcte du sol et du sous-sol.

De ces expérimentations un esprit nouveau est né.

Jusqu'il y a peu, la lutte antiérosive était trop souvent synonyme de restrictions, défenses ou mise hors du circuit de production des terrains trop dégradés. Avec VAN DEN ABEELE et VANDEPUT (1956), FOURNIER (1967) et HUDSON (1973) nous pensons au contraire que les techniques de conservation de l'eau et de la fertilité des sols (au sens large) doivent permettre une exploitation intensive et durable du milieu au même titre que la fertilisation, l'irrigation, la lutte phytosanitaire et l'amélioration génétique des plantes.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Tout au long de ce mémoire, nous nous sommes efforcé de caractériser la dynamique actuelle de deux types de sols tropicaux issus d'une même couverture kaolinique, qui est le produit de l'altération poussé des roches pendant des dizaines de millénaires et qui ne comporte plus de ce fait qu'un matériaux résiduel monotone formé de quartz, de kaolinite et de sesquioxydes. Malgré cette longue histoire commune, la partie supérieure des sols ferrallitiques et des sols ferrugineux tropicaux ont aujourd'hui des comportements hydrodynamiques très différents et sont répartis dans des paysages typiques liés à deux ensembles de bioclimats. Ce fait n'est pas dû au hasard : il montre qu'il existe des relations étroites entre le climat actuel, les activités biologiques (sensu lato) qui se développent dans chacun de ces paysages et la dynamique actuelle des horizons qui composent la partie supérieure de ces sols, que nous avons appelée la "boîte noire" (bien que nos ainés nous ont déjà donné de sérieuses lueurs sur ce qui s'y passe).

Le moment est venu de rappeler les principaux résultats de cette étude et d'en tirer les enseignements généraux qui s'imposent.

1 - RAPPEL DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

1.1. Originalité de la méthode d'étude

Pour évaluer la dynamique actuelle des horizons biologiquement les plus actifs (2 mètres supérieurs), à des échelles de temps (10-100-1000 ans) compatibles avec les dernières variations climatiques, nous avons mis au point une série de dispositifs permettant de mesurer sur le terrain l'ensemble des mouvements de matières (eau, éléments solubles et particules solides) : en particulier les apports par les pluies et les engrais, les pertes par érosion et lessivage, les remontées biologiques et les immobilisations dans la végétation et le sol. Huit stations d'expérimentation ont été établies depuis les forêts denses humides de la basse Côte d'Ivoire jusqu'aux savanes soudano-sahéliennes du Centre de la Haute-Volta, où sont observés ces bilans dans les conditions les plus variables possibles (végétation naturelle, cultures fertilisées ou sol nu). Le bilan de tout ce qui entre ou sort de la "boîte noire", comparé aux cycles internes et aux stocks permet de préciser en 4 à 10 ans d'expérimentation l'évolution actuelles du profil en fonction des traitements.

1.2. Séquence bioclimatique et toposéquences

Dans cette étude,il est question de séquence bioclimatique et non de toposéquences. Ceci ne signifie nullement que l'auteur ignore ou refuse d'admettre l'évidence des relations latérales entre les sols d'une même toposéquence; les mesures de ruissellement et de drainage oblique ont suffisamment prouvé que ces relations existent et qu'elles sont probablement plus poussées sous climat tropicalsec qu'en milieu subéquatorial. Nous avons choisi d'étudier la dynamique des sols des versants (et même des 2/3 supérieurs des versants) parce qu'ils représentent mieux l'équilibre avec les conditions actuelles bioclimatiques de pédogenèse que les sols des sommets (reliques de pédogenèses passées) ou des vallées (influence de l'hydromorphie et apports sédimentaires successifs). L'étude fouillée des toposéquences a été entreprise plus tard par une équipe multidisciplinaire à l'aide de deux simulateurs

de pluie et de séries de parcelles emboîtées couvrant progressivement l'ensemble du paysage (cf. les travaux de ASSELINE, COLLINET, LAFFOR-GUE, ROOSE et VALENTIN).

1.3. Facteurs de l'érosion

Dans le milieu naturel, les phénomènes d'érosion restent discrets tant que le sol est couvert : leurs variations interannuelles sont aussi importantes que les différences entre les milieux forestiers et les savanes soudaniennes. Par contre, lorsque le feu dévaste régulièrement la savane, la couverture arborée tent à disparaître ainsi que son pouvoir de stockage des nutriments, les activités biologiques diminuent et la structure des horizons supérieurs du sol se dégrade ; le ruissellement atteint alors des proportions inacceptables dans ces zones carencées en eau et les pertes en terre sont loin d'être négligeables, même sur des pentes très faibles (moins de 1 %). Cependant, c'est dans le milieu ouvert des steppes sahéliennes (pluie = 400 à 700 mm) que les phénomènes d'érosion sont les plus développés en milieu naturel.

En milieu cultivé, les phénomènes d'érosion sont très variables : on y observe donc plus facilement le rôle des facteurs conditionnels. A l'origine de l'érosion se trouve l'énergie des gouttes de pluie qui brisent les agrégats, libèrent les particules élémentaires susceptibles d'être transportées par les eaux de ruissellement ou d'infiltration, lesquelles ont toutes deux une faible compétence. Or, en milieu tropical, les pluies sont extrêmement agressives (3 à 60 fois plus en Afrique occidentale qu'en région tempérée), abondantes, intenses et concentrées en quelques mois de l'année. Façe à cette énorme érosivité potentielle, qui diminue du Sud au Nord avec les précipitations annuelles, le milieu oppose une résistance elle aussi décroissante. L'analyse des observations sur l'érosion effectuée à l'aide de l'équation de Wischmeier et Smith (1960), montre que le couvert végétal peut réduire l'érosion de 1 à 0,001, les propriétés intrinsèques du sol de 0,30 à 0,01 et les techniques culturales ou antiérosives de 1 à 0,1. Quant à la pente, elle intervient plus par son inclinaison et sa forme (érosion sur pentes convexes > planes > concaves) que par sa longueur ; dans les

paysages les plus répandus d'Afrique occidentale, le facteur topographique fait varier l'érosion de 0,1 à 5 (20 dans les cas extrêmes). L'érosion réelle est le produit de ces cinq facteurs : qu'un seul facteur s'annule et l'érosion devient négligeable. La planification de la conservation des sols devrait donc s'appuyer sur les facteurs les plus efficaces pour arrêter les processus de dégradation à leur origine (absorption de l'énergie des gouttes par une bonne couverture du sol) plutôt que de chercher par divers moyens mécaniques à limiter le ruissellement et les conséquences désastreuses de cette dégradation.

1.4. Bilan hydrique

Le drainage profond passe de 40-45 % sous forêt dense subéquatoriale à 25-35 % sous savane soudanienne et tend à s'annuler au pôle sahélien ; à ce pôle sec (P < 700 mm), le front d'humectation du sol ne dépasse pas chaque année 50 centimètres de profondeur, tant le pouvoir évaporant de l'air et le ruissellement sont élevés. En revanche, au pôle humide l'ETP est limitée à 1250 mm, de telle sorte qu'une masse d'eau considérable est disponible pour percoler à travers le profil jusqu'à la nappe phréatique (ou ruisseler, si le sol est dégradé). L'influence de la roche mère et de la topographie sur ce bilan est assez complexe. Le rôle de la végétation par contre est d'autant plus important (ruissellement et ETR) que le climat est sec. La forêt évapotranspire probablement 150 à 200 mm de plus que les autres couverts. Elle modifie surtout la qualité des eaux (charge solide) et la répartition de l'écoulement dans l'année : plus la végétation est dense, plus l'écoulement retardé (le plus utile) est favorisé, et les écoulements de pointe (les plus dangereux pour l'érosion) sont laminés. Une couverture végétale abondante améliore donc le bilan de l'eau utile (augmentation des écoulements de base). Les résultats montrent qu'on néglige trop souvent le ruissellement dans les modèles d'estimation du bilan hydrique.

1.5. Charge soluble des eaux

Dans la séquence étudiée, la charge soluble des eaux superficielles varie plus en fonction du volume des écoulements et des
saisons, qu'en fonction des caractéristiques des stations. La tendance
à la dilution en milieu humide est compensée par des apports atmosphériques croissants (proximité de l'océan et de la forêt) et par une activité biologique plus poussée : seule la silice des eaux de nappe augmente nettement avec l'aridité du milieu. Les eaux de pluie se chargent
au contact des végétaux (surtout des arbres) et des couches humifères
du sol, puis se déchargent avant d'atteindre la nappe phréatique ;
seuls la silice et, dans ume moindre mesure le sodium, qui ne sont pas
piégés par les végétaux, présentent des teneurs croissantes jusqu'aux
sources.

L'influence de la roche mère sur la charge soluble des eaux superficielles est réduite, car il ne reste pratiquement pas de minéraux altérables dans les horizons traversés. La kaolinite est stable, le quartz et les phytolithes sont solubles dans certaines circonstances au sein des horizons superficiels, mais pas dans la zone d'altération; les sesquioxydes migrent principalement sous forme colloïdale ou particulaire.

L'aménagement du milieu naturel (défrichement, feux, fertilisation) peut modifier considérablement la charge soluble des eaux superficielles, en changeant l'équilibre entre l'offre (minéralisation des matières organiques et engrais) et la demande d'éléments nutritifs (fixation par le sol et besoins des plantes). Il en résulte des risques de lixiviation des éléments les plus mobiles (N, Ca, Mg, K, Na, Cl, SO,) et une tendance à l'acidification des sols soumis à une fertilisation intense trop souvent incomplète. Les risques de pollution des nappes sont cependant réduits tant que les apports ne dépassent pas les besoins des plantes, ni la capacité de fixation du sol (fractionnement) et qu'ils sont effectués en dehors des périodes les plus humides de l'année. L'azote et les bases sont très mobiles alors que le phosphore est rapidement insolubilisé par le fer et l'alumine libres, abondants dans les sols tropicaux. Le potassium est très mobile dans les sols kaoliniques, tandis qu'il est rapidement rétrogradé dans les sols riches en argiles 2/1.

La composition chimique des eaux superficielles semble dépendre des phénomènes biochimiques et de l'aménagement du milieu par l'homme, tandis qu'au niveau de la nappe, elle serait contrôlée par les lois d'équilibre physico-chimique entre les minéraux et les solutions.

1.6. Bilans géochimiques de l'évolution

Dans le milieu naturel, le bilan n'est équilibré que grâce aux apports atmosphériques et au recyclage rapide des éléments concentrés à la surface du sol par diverses activités biologiques (pluviolessivage, minéralisation des litières, remontées par la flore et la mésofaune). Qu'un processus quelconque interrompe la chaîne biologique et la productivité végétale diminue, tandis que les horizons superficiels du sol se dégradent. Ainsi, lorsque le feu parcourt régulièrement la savane, il empêche la régénération des arbres, abîme les touffes d'herbes, réduit la variabilité végétale : finalement le taux de matières organiques du sol diminue, tandis que sa compaction et son érodibilité augmentent.

L'arbre joue en quelque sorte le rôle du "bas de laine" pour accumuler les substances nutritives disponibles : sa destruction entraîne nécessairement une certaine dégradation du milieu, mais celle-ci peut être plus ou moins rapide et profonde en fonction de la brutalité des techniques de défrichement et du mode d'exploitation . En définitive ce milieu tropical, où les minéraux altérables sont profondément enfouis sous la couverture kaolinique, est très fragile et difficile à mettre en valeur à cause de l'agressivité climatique ; de fortes pluies succèdant à de fortes chaleurs, les matières organiques sont rapidement minéralisées laissant un substrat pédologique pauvre chimiquement et fragile dans ses structures. L'exploitation agricole exige donc des apports minéraux et organiques réguliers pour compenser les pertes de nutriments (exportation par les récoltes, érosion, lixiviation) et la réduction de certaines activités biologiques. L'utilisation rationnelle des résidus de culture au champ semble essentielle tant pour réduire les exportations minérales que pour assurer un niveau raisonnable du taux de matières organiques dans les horizons superficiels du sol, une structure correcte et une bonne résistance à l'érosion, une capacité suffisante de stockage de l'eau utile et des nutriments.

1.7. Transferts de matières en phase solide.

Conséquences sur la morphologie des profils.

Dans la séquence bioclimatique étudiée, <u>l'appauvrissement</u> en particules fines des horizons superficiels est généralisé sur <u>les couvertures kaoliniques</u>: cet appauvrissement provient de l'action combinée de l'érosion en nappe sélective, des remontées de matériaux fins par la mésofaune et du lessivage des éléments colloïdaux. La destruction des argiles ne semble se produire qu'en milieu chaud beaucoup plus humide (pluie > 3000 mm).

En milieu forestier subéquatorial, le drainage vertical est si important que le lessivage vertical à floculation diffuse domine les mouvements obliques de surface et développe des profils peu différenciés et profondément appauvris. Sous savane brûlée et sous culture sarclée le lessivage est aussi abondant, mais largement dépassé par les phénomènes d'érosion sélective. Sur forte pente ou en milieu très dégradé, l'érosion devient décapante, ce qui limite l'épaisseur des horizons appauvris. Si le lessivage des éléments colloïdaux est plus apparent en milieu tropical sec, c'est que ceux-ci se déposent à faible profondeur, faute de drainage profond : ils forment des profils très différenciés. Dès lors se développe un horizon compact à faible profondeur, lequel favorise les mouvements obliques superficiels de l'eau et de tout ce qu'elle peut transporter.

Pour le lessivage comme pour l'érosion en nappe, l'énergie des gouttes de pluie intervient pour désagréger les particules, tandis que l'eau assure leur transport. Par contre, les matières organiques peuvent jouer des rôles divergents : les acides fulviques maintiennent les colloïdes kaoliniques à l'état dispersé et assurent leur migration, tandis que d'autres formes de matières organiques protègent la stabilité de la structure et ralentissent l'érosion.

Les activités de la mésofaune sont multiples et très variables d'une espèces à l'autre. Retenons leur influence positive sur la macroporosité, la capacité de filtration et l'homogénéisation des non horizons superficiels. Notons également que la remontée de matériaux riches en particules fines au-dessus de la litière et des lits de gra-

viers, assure l'évolution de l'appauvrissement et la possibilité d'une érosion en milieu naturellement protégé.

2 - ENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

De cette étude, il est possible d'extraire les enseignements suivants concernant la méthode, la pédogenèse actuelle et l'influence de l'homme et de la végétation.

- 2.1. La méthode d'observation des flux liquides et solides sur les parcelles tout au long des saisons s'est avérée bien adaptée à l'évaluation des tendances actuelles de la pédogenèse. En effet, les flux en milieu naturel sont nettement plus faibles que les stocks; il eut été difficile d'étudier la dynamique actuelle exclusivement à partir de l'évolution de ces stocks, alors que les échanges entre les éléments facilement solubles et la réserve minérale totale du sol ne sont pas toujours très nets à l'échelle d'une rotation.
- 2.2. Le passage d'une échelle de temps, et surtout d'espace, à une autre est assez délicat : en effet, le comportement d'un versant peut différer significativement de celui des parcelles qui la composent, car l'aménagement des surfaces a une influence majeure sur les transferts de matières. On l'a vu à propos des bilans hydriques. A chaque problème correspond une échelle d'observation et des méthodes adaptées : chacune a ses avantages et ses inconvénients.
- 2.3. La différenciation des profils sur les couvertures kaoliniques tient à la diversité de la <u>dynamique de l'eau</u> et au
 rôle essentiel joué par <u>diverses activités biologiques</u>. En même temps
 que les mouvements de l'eau deviennent plus profonds du pôle sahélien
 au pôle subéquatorial, les activités biologiques s'amplifient et se
 diversifient au point d'influencer la plupart des processus pédologiques.

- 2.4. La charge soluble des eaux superficielles est peu influencée par la nature des roches et par l'aridité climatique : elle dépend de l'activité biologique et de l'aménagement du milieu (feu, déforestation, fertilisation, etc...). En revanche, au niveau des nappes profondes, les solutions sont en équilibre thermodynamique avec l'altération et la néogenèse des minéraux.
- 2.5. Les transferts de matières sous forme particulaire occupent une place prédominante dans la séquence bioclimatique étudiée. Si le rapport entre les migrations solubles et solides augmente à mesure que le climat devient plus humide, cependant, même en milieu subéquatorial, les tranferts de matière sous forme particulaire sont supérieurs à ceux qui existent sous forme soluble. Sous culture peu couvrante, les migrations solides par érosion sont largement prépondérantes.
- 2.6. La lixiviation des nutriments et l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels sont des processus pédologiques très rapides (quelques dizaines d'années à quelques millénaires) par rapport à l'altération ferrallitique (20 000 à 100 000 ans par mètre de granite kaolinisé). On comprend dès lors que la morphologie des profils et des paysages soit en relation avec le bioclimat actuel. D'ailleurs, par son emprise sur le milieu naturel, l'homme accélère encore l'érosion superficielle et les migrations particulaires à la surface du sol, processus qui, dans le milieu naturel, dépend pour une large part de l'activité de la mésofaune.
- 2.7. Le rôle de la végétation sur la dynamique des sols est considérable, tant sur le plan chimique que physique. Elle concentre les éléments nutritifs dans les horizons superficiels (surtout les arbres), entretient le cycle de la matière organique, protège le sol de l'énergie du soleil et des gouttes de pluie et assure la pénétration en profondeur des eaux atmosphériques en maintenant la structure et la macroporosité.
- 2.8. Il faut finalement insister sur le rôle de l'homme qui est fondamental. L'homme peut en effet modifier la couverture végétale (feu et culture), l'activité biologique et la structure des

horizons superficiels (travaux culturaux), ce qui entraîne une accélaration notable de certains processus et peut changer la dynamique
actuelle de la partie supérieure du profil. Le milieu étant exposé à
un climat particulièrement agressif, sa mise en valeur exige qu'on respecte les lois élémentaires de la nature et en particulier qu'on protège
les horizons superficiels les plus actifs biologiquement et qu'on leur
restitue les éléments nutritifs et les matières organiques qui leur sont
indispensables pour maintenir leur niveau de fertilité.

A l'heure où le spectre de la famine réapparaît dans diverses régions tropicales d'Afrique et d'Asie, il n'est pas inutile de rappeler que les potentialités de production de ces régions chaudes sont largement supérieures à celles des pays tempérés, pourvu qu'une volonté politique et économique se dessine et qu'on fasse appel aux techniques adaptées aux conditions écologiques.

BIBLIOGRAPHIE

- AALDERS (H.W.), 1976. Une estimation de l'érosivité de la pluie au Bénin. FAO/U.N., Cotonou, Projet agro-pédologie, 16 p.
- ADAMS (F.), PEARSON (R.W.), 1967. Crop response to lime in the Southern United States and Puerto-Rico. In "Soil acidity and liming", Agron. Monograph. n° 12, Americ. Soc. of Agron., Madison.: 161-206.
- AKITI (T.), 1980. Etude géochimique et isotopique de quelques aquifères du Ghana: - Gneiss de la Plaine d'Accra, - Calcaires de la Plaine au Sud-Est de la Volta, - Granites de la Haute-Région. Thèse Doct. Ing. Univ. Paris-Sud Orsay, 232 p.
- AMERMAN (C.R.), Mc GUINNESS (J.L.), 1967. Plot and small watershed runoff: its relation to larger areas.-Amer. Soc. Agr. Eng. Trans. 10, 4,: 464-466.
- ANDREUX (F.), CORREA (A.), 1979. Caractères généraux de la matière organique de sols entrophes et mésotrophes affectés ou non par des migrations particulaires...Colloque "migrations organo-minérales dans les sols tempérés", Nancy, Sept. 1979.
- ARNOLDUS (H.M.), 1978. An approximation of the rainfall factor in the Universal soil loss equation. Workshop on assessment on erosion in USA and Europe: Gent mars 1978, 6 p.
- ARRIVETS (J.), 1973. Résultats de riziculture sans aménagement en zone soudanienne. L'exemple de bas-fonds du Centre Haute-Volta.—Agron. Trop. 28, 7, : 34-53.
- ARRIVETS (J.), ROOSE (E.), CARLIER (P.), 1973. Etude du ruissellement, du drainage et de l'érosion sur des sols ferrugineux de la région Centre Haute-Volta (station de Saria). Dispositif d'étude et premiers résultats (1971). Annexes. Rapport IRAT/H.V.-ORSTOM/C.I.,: 85 + 88 p.
- ARRIVETS (J.), OLIVER (R.), 1974. Etude de la dynamique de l'azote minéral à Ampangabe. Résultats 73-74 et synthèse des deux années précédentes. IRAM/CENRADERU, Tananarive, 18 p. inédit.
- ASSELINE (J.), VALENTIN (C.), 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. 15, 4, : 321-350.
- AUBERT (G.), 1950. Cours de pédologie à l'Ecole Supérieure d'Agronomie Tropicale. Nogent-sur-Marne.
- AUBERT (G.), 1959. La végétation et le problème de l'évolution des sols perméables en zone tropicale humide et semi-humide. Coll. Soc. Bat. de France.
- AUBERT (G.), 1959. Influence de divers types de végétation sur les caractères de l'évolution des sols en région équatoriale et sub-équatoriale ainsi que leurs bordures tropicales semi-humides.—Coll. UNESCO Abidjan "sols et végétations des régions tropicales": 41-45.
- AUBERT (G.), 1965. La classification pédologique utilisée en France. Pédologie n° spéc. : 25-56.
- AUBERT (G.), FOURNIER (F.), 1958. Les cartes d'utilisation des terres. Sols Africains, 3, 1 : 1-15.

- AUBERT (G.), SEGALEN (P.), 1966. Projet de classification des sols ferrallitiques. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. 4, 4, : 97-112.
- AUBERT (G.), BOULAINE (J.), 1967. La Pédologie.-P.U.F. Coll. Que sais-je ? n° 352, Paris, 127 p.
- AUBREVILLE (A.), 1938. La forêt coloniale. Les forêts de l'ADF. Ann. Ac. Sci. Col., t. IX, 244 p. Paris.
- AUBREVILLE (A.), 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique Tropicale. Paris, Soc. Ed. Géogr . Marit. Col. 1949, 351 p.
- AUDRY (P.), 1967. "Observations sur le régime hydrique comparé d'un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sous savane et sous culture (arachide et pénicillaire)". Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive, 19-25.11.67. Communication n° 129, tome II, : 1591-1614.
- AUDRY(P.), COMBEAU (A.), HUMBEL (F.X.), ROOSE (E.), VIZIER (J.F.), 1973. Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Définition, méthodologie, techniques, limitations actuelles, quelques voies de recherche possibles (suite). In: "Bulletin de groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols, n° 2, juillet 1973.
- AUDRY (P.), 1978. Modélisation du régime hydrique d'un sol tropical drainé. Application à un sol ferrallitique du Tchad étudié sous savane boisée._ORSTOM, Paris, 111 p., inédit.
- AUSSENAC (G.), 1970. Aperçu du rôle de la forêt dans l'économie de l'eau. Revue Forest. Française (Nancy), 22, 6, : 603-618.
- AVENARD (J.M.), ROOSE (E.J.), 1972. Quelques aspects de la dynamique actuelle sur versants en Côte d'Ivoire: ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé, 25 p. (Communication présentée au 22 en Congrès International de Géographie, Canada, Août 1972.)
- BACHELIER (G.), 1963 . "La vie animale dans les sols".-ORSTOM, Paris, série "Initiation, documentations techniques", n° 3, 279 p.
- BACHELIER (G.), 1973. Faune des sols et termites. In "Les sols ferrallitiques: IV - La matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques. ORSTOM, Paris,: 107-146. (Initiations, Documentations techniques n° 21).
- BAILLY (C.), BENOIT DE COIGNAC (G.), MALVOS (C.), NINGRE (J.M.), SARRAILH (J.M.), 1974. Etude de l'influence du couvert naturel et de ses modifications à Madagascar. Expérimentations en bassins versants élémentaires.—In : "Cahiers Scientifiques", Oct. 1974, n° 4, 114 p.
- BALLIF (J.J.), DURAND (L.), DUTIL (P.), MULLER (J.), 1975. Résultats des études en cases lysimétriques, campagnes 1973 à 1975
 à la station de Châlons-sur-Marne. INRA, trav. sc. du Sol, station
 de Châlons-sur-Marne, Public. n° 37, 68 p.
- BARTOLI (F.), SOUCHIER (B.), 1978. Cycle et rôle du silicium d'origine végétale dans les écosystèmes forestiers tempérés.—Ann. Sci. Forest. 35, 3, : 187-202.

- BARTHOLOMEW (W.V.), MEYER (J.), LAUDELOUT (H.), 1953. Mineral nutrient immobilisation under forest and grass fallow in the Yangambi (Belgian Congo) region. Publ. Inéac. sér. sc., 57, 27 p.
- BASTISSE (E.), 1951. Etudes lysimétriques appliquées à l'agronomie. Ann. Agron., 21 : 727-781.
- BEAUDOU (A.G.), CHATELIN (Y.), 1974. Les mouvements d'argile dans certains sols ferrallitiques centrafricains.-C.R. 10ème Congrès Sci. Sol. Moscou 1974, t. 7, : 247-255.
- BEIRNAERT (), 1941. La technique culturale sous l'Equateur...
 Publ. INEAC, Sér. Techn. 86 p.
- BELOUSOVA (N.I.), 1974. Role of the migration of water-soluble substances in the formation of podzolic Al-Fe-humic soil (based on lysimeter data).—Pochvovedeniye 12, : 55-69 (Soviet Soil Sci., 6: 694-708).
- BELOUSOVA (N.I.), 1979. Lysimetric studies in the Targa zone, Genetical interpretation. In "Colloque Intern. Nancy", Sept. 1979, "Migrations organo-minérales dans les sols tempérés", résumé: 1.
- BENNET (H.H.), 1939. "Elements of soil conservation".
 2nd ed. New-York, Mac Graw-Hill.
- BENNET (H.H.), BELL (F.G.), ROBINSON (B.D.), 1951. Raindrops and Erosion. Circular 895, U.S. D.A.
- BERLIER (Y.), DABIN (B.), LENEUF (N.), 1956. Comparaison physique, chimique et microbiologique entre les sols de forêt et de savane sur les sables tertiaires de la Basse Côte d'Ivoire. Congr. Sci. Sol. Paris, 6, : 499-502.
- BERNHARD (F.), 1970. Etude de la litière et de sa contribution au cycle des éléments minéraux en forêt ombrophile de Côte d'Ivoire. Oecol. Plant., Gauthier-Villars, : 247-266.
- BERNHARD-REVERSAT (F.), 1975. Recherches sur les cycles biogéochimiques des éléments minéraux majeurs en milieu forestier sub-équatorial (Côte d'Ivoire). ORSTOM, Paris, 108 p., Thèse Doct. Sciences Nat. d'Orsay, Université de Paris-Sud.
- BERTHELIN (J.), SOUCHIER (B.), TOUTAIN (F.), 1979. Intervention des phénomènes biologiques dans l'altération. Science du Sol, 2-3, : 175-187.
- BERTHOIS (L.), 1964. Etude comparative du lessivage des cations dans les zones tropicales et tempérées.-Rev. Gén. Sciences Pures et Appliquées, 71, 5-6, : 143-149.
- BERTRAND (R.), 1967. "Etude de l'érosion hydrique et de la conservation des eaux et du sol en pays Baoulé". Coll. sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive 19-25.11.67, n° 106,: 1281-1295.
- BIROT (P.), 1971. Géographie physique générale de la zone intertropicale...C.D.U. Les Cours de Sorbonne, Paris, 280 p.

- BIROT (P.), 1978. Evolution des conceptions sur la genèse des insel- bergs.-Z. Geomorph. N.F., suppl. Bd 31.: 42-63.
- BIROT (Y.), GALABERT (I.), 1967. "L'amélioration des rendements en agriculture par aménagements anti-érosifs et techniques culturales visant à la conservation de l'eau et du sol dans l'Ador Doutchi Maggia". Premières observations, 1966.—Coll. Fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25.11.67, Comm. n° 109, : 1316-1331.
- BIROT (Y.), GALABERT (I.), 1969-1970. Economie de l'eau et travail du sol dans les plantations de zone sèche. Application à la zone Sahélo-soudanaise. Bois et Forêts des tropiques. I, 127, : 29-44. II, 128, : 23-37, III, 129, : 3-21.
- BIROT (Y.), GALABERT (I.), 1972. Bioclimatologie et dynamique de l'eau dans une plantation d'Eucalyptus. Cah. Scient. du CTFT n° 1, Bois et Forêts des Tropiques, 51 p.
- BLANCANEAUX (Ph.), 1979. Dynamique de sols ferrallitiques sur granito-gneiss en Guyane française. Relation avec l'érosion, le ruissellement et le lessivage oblique.—Rapport ORSTOM, 162 p.
- BLIC (Ph. de), 1976. Le comportement de sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire après défrichement et mise en culture mécanisée : rôle des traits hérités du milieu naturel.—Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 14, 2, : 113-130.
- BLONDEL (D.), 1971. Contribution à l'étude du lessivage de l'azote en sol sableux (dior) au Sénégal.-Agron. Trop., 26, 6-7, : 687-696.
- BLOOMFIELD (C.), 1955. Le déplacement des sesquioxydes et de l'argile dans le sol. Sols Africains, 3, 4, : 488-506.
- BLOT (A.), 1980. L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal.-ORSTOM Paris, sér. Travaux et Documents, à paraître.
- BOCQUIER (G.), 1967. Introduction à quelques problèmes relatifs au lessivage dans les sols ferrugineux tropicaux. Rapport multig. ORSTOM, Réunion annuelle des pédologues, Paris 1967, 9 p.
- BOCQUIER (G.), 1971. Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Paris ORSTOM, 1973, 351 p. Thèse Sc. Nat. Strasbourg, 1971, Mémoire ORSTOM n° 62.)
- BOISSEZON (P. de), 1964. Les sols de savane des plateaux Bateké. Cah. ORSTOM, sér. Pédologie, III, 4, : 291.
- BOISSEZON (P. de), 1973. Les matières organiques des sols ferrallitiques.—In "Les sols ferrallitiques". IV, la matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques. ORSTOM, Paris, Initiation, documentations techniques n° 21, : 9-66.
- BOIS (J.F.), ROOSE (E.), 1978. Quelques réflexions sur les résultats de mesures systématiques d'humidité à la sonde à neutrons dans un sol ferrallitique forestier de Basse Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 15, 4, : 351-363.

- BOLLINE (A.), HANOTIAUX (G.), PISSART (A.), 1978. L'érosion en milieu agricole. Synthèse et conclusion de la journée d'étude de la Société Belge de Pédologie, du 28 Octobre 1977. Pédologie, 28, : 233-245.
- BOLLINE (A.), ROSSEAU (P.), 1978. L'érodibilité des sols de Moyenne et Haute Belgique. Utilisation d'une méthode de calcul du facteur K de l'équation universelle de perte de sol.—Bull. Soc. Géogr. Liège, 14, : 127-140.
- BOLLINE (A.), LAURANT (A.), BOON (W.), 1979. L'érosivité des précipitations à Florennes. Révision de la carte des isohyètes et de la carte d'érosivité de la Belgique. Bull. Soc. Géogr. de Liège, 15, p. 77-99.
- BONFILS (P.), CHARREAU (C.), MARA (), 1963. Etudes lysimétriques au Sénégal. Agron. Trop. 19, 11, : 29-62.
- BONZON (B.), HAINNAUX (G.), RICAUD (J. de), ROOSE (E.), 1974-1976. Evolution des problèmes de lutte antiérosive et des techniques culturales sous ananas. Comptes-rendus de visite des plantations de Ono et Bonoua, inédits.
- BORST (H.L.), WOODBURN (R.), 1940. "Kain simulator studies of the effect of slope on erosion and runoff". U.S. Dept. Agr. SCS-TP 36.
- BORST (H.L.), WOODBURN (R.), 1942. The effect of mulching and methods of cultivation on runoff and erosion from Muskingum Silt Loam.-Agricultural Engineering, 1842, janv., : 19-22.
- BOUGERE (J.), 1976. Recherches sur les paysages soudano-birrimiens de la région de Kaya (Haute-Volta). Thèse Doct. 3ème Cycle, Paris, 84 p.
- BOULET (R.), 1974. Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibre et déséquilibre pédobioclimatique. Mémoire ORSTOM, Paris n° 85, 272 p. (1978), Thèse Doc. Sc. Nat. Strasbourg (1974).
- BOULET (R.), 1975. Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibres dynamiques et bioclimats. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.13,1.
- BOULET (R.), BRUGIERE (J.M.), HUMBEL (F.X.), 1979. Relations entre organisation des sols et dynamique de l'eau en Guyane française septentrionale. Conséquences agronomiques d'une évolution déterminée par un déséquilibre d'origine principalement tectonique. _____ Science du Sol, l, : 3-18.
- BOURGES (J.), FLORET (C.), PONTANIER (R.), 1973. Etude d'une toposéquence type du sud tunisien. Djebel Dissa. (Les sols, bilan hydrique, érosion, végétation). Résultats de la saison 1972-1973. ORSTOM, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 43p.
- BOURGES (J.), FLORET (C.), GIRARD (C.), PONTANIER (R.), 1979. Etude d'un milieu représentatif du sud tunisien (type Segui):
 la citerne Telman.-Rapport de synthèse 1972-77. Ministère Agric.
 Tunisie/ORSTOM, 87 p.

- BOURRIE (G.), 1978. Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré. Application aux granites des Vosges et de la Margeride._Mémoire n° 52, Sciences Géologiques, 17 p.
- BOURRIE (G.), GRIMALDI (C.), 1979. Premiers résultats concernant la composition chimique des solutions issues de sols bruns acides sur granite en climat tempéré océanique. Données naturelles et expérimentales. In "Coll. Intern. Nancy", Sept. 79. Migrations organominérales dans les sols tempérés. Résumé p. 6.
- BOYER (J.), 1970. Essai de synthèse des connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique intertropicale francophone. Paris, ORSTOM, 1970, 175 p.
- BOYER (J.), 1975. Les sols ferrallitiques. Tome X, I : les facteurs physiques de la fertilité.—ORSTOM, 97 p.
- BOYER (J.), 1976. L'aluminium échangeable : incidences agronomiques, évaluation et correction de sa toxicité dans les sols tropicaux.- Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XIV, 4, : 259-269.
- BOYER (J.), 1978. Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales humides et sub-humides. Init. Doc. Techn. n° 35, ORSTOM, Paris, 173 p.
- BOYER (Ph.), 1956. Action des termites constructeurs sur certains sols d'Afrique tropicale. VIème Congrès Sci. Sol. Paris, 1956, 3, 16:35-101.
- BOYER (Ph.), 1958. Sur les matériaux composant la termitière géante de Bellicosi Termes rex._C.R. Acad. Sci., 247 : 488-490.
- BOYER (Ph.), 1958. Influence des remaniements par le termite et l'érosion sur l'évolution pédogénétique de la termitière épigée de Bellicositermes rex.-C.R. Acad. Sci., 247, : 479-482.
- BOYER (Ph.), 1973. Action de certains termites constructeurs sur l'évolution des sols tropicaux.-Annales des Sci. Nat. Zoologie Paris, 12ème série, 15, : 329-498; 17, : 273-446; 17, : 447-504.
- BOYLE (E.A.), EDMOND (J.M.), SHOLKOVITZ (E.R.), 1977. The mechanism of iron removal in estuaries. Geochimica et Cosmochimica Acta, 41,: 1313-1324.
- BRAY (J.R.), GORHAM (E.), 1964. Litter production in forests of the world. Adv. Ecol. Res., 2,: 101-157.
- BRUNE (G.), 1948. Rates of sediment production in midwestern United States._U.S. Soil Cons. Serv. Techn. Publ. 65, 40 p.
- BRUNET-MORET (Y.), 1963. Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale : République de Haute-Volta.-ORSTOM, Comité Inter-Etats d'Etudes Hydrauliques, 23 p.
- BRUNET-MORET (Y.), 1967. Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale : République de Côte d'Ivoire. Rapport ORSTOM, Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques, 20 p.

- BURNELL (R.E.), LARSON (W.E.), 1969. Infiltration as influenced by tillage- induced random roughness and pore-space. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 33, 3, : 449-452.
- CALLEDE (J.), 1974. Bassin versant représentatif de Sarki (République Centrafricaine). Bilan de 5 ans d'observations (1968 à 1972). ORSTOM Paris, 120 p.
- CAMUS (H.), CHAPERON (P.), GIRARD (G.), MOLINIER (M.), 1976. Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture (Côte d'Ivoire: Korhogo, 1962-72).— Travaux et Documents ORSTOM Paris, n° 52, 81 p.
- CESAR (J.), 1971. Comparaison de quelques méthodes d'étude quantitative du système racinaire de la strate herbacée.-Bull. de liaison des chercheurs de Lamto, Nov. 1971, : 19-26.
- CESAR (J.), 1971. Etude quantitative de la strate herbacée de la savane de Lamto (Moyenne Côte d'Ivoire).-Thèse 3ème cycle, Fac. Sci. Paris, 111 p.
- CHABALIER (P.). 1976. Contribution à la connaissance du devenir de l'azote du sol et de l'azote-engrais dans un système sol-plante. Thèse Doct. Ing. Fac. Sci. Abidjan n° 33, 139 p.
- CHAMINADE (R.). Recherches sur la fertilité et la fertilisation des sols en régions tropicales.-Agron. Trop., 27, 9, : 891-904.
- CHARREAU (C.). Pluie et érosion. Rapport, Séminaire de météorologie et climatologie, 12 p.
- CHARREAU (C.) et SEGUY (L.), 1969. Mesure de l'érosion et du ruissellement à Séfa en 1968.-Agron. Trop., 24, 11, : 1055-1097.
- CHARREAU (C.), 1969. Influence des techniques culturales sur le développement du ruissellement et de l'érosion en Casamance. Agron. Trop., 24, 9, : 836-842.
- CHARREAU (C1.), 1970. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest-Africaine et ses incidences agronomiques. II : les facteurs biologiques et leur influence sur le profil cultural et la productivité agricole, Rapport IRAT Sénégal, 2, 108 p.
- CHARREAU (C.), FAUCK (R.), 1970. Mise au point sur l'utilisation agricole des sols de la région de Séfa.-Agron. Trop. 25, 2, : 151-191.
- CHARREAU (C.), NICOU (R.), 1971. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest-Africaine et ses incidences agronomiques.-Agron. Trop. 26, 9,: 903-978 et 11,: 1183-1247.
- CHARREAU (C.), 1972. Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles.-Comm. au Séminaire sur les sols tropicaux, Ibadan, 22-26 Mai 1972, 54 p.
- CHATELIN (Y.), MARTIN (D.), 1972. Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques.-Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. 10, 1, : 25-44.

- CHAUVEL (A.), CHARREAU (C.), 1972. Observations sur l'exportation de l'argile par les eaux de drainage, effectuées sur trois sols tropicaux sablo-argileux reconstitués en cases lysimétriques.—Bull. Ass. Fr. Etude des Sols, 6, : 251-268.
- CHAUVEL (A.), 1977. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées... Travaux et Document de l'ORSTOM, 62, 532 p.
- CHEVALIER (A.), 1950. La décadence des sols et de la végétation en Afrique Occidentale Française et la protection de la nature. Bois et For. Trop., 16, : 335-353.
- CHRISTOI (R.), 1966. Mesure de l'érosion en Haute-Volta. Oléagineux, 21, 8-9, : 531-634.
- CLAISSE (G.), 1972. Solubilisation du quartz en voie d'altération. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 10, 2, : 97-122.
- CLAISSE (G.), 1975. Etude de la solubilisation différentielle du quartz pur en laboratoire.-Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 13, 1, : 61-88.
- COINTEPAS (J.P.), 1956. Premiers résultats des mesures de l'érosion en Moyenne Casamance. Congr. Int. Soc. Sci. Sol. Paris 1956, D, 569-576.
- CLAUDE (J.), FRANCILLON (G.), LOYER (J.Y.), 1976. Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors des crues exceptionnelles de mars 1973.-Minist. Agriculture Tunisie, ORSTOM/Tunisie, 162 p.
- COLLIER (D.), ROBELIN (M.), 1959. Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilocalcaires de Limagne. Résultats de quatre années d'observations lysimétriques. Ann. Agron., 10, 4, : 415-453.
- COLLIER (D.), GACHON (L.), PERIGAUD (S.), 1968. Influence du climat et des cultures sur le drainage de l'eau et des substances chimiques dans le Massif Central.-C.R. Acad. Agric. France 6.11.1968, 1036-1047.
- COLLINET (J.), 1971. Premiers résultats de l'exploitation d'une parcelle de lessivage oblique dans la région de Libreville (Gabon). ORSTOM, Libreville, 15 p.
- COLLINET (J.), LAFFORGUE (A.), 1979. Mesures de ruissellement et d'érrosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. ORSTOM Abidjan, 129 p. multigr.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques.—ORSTOM Abidjan, 40 p.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. 2ème partie, ORSTOM Abidjan, 40p.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.) et al., 1980. Etude LAT/03 : ruissellement, infiltration et érosion en zones sahéliennes et subdésertiques. Rapport de terrain sur la première opération : la Mare d'Oursi.-ORSTOM-DGRST, Adiopodoumé, 14 p.

- COLOMBANI (J.), 1967. Premiers résultats des mesures de qualité des eaux au Togo et au Dahomey. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 4, 2:3-25.
- COLOMBANI (J.), 1977. Les apports telluriques naturels dissous de la Medjerda à la Méditerranée. Direction des Ressources en Eaux et Sols de Tunisie. ORSTOM, 16 p.
- COLOMBANI (J.), VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), 1980.—Bilan hydrique dans le Sud Tunisien. Caractérisation expérimentale des transports dans la zone non saturée.—Journ. of Hydrology, sous presse.
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.), 1962. Erosion et stabilité structurale du sol.-Publ. Ass. Int. Hydr. Sc., 59.
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.), 1964. Observations sur les relations entre stabilité structurale et matière organique dans quelques sols d'Afrique Centrale. Cah. Pédo. ORSTOM, 11, 1, : 3-11.
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.), VERDIER (J.), 1963. Observation sur les variations dans les temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. Cahiers ORSTOM, Pédologie, 3, : 17-26.
- COMITE AMENAGEMENT RURAL DE LA CANCHE ET DE L'AUTHIE, 1979. Etude sur l'érosion des terres agricoles dans le Val de Canche.
 1: inventaire communal des phénomènes érosifs. 2: mesures qualitatives et quantitatives permettant d'apprécier les causes et les conséquences du ruissellement. 3: le sous-solage et les engrais verts, moyens de lutte contre l'érosion. 4: érosion et machinisme. SRAE Nord-Pas-de-Calais, Atelier Aménagement rural, Inst. Nat. Agron. Paris, 16 + 36 + 28 + 49 p.
- COMMISSION DE PEDOLOGIE ET DE CARTOGRAPHIE DES SOLS (CPCS). 1967. Classification des sols.—Edition 1967, 87 p.
- COPPENET (M.), 1969. Résultats de douze années d'observations lysimétriques à Quimper (1954-1965). Ann. Agron., 20, 2, : 111-144.
- CROZAT (G.), 1978. L'aérosol atmosphérique en milieu naturel. Etude des différentes sources de potassium en Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire).-Thèse Univ. Toulouse, n° 844, 70 p.
- C.T.F.T., 1974. Rapport annuel 1973, Haute-Volta.-Rapport CTFT/H.V. Ouagadougou, 56 p.
- DABIN (B.), 1956. Sols de la forêt de Brabodougou.-In:"les sols de la région schisteuse de Hiré-Oumé, inédit IDERT.
- DABIN (B.), LENEUF (N.), 1958. Etude de l'érosion et du ruissellement en basse Côte d'Ivoire, mai 1956-1958. ORSTOM Abidjan, 20 p.
- DABIN (B.), 1963. Appréciation des besoins en phosphore dans les sols tropicaux. Les formes du phosphore dans les sols de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 1, : 27-42.
- DABIN (B.), 1976. Méthode d'extraction et de fractionnement des matières humiques du sol. Application à quelques études pédologiques et agronomiques dans les sols tropicaux.-Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. XIV, 4, : 287-297.
- DEMOLON (A.), BASTISSE (E.), 1936, 1946. Etudes lysimétriques appliquées à l'Agronomie. Comptes rendus, 203 : 736 (1936) ; 223 : 155 (1946).

- DAGG (M.), BLACKIE (J.R.), 1945. Studies of the effects of changes in land use on the hydrological cycle in East Africa by means of experimental catchment areas.-Bull. I.A.S.H. 10, 4,: 63-75.
- DEAT (M.), 1975. Le redressement de la fertilité sur des terres à vocation cotonnière présentant des carences en éléments majeurs. Coton et Fibres Tropicales, 30, 2, : 245-262.
- DE CONINCK (F.), 1979. Application des phénomènes de surface au processus de podzolisation. Colloque "migrations organo-minérales dans les sols tempérés". Nancy, Sept. 79.
- DEGALLIER (R.), 1975. Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes souterraines. Application aux données provenant du bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire).—B.R.G.M. 75 SGN 383 AME, 231 p.
- DEJOU (J.), MORIZET (J.), 1977. Etude comparative de la dynamique du drainage et de la composition des eaux de percolation dans les sols granitiques et basaltiques du Massif Central. Résultats de 15 ans d'observation en case de végétation dans les conditions climatiques du bassin Limagnais.- Ann. Agron. 28, 4, : 335-359.
- DELECOUR (F.), HANOTIAUX (G.), 1972. Aspects de la dynamique des éléments nutritifs dans les sols bruns acides de l'Ardenne belge. In Coll. "migrations organo-minérales dans les sols tempérés", Nancy, Sept. 79.
- DELHUMEAU (M.), 1979. Mesure des réserves en eau du sol avec une sonde à neutrons. Relations pluies stocks d'eau au cours de quatre années sur le bassin versant de l'oued Sidi Ben Nasseur (Tunisie). ORSTOM, Tunis, 7 p.
- DELVIGNE (J.), 1965. Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. (Mém. ORSTOM n° 13), Dunod, Paris, 178 p.
- DELWAULLE(J.C.), 1973. Résultats de six années d'observations sur l'érosion au Niger.-Bois et Forêts des Tropiques, 150, : 15-37.
- DELWAULLE(J.C.), 1973. Désertification de l'Afrique au Sud du Sahara. Rev. Bois et Forêts des Tropiques, 149. In "Contribution à l'étude de la désertification de l'Afrique Tropicale sèche", : 51-68.
- DEHOLON (A.), BASTISSE (E.), 1936, 1946. Comptes-rendus, 203: 736 (1936), 223, : 115 (1946).
- DE PLOEY (J.), 1964. Nappes de gravats et couvertures argilo-sableuses au Bas-Congo; leur genèse et l'action des termites.-In "Etudes sur les termites africains". Colloque int. 1964. Université dè Lovanium (Léopoldville), Ed. par A. Bouillon, Ed. de l'Univ. Léopoldville, : 399-414.
- DOMMERGUES (Y.), 1963. Les cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. Rev. Bois et Forêts des Tropiques, 87, : 9-25.

- DOMMERGUES (Y.), 1966. Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche. Thèse Fac. Sci. Paris, Série A n° 3888, n° 4739. Ann. Agron. 13, 4,: 265-324. Suite 13, 5,: 379-469.
- DRESCH (J.), 1966. Les paysages tropicaux humides. Géographie Géné. Encyclop. "La Pléïade", Paris, : 609-711.
- DUBREUIL (P.), 1960. Etudes hydrologiques de petits bassins versants en Côte d'Ivoire. II : rapport général sur la zone de savane. ORSTOM Paris, 141 p.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1960. "Précis de Pédologie". Ed. Masson, Paris, 438 p.
- DUCHAUFOUR (P.), LELONG (F.), 1967.- Entraînement ou destruction d'argile dans les horizons éluviaux des sols lessivés. C.R. Acad. Sci. Paris, 264, : 2884-87.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1968. L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils.-Masson et Cie, Paris, 94 p.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1977. Pédologie 1. Pédogenèse et classification. -Masson Edt. Paris, 477 p.
- DULEY (F.L.), HAYS (O.E.), 1932. The effect of the degree of slope on runoff and soil erosion.-J. Agr. Res., 45, : 349-360.
- DUMAS (J.), 1965. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 3, 4, : 307-333.
- DUNNE (T.), 1979. Sediment yield and land use in tropical catchments.~ Journal of Hydrology 42, : 280-300.
- DUPRIEZ (H.), 1980. Paysans d'Afrique noire.-Terres et Vie, 256 p.
- DURAND (R.), 1978. La pédogenèse en milieu crayeux dans le Nord-Est de la France.-Thèse Doct. d'Etat, Univ. Strasbourg, 176 p.
- DUTIL (P.), BALLIF (J.L.), MULLER (J.), 1973. Premiers résultats des observations effectuées en case lysimétrique.-Travaux station agron. Châlons n° 17.
- DUTIL (P.), DURAND (R.), 1974. Acquisition des caractères chimiques de l'eau en milieu calcaire: passage du sol à la nappe de craie en Champagne. X Congrès Int. Ass. Int. des hydrogéologues.
- ELDIN (M.), DAUDET (A.), 1967. Notice des cartes climatologiques de Côte d'Ivoire. 1 : déficits hydriques cumulés et durée de la saison sèche. 2 : données pluviométriques. In "1'Atlas de Côte d'Ivoire.
- ELDIN (M.), 1971. Le climat. In "Le milieu naturel de la Côte d'I-voire". Mémoire ORSTOM Paris n° 50, 391 p.: 77-108.
- ELLISON (W.D.), 1944. Studies of raindrop erosion . Ag. Eng. 25,: 131-181.

- ELLISON (W.D.), 1945. Some effects of raindrops and surface flow on soil erosion and infiltration. Trans. Am. Géophys. Union., 26, : 415-429.
- ELLISON (W.D.), 1948. Soil erosion.-Soil Sci. Am. Soc. Proc. 12, : 479-484.
- ELLISON (W.D.), 1952. Raindrop energy and soil erosion. Emp. J. Exp. Agric., 20, : 81-86.
- EL-SWAIFY (S.A.), 1975. Susceptibilities of certain tropical soils to erosion by water.—I.I.T.A. Ibadan, 12 p. Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides, Ibadan.
- ELWELL (H.A.), STOCKING (M.A.), 1975. Parameters for estimating annual runoff and soil loss from agricultural lands in Rhodesia. Water ressources research, II, 4,: 601-605.
- ELWELL (H.A.), STOCKING (M.A.), 1976. Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia.-Geoderma, 15, : 61-70.
- ERHART (H.), 1955. Biostasie et Rhexistasie. Esquisse d'une théorie sur le rôle de la pédogenèse en tant que phénomène géologique. C.R. Acad. Sci. Paris, 241, : 1218-1220.
- ERHARD (H.), 1956. La genèse des sols en tant que facteur géologique.-Masson et Cie, Paris, 90 p.
- ESCHENBRENNER (V.), BADARELLO (G.), 1975. Notice explicative de la carte des paysages morpho-pédologiques. Feuille Odienne à 1/200.000. ORSTOM Abidjan, 95 p. multigr.
- F.A.O., 1967. La défense des terres cultivées contre l'érosion hydrique.-Collection "Progrès et mise en valeur, Agriculture", 81, Rome, 202 p.
- F.A.O., 1974. Shifting cultivation and soil conservation in Africa. FAO/SIDA/ARCN Seminar, Ibadan, Juil. 73, in "Soils Bulletin, 24, Rome, 248 p..
- FAUCK (R.), 1956. L'étude de l'évolution des sols sous culture mécanisée et le problème des prélèvements de terre. A.F.E.S., 73, : 388-391.
- FAUCK (R.), 1956. Erosion et mécanisation agricole.-Bureau des sols en Afrique Occidentale Française, 24 p.
- FAUCK (R.), 1964. Les sols rouges faiblement ferrallitiques d'Afrique Occidentale. Comm. 8ème Congrès Int. Sci. Sol. Bucarest, 5, 62, : 547-557.
- FAUCK (R.), MOUREAUX (C1.), THOMANN (Ch.), 1969. Bilans de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. Agron. Trop. 24, 3, : 263-301.
- FAUCK (R.), 1970. Evolution des quartz dans les sols rouges ferrallitiques développés sur les roches sableuses et gréseuses de l'Afrique Occidentale. In C.R. Acad. Sc. Paris, 271, : 2273-2276.

- FAUCK (R.), 1972. Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale. Mémoire ORSTOM Paris, 61, 257 p.
- FAUCK (R.), 1974. Les facteurs et les mécanismes de la pédogenèse dans les sols rouges et jaunes ferrallitiques sur sables et grès en Afrique. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 12, 1, : 69-72.
- FEDOROFF (N.), 1974. Les transferts de particules solides dans les sols sur granites.-C.R. 10ème Congrès Soc. Int. Sc. Sol, Moscou 1974, 6, : 219-224.
- FEODOROFF (A.), 1965. Mécanismes de l'érosion par la pluie.-Revue Géogr. Phys. Géol. Dyn., 7, 2, : 149-163.
- FOSTER (G.), 1977. Soil erosion: prediction and control. Proceedings of a Nat. Conf. on Soil Erosion Purdue, May 1976. Soil Conservation Society of America. Special publication 21.
- FOURNIER (F.), 1949. Les facteurs climatiques de l'érosion du sol.-Assoc. Geogr. Française Bull. 203, : 97-103.
- FOURNIER (F.), 1954. La parcelle expérimentale. Méthode d'étude expérimentale de la conservation du sol, de l'érosion et du ruissellement.-Extrait du rapport de la mission O.E.C.E. "Etude des sols" aux Etats-Unis (T.A. 38-63), ORSTOM, Bondy.
- FOURNIER (F.), 1960. Climat et érosion.-Presses Universitaires de France, Paris, 201.
- FOURNIER (F.), 1962. Carte du danger d'érosion en Afrique au Sud du Sahara fondée sur l'agressivité climatique et la topographie. Notice explicative.-CEE-CCTA, Paris, 11 p.
- FOURNIER (F.), 1967. La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain.- Sols africains, 12, 1, : 5-53.
- FOURNIER (F.), 1969. Transports solides effectués par les cours d'eau. Résultats au 1.8.1967 de l'enquête sur les données acquises avant la Décennie Hydrologique Internationale.-AIHS, 14, 3, : 7-49.
- FRANQUIN (P.), FOREST (F.), 1977. Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique.—Agron. Trop. 32, 1, : 7-11.
- FREE (G.R.), 1952. Soil movement by raindrops.—Agricultural Engineering, 33, 8,: 491-494.
- FRITZ (B.), TARDY (Y.), 1973. Etude thermodynamique du système gibbsite-quartz-kaolinite-CO₂. Sciences Géol. Strasbourg. Bull. 26, 4, : 339-367.
- GADET (R.), SOUBIES (L.), 1962. Le bilan de l'azote dans les sols. Expérimentation de longue durée en cases lysimétriques et utilisation de l'isotope stable de l'azote 15.-C.R. Acad. Agri.: 145-153.

- GADET (R.), SOUBIES (L.), 1963. Bilan apparent et bilan réel de l'azote minéral appliqué au sol, mesuré en cases lysimétriques avec utilisation de l'azote 15. FAO/IAEA Techn. Meeting, Brunswick 297-305.
- GADET (R.), SOUBIES (L.), 1972. Bilan apparent et bilan réel (mesuré par 15_N) de l'azote minéral des engrais appliqués au sol.-Toulouse Société commerciale des potasses et de l'azote, 19 p.
- GALABERT (J.), MILLOGO (E.), 1973. Indice d'érosion par la pluie en Haute-Volta. CTFT, Ministère de l'Agriculture, Ouagadougou, 57 p.
- GARCZYNSKI (F.), 1978. Effets comparés des couverts végétaux sur la qualité, la quantité et la régularité des écoulements sur les versants et dans les cours d'eau. In XV Journées de l'Hydraulique, Toulouse Sept. 1978, question 5, rapport 4, 6 p.
- GARCZINSKI (F.), 1980. Influence du taux de boisement sur le régime hydrologique dans trois régions des USA (corrélations multiples). In "Intern. Symposium of the influence of man on the hydrological regime". UNESCO IAHS Helsinski, Juin 1980, 14 p.
- GARDNER (L.L.), 1970. A chemical model for the origin of gibbsite from kaolinite.—Amer. Mineral., 55: 1380-1389.
- GARDNER (W.R.), 1975. Water entry and movement in relation to erosion. I.I.T.A. Ibadan, 10 p. Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides, Ibadan, Juin-Juil. 1975.
- GARRELS (R.M., CHRIST (C.L.), 1965. Solutions, minerals and equilibria.—Harper and Row, New-York, 450 p.
- GAUDET (J.P.), 1979. Le transfert dans les sols du vecteur des substances organo-minérales : l'eau.-In "Coll. Intern. Nancy Sept. 79. Migrations organo-minérales dans les sols termpérés.
- GERDAT , 1975. Intensification de l'agrosystème en cultures assolées dans le centre de la Côte d'Ivoire. Bilan des résultats de la recherche. Rapport Gerdat (IEMVT-IRAT-IRCT), 55 p.
- GIRARD (G.), SIRCOULON (J.), TOUCHEBEUF (P.), 1971. Aperçu sur les régimes hydrologiques.-In "Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire". ORSTOM Paris, mémoire n° 50, : 113-160.
- GLEASON (C.H.), 1957. Reconnaissance methods of measuring erosion.—
 J. of Soil and Water Cons. 12, 3, : 105-107.
- GODEFROY (J.), MULLER (M.), ROOSE (E.), 1970. Estimation des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de Basse Côte d'Ivoire. Fruits, 25, 6, : 403-423.
- GODEFROY (J.), 1974. Evolution de la matière organique du sol sous culture de bananier et de l'ananas. Relation avec la structure et la capacité d'échange cationique. Thèse Doct. Ing. Nancy I, CNRS AO 9296, 166 p.

- GODEFROY (J.), ROOSE (E.J.), MULLER (M.), (1975). Estimation des pertes par les eaux de ruissellement et de drainage des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie du Sud de la Côte d'Ivoire. Fruits, 30, 4: 223-235.

 GOMBEER (R.), HOORE (J. d'), 1971. Induced migration of clay and
- GOMBEER (R.), HOORE (J. d'), 1971. Induced migration of clay and other moderately mobile soil constituents. III: Critical soil/water dispersio ratio, colloid stability and electrophoretic mobility. Pédologie, 21, 3, : 311-342.
- GOUJON (P.), 1968. Conservation des sols en Afrique et à Madagascar. lère partie : les facteurs de l'érosion et l'équation universelle de Wischmeier. Bois et Forêts des Tropiques, 118 : 3-17.
- GOUJON (P., BAILLY (C.), VERGNETTE (de), BENOIT DE COIGNAC (G.), ROCHE (P.), 1968. Influence du couvert végétal sur le ruissellement et les pertes en terre. Résultats obtenus à Madagascar (2ème partie).—Bois et Forêts des Tropiques, 119, 3,: 17-26.
- GOUJON (P.), 1972. Essai de défense contre l'érosion sur les hautsplateaux malgaches. L'aménagement-test de Manankazo. Journées d'Etude de la lère Session de Commission Intern. du Génie Rural : Florence, Sept. 72, 16 p.
- GOUJON (P.), BAILLY (C.), 1974. Aménagements antiérosifs et économie de l'eau.-Communication aux XIII Journées de l'Hydraulique : Paris Octobre 74, 7 p.
- GOUZY (M.), 1973. Méthodes d'analyses utilisées dans le Laboratoire Central d'Analyse du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé.-ORSTOM, Abidjan.
- GRAS (F.), 1975. Les sols très calcaires du Liban Sud : évolution et mise en valeur. Thèse Doct. Ing. Univ. Strasbourg, 191 p.
- GRASSE (P.P.), NOIROT (Ch.), 1959. Rapports des termites avec les sols tropicaux.-Rev. Géomorphol. Dynam. 10, 1-2 et 3-4, : 35-40.
- GREENLAND (D.J.), KOWAL (J.M.L.), 1960. Nutrient content of the moist tropical forest of Ghana.—Plant and Soil, 12, 2,: 154-174.
- GREENLAND (D.J.), 1965. Interaction between clays and organic compounds in soils. II: adsorption of soil organic compounds and its effect on soil properties.—Soils and fertilizers, 28, 6,: 521-532.
- GREER (J.D.), 1971. Effect of excessive rate rainstorm on erosion.J. Soil and Water Cons. 26, 5, : 196-197.
- GUILLAUMET (J.L.), 1968. "La végétation de Côte d'Ivoire".-ORSTOM Abidjan, 116 p.
- GUILLET (B.), VEDY (J.C.), ROUILLER (J.), SOUCHIER (B.), 1978. Migration de particules argileuses dans les milieux de géochimie organique très acide : exemple des podzols sur colluvium de grès vosgien.—Sciences Géol. Sous presse. Centre Pédologie Biologique Vandoeuvre, 10 p.
- GUILLET (B.), ROUILLER (J.), VEDY (J.C.), 1979. Dispersion et migration de minéraux argileux dans les podzols. Composition des composés organiques associés. Leur rôle sur les formes et l'état de l'aluminium. Résumé des publications p. 8-10.-Coll. Intern. Nancy "migrations organo-minérales dans les sols tempérés", Sept.79.

- GUILLET (B.), SOUCHIER (B.), 1979. Les oxyhydroxydes amorphes et cristallins dans les sols (fer, aluminium, manganèse, silicium).- 2,:16-37, in "Pédologie 2: constituants et propriétés des sols" de M. Bouneau et B. Souchier, Edit. Masson, 495 p.
- HAIDER (K.), MARTIN (J.P.), 1979. Biochimie de la formation des substances humiques et ses interactions avec les minéraux argileux. Colloque "Migrations organo-minérales dans les sols tempérés, Nancy, Sept. 1979.
- HALLWORTH (E.G.), 1963. An examination of some factors affecting the movement of clay in an artificial soil.-J. Soil Sci., 14,: 360-371.
- HANSEN (E.E.), HARRIS (A.R.), 1975. Validity of soil-water samples collected with porous ceramic cups.—SSSAP, 39, : 528-536.
- HARRASSOWITZ (H.), 1926. Laterit.-Fortschr. Geol. Pal. 4, p. 253-565.
- HARROLD (L.L.), DREIBELBIS (F.R.), 1958. Evaluation of agricultural hydrology by monolith lysimeters: 1944-1955.—USDA and Ohio Agric. Expt. Station, Technical Bulletin, 1179, 166 p.
- HARROLD (L.L.), DREIBELBIS (F.R.), 1967. Evaluation of agricultural hydrology by monolith lysimeters: 1956-1962.—USDA and Ohio Agric. Research and Dev. Center. Technical Bulletin, 1367, 124 p.
- HARROY (J.P.), 1944. "Afrique, Terre qui meurt. La dégradation des sols africains sous l'influence de la colonisation".-Bruxelles, M. Hayez, p. 557.
- HAYLETT (D.U.), 1960. Etudes sur le ruissellement et l'érosion du sol à Prétoria.-South Afric. Journal of Agr. Sci., 3, 3, : 379-394.
- HEBERT (J.), GRAFFIN (Ph.), 1971. Essai d'estimation de l'influence des engrais et des rejets agricoles sur l'entrophisation. Rapport INRA, 29 p.
- HENIN (S.), 1956. "Le mécanisme de l'érosion par l'eau".-Bull. Tech. Information. Ing. du service agricole, n° 50-51.
- HEUSCH (B.), 1969. "L'érosion dans le bassin du Sebou : une approche quantitative".-Revue Géogr. du Maroc, 15, : 109-128.
- HEUSCH (B.), 1970. L'érosion hydraulique au Maroc : son calcul et son contrôle. Rapport Dir. Eaux et Forêts du Maroc, 16 p.
- HEUSCH (B.), 1970. L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental.—In : Annales de la Recherche Forestière au Maroc, numéro spécial, études sur l'érosion, Rabat, 12, : 9-176.
- HEUSCH (B.), 1971. Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique.-Soc. Sci. Nat. Phys. Maroc, C.R., 37, : 41-54.
- HEUSCH (B.), MILLIES-LACROIX (A.), 1971. Une méthode pour estimer 1'écoulement et 1'érosion dans un bassin. Application au Maghreb.-Mines et Géologie, 33, Rabat, : 21-38.

- HEUSCH (B.), 1975. La conservation des eaux et des sols dans la haute vallée de Keita.-Sogreah Grenoble/Niger Minist. économie rurale 24 p.
- HIBBERT (A.R.), 1965. Forest treatment effects on water yield.-Symposium internat. sur l'hydrologie forestière. Pensylvanie, USA, p. 527.
- HJULSTRÖM (J.), 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris.-Alquist et Wiksells Eds. Uppsala, 520 p.
- HOORE (J. d'), 1954. L'accumulation des sesquioxydes libres dans les sols tropicaux.-Publ. Inéac sér. sci. n° 62, 132 p. Bruxelles.
- HOORE (J. d'), 1970. Induced migration of clay and other moderately mobile soil constituents. I: general introduction. II: natural clay fractionation. In: Pédologie, Ghent, 1970, 20, 1,: 51-61.
- HUDSON (N.W.), 1957. Erosion control research. Progress Report on Experiments at Henderson research station: 1953-56.—Rhodesia Agric. Journ., 54, 4,: 297-323.
- HUDSON (N.W.), 1957. Engineering problems in overseas agriculture. II: agriculture engineering in Rhodesia.—Journal of agricultural engineering research, 2, 3, : 235-237.
- HUDSON (N.W.), 1957. Soil erosion and tobacco growing.-Rhodesian agricultural Journal, 54, 6, : 547-555.
- HUDSON (N.W.), 1961. An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of sub-tropical rainfall.—Proceedings and transactions of the Rhodesia scientific association. XLIX, 1,: 15-25.
- HUDSON (N.W.), 1963. Rainfall intensity and erosivity.—Advisory Notes. Dept. of Cons. & Ext. Rhodesia, 5 p.
- HUDSON (N.W.), 1964. Field measurements of accelerated soil erosion in localized areas.—Rhodesian Agricultural Journal, 2249, : 3.
- HUDSON (N.W.), 1973. Soil conservation.-B.T. Batsford Ltd. London, 320 p.
- HUMBEL (F.X.), 1964. "Etude de quelques dépressions circulaires à la surface d'un plateau sédimentaire de Côte d'Ivoire". Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 2, 3, : 27-42.
- HUMBEL (F.X.), 1970. Etude de la densité apparente mesurée in situ dans quelques sols du Cameroun.-Yaoundé, ORSTOM, 49 p.
- HUMBEL (F.X.), 1974. La compacité de sols ferrallitiques du Cameroun : une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessication saisonnière.—Cah. ORSTOM, sér. Pédol. XII, 1: 73-101.
- HUMBEL (F.X.), 1975. Etude de la macroporosité des sols par des tests de perméabilité. Application d'un modèle de filtration aux sols ferrallitiques du Cameroun.-Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 13, 2, : 93-117.

- HUMBEL (F.X.), 1976. L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun.-ORSTOM, Paris, 310 p.
- HUTTEL (Ch.), 1971. Estimation du bilan hydrique dans une forêt sempervirente de Basse Côte d'Ivoire.-AIEA-IAEA/SM 151/46. Symposium on the use of isotopes and radiation in research on soil-plant relationships including applications in forestry, Vienne, Déc. 71, 12 p.
- HUTTEL (C.), 1975. Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de Basse Côte d'Ivoire. IV : estimation du bilan hydrique.—
 In "La terre et la vie", revue d'écologie appliquée, 29, : 192-202.
- HUTTEL (C.), BERNHARD-REVERSAT (F.), 1975. Recherche sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de Basse Côte d'Ivoire. V : biomasse végétale et productivité primaire. Cycle de la matière organique. Rev. Ecol. Appl., 29, : 203-228.
- TBIZA (D.), 1976. Bilan hydrique sous prairies naturelles et artificielles. Bassins versants expérimentaux d'Ambatomainty. Campagne 1974-75: effet de la mise en valeur.—Rapport ORSTOM/CTFT/IRAM/IEMVT. Tananarive, 47 p.
- IMESON (A.C.), KWAAD (F.J.), 1976. Some effects of burrowing animals on slope processes in the Luxembourg Ardennes. Part 1: the excavation of animal mounds in experimental plots. Part 2: the erosion of animal mounds by splash under forest.-Geografiska Annaler, 58, Sér. A, 1-2, : 115-125; 4, : 317-328.
- I.R.A.T. (Haute-Volta), 1970. Fertilisation des céréales de culture sèche. Rapport 1968-69.—IRAT, Ouagadougou, 106 p.
- IRHO (Côte d'Ivoire), 1962. L'IRHO, 1942-1962. Vingt ans d'activité. Oléagineux, 17, 4,: 275-314.
- JADIN (P.), 1972. Etude de la fertilisation minérale des cacaoyers en Côte d'Ivoire à partir du diagnostic "Sol".-Café, Cacao, Thé, 16, 3, : 204-218.
- JENNY (F.), 1965. Sols et problèmes de fertilité en Haute-Volta. -- Agronomie Trop., 2, 1965, : 220-247.
- JORDAN (C.F.), 1968. A simple tension-free lysimeter.-Soil Sci. (Baltimore), 105, 2, : 81-86.
- JOSENS (G.), 1972. Etudes biologique et écologique des termites (Isoptera) de la savane de Lamto-Pakobo (Côte d'Ivoire).-Thèse Fac. de Sciences, Université Libre de Bruxelles, 262 p.
- JOSENS (G.), 1974. Les termites de la savane de Lamto.-In "Analyse d'un écosystème tropical humide : la savane de Lamto (Côte d'I-voire)". V : les organismes endogés.-Bulletin de liaison des chercheurs de Lamto, n° spécial, 5, : 91-131.
- JOURDAN (0.), MARINI (P.), VILLEMIN (P.), 1978.— Etude des conditions particulières créées par un lysimètre. Application au type monolithe.—Bulletin G.F.A.L., 5, 14p.

- JURION (F.), HENRY (J.), 1967. De l'agriculture itinérante à l'agriculture intensifiée.-Publ. INEAC, hors série, 498 p.
- KALMAN (R.), 1967. Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou (Maroc).- Projet Sebou, 32 p.
- KALMS (J.M.), 1975. Influence des techniques culturales sur l'érosion et le ruissellement en région centre de Côte d'Ivoire. I.R.A.T., Bouaké, 9 p. (Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides, Ibadan, Juin-Juillet 75).
- KALOGA (B.), 1976. Contribution à l'étude du cuirassement : relations entre les gravillons ferrugineux et leurs matériaux d'emballage. Cah. ORSTOM, sér. Pédologie, XIV, 4, : 299-319.
- KAMPRATH (E.J.), 1972. "Soil acidity and liming".-In: "Soils of the humid tropics", National Acad. of Sciences. Washington D.C.: 136-149.
- KAOURITCHEV (I.), KOMAREVTSEVA (L.), ROMACHKEVITCH (A.), IARTSEVA (A.).—
 Quelques résultats de l'utilisation de la méthode lysimétrique dans
 les recherches sur la pédogenèse de l'époque actuelle.—C.R. Xème
 Congrès Soc. Int. Sci. Sol. Moscou, 6, : 111-117.
- KILIAN (J.), 1974. Etude du milieu physique en vue de son aménagement Conception de travail. Méthode cartographique.-Agron. Trop. 2-3,: 122-363.
- KIRA (T.), 1974. Primary productivity of Pasch forest. A synthesis.IBP. Synthesis Meeting. Kuala-Lumpur, Août 1974.
- KLINGE, (H.), RODRIGUES (W.A.), 1968. Litter production in an area of amazonian terra firme forest. Part II: mineral nutrient content of the litter.-Amazoniana 1,: 303-310.
- KLINGE (H.), 1974. Litter production in tropical ecosystems.—In: I.B.P. Synthesis Meeting, Kualalumpur, Août 1974.
- KOHNKE (H.), DREIBELBIS (F.R.) and DAVIDSON (J.M.), 1940. A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance.—USDA Misc. Publ. 372, Washington D.C.
- KOLLMANNSPERGER (F.), 1956. -
 - 5ème Congrès Int. Sci. du Sol, Paris, 3, 49.
- KOVDA (V.), 1956. Composition minérale des plantes et formation des sols. 6ème Congrès Sci. Sol., Vol. €, p. 201-206.
- KUCHARKA-FORKASIEWICZ (J.), MARGAT (J.). Premiers résultats de l'étude hydrogéologique du bassin de Korhogo.-BRGM-CIEH, 30 p.
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.), 1976. Exemple d'analyse expérimentale des facteurs du ruissellement sous pluies simulées.-Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. 13, 3, : 195-237.
- LAL (R.), 1975. Soil management Systems and erosion control.—IITA, Ibadan, 7 p. (Colloque sur la conservation et l'aménagement du sol dans les tropiques humides. IITA, Ibadan, Juin-Juillet 75.

- LAL (R.), 1975. Role of mulching techniques in tropical soil and water management.-Technical Bull. n° 1, I.I.T.A., Ibadan 38 p.
- LAL (R.), 1976. Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria and their control.-I.T.A. Monograph n° 1, **I**badan, 126 p.
- LAL (R.), 1977. Erosivity in tropical countries. FAO/UNEP consultation on Methodology for assessing soil degradation. Rome, 18-20 Janvier 1977, 12 p.
- LAMOUROUX (M.), LOYER (J.C.), PINTA (M.), BOULEAU (A.), 1978. Expérimentation sur l'entraînement des produits dissous et en
 suspension dans un matériau ferriallitique.-Science du sol. | 55-71
- LAMOUROUX (M.), 1979. Phénomènes de transport de matière dans l'écorce terrestre.-Rapport scientifique ATP n° 1949, ORSTOM/CNRS 45 p.
- LANGBEIN (W.B.), SCHUMM (S.A.), 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. Am. Geophys. Union Trans., 39,: 1076-1084.
- LAUDELOUT (M.), MEYER (S.), 1954. Les cycles d'éléments minéraux en forêt équatoriale congolaise. 5 ème Congrès Int. Sci. Sol. Léopold-ville, 2, : 267-272.
- LAURANT (A.), BOLLINE (A.), 1978. Caractérisation des pluies en Belgique du point de vue de leur intensité et de leur érosivité. Pédologie, 28, : 214-232.
- LAVEE (H.), 1978. Erosion processes over arid limestone slopes.— Communication in "Field experiments in geomorphology". Paris, Octobre 1978.
- LAVELLE (P.), 1974. Les vers de terre de la savane de Lamto.__ Bull. liaison des chercheurs de Lamto n° spécial 1974, 5,: 133-166.
- LAVELLE (P.), 1974. Les vers de terre de la savane de Lamto. Analyse d'un écosystème tropical humide de la savane de Lamto (Côte d'Ivoire. V: les organismes endogés. Bull. liaison des chercheurs de Lamto, n° spécial 1974., p. 133-166.
- LAVELLE (P.), 1975. Consommation annuelle de terre par une population naturelle de vers de terre (Millsonia anomala Omodeo) dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire).-Rev. Ecol. Biol. Sol, 12, 1, 11-24.
- LAWS (J.O.), 1940. Recent studies in raindrops and erosion.-Agricultural Engineering 21: 431-433.
- LE BOURDIEC (P.), 1958. Contribution à l'étude géomorphologique du bassin sédimentaire et des régions littorales de Côte d'Ivoire. Etudes Eburnéennes, 7 : 7-96.
- LE BUANEC (B.), 1972. Dix ans de culture motorisée sur un bassin versant du centre Côte d'Ivoire. Evolution de la fertilité et de la production.-Agron. Trop., 27, 11, : 1191-1211.

- LE BUANNEC, 1973. Difficultés de l'élaboration du "Conseil de fumure" dans les pays en voie de développement d'Afrique de l'Ouest.
 Méthode adoptée par la recherche et la vulgarisation en Côte d'Ivoire.—ADRAO/5/73/15. Communication au Séminaire sur la fertilité
 des sols et l'utilisation des engrais : 22-17 Janv. 1973. —
 IRAT/CI, 12 p.
- LEE (K.E.), 1974. The significance of soil animals in organic matter decomposition and mineral cycling in tropical forest and savanna ecosystems.—C.R. Xème Congrès Int. Sci. sol: Moscou, Août 74, 3, 43-51.
- LELONG (F.), 1966. Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération tropicale. Conséquences pour la pédogenèse. In : Sciences de la Terre, 11, 2, : 201-244.
- LELONG (F.), LEMOINE (I.), 1968. Les nappes phréatiques des arènes et des altérations argileuses ; leur importance en zone intertropicale ; les difficultés de leur exploitation.-In : Bull. BRGM, 2, III, 2,:41-52.
- LELONG (F.), 1969. Nature et genèse des produits d'altération des roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française).- Thèse Fac. Sci. Nancy, Mém. 14, 188 p.
- LELONG (F.), SOUCHIER (B.), 1970. Bilans d'altération dans la séquence de sols vosgiens, sols bruns acides à podzols, sur granite. -- Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., 23, 3-4, : 113-143.
- LELONG (F.), TARDY (Y.), GRANDIN (G.), TRESCASES (J.J.), BOULANGE (B.) 1976. Pedogenesis, chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits. In: Handbook of strate-bound and stratiform ore deposits. Ed. K.H. Wolf, Elsevier, Amsterdam, p. 93-173.
- LELONG (F.), SOUCHIER (B.), 1979. Les bilans d'altération dans les sols : méthodes résultats, perspectives.—Bulletin de l'AFES. Sciences du Sol, 2, 3, : 267-279.
- LENEUF (N.), 1959. L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés.-Thèse Fac. Sci. Paris, 210 p.
- LENOIR (F.), 1971. A propos de la répartition saisonnière des éléments transportés en solution dans un fleuve de la zone intertropicale (Le Bandama : Côte d'Ivoire).-C.R. Acad. Sc. Paris, 273, : 34-36.
- LENOIR (F.), 1972. Exportation chimique d'un bassin intertropical (Le Bandama, Côte d'Ivoire). Influence des conditions hydrologiques.—Thèse Doct. Sc. Nat. Université de Nice, CNRS, n° AO 7845, ORSTOM, 375 p.
- LENOIR (F.), MATHIEU (P.), MONNET (Cl.), 1976. Bilan d'érosion chimique et mécanique sur un bassin versant de Côte d'Ivoire (Bassin du Bandama). 3ème Conf. Géol. Africaine: Khartoum, 3-17 Janvier, 7 p.

- LEPRUN (J.C.), 1979. Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche. Genèse, transformation, dégradation. Thèse Doct. Sc. Nat. Strasbourg, 222 p.
- LEVEQUE (A.), 1975. Pédogenèse sur le socle granitogneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. Thèse Doct. Sciences Nat. Université Strasbourg. N° CNRS: AO 11485
 ORSTOM, Paris, 301 p.
- LEVEQUE (A.), 1978. Les concentrations du fer dans les sols développés sur le socle granito gneissique au Togo.-Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 16, 1, : 3-22.
- LOSSAINT (P.), 1959. Etude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. Thèse Fac. Sci. Strasbourg, 107 p.
- LOVERING (T.S.), 1958. Geological significance of accumulator plants in rock weathering. Sciences, 127, : 1061-1062.
- LOVERING (T.S.), 1959. † Significance of accumulator plants in rock weathering.—Géol. Soc. Am. Bull. 70, : 781-800.
- MAC INTYRE (D.S.), LOVEDAY (J.), 1968. Problems of determination of soil density and moisture properties from natural clods.—Soil Sci., Baltimore, 105, 4,: 232-235.
- MAGDE (D.S.), 1965. Leaf fall and litter disappearance in a tropical forest. Pedobiologia, 5, : 273.
- MAIGNIEN (R.), 1968. Les sols ferrugineux tropicaux. Unités pédologiques.-ORSTOM, Yaoundé, 34 p.
- MAIGNIEN (R.), 1958. Le cuirassement des sols en Guinée, Afrique Occidentale.-Mémoire du Serv. Carte Géol. Als. Lorraine, n° 16, Strasbourg, 239 p.
- MAIGNIEN (R.), 1961. Le passage des sols ferrugineux tropicaux aux sols ferrallitiques dans les régions SW du Sénégal.—Sols Afr. VI, 2-3, : 113-171.
- MALDAGUE (M.), 1959. Analyses de sols et de matériaux de termitières du Congo Belge.-Insectes Sociaux, 6, 4, : 343-359.
- MALDAGUE (M.E.), 1970. Rôle des animaux édaphiques dans la fertilité des sols forestiers.-INEAC, sér. Sci., 112, 245 p.
- MANGENOT (G.), 1955. Etude sur les forêts des plaines et des plateaux de Côte d'Ivoire. Etudes Eburneennes, 4,:5-61.
- MANNERING (J.V.), MEYER (L.D.), JOHNSON (C.B.), 1968. Effect of cropping intensity on erosion and infiltration.—Agronomy Journal 60, March-April,: 206-209.
- MARTIN (G.), 1963. Dégradation de la structure des sols sous culture mécanisée dans la vallée du Niari.-Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 1, 2, : 8-14.
- MARTIN (G.), 1968. Synthèse agropédologique sur les sols de la vallée du Niari. In "Quinze ans de travaux et recherches dans la vallée du Niari", 3, : 53-145.

- MARCHAL (J.), MARTIN-PREVEL (P.), 1971. Les oligo-éléments Cu-Fe-Mn-Zn dans le bananier Fruits, 26, 7, : 483-500.
- MARTIN-PREVEL (P.), TISSEAU (R.), 1962. Les éléments minéraux dans le bananier et dans son régime.-Fruits, 17, 3, : 123-128.
- MASSON (J.H.), 1971. L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen, méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ.-Thèse Doct. Ing. Univ. Languedoc, 213 p.
- MASSON (J.M.), KALMS (J.M.), 1971. Analyse et synthèse des facteurs de l'érosion sur le bassin versant de la Tet à Vinca.-Note 14/71 EDF/Univ. Montpellier, 90 p.
- MATVEEV (A.A.), BRYZGALO (V.A.), 1969. Concentration en certaines matières organiques et en éléments biogènes dans les précipitations atmosphériques, la couverture de neige et les eaux de fonte et de rivières de la zone de haute montagne du Caucase.-Gidrokhim. Mater., SSSR 49, : 115-124.
- MATHIEU (P.), 1971. Erosion et transport solide sur un bassin versant forestier tropical : l'Amitioro en Côte d'Ivoire.-Cah. ORSTOM Sér. Géol., 3, 2, : 115-144.
- MATHIEU (P.), 1972. Apports chimiques par les précipitations atmosphériques en savane et sous-forêt. Influence du milieu forestier intertropical sur la migration des ions et sur les transports solides (Bassin de l'Amitioro, Côte d'Ivoire). Paris, ORSTOM, 441 p. Thèse Doc. Sci. Nat. Fac. Sci. Nice.
- MC GUINNESS (J.L.), HARROLD (L.L.), EDWARDS (W.M.), 1971. Relation of rainfall energy streamflow to sediment yield from small and large watersheds.—J. Soil and Water Cons., 26, 6, : 233-235.
- MERCIER (J.R.), 1978. Energie et Agriculture. Le choix écologique.Debard Ed. Paris, 191 p.
- MES (M.G.), 1954. Excretion (recretion) of phosphorus and other mineral elements by leaves under the influence of rain.-S. Afr. Journ. Sci. 1, : 167-172.
- MEYER (L.), 1943. Experimenteller Beitrag zu Makrobiologischen Wirkungen auf Humus und Bodenbildung.-Z. Pflanzenernähr Düngung Bodenkde 29, : 119-140.
- MEYER (L.D.), 1958. "An investigation of methods for simulating rainfall on standard runoff plots and a study of the drop size, velocity and kinetic energy of selected spray nozzles". Special Report n° 81, Eastern Soil and Water Conservation Research Branch, Agricultural Research Service. US Dep. Agr. Lafayette, Indiana, 43 p.
- MEYER (L.D.), Mc CUNE (D.L.), 1958. Rainfall simulator for runoff plots.-Agricultural Engineering, 39, 10, : 644.
- MEYER (L.D.), 1960. Use of the rainulator for runoff plot research.-Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24, : 319-322.

- MICHEL, (P.), 1975. La dynamique actuelle de la géomorphologie dans le domaine soudanien de l'Ouest Africain : exemples du Mali et du Sénégal Oriental.-In : Geomorphologie dynamique dans les régions intertropicales. Presses Universitaires du Zaïre, p. 1-20.
- MILLOT (G.), FAUCK (R.), 1971. Sur l'origine de la silice des silifications climatiques et des diatomites quaternaires du Sahara. -In : C.R. Acad. Sc. Paris, 272, : 4-7.
- MILLOT (G.), 1977. Géochimie de la surface et formes du relief. Présentation.-Sci. Géol. Bull. 30, 4, : 229-233.
- MILLOT (G.), 1980. Les grands aplanissements des socles continentaux dans les pays subtropicaux, tropicaux et désertiques.-A paraître dans le livre jubilaire (150 ans) de la Société Géologique de France, 21 p.
- MINDERMAN (G.), LEEFLANG (K.W.F.), 1968. The amounts of drainage water and solutes from lysimeters planted with either oak, pine or natural dune vegetation or without any vegetation cover. Plant and Soil, 28, 1, : 61-80.
- MINSHALL (N.E.), JAMISON (V.C.), 1965. Interflow in claypan soils.—Water Resources Research, 1, 3, : 381-390.
- MOLDENHAUER (W.C.), 1970. Influence of rainfall energy on soil loss and infiltration. II: effect of clod size distribution. -Soil Sc. Soc. Amer. Proc., 34,: 673-677.
- MONNET (C.), 1971. Données sur le transport en suspension par un fleuve de zone intertropicale (Bandama, Côte d'Ivoire). C.R. Acad. Sci. Paris, 273, : 41-44.
- MONNET (C1.), 1972. Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des suspensions d'un fleuve intertropical, le Bandama, Côte d'Ivoire. Evolution des éléments chimiques des eaux et de son estuaire. Thèse Fac. Science de Nice, n° AO 7826, 427 p.
- MONNIER (G.), 1955. Etudes pédologiques à la station IFAC à Azaguié.Ann. IFAC, 10, 34 p.
- MONTAGUT (G.), MARTIN-PREVEL (P.), 1965. Essais sol-plante sur bananiers. Besoins en engrais des bananiers antillais. Fruits, 20, 6,: 265-273.
- MONTENY (B.), ELDIN (M.), 1977. Données agroclimatiques recueillies à la station ORSTOM d'Adiopodoumé : 1948-1976. ORSTOM, Abidjan, 24 p.
- MOREAU (R.), 1978. Influence de l'ameublissement mécanique et de l'infiltration d'eau sur la stabilité structurale d'un sol ferrallitique dans le Centre de la Côte d'Ivoire.—Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 16, 4, : 413-424.
- MOREL (R.), QUANTIN (P.), 1972. Observations sur l'évolution à long terme de la fertilité des sols cultivés à Grimari (Rép. Centrafricaine). Résultats d'essais de culture mécanisée semi-intensive, sur des sols rouges ferrallitiques moyennement désaturés en climat soudano-guinéen d'Afrique Centrale.—Agron. Trop. 27, 7, : 667-739.

- MOULO (N.), 1974. Etude comparative des sols sous forêt et sous bananiers sur schistes à Azaguié d'après deux toposéquences (basse Côte d'Ivoire). Rapport de stage. Rapport ORSTOM, Abidjan, 99 p.
- NGO-CHAN-BANG, 1967. Méthode et appareil pour l'étude dynamique de la structure des sols. Application à divers cas agronomiques de Madagascar.-In Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive du 19 au 25 Nov. 1967. Comm. n° 1, p. 51-68.
- NGUYEN KHA, ROUILLER (J.), SOUCHIER (B.), 1976. Premiers résultats concernant une étude expérimentale du phénomène de l'appauvrissement dans les pélosols.—Science du Sol, 4, : 259-268.
- NIELSEN (N.E.), 1972. A transport kinetic concept of ion uptake from soil by plants. 1: a method for isolating soil solutions from soils with or without plant cover. Plant and soil, 36, 505-520.
- NORTCLIFF (S.), THORNES (J.B.), 1977. Water and cation movement in a tropical rainforest environment. I.-London School of Economics, Geography Dept. Discussion Paper n° 62.
- NORTCLIFF (S.), THORNES (J.B.), WAYLEN (M.J.), 1979. Tropical forest systems: a hydrological approach. Amazoniana, 4, 4,: 557-568.
- NOUVELOT (J.F.), 1969. Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun.-Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 4, 4.
- NOUVELOT (J.F.), 1972. Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun, de 1969 à 1971. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. 9, 1, : 47-74.
- NOUVELOT (J.F.), 1973. Hydrologie des Mayos du Nord Cameroun (Monographie de la Tsanaga). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 10, 3, : 211-303.
- NYE (P.), 1955. Some soil-forming processes in the humid tropics.

 4. The action of soil fauna.-J. Soil Sci., 6, 1, : 137-148.
- NYE (P.H.), 1961. Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest.-Plant and Soil, 13, 4,: 333-346.
- OBERLIN (G.), BAUDUIN (D.), CHAPERON (P.), 1966. Etude hydrologique en Haute-Volta. Région de Tikaré. Campagne 1965 et conclusions générales.-Rapport ORSTOM Paris, 81 p.
- OLLAGNIER (M.), LAUZERAL (A.), OLIVIN (J.), OCHS (R.), 1978. -Evolution des sols sous palmeraie après défrichement de la forêt.-Oléagineux 33, 11, : 537-544.
- PECROT (A.), DELVIGNE (J.), GASTUCHE (M.), FRIPIAT (J.), VIELVOY (L.) 1962. - L'altération des roches et la formation des sols au Kivu Rép. du Congo).-Publ. INEAC, sér. Scientif. n° 97, 90 p.
- PEDRO (G.), 1961. Sur l'altération spontanée du granite en milieu naturel : résultats obtenus au bout de 30 ans dans l'expérience lysimétrique de Versailles.-C.R. Acad. Sci. 253, 2, : 2242-2244.

- PEDRO (G.), 1964. Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Thèse Doc. Fac. Sci. Paris, 344 p.
- PEDRO (G.), 1966. Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique).-C.R. Acad. Sci., 262, série D, 1828-1831.
- PEDRO (G.), CHAUVEL (A.), 1973. Sur la nature et l'importance relative des principaux mécanismes intervenant dans le processus de lessivage pédologique. C.R. Acad. Sci. Paris, 277, série D, : 1133-1136.
- PEDRO (G.), 1979. Caractérisation générale des processus de l'altération hydrolytique. Base des méthodes géochimiques et thermodynamiques.-Science du Sol, Bull. AFES, 2-3, : 93-105.
- PERRAUD (A.), 1971. Lès Sols.-In : le milieu naturel de la Côte d'I-voire. ORSTOM, Paris, : 269-391.
- PERRAUD (A.), 1971. La matière organique des sols forestiers de la Côte d'Ivoire. Relations sol-végétation-climat. Thèse d'Etat, Univ. Nancy I, 27.5.71. N° CNRS AO 5683. ORSTOM, Paris, 82 p.
- PIERI (C.), 1979. Etude de la composition de la solution d'un sol sableux cultivé du Sénégal à l'aide de capteurs en céramique poreuse.-Agron. Trop. 34, 1, : 9-22.
- PIEYNS (S.), KLEIN (J.C.), 1964. Etudes hydrologiques des bassins versants de Ouagadougou.-Rapport ORSTOM Paris, 95 p.
- PIHAN (J.), 1978. Annuaire des valeurs mensuelles de l'indice d'érosivité R de Wischmeier relatives aux stations officielles de la Météorologie Nationale française.—INRA-Rennes et UER Géographie Université de Haute-Bretagne, 112 p.
- PISSART (A.), BOLLINE (A.), 1978. L'érosion des sols limoneux cultivés de la Hesbaye. Aperçu général.-Pédologie, 28, : 161-182.
- PLESSIX (C. du), 1969. De l'intérêt du désherbage chimique pour l'entretien des jeunes hévéas plantés sur sables tertiaires de Côte d'Ivoire. II : définition d'une méthode d'entretien. I.R.C.A. R.G.C.P., 47, 1, 1970, : 75-79.
- POULAIN (J.F.), ARRIVETS (J.), 1971. Effets des principaux éléments fertilisants autres que l'azote sur les rendements des cultures vivrières de base (sorgho, mil, maïs) au Sénégal et en Haute-Volta.— Séminaire CSTR/OUA sur les facteurs du milieu qui influencent le rendement des cultures céréalières en Afrique tropicale. Dakar 26-29.7.71. Rapport IRAT/HV, 31 p.
- POULAIN (J.F.), 1975. Bilan des travaux réalisés par l'IRAT de 1962 à 1974 au Mali dans le domaine de l'agronomie. Rapport IRAT Mali, 22 p.
- POULAIN (J.F.), 1978. Synthèse des résultats agronomiques obtenus de 1971 à 1977. Rapport IRAT/HV Minist. Dév. Rural H.V., 175 p.

- PREVOT (P.), OLLAGNIER (M.), 1959. Loi du minimum en nutrition minérale équilibrée.-Paris, IRHO, 19 p.
- RAKHMANOV (V.V.), 1970. Dependance of stream flow upon the percentage of forest cover of catchments.-5, posium sur les influences de la forêt et de l'aménagement des bassins versants, Moscou, p. 55.
- RAPP (M.), 1967. Production de litière et apport au sol d'éléments minéraux et d'azote dans un bois de pins d'Alep (Pinus halepensis mill.).-Oecol. Plant. (Paris), 2, 4, : 325-338.
- RAUNET (P.), 1971. Contribution à l'étude pédo-agronomique des terres de Barre au Dahomey et au Togo sur les points d'essai de l'IRAT.-IRAT, 119 p.
- RICHARDS (L.A.), NEAL (O.R.), RUSSEL (M.B.), 1939. Observations on moisture conditions in lysimeters.-Soil Sci. Soc. Am. Proc., 4,: 55-59.
- ROBERT (M.), RAZZAGHE (M.K.), VINCENTE (M.A.), VENEAU (G.), 1979. Rôle du facteur biochimique dans l'altération des minéraux silicatés.-Science du Sol, 2-3, : 153-177.
- ROCHE (M.), 1965). Détermination des caractéristiques hydrologiques pour 28 barrages de Haute-Volta financés par le F.E.D.-Rapport ORSTOM Paris, 56 p.
- ROCHE (M.A.), 1978. Les bassins versants expérimentaux Ecerex en Guyane Française. Etude comparative des écoulements et de l'érosion sous forêt tropicale humide. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 15, 4,: 365-378.
- RODIER (J.), 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. Thèse doct. ing. Fac. Sc. Univ. Toulouse, 137 p.
- RODIER (J.), AUVRAY (C.), 1965. Estimation des débits de crues décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. ORSTOM-CIEH, 30 p.
- ROOSE (E.), CHEROUX (M.), 1966. Les sols du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire.-Cah. ORSTOM, sér. Pédol., IV, 2, : 51-92.
- ROOSE (E.), 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal.-Agron. Trop. 22, 2, : 123-152.
- ROOSE (E.), 1967. Erosion, ruissellement et lessivage oblique sous une plantation d'hévéas de basse Côte d'Ivoire. I : milieu, dispositif et résultats en 1966.-Rapport ORSTOM-IRCA Abidjan, 46 p.
- ROOSE (E.), GODEFROY (I.), 1967. Lessivage des éléments fertilisants en bananeraie. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive 19-25.11.67. Communication n° 114 : 1405-1409.
- ROOSE (E.), 1967. Quelques exemples des effets de l'érosion hydrique sur les cultures. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive, 19-25.11.67. Communication n° 113, 1385-1404.
- ROOSE (E.), GODEFROY (J.), 1968. Lessivage des éléments fertilisants en bananeraie. Fruits, 23, 11, : 580-584.

- ROOSE (E.J.), 1968. Un dispositif de mesure du lessivage oblique dans les sols en place.-Cah. ORSTOM, sér. Pédol. VI, 2, : 235-249.
- ROOSE (E.J.), 1968. Mesure de l'érodibilité d'un sol (facteur K) sur la parcelle de référence de Wischmeier. Deuxième projet de protocole standard et sa discussion.-ORSTOM Abidjan, 4+6 p.
- ROOSE (E.J.), 1968. Erosion en nappe et lessivage oblique dans quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire.-Communication à la 6ème Conf. Biennale de la WASA/ASOA. Abidjan 8-13.4.68, 15 p.
- ROOSE (E.J.), JADIN (P.), 1969. Erosion, ruissellement et drainage oblique sur un sol à cacao en moyenne Côte d'Ivoire : station IFCC près de Divo. I : milieu, dispositif et résultats des campagnes 1967-68.—ORSTOM-IFCC, Abidjan, 77 p.
- ROOSE (E.J.), HENRY DES TUREAUX (P.), 1970. Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans les sols en place.-Agron. Trop. 25, 12, : 1079-1087.
- ROOSE (E.J.), 1970. Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogenèse actuelle d'un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire. Deux années de mesure sur parcelle expérimentale.-Cah. ORSTOM, Sér. Pédol. 8, 4, : 469-482.
- ROOSE (E.J.), BIROT (Y.), 1970. Mesure de l'érosion et du lessivage oblique et vertical sous une savane arborée du plateau Mossi (Gonsé, Haute-Volta). 1 : résultats des campagnes 1968-69.-Rapport CTFT-ORSTOM, Abidjan, 148 p.
- ROOSE (E.J.) et al., 1970. Erosion, ruissellement et lessivage oblique sous une plantation d'hévéa en basse Côte d'Ivoire. III : résultats des campagnes 1967-68-69.—ORSTOM-IRCA, Abidjan, 115 p.
- ROOSE (E.J.), 1971. Influence des modifications du milieu naturel sur l'érosion, le ruissellement, le bilan hydrique et chimique, suite à la mise en culture sous climat tropical. Synthèse des observations en Côte d'Ivoire et en Haute-Volta.—Rapport ORSTOM Abdidjan, 22 p.
- ROOSE (E.J.), BERTRAND (R.), 1971. Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. Résultats expérimentaux et observations sur le terrain.—Agron. Trop. 26, 11, : 1270-1283.
- ROOSE (E.J.), 1971. Note technique concernant l'érosion hydrique au Maroc.-Bull. de liaison des Ing. Forestiers du Maroc, 6, : 47-52.
- ROOSE (E.J.), BERTRAND (R.), 1972. Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogenèse actuelle d'un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire. Résultats des campagnes 1967 à 1971.-Rapport ORSTOM-IRAT, Abidjan, 94 p.
- ROOSE (E.J.), 1972. Contribution à l'étude de l'appauvrissement de quelques sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux situés entre Abidjan et Ouagadougou par l'utilisation de méthodes expérimentales de terrain.-Bulletin de liaison, Thème A, I, : 19-41.

- ROOSE (E.J.), 1972. Comparaison des causes de l'érosion et des principes de lutte antiérosive en région tropicale humide, tropicale sèche et méditerranéenne.—Communication aux Journées d'Etude du Génie Rural à Florence, 12-16.9.72, : 417-441.
- ROOSE (E.J.), 1973. Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical.-ORSTOM, Abidjan, 125 p. Thèse Doct. Ing. Fac. Sci. Abidjan, n° 20.
- ROOSE (E.J.), TALINEAU (J.C.), 1973. Influence du niveau de fertilisation sur le bilan des éléments nutritifs majeurs de deux plantes fourragères cultivées sur un sol sableux de basse Côte d'Ivoire. Comm. Xème Coll. Inst. Intern. Potasse, Abidjan, décembre 73, 305-320.
- ROOSE (E.J.), 1974. Influence du type de plante et du niveau de fertilisation sur la composition des eaux de drainage en climat tropical humide.-Communication XIII Journées de l'Hydraulique Paris, Sept. 1974, rapport 13, 7 p.
- ROOSE (E.J.), PERRAUD (A.), 1974. Nature des composés humiques des eaux de ruissellement et de drainage et essai d'évaluation des migrations des matières organiques sous végétation naturelle en région tropicale. In : C.R. Xème Congrès Soc. Int. Sci. Sol, Moscou, 6, : 74-80.
- ROOSE (E.J.), 1974. Contribution à l'étude de la résistance à l'érosion de quelques sols tropicaux.-In : C.R. Xème Congrès Soc. Int. Sci. Sol, Moscou, 11, : 54-61.
- ROOSE (E.J.), 1974. Conséquences hydrologiques des aménagements antiérosifs.-In XIII Journées de l'Hydraulique, Paris, Sept. 74, rapport 10, 6 p.
- ROOSE (E.J.), ARRIVETS (J.), POULAIN (J.F.), 1974. Etude du ruissellement du drainage et de l'érosion sur deux sols ferrugineux de la région centre Haute-Volta. Bilan de 3 années d'observation à la station Saria, ORSTOM Abidjan, IRAT/HV, 83 p.
- ROOSE (E.J.), 1975. Natural mulch or chemical conditioner for reducing soil erosion in humid tropical areas.—In: "Soil Conditioners" SSSA Special Publication, 7, 12,: 131-137.
- ROOSE (E.J.), LACOEUILHE (J.J.), 1975. Etude du ruissellement, de l'érosion et de la lixiviation en fonction du mode d'utilisation des résidus de la culture d'ananas. I : protocole expérimental : ORSTOM Abidjan, 17 p. II : rapport de la campagne 1975 : ORSTOM Abidjan, 18 p.
- ROOSE (E.J.), 1976. Conservation des eaux et du sol en vue de l'intensification de l'exploitation de l'espace agricole tropical. In : Colloque Seneca "L'eau et les activités agricoles", Paris 3-5 Mars, Communication 322, 7 p.

- ROOSE (E.J.), LELONG (F.), 1976. Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique Tropicale. Etudes sur petites parcelles expérimentales. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn. 18, 4, : 365-374.
- ROOSE (E.J.), COLLINET (J.), 1976. La conservation des sols et la dynamique de l'eau.-In : "Journées de la recherche scientifique en région de savane : Korhogo, du 12-15 Avril 76. ORSTOM Abidjan p. 5-12.
- ROOSE (E.J.), 1976. Contribution à l'étude de l'influence de la mésofaune sur la pédogenèse actuelle en milieu tropical. Rapport ORSTOM Abidjan, 56 p.
- ROOSE (E.J.), 1976. Le problème de la conservation de l'eau et du sol en République du Bénin. Mise au point en 1976.-FAO-ORSTOM Abidjan, 34 p.
- ROOSE (E.J.), 1976. Use of the universal soil loss equation to predict erosion in West Africa.-In S.S.S.A. Special publication n° 21, p. 60-74.
- ROOSE (E.J.), 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales.-Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 78, 108 p.
- ROOSE (E.J.), 1977. Adaptation des méthodes de conservation des sols aux conditions écologiques et socio-économiques de l'Afrique de l'Ouest.-Agron. Trop., 32, 2, : 132-140. ORSTOM Abidjan,
- ROOSE (E.J.), GODEFROY (J.), 1977. Pédogenèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous une bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire. Azaguié, 1966 à 1973.- Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 15, 4, : 67-94.
- ROOSE (E.J.), 1977. Application of the universal soil loss equation of Wischmeier and Smith in West Africa.—In "Soil conservation and management in the humid tropics", Greenland and Lal éds. J. and Wiley, 283 p.
- ROOSE (E.J.), ASSELINE (J.) et al., 1978. Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé. II : les charges solides et solubles des eaux de ruissellement sur sol nu et diverses cultures d'ananas. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 16, 1: 43-72.
- ROOSE (E.J.), 1978. Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux issu de granite sous une savane arborée du plateau Mossi (Haute-Volta). Gonsé : campagnes 1968 à 1974.-ORSTOM Paris, 121 p.
- ROOSE (E.J.), FAUCK (R.), 1978. Des contraintes d'origine climatique limitent l'exploitation des sols ferrallitiques dans les régions tropicales humides de Côte d'Ivoire.-Comm. Congrès Soc. Int. Sci. Sol, Edmonton, Canada, Juin 1980, 7 p.
- ROOSE (E.J.), 1978. Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux complexe issu de granite sous une savane arborescente du centre Haute-Volta. Gonsé: campagnes 1968 à 1974.-Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 16, 2, : 193-223.

- ROOSE (E.J.), 1979. Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous une savane arbustive soudanienne du Nord de la Côte d'Ivoire. Korhogo: 1967-75.—Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 17, 2, : 81-118.
- ROOSE (E.J.) et al., 1979. Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés sous sorgho et sous savane soudano-sahélienne. Saria (Haute Volta): campagnes 1971-74.-ORSTOM Paris, 123 p.
- ROOSE (E.J.), 1979. Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique très désaturé sur sédiments argilo-sableux sous culture et sous forêt dense humide subéquatoriale du Sud de la Côte d'Ivoire. Adiopodoumé: 1964-1976. I: l'érosion et le bilan hydrique.-Cah. ORSTOM, sér. Pédol. XVII, 4,: 25-47.
- ROOSE (E.J.), 1980. Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous une savane arbustive soudanienne du Nord de la Côte d'Ivoire. Korhogo, synthèse des campagnes 1967 à 1975.-Rapport ORSTOM Paris, 172 p.
- ROOSE (E.J.), 1980. Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique sabloargileux très désaturé, sous cultures et sous forêt dense humide subéquatoriale du Sud de la Côte d'Ivoire. Adiopodoumé : 1964-75.-ORSTOM Paris, 204 p.
- ROOSE (E.J.), LELONG (F.), 1980. Les facteurs conditionnant la composition chimique des eaux du sol et du sous-sol en zone intertropicale.-26ème Congr. Intern. Géologie, Paris, Juillet 80, à paraître.
- ROQUES (H.), 1972. Sur une nouvelle méthode d'étude graphique des eaux naturelles. Ann. Spéléo. 27, 1, : 79-92.
- ROUGERIE (G.), 1960. Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière. Mémoire IFAN n° 58, 542 p.
- SACCARDY (L.), 1950. Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols. Terres et Eaux, Algérie.
- SCHOELLER (H.), 1941. L'influence du climat sur la composition des eaux souterraines.-Bull. Soc. Géol. Fr., 11, : 267-289.
- SCHOELLER (M.), 1958. Variation de la composition chimique des solutions des sols avec la nature pédologique et comparaison de la nature chimique de ces solutions avec celle des nappes phréatiques sous-jacentes.-C.R. Acad. Sci. Paris, 246, : 2507-2508.
- SEGALEN (P.), 1964. Le fer dans les sols.-ORSTOM, sér. Initiations n° 4, 150 p.
- SEGALEN (P.), 1969. Le remaniement des sols et la mise en place de la stone-line en Afrique. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. VII, 1, : 113-117.
- SHANHOLTZ (V.O.), LILLARD (J.H.), 1969. Tillage system effects on water use efficiency.-J. of Soil and Water Conservation, 24, 5,: 186-189.

- SHARMA (M.L.), UEHARA (G.), 1968. Influence of soil structure on water relations in low humic latosols. I: water retention. II: water movement.-S. Sci. Soc. Amer. Proc. (Madison), 32, I: 765-770. II: 770-774.
- SIBAND (P.), 1974. Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance.-Agron. Trop. 29, 12, : 1128-1248.
- SINE (L.), AGNEESSENS (J.P.), 1978. Etude des débits solides et du phénomène de migration dans une rivière drainant un bassin agricole.-Pédologie, 28, : 183-191.
- SMITH (D.W.), 1970. Concentrations of soil nutrients before and after fire.-Canad. J. Soil Sci., 50, 1, : 17-19.
- SOUCHIER (B.), DUCHAUFOUR (Ph.), 1969. Observations sur la stabilité des suspensions argileuses en milieu acide.-C.R. Acad. Sci. Paris, 268 D.: 1849-1852.
- SOUCHIER (B.), 1971. Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges).-Thèse Doct. Sc. Nat. Nancy, 134 p.
- SPOMER (R.G.), SHRADER (W.D.), ROSENBERRY (P.E.), MILLER (E.L.), 1973.— Level terraces with stabilized backslopes on bessial cropland in the Missouri Valley, a cost-effectiveness study.—J. of Soil and Water Cons. 28, 3,: 127-131.
- STALLINGS (J.H.), 1953. Continuous plant cover. The key to soil and water conservation.-J. Soil and Water Cons., 8, : 63-68.
- STALLINGS (J.H.), 1957. Soil conservation.-Prentice Hall, New-York, 575 p.
- SWANSON (N.P.), 1965. Rotating boom rainfall simulator.-Trans. Amer. Soc. Agric. Engineers 8, : 71-72. St. Joseph, Michigan.
- TALINEAU (J.C.), . Accumulation de matière organique dans le sol sous quelques cultures fourragères dans la région centre de la Côte d'Ivoire.-Université d'Abidjan, Inst. Ecologie Tropicale, 31 p. D.E.A. d'Ecologie Tropicale (rapport de stage).
- TARDY (Y.), MILLOT (G.), 1966. Premiers résultats de l'étude chimique de la nappe du bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire). C.R. Acad. Sci. Paris, p. 753-755.
- TARDY (Y.), 1969. Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Strasbourg CNRS, 199 p. Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr. n° 31.
- THORNTWAITE (C.W.), 1948. An approach toward a rational classification of climate.—Geogr. Review, : 55-94.
- TOMLINSON (T.E.), 1971. Nutrient losses from agricultural land. Outlook on Agriculture, 6, 5, : 272-278.
- TONDEUR (G.), 1950. Erosion du sol spécialement au Congo Belge. Publication des services de l'agriculture du Ministère des Colonies et du Gouvernement Général du Congo Belge, Bruxelles, 3ème édition, 240 p.

- TOUCHEBEUF (P.), 1961. Etude de transports solides en Afrique Noire et à Madagascar. Conf. Interafricaine sur l'Hydrologie, Naïrobi, C.C.T.A. n° 66, : 247-255.
- TOURTE (R.), VIDAL (P.), JACQUINOT (L.), FAUCHER (J.), NICOU (R.), 1964. Bilan d'une rotation quadriennale sur sole de régénération au Sénégal.-Agron. Trop., 19, 12, : 1033-1072.
- TRAN THANH-CANH, 1972. Etude comparative des sols sous forêt et sous hévéa sur sables tertiaires à l'Anguédédou. Rapport de stage. ORSTOM Abidjan, 157 p.
- TRAN-VINH-AN, 1973. L'action des vers de terre, genre Hyperiodrilus africanus, sur quelques propriétés pédologiques d'un sol sablonneux de la région de Kinshasa (Zaïre).-Cah. ORSTOM, sér. Pédol. XI, 3-4, : 249-256.
- TRICART (T.), 1962. Les discontinuités dans les phénomènes d'érosion.-A.I.H.S., 59, : 233-243.
- TRICART (J.), KILIAN (J.), 1979. L'écogéographie et l'aménagement du milieu naturel.-Edit. Maspero Paris, coll. Hérodote, 320 p.
- TRICART (J.), CAILLEUX (A.), 1965. Traité de géomorphologie V. Le modelé des régions chaudes, forêts et savanes. Sedès, Paris, p.322.
- TRICHET (J.), 1969. Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques.-Thèse Fac. Sci. Paris, 232 p.
- TURC (L.), 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Formule climatique simplifiée et mise à jour.-Ann. Agron. 12, 1, : 13-49.
- TURENNE (J.F.), PLENECASSAGNE (A.), 1976. Dynamique de la matière organique en sols cultivés. Effet d'une culture intercalaire de sorgho en vertisols irrigués.-Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 14, 3,: 193-205.
- VALENTIN (C.), 1978. Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire.-ORSTOM Abidjan, 150 p.
- VALENTIN (C.), 1978. Problèmes méthodologiques liés à la simulation de pluies. Application à l'étude de l'érodibilité des sols.Comm. Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Strasbourg 20-23.9.78, ORSTOM Abidjan, 11 p.
- VALENTIN (C.), ROOSE (E.J.), 1980. Soil and water conservation problems in pineapple plantations of South Ivory Coast. ORSTOM Abidjan 9 p. Comm. "Conservation 80, Silsoe, Juillet 1980.
- VAN DEN ABEELE (M.), VANDENPUT (R.), 1956. Les principales cultures du Congo Belge.-Publication de la Direction de l'Agriculture, Bruxelles, 3ème éd., 932 p.
- VEDY (J.C.), BRUCKERT (S.), 1979. Les solutions du sol. Composition et signification pédogénétique.-In : "Pédologie 2 : constituants et propriétés du sol" de M. Bonneau et B. Souchier. Masson éd. Paris, 459 p.

- VERLIERE (G.), 1973. La nutrition minérale et la fertilisation du caféier sur sol schisteux en Côte d'Ivoire. II : influence de la fertilisation minérale sur les rendements. III : relation entre les rendements et la composition minérale des feuilles.- Café, Cacao, Thé, 17, 3.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), WILLAIME (P.), 1967. Etude de l'érosion sur "Terres de Barre". Comparaison sol nu-jachère arbustive, année 1965.-Rapport ORSTOM, 14 p:
- VERNEY (R.), WILLAIME (P.), 1965. Résultats des études de l'érosion sur parcelles expérimentales entreprises au Dahomey.-Communication Coll. Conservation et amélioration de la fertilité des sols; Khartoum, OUA/STRC Publ. n° 98, p. 43-53.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), 1967. Etude de l'érosion sur "Terres de Barre". Erosion sous culture de mais sans fumure minérale.-ORSTOM Cotonou, 18+17 p.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), 1968. Etude de l'érosion sur "Terres de Barre". Erosion sous culture de maïs : maïs avec fumure minérale. Année 1967.- Rapport ORSTOM, 21 p.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), 1969. Etude de l'érosion sur "Terres de Barre". Erosion sous culture d'arachide. Année 1968.-Rapport ORSTOM 17 p.
- VERNEY (R.), VIENNOT (M.), GBAGUIDI (C.), 1970. Etude de l'érosion sur "Terres de Barre". Erosion sous culture de mais et coton avec fumure minérale.-Cotonou, ORSTOM, 25 p.
- VIEILLEFON (J.), 1977. Les sols des mangroves et des tannes de Basse Casamance (Sénégal).-Mém. ORSTOM Paris, n° 83, 291 p.
- VILLECOURT (P.), ROOSE (E.J.), 1978. Charge en azote et en éléments minéraux majeurs des eaux de pluie, de pluviolessivage et de drainage dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire).—Rev. Ecol. Biol. Sol 15, 1, : 1-20.
- VISSER (S.), 1961. Chemical composition of rain water in Kampala (Ouganda) and its relation to meteorological et topographical conditions.—Jour. Géophys. Res., 66, : 3759-3765.
- VÖMEL (A.), 1966. Experiments on nutrient balance, using various lysimeter soils. I: water percolation and nutrient economy.— Z. Acker. V. Pfl. Ban 123, : 155-188.
- VUILLAUME (G.), 1968. Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne. Bassin représentatif de Kount Kouzout (Niger).-Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. 5, 2, : 33-56.
- VUILLAUME (G.), 1969. Analyse quantitative du rôle du milieu physico-co-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone sahélienne (Kount Kouzout, Niger).—Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 6, 4, : 87-132.

- VUILLAUME (G.), 1969. Etude analytique du ruissellement et de l'érosion. Bassins versants représentatifs de Kountkouzout (Rép. du Niger).-Paris ORSTOM, 137 p.
- WACKERMANN (J.M.), 1975. L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide. Etude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection.-Paris, ORSTOM, 373 p. Thèse Doct. Sc. Nat. Strasbourg, n° A.O. 11.013.
- WEBB (L.J.), TRACEY (J.G.), WILLIAMS (W.T.), LANCE (G.N.), 1969. The pattern of mineral return in leaf litter of three sub-tropical australian forest.-Aust. For. 93, : 90-110.
- WHIPKEY (R.Z.), 1965. Subsurface stormflow from forested slopes.-Bulletin A.I.H.S.: 74-87.
- WHITEHEAD (H.C.), FETH (J.H.), 1964. Chemical composition of rain, dry fallout and bulk precipitation at Menlo Park, California, 1957, 1959. Journ. Geophys. Res; 69, 16, : 3319-3333.
- WIKLANDER (L.), 1974. Leaching of plant nutrients in soils.

 I: general principles. Acta Agriculturae Scandinavica 24,: 349-356.
- WILLAIME (P.), 1962. Etudes pédologiques de Boukombé.-ORSTOM, mission Dahomey, 76 p.
- WILLAIME (P.), 1965. Erosion "normale" sur Terres de Barre. Rapport ORSTOM, 7 p.
- WILSON (Lee), 1973. Variations in mean annual sediment yield as a function of mean annual precipitation.-Am. J. Science, 273, 4,: 335-349.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), UHLAND (D.R.), 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation.—Agricultural Eng., 39: 458-462 et 474.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss.-Trans. Amer. Géophys. Union, 39, : 285-291.
- WISCHMEIER (W.H.), 1960. Cropping-management factor evaluations for an universal soil-loss equation.—Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24, 4: 322-326.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1960. An universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7th Intern. Congr. Soil Science, I,: 418-425.
- WISCHMEIER (W.H.), 1966. Surface runoff in relation to physical and management factors. Proceedings, First Pan American Soil Conservation Congress, Sao Paolo, Brazil, : 237-244.
- WISCHMEIER (W.H.), JOHNSON (C.B.), CROSS (B.U.), 1971. A soil ero-dibility nomograph for farmland and construction sites.—J. of Soil and Water Conservation, 26, 5,: 189-192.

- WISCHMEIER (W.H.), 1973. Conservation tillage to control water erosion.—In: Proceedings of the National Conservation Tillage Conference, 28-30 Mars 1973, Des Moines Iowa, : 133-141.
- WISCHMEIER (W.H.), 1974. New developments in estimating water erosion. Proc. 29 th annual meeting of the Soil Conservation Soc. of Am., 11-14.8.74, Syracuse, New-York, : 179-186.
- WISCHMEIER (W.H.), 1975. Estimating the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed areas.—In: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources Proc. Sediment-yield workshop, USDA-Sediment. Lab., Oxford, Missouri. US-AGR-R.S.—S 40, 285 p.
- WISCHMEIER (W.H.), 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation.-J. Soil and water conservation 31, 1, : 5-9.
- WISHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning.-USDA, Agriculture Handbook n° 537, 58 p.
- WOODCOCK (A.H.), MORDY (W.A.), 1955. Salt nuclei, wind, and daily rainfall in Hawaii.-Tellus 7,: 291-300.
- WOOD (H.), WARREN (W.), 1973. A technique using porous cups for water sampling at any depth in the unsaturated zone.Water Resour. Res. 9, 2, : 486-488.
- WOODRUFF (C.M.), 1948. Erosion in relation to rainfall, crop cover, and slope on a greenhouse plot. Soil Sci. Proc., 12, : 475.
- WRIGHT (W.R.), FOSS (J.E.), 1968. Movement of silt-sized particles in sand columns. S. Sci. Soc. Amer. Proc. (Madison), mai-juin 68, 32, 3, : 446-448.
- YAIR (A.), LAVEE (H.), 1976. Runoff generative process and runoff yield from arid talus mantled slopes.—Earth Surface Processes, 1, : 235-247.
- ZINGG (A.W.), 1940. Degree and length of land slope as it affect soil loss and runoff. Ag. Eng., 21, : 59-64.

LISTE DES ANNEXES

Page

- Résumés à l'échelle de l'année des observations sur les précipitations, le ruissellement, l'érosion, le drainage (Chap. 3, 515 4,5,6) vertical et oblique aux huit stations d'expérimentation. ANNEXE II - Schémas de bilans hydriques en année normale, décennale 527 humide et sèche à Adiopodoumé, Korhogo et Gonsé. (Chap. 6) - Caractéristiques chimiques et physiques des eaux superfi-ANNEXE III cielles : moyennes pondérées par les volumes écoulés, teneurs 533 (Chap. 7) fréquentes et extrêmes, teneurs moyennes et déviation standart - $(A_7 1 à 13)$. ANNEXE IV - Comparaison entre la terre érodée, les remontées de terre par la mésofaune et le sol en place. - $(A_7 13 à 19)$. 547 (Chap. 7)

ANNEXE I

RÉSUMÉS À L'ÉCHELLE DE L'ANNÉE DES OBSERVATIONS SUR LES PRÉCIPITATIONS, LE RUISSELLEMENT, L'ÉROSION, LE DRAINAGE OBLIQUE ET VERTICAL AUX HUIT STATIONS D'EXPÉRIMENTATION

(Tableaux A1 à 11)

========

Tableau Al : Résumé annuel à la case de lessivage oblique "R2"
----- Adiopodoumé, forêt secondaire sur pente de 65% - sol ferrallitique / sables tertiaires

| ANNEES | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | MEDIANE |
|---------------------|-----------------|--------|--------|----------|---------|--------|------------------|---------|--------|-------------|---------------------------------------|----------|
| Pluie mm | 2299 | 1619 | 1454 | 2003 | 1959 | 1654 | 1574 | 1635 | 1611 | 2115 | 1646 | 1646 |
| Pluie s/couvert % . | | | | : | 89 | 92 | 85 | 86 | 89 | 83 | 79 | 86 |
| Lame Ruiss. mm | 20.5 | 12.2 | 35.9 | 10.1 | 49,5 | 27 | 34.9 | 17.3 | 19.4 | 32.4 | 9.2 | 20.5 |
| KRAM % | 0.9 | 0.8 | 2.5 | 0.5 | 2.5 | 1.6 | 2.2 | 1.1 | 1.2 | 1.5 | 0.6 | 1.2 |
| KR MAX % | 7.4 | 11 | 12 | 3.5 | 15 | 9 | 15 | 14 | 7.8 | 16 | 12 | 12 |
| Turbidité mp.mg/l | 566 | 415 | 203 | 689 | 540 | 516 | 295 | 371 | 374 | 275 | 384 | 384 |
| Erosion kg/ha | 1802 | 637 | 735 | 425 | 1188 | 831 | 328 | 211 | 455 | 356 | 240 | 455 |
| S/E % | 0.9 | 7.9 | 9.9 | 16.4 | 22.5 | 16.8 | 31.4 | 30.4 | 16 | 25 | 14.7 | 16 |
| DRAINAGE OBLIQUE (1 | itres/parce | :11e) | | <u> </u> | | | · | | | | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | <u> </u> |
| R 2 1 1/parcel. | 745.65 | 56.14 | 208.03 | 98.84 | 342.31 | 99.50 | >179.8 | 80.74 | 54.37 | > 95.05 | 23.19 | 96 |
| R 2 2 " | ₹24 . 39 | 45.31 | 213.04 | 119.19 | 556.56 | 108.74 | >242.4 | >247.67 | 46.58 | > 127.82 | 0.65 | 119 |
| R 2 3 "" | >21.02 | 89.31 | 121.70 | 85.68 | 219.89 | 82.03 | >141.6 | 47.09 | 38.53 | > 118.17 | 2.12 | 86 |
| R 2 4 " | 711.05 | 112.60 | 30.35 | 40.81 | 93.12 | 28.73 | 18.07 | 9.1 | 2.35 | 39.19 | 0 | 29 |
| D.O. Total " | >102.12 | 303.36 | 573.12 | 344.52 | 1211.88 | 319 | >581.9 | >384.6 | 141.83 | > 380.2 | 25.96 | 345 |

Surface cases d'érosion = 2 x 25 mètres en 1965-66, puis 4 x 25 mètres.

de lessivage oblique =

2 x 25 mètres en 1965-66, puis 2 x 25 mètres.

S/E = rapport entre le poids de sédiments en suspension et l'érosion totale.

Tableau A2 : Résumé annuel case lessivage oblique "R3"

Adiopodoumé, forêt secondaire sur pente de 11%, sol ferrallitique très désaturé sur sables tertiaires

| ANNEES | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | MEDIANE |
|---------------------|-----------|-----------|------------|-----------|----------|------------|-------|----------|------|----------|------|---------|
| Pluie mm | 2299 | 1670 | 1645 | 2084 | 1916 | 1693 | 1492 | 1660 | 1749 | 2195 | 1772 | 1749 |
| Pluie s/c. % | _ | - | - | _ | 91 | - | _ | - | _ | - | - | - |
| Lame Ruiss. mm | 1.68 | 2.43 | 1.36 | 1.60 | 5.37 | 7.64 | 10.17 | 2.80 | 8.49 | 8.50 | 6 | 5.3 |
| KRAM Z | 0.07 | 0.14 | 0.08 | 0.08 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.2 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.3 |
| KR MAX % | 1.2 | 0.7 | 0.8 | 2.2 | 1.5 | 1.4 | 2. | 1.1 | 1.6 | 1.3 | 1. | 1.3 |
| Turb. mp. mg/1 | 592 | 397 | 203 | 402 | 152 | 353 | 266 | 411 | 248 | 187 | 194 | 266 |
| Erosion kg/ha | 126.4 | 14.8 | 20.4 | 81. | 89.2 | 64.1 | 31.8 | 37.1 | 60.6 | 20.3 | 38.6 | 38 |
| S/E % | 7.8 | 65 | 14 | 7.9 | 9.2 | 42 | 85 | .31 | 35 | 78 | 30 | 31 |
| DRAINAGE OBLIQUE OF | SERVE SUR | UNE PARCE | LLE DE FOF | RET SECON | DAIRE (p | ente = 11% | 3) | | | | | |
| R 31 1/parcelle | > 5.54 | 7.8 | 7.38 | 18.66 | 6.85 | 1.22 | 0.11 | 0 | - | - | - | 6.8 |
| R 32 · " | 0 | 0.8 | 2.68 | 0.58 | 0.12 | 0.10 | 0.10 | 0 | | - | - | 0.1 |
| R 33 "" | 0 | 0 | 2.54 | 0.95 | 0.12 | 0 | 0.01 | 0 | - | - | - | 0.01 |
| R 34 " | 0 | 0 | . 0 | 1.30 | 0.10 | 0 | 0 | 0 | - | - | - 、 | 0 |
| D.O. total | >5.54 | 8.6 | 12.6 | 21.49 | 7.19 | 1.32 | 0.22 | 0 | - | - | - | 7 |

Surface cases d'érosion : 2 x 50 mètres en 1965-66, puis 6 x 33 mètres.

de lessivage oblique : " " 2 x 33 mètres.

Tableau A3: Résumé annuel des phénomènes d'érosion à la parcelle P6: campagnes 1956-65.

Adiopodoumé, forêt secondaire sur pente 23%, sol ferrallitique très désaturé sur sables tertiaires.

| ANNEES | | 1956 | 1957 | 1958 | 1959 | 1960 | 1961 | 1962 | 1963 | 1964 | 1965 | MEDIANE |
|----------------|-------|--------|-------|------|------------------|-------|------|------|------|------|-------|---------|
| Pluie | mm . | 2425 | 2383 | 1945 | 2342 | 1898 | 2289 | 2773 | 2434 | 1647 | 2300 | 2321 |
| Lame Ruiss. | mm | >47.17 | 23.42 | 5.88 | 9.25 | 11.05 | 9 | 1.79 | 3.63 | 8.71 | 14.36 | 11.6 |
| KRAM | % | 2.17 | 0.98 | 0.30 | 0.39 | 0.58 | 0.38 | 0.06 | 0.15 | 0.53 | 0.62 | 0.5 |
| KR MAX | 7. | - | _ | - | - | 2.7 | 3 | 1 | 3.4 | 3.9 | 7.3 | 3.2 |
| Erosion Totale | Kg/ha | 2600 | 200* | 100* | 60 ^{**} | 13 | 21 | 13 | 7 | 52 | 227 | 52 |
| S/E | 7. | (410) | - | - | - | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Tableau A4: Adiopodoumé, 2 cycles de mais par an, en rotation (P1-2-4) ou en culture continue (P5), rendements faibles.

| ANNEES | | 1958 Icycle - P4 | 1967 P1 | 1967 P5 | 1968 P2 | 1968 P5 | 1969 P4 | 1969 P5 | MEDIANE |
|----------------|----------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| Pluie. | mm | 1945 | 1673 | 1673 | 2084 | 2084 | 1951 | 1951 | 1951 |
| Lame Ruiss. | mm | 254 | 443 | 471 · | 616 | 596 | 428 | 519 | 527 |
| KRAM | 7. | 13 | 27 | 28 | 30 | 29 | 22 | 27 | .27 |
| KR MAX | % | - | 56 | 66 | 80 | 71 | 63 | 59 | 65 |
| Erosion Totale | t/ha | 35.5 | 75.9 | 103.3 | 133.6 | 89.5 | 83 | 105.3 " | 90 |
| S/E | 7. | - | 3.7 | 3.8 | 8.7 | 9.7 | 7.9 | 7.5 | 7.7 |

KRAM = coefficient de ruissellement annuel moyen (=LR/Pluie). KR MAX = coefficient de ruissellement maximum pour 1 averse S/E = suspension / erosion totale.

| C | п |
|---|---|
| ĭ | |
| - | _ |
| u | 2 |

| | | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | TOTAL | MOYENNE |
|---|---------------------|--------|--------|--------|--------|----------|------------|
| Pluviosité au pluviomètre IFAC | à l'Anguédédou (mm) | 1786,9 | 1748,2 | 2234. | 1818,4 | 7587,5 | 1896,9 |
| Pluviosité à la parcelle | (mm) | 1583. | 1400. | 1804,7 | 1488,7 | 6276,4 | 1569,1 |
| Index d'érosivité "Rusa" en uni | ités américaines | 755 | 592 | 749 | 553 | 2649. | 662 |
| L.Ruiss. | (coeff.4902)mm | 13.76 | 6.75 | 5.36 | 7.60 | 33.47 | 8.36 |
| KRAM - | | | | | - | | . |
| | , % | 0.88 | 0.48 | 0.30 | 0.51 | _ | 0.53 |
| KR MAX - | 7. | 4.60 | 1.89 | 2.10 | 2.26 | max. | 2 à 4% |
| Turbidité moyenne pondérée | (g/litre) | 0.405 | 0.376 | 0.668 | 1,318 | - | 0.648 |
| Suspension (S) | (Kg/ha) | 55.7 | 25.4 | 35.8 | 100.2 | 217.1 | 54.3 |
| ·Terre de fond (T) | 11 | 270.4 | 53.4 | 22.2 | 229.2 | 575.2 | 143.8 |
| Erosion totale (E = S + T) | • " | 326.1 | 78.8 | - 58 | 329.4 | 792.3 | 1,97.1 |
| Rapport S/E | % | 17 | 32 | 62 | 33 | - | 28 |
| Drainage oblique sur 2 mètres | de front . | | | | | | |
| - de 0 à 30cm | (1/parcelle) | 10.8 | 1.6 | 104.3 | 56.2 | 172.9 | 43.2 |
| - de 30 à 60cm | u | 26.8 | 93.8 | 149.2 | 87 | 356.8 | 89.2 |
| - de 60 à 100cm | II . | 48.7 | 120.9 | 69.6 | 157 | 396.2 | 99 |
| - de 100 à 150cm | 11 | 51.8 | 190.4 | 119.5 | 70.7 | 432.4 | 108.1 |
| Total sur 150cm | 11 | 138.1 | 406.7 | 442.6 | 370.9 | 1358.3 | 339.5 |
| Drainage oblique réduit à 1'ha (coeff. 147.06) | 1001 | 2.03 | 5.98 | 6.51. | 5.45 | 19.97 | 4.99 |
| Coefficient de drainage oblique bilan annuel parcelle | e sur 150cm du % | 0.13 | 0.43 | 0-36 | 0.366 | - | 0.32 |
| Coefficient de drainage oblique max. par pluie uni | | 0.94 | 1.45 | 2.25 | 3.59 | max. de | e 1.5 à 4% |

Tableau A6 : Résumé des observations effectuées sur les parcelles ERLO d'AZAGUIE sous forêt dense secondarisée et sous bananeraie irriguée (pente : 14%)

| A | | | | | | | | | ٠. | <u> </u> |
|--|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|---------------|-------------|-----------------------------|--------------|
| RUISSELLEMENT | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1973 | EXTREMES | MEDIANE |
| Pluies % | 1614 | 1838 | 2051 | 1478 | 1658 | 1469 | 1450 | 1784 | 1450 à 2051 | 1640 |
| FORET . Kr ma Z | - | - | 5.5 | 2.6 | 5.1 | 1.3 | 0.5 | 0.4 | 0.4 à 5.5 | 2 |
| . Kr max. | | - | 33.5 | 11 | 39 | 17 | 4 | 3 | 3 3 39 | 14 |
| BANANERAIE . Kr ma % | 2.9 | 9 | 5.5 | 10.3 | 11.4 | 6 | 10 | 6.4 | 5.5 à 12 | 9 . |
| . Kr max. % | 20 | 25 | 30 | 74 | 65 | 36 | 63 | 61 | 25 à 74 | 60 |
| | | | ******** | ******* | | | | 2242234923 | <u>보통 문제의 로르 전</u> 부 문 대체 그 | ********* |
| BANANERAIE . Irrigation mm . Kr ma. '7 | 317 | 297 | 89 | 435 | 323 1 | 200 | 114 | 88 | 80 à 450 0.1 à 4.3 | 250 . 0.8 |
| |] - | _ | 1.2 2 | 0.3 | - 5 | 4.3 | 2 | 1 | 1 4.5 | 2 |
| . Kr Max. 2 | | | 4 | 12 | <u> </u> | 1,3 | | <u>L'</u> | 1 4 13 | - |
| | | · | _/ | , | , | , | , | r | · | |
| EROSION | | | | | <u> </u> | | | | • | |
| Pluies | | | | | | | | | | |
| . Hauteur mm . RUSA | 1614 810 | 1838 1308 | 2051 933 | 1478 685 | 1658 924 | 1469 729 | 1450 655 | 1784 942 | 1450 à 2051 655 à 1308 | 1640 373 |
| FORET • Erosion totale Kg/ha | - | _ | 1426 | 229 | 848 | 82 | 54 | 45 | 45 à 1426 | 150 |
| • Turbidité Mg/1. | |] | 893 | 447 | 896 | 434 | 697 | 699 | 434 à 896 | 700 |
| . S.E. % | | | 68 | 71 | 86 | 100 | 100 | 100 | 68 a 100 | 90 |
| ********************* | | | ********* | | | ****** | | | *********** | |
| BANANERAIE P. nat. .Erosion Kg/ha | 2017 | 4547 | 729 | 884 | 2325 | 1326 | 2087 | 1638 | 729 à 4547 | 1830 |
| .Turbiditê mg/l | 265 | 1314 | 637 | 542 | 738 | 1024 | 1353 | 1371 | 265 à 1371 | 900 |
| .S/E % | 74 | 54 | 97 | 93 | 60 | 67 | 94 | 88 | 54 a 97 | 80 |
| BANANERAIE Irriguêe .Erosion Kg/ha | | | 8 | 12 | 49 | 128 | 13 | 1 | l à 128 | 12 |
| .Turbidité Mg/1 | | İ | 565 | 803 | 1515 | 1504 | 1856 | 986 | 565 à 1856 | 1250 |
| .s/e z | | | · 75 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 75 à 100 | 100 |
| | | 1 | l | <u> </u> | <u> </u> | <u> </u> | <u> </u> | <u> </u> | <u> </u> | <u> </u> |
| DRAINAGE OBLIQUE | | | | | | | | | | |
| FORET litres/parcelle . T! 30cm | | | 9.4 | 6.6 | 3 | 34.7 | 107.9 | . 156.1 | 3 a 156 | . 25 |
| . T2 80cm | | 1 | 0 | 4.7 | 2 | 170.7 | 177.1 | 202.1 | o a 203 | 100 |
| . T3 150cm | | | 0 | 14.8 | 55 | 33.7 | 157.9 | 53.1 | O 2 158 | 45 |
| . T4 180cm | | | 52 | 27 | 120.5 | 74.3 | 137.6 | 62.7 | 27 à 138 | _55 |
| TOTAL | | | 61.4 | 53.1 | 180.5 | 313. | 581 | 475 | 53 à 581 | 225 |
| BANANERAIE litres/parcelle | | | | | | | | } | | |
| . Al vers 40cm | >284.3 | >126.5 | 12 | 17.8 | 243.2 | 111 | 31.4 | 252.8 | 11 à>284 | 200 |
| : A2 vers 90cm | >379.3 | >143.7 | 71.7 | 129.5 | 98.1 | 6 | 31.3 | 90.8 | 6 a>379 | 95 |
| . A3 vers 140cm | >755 | >587.1 | > 1703 | 410.1 | 686.4 | 338.8 | 499 | 667.4 | 410 a>1703 | 630 |
| . A4 vers 180cm | pas inst | | > 1905 | ×808.5 | 968.5 | 554.7 | 478 | 517.9 | 478 a>1905 | 690 |
| | >1419 | 858 | >3692 | 71366 | 1997 | 911 | 1040 | 1529 | 858 à>3700 | 1615 |
| | | | | | | | | | | |

Tableau A7 : Résumé annuel des observations à la case ERLO de la station IFCC près de DIVO
Sol ferrallitique - moyennement désaturé remanié appauvri sur granite Pente = 10%

| | FOR | et semi – d | ECIDUE | | CACAOYI | ERE + RECRU | FORESTIER | | MED IANE |
|--|--|---|---|--|---|--|---|--|---|
| | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1967-1974 |
| Pluie (H en mm) | 1242 | 1955 | 1211 | 1436 | 1220 | 1291 | 1388 | 1375 | 1333 |
| Agressivité Rusa | 607 | 1100 | 500 | 848 | 599 | 684 | 795 | 659 | 672 |
| L. Ruiss. (mm) KRAM % KR Max % | 6.26 | 27.1 | 5.62 | 14 | 3.58 | 4.74 | 6.14 | 5.22 | 5.88 |
| | 0.5 | 1.4 | 0.5 | 1 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| | 2.9 | 6 | 4.6 | 6.1 | 1.2 | 1.5 | 2.4 | 1.7 | 2.7 |
| Turbidité mp (g/1) Erosion (kg/ha) Suspension " S/E % | 5,848 | 0,898 | 0,557 | 0,397 | 0,231 | 0,332 | 0,421 | 0,622 | 0,490 |
| | 503 | 644 | 128 | 191 | 133 | 73 | 58 | 98 | 130 |
| | 366 | 243 | 29 | 56 | 10 | 16 | 26 | 32 | 30 |
| | 73 | 38 | 23 | 29 | 8 | 22 | 45 | 33 | 24 |
| Drainage oblique .Dl Oà 15cm 1/parcD2 15à 50 " .D3 50à100 " .D4 100à150 " .D5 150à190 " D.O.Total sur2m/front 1 réduit à 1'ha. Coeff. D.O./du bilan an. max./averse | 0.01 0.01 > 25.83 > 26.66 > 29.20 > 81.7 1 1.08mm 0.09% 1.3% | 20.57 6.41 12.36 26.93 0 66.3 1 0.87mm 0.04% | 12.80 6.15 56.42 26.90 2.35 104.6 1 1.37mm 0.117 4.17 | 46.48 43.18 117.62 144. 85.65 436.93 1 5.75mm 0.40% 3.9% | 0.08 13.25 10.63 10.21 0.01 34.18 1 0.45mm 0.047 0.67 | 2.70 64.56 83.43 33.71 0 184.4 1 2.43mm 0.19% 2.3% | 0.54 6.48 15.91 3.35 0.21 26.49 1 0.35mm 0.03% 0.5% | 0.06 19.95 47.71 67.07 2.42 137.21 1.81mm 0.137 3.17 | 1.62 9.87 36.77 26.92 1.28 76.46 1 1. mm 0.08% 1.8% |

Tableau A8: Résumé annuel des observations aux cases ERLO et DV de la station IRAT près de BOUAKE.

Sol ferrallitique très désaturé rajeuni par érosion remanié sur granite (pente = 4%).

| Jachère pâturée | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1973 | Valeur r tative | eprésen- |
|---|-------------------|--------------|-------------|--------------------|--------------|----------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| brûléesavane arborée antécédent | Feu+pâtu- rage | feux | Protec | tion intégra | 1e | | | avec feux | Protection |
| Précipitations | | • | | | · | | <u>.</u> | | |
| Hauteur mm Indice Agressivité Rusa | 939 392 | 1553 606 | 980 486 | 1160 528 | 1383 609 | 965 397** | 959 436 ≭ | | |
| Ruissellement | | • . | | | | | | | |
| Lame mm | 2.38 | 3.67 | 2.11 | 0.59 | 0.47 | 0.30 | 0.24 | | |
| Coeff. annuel moyen KRAM % | 0.25 | 0.24 | 0.22 | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.23% | 0.03% |
| Coeff. max. journalier KRMAX % | 1.2 | 1 | 1.6 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 1 % | 0.27 |
| Erosion Totale (E) Kg/ha/an | 182 | 57 | 51 | 2 | 1.8 | 0.38 | 0.43 | 50 | 1 |
| Suspension (S) " | 19.6 | 15.8 | 16.4 | 2 | 1.8 | 0.38 | 0.43 | 16 | 1 |
| Turbidíté g/l S / E % | 0.823 11 | 0.430 28 | 0.777 32 | 0.333 100 | 0.380 100 | 0.127 100 | 0.179 100 | 0.8 32 | 0.2 100 |
| Durán Oldán | | | | | | | | | |
| Drainage Oblique | | | ,, | | 4.8 | | | | |
| de 0 à 25cm litre/parcelle 25 à 50" | 10.7 23.4 | 31.8 33.1 | 33 18 | [| 16.1 | 0 | 0 | | |
| 50 à 100" " 100 à 180" " | - | 0.3 | 14 19 | | 1.1 0 | 0 | 0 | | |
| Total sur 180cm | | | | ` | | | | | |
| - sur 2m de front - réduit à l'ha (mm) | 34.1 0.34 | 65.3 0.65 | 84 0.84 | | 22 0.22 | 0 | 0 0 | 601 1 mm | 0à201 <0.3mm |
| Coeff. drain. oblique | | | | ! | | • | | | |
| - du bilan annuel 7 - max./averse 7 | 0.04 0.3 | 0.04 0.4 | 0.09 | | 0.02 0.4 | 0 | 0 | 0.1% | <17 |
| Drainage Vertical | | * à par | ir du | 27 mai 1970 | | | | Androg | |
| Vers 45cm mm | | |] | 906 kn kn 331.3 | 449.2 | (123.5) | 367.5 | non brû | rre |
| Vers 90cm Z | | | | 365.2 | 509.1 | 317.4 | 379 | | |
| 120cm % | | | | 367.6 393.1 | 472 573.7 | 254.3 416.5 | 385.9 493.9 | | |
| Moyenne des 3 derniers mm | | | 1 | 375.2 | 518.3 | 329.4 | 419.6 | | |
| % des précipitations annuelles | | | | 41.4% | 37.5% | 34.1% | 43.7% | 35 à 4 | i5 % |

Végétation = vieille jachère pâturée et brûlée chaque année. Clôturée en 1967 et protégée des feux depuis 1968, la parcelle tend à devenir une savane arborée où la strate herbeuse disparaît en dehors des bordures et des lysimètres.

Tableau A9: Résumé annuel des observations aux cases ER-ERLO de la station ORSTOM près de Korhogo. Sol ferrallitique moyennement désaturé remanié modal sur granite facies appauvri - 1967 - 1975 - pente 3%.

| ANNEES | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | MOYENNE |
|--|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Pluie mm Rusa pieds.tonne/acre.inch | 1367 610 | 1193 505 | 1713 1046 | 1226 555 | 1252 611 | 1199 576 | 1241 788 | 1165 692 | 1155 539 | 1280 658 |
| Lame ruiss. / Jach. mm | 41.44 | 35.34 | 95.51 | 31.37 | 19.76 | 56.33 | ر ^{46.78} 437 | 31.25 460 | ⟨8.67 ⟨275 | /40.72 426 |
| KRAM / Jach. % % % % % % % % % % % % % % % % % % % | 3 - | 3 | 5.5 | 2.6 | 1.6 | 4.7 34.5* | ζ _{35.2} ^{3.8} | 39.5 | ζ ^{0.8} 23.8 | 3.2 33.3 |
| KR MAX / Jach. % | 19 - | 21 | 27 (52) | 28 | 9 - | ⟨25 75 * | 〈 19 89 | ⟨16 85 | ر 8 67 | 〈 28 89 |
| Erosion totale | 129 . | 141 | 160 | 109 | 9 - | ζ ¹³⁷ 2974 * | (109 9294 | / 42 3714 | 22 3270 | 95 5426 |
| Suspension/E. totale /Jach.brûlée /Sol nu | 75 - | 96 - | 99 | 79 | 100 | ξ 97 16* | \(\lambda \) 100 \(\tau \) 14 | (100 | 26 11 | / 90Z 13.6Z |
| Turbidité / Jach.brûlée Sol nu | 232 | 382 | 168 | 275 | 45 - | <237 248≭ | ∠ 232 287 | / 135 109 | 62 137 | 209 159 |
| DRAINAGE OBLIQUE | | | | | | | • | | | |
| de O à 18cm en 1/parc. 18 à 50cm " 50 à 100cm " 100 à 170cm " | 27.12 8.01 20 5.21 | 30.70 10.10 2.30 2.10 | 400.12 188.04 74.77 32.60 | 81.10 5.60 9.05 0.45 | 138.51 77.80 51.96 36.75 | 185.80 33.10 15.20 4.25 | 136.40 50.33 25.60 18.25 | 112.05 74.60 29.75 23.80 | 33.40 6.50 34.80 7.20 | 127.24 50.45 29.27 14.51 |
| Total sur 170cm " sur 2m front | 60.34 | 45.20 | 695.53 | 96.20 | 305.02 | 238,35 | 230.58 | 240.20 | 81.90 | 221.48 |
| Coeff. Drain. oblique - du bilan annuel % - max / averse % | 0.04 0.93 | 0.04 0.63 | 0.41 | 0.08 0.48 | 0.24 | 0.20 | 0.19 1.8 | 0.20 | 0.07 1.5 | 0.17 0.95 |

^{* :} Campagne incomplète commencée le 1.8.72 sur 2 parcelles en sol nu et travaillé. Végétation - vieille jachère de plus de 10 ans, au départ pâturée et brûlée chaque année entre décembre et mars. Depuis 1967, une clôture empêche le pâturage mais pas les feux de brousse.

<u>Tableau A.10</u>: Résumé des observations à la Case ERLO de SARIA (P7)
- Campagnes 1971-1974 -

| Année | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | MOY. |
|--|-----------------|-----------------|--------------|------------|--------------|
| Précipitation | | | | | |
| Hauteur (mm) | 602 | 724 ′ | 672 | 714 . | 643 |
| Agressivíté Rusa | 302 | 295 | · 458 | 512 | 380 |
| Ruissellement | | | | | |
| Sol nu travaillé | 43 | 35 | 40 | 42 | |
| gorgha huttā | 26 | 10 | 29 | 37 | ł |
| . KRAM 7 jeune jachère | 20 | 5 | 6 | 8*± | } |
| vieille jachère | 20 10 | 0.4 | 0.3 | o . 3≭≭ | 1 |
| · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | | | l 'I | _ | 1 |
| Sol nu travaillé | 71 | 69 | 69 | 71 | 1 |
| . KRMAXZ sorgho butte | 57 | 40 | 64 | 65 (84) | İ |
| jeune jachere | 51 | 29 | 22 | 30** | ł |
| vieille jachère | 41 | 2 | 1 1 | 8** | |
| Erosion totale (t/ha) observée sur les p | arcelles de SAR | A (1971-1974) | | | |
| Sol nu travaillé | 3.4 * | 13.8 | 35.4 | 26.8 | 19.8 |
| sorgho buttë | 5.7 * | 3.2 | 6.2 | 14.3 | 7.3 |
| jeune jachère | 0.70* | 0.43 | 0.19 | 0.72** | 0.51 |
| vieille jachère | 0.17* | 0.09 | 0.10 | 0.34** | 0.17 |
| Drainage oblique observé aux cases ERLO | de SARIA 1971 à | 1974 (jeune ja | chère) | | |
| . en protection | 0 | o | 0 | 0 | |
| . P7 : SI 25cm Nor. gris+ beige | 0 | О | *** | 99.7 | |
| S2 45cm " brun jaune | Ö | ő | > 93.32 | > 261.5 | l |
| S3 65cm " grav. gris | 0 . | Ö | >118.52 | >249.6 | 1 |
| S4 100 " dans carapace | 0 | ő | 7.43 *** | > 55.7 | 1 |
| S5 150 " bariolé rouge+ocre | ŏ | ŏ | 2.52 *** | > 172.7 | |
| S6 200 " bariolé rouge+ocre | Ö | Ö | 50.66 | >262.7 | |
| + blanc | - | - | | | |
| | | | | | |

^{* :} Erosion et ruisællement ont été mesurés à partir du 8.7.71 sur un total de 461mm de pluie 18 Rusa = 254.

Fauche et exportation de toutes les pailles le 15.5.74 avant le début des pluies

[:] Il y eut plusieurs incidents de telle sorte que les mesures sont évaluées par défaut.

Tableau All: Résumé annuel des observations à Gonse (Haute-Volta) sous savane arborée protégée (1970-1971) ou soumise aux feux - Pente 0.5%

| | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1968 [*] | |
|---|---------------------------------|-----------------------|-------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|--|---|
| Etat du couvert | Feux p | récoces | Protec intégr | | F | eux tar | difs | P _{lantat} io Eucalyptu Crebra de | s · |
| <u>Pluie</u> (mm) Rusa | 809 355 | 759 407 | 799 . 407 | 674 321 | 691 293 | 553 318 | 596 189 | | |
| Ruissellement : Lame ruis.(mm) | 24 | 17.1 | 2.5 | 1.5 | 62 | 88.9 | . 89 | BIROT-GAL 1969-19 | |
| KRAM 7 KR MAX 7 | 3 8.2 | 2.3 | 0.3 | 0.2 0.7 | 8.9 73.3 | 16.1 52.8 | 14.9 55.6 | 8% 24% | |
| Erosion: Turbidité (mg/1) Erosion (Kg/ha) S/E % | 203 149.4 33 | 170 46.8 63 | 237 18.2 33 | 155 47.3 5 | 582 408.3 88 | 295 303.9 86 | 306 312.3 88 | | |
| Drainage oblique: G1 25cm 1/parcelle G2 80cm " G3 140cm " G4 170cm " G5 210cm " | 30.1 6.3 0 0.1 11.3 | traces " " " | traces | traces | 0.3 0 0 61.8 94 | 0.4 0.1 0.4 0.1 | 0 0 0 0.7 2.3 | Extrêmes Oà30 Oà6 O O.1262 O à 94 | Moyen. 700mm 4.4 0.9 0.1 9 |
| Total 1/parcelle | 47.8 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 156.1 | 1.1 | 3 | 0à 156 | 29.7 |

ANNEXE II

SCHÉMAS DE BILANS HYDRIQUES EN ANNÉES NORMALE, DÉCENNALES HUMIDE ET SÈCHE À ADIOPODOUMÉ, KORHOGO ET GONSÉ

Tableau 6.7a : Schémas de bilans hydriques : Drain = Pluie - (ETP + Ruiss.) - Variation stock d'eau du sol

Ruiss. = 1% : Var. Max. stock eau sol = 200mm

Adiopodoumé forêt secondaire

| | JAN. | FEV. | MARS | AVRIL | MAI | JUIN | JUIL. | AOUT | SEPT. | OCT. | NOV. | DEC. | T O | TAL |
|-------------------|--------------|------|------------|--------------|---------------|----------|-------|------|-------|------|-------|----------|----------|---------------------|
| Année Moyenne | | | | | | | | | | | | | | |
| ETP | 109 | 114 | 130 | 123 | 115 | 79 | 83 | 79 | 82 | 110 | 116 | 109 | 1249 | 59 |
| Pluie | 30 | 66 | 112 | 143 | 295 | 698 | 268 | 42 | 77 | 167 | 152 | 81 | .2131 | 100 |
| Ruiss | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 7 | 3 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 22 | 1 |
| ETR brut | 30 | 65 | 111 | 123 | 115 | 79 | 83 | 42 | 76 | 110 | 116 | 80 | 1030+200 | 48.3→57.7 |
| DV ,brut | 0 | 0 | 0 | 18 | 177 | 612 | 182 | 0 | o | 55 | 35 | 0 | 1079 | 50.6 |
| corrigé | 0 | 0 | 0 | lo | 0 | 607 | 182 | 0 | l o | 55 | 35 | 0 | -200 | 9.4 |
| Var. Stock -200 | * | * | N . | ≯ +18 | <i>₹</i> +177 | / | > | • | | | | 7 | 879 | 41.3 |
| Année Humide 1962 | | | | | | | | | | | | | | |
| | 24 | | | | l | 1 | | | | | | | | |
| ETP | 96 | 99 | 114 | 110 | 111 | 66 | 70 | 79 | 83 | 97 | 99 | 83 | 1107 | 40 |
| Pluie | 25 | 15 | 149 | 169 | 168 | 1378 | 401 | 24 | 5 | 221 | 205 | 16 | 2776 | 100 |
| RUISS. | 0 | 0 | l! · | 2 | 2 | 14 | 4 | 0 | 0 | 3. | 2 | 0 | 28 | 1 1 |
| ETR Brut | 25 | 15 | 114 | 110 | 111 | 66 | 70 | 24 | 5 | 97 | 99 | 16 | 752+200 | 27.1 - 34,3 |
| DV brut. | 0 | 0 | 34 | 57 | 55 | 1298 | 327 | 0 | 0 | 121 | 104 | 0 | 1996 | 71.9 |
| corrigé | 0 | , 0 | 0 | 0 | 0 | 1244 | 327 | 0 | 0 | 121 | 104 | 0 | -200 | 7.2 |
| Var. Stock -200 | 7 | 70 | ×+34 | ≠+57 | +55 | +44 | | 7 | ¥ . | 7 | _ | 7 | 1796 | 64.7 |
| Année Sèche 1972 | | | | | | | · | | | | | | | |
| ETP | 123 | 120 | 140 | 125 | 114 | 90 | 77 | 76 | 83 | 118 | 108 | 111 | 1285 | 79 |
| Pluie | 9 | 120 | 101 | 83 | 254 | 518 | 145 | 17 | 20 | 186 | 101 | 82 | 1636 | 100 |
| Ruiss. | ló | 1 1 | l "i | 1 1 | 2.5 | 6.4 | 1.5 | o' | 0 | 2 | 1 ''i | 0 | 16.4 | 1 . 1 |
| ETR brut | 9 | 119 | 100 | 82 | 114 | 90 | 77 | 17 | 20 | 118 | 100 | 82 | 928+200 | 56.7 - 1680 |
| DV brut | ĺ | 0 | 0 | ō | 137.5 | 421.6 | 66.5 | 0 | ا ق | 66 | 0 | 0 | 691.6 | 56.7 → 68,9 42.3 |
| corrigé | ١٥ | lŏ | ٥ | Ö | 0 | 359.1 | 66.5 | o | ١ ٥ | 66 | lŏ | lő | -200 | 122 |
| Var. stock -200 | 1. | | | · | 1 | 333.1 | | 1 | 1 | 1 00 | i | 1 | 491.6 | 122 30.1 |
| Tari Stoom 200 | 74 . | A | × | 74 | 1 | / | | | 1 | | | | لتخششنا | انتتنا |
| | 1 | į. | { | ` | 1 | / | l | 7 | 74 | 1 | / v | A | Ŋ | 1 |

Tableau 6.7b: Schémas de bilans hydriques en année moyenne, décennale humide et sèche, dans la région de KORHOGO.

- Savane arbustive brûlée précocement, pente 3%, Ruiss. = 2 - 3 - 5%, variation du stock =150mm.

| | JANV. | FEV. | MARS | AVRIL | MAI | JUIN | JUIL. | AOUT | SEPT. | OCT. | nov. | DEC. | TOTAL | 7. |
|--|-------------------------------|--|--|--|--------------------------------|-----------------------------------|---|--|--|--|------------------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|
| Année Moyenne . ETP . Pluie . Ruiss. . ETR brut corrigé . Drain. brut corrigé Var. Stock = 150mm | 171 6 0 6 +150 ms | 155 15 0 15 de variat 0 | 149 52 0 52 ion de sto | 142 90 2 88 ck | 149 123 4 119 | 132 154 4 132 18 0 | 116 193 7 116 70 0 | 110 318 11 110 197 135 | 115 237 9 115 113 | 140 118 3.6 114.4 140 0 | 139 34 0 34 139 0 | 142 13 0 13 32 0 0 | 1660 1353 40.6 914.4 1064.4 398 248 | .1237 1007 3 78.7 18.3 |
| Année Humide . ETP . Pluie . Ruiss ETR brut corrigé . Drain. Brut corrigé Var. Stock = 150mm | 150 0 0 0 + 0 | 140 40 0 40 150 mm 0 | 157 90 0 90 de variat 0 | 141 34 0 34 ion de stoo 0 | 157 93 0.2 92.8 :k | 131 192 0.4 131 60.6 | 126 421 36.5 126 258.5 169.1 | 118 332 .42.2 118 171.8 171.8 | 118 202 6.9 118 77.1 77.1 | 131 161 0 131 30 30 | 138 158 0 138 20 20 | 136 0 0 0 0 | 1643 1723 86.2 1018.8 1168.8 618 468 | 95% 100% 5 67.8 27.2 |
| Année sèche ETP Pluie Ruiss. ETR brut corrigé Drain brut corrigé Var. Stock = 150mm | 180 0 0 0 + 0 | 189 0 0 0 150 mm de 0 | 150 0 0 0 variation 0 | 148 55 2 53 de stock 0 | 150 48 0 48 | 137 90 2 88 | 117 183 4 117 62 0 | 116 242 6 116 120 32 | 117 239 4 117 118 118 | 137 145 2 137 6 6 | 147 2 0 | 163 0. 0 0 | 1751 1004 20 678 828 306 .156 | 174% 100% 2% 82.5 15.5 |

Tableau 6.7c : Schémas de bilans hydriques en année moyenne, humide (1955) et sèche (1963) dans la région de Ouagadougou. Savane arborée, pente 17, Ruiss. 2.57 - 5 - 27, Var. max. stock eau du sol = 194mm.

| | | | | 1 | l | ł | | 1 | l | | | | T | OTAL |
|-----------------------|-------|------|------|------|------|------|----------|----------|-------|------------|---------|----------|----------------|------------|
| | JANV. | FEV. | MARS | AVR. | MAI | JUIN | JUIL. | AOUT | SEPT. | OCT. | NOV. | DEC. | mm | 7. |
| Année Moyenne | | | | - | | | | | | | | | | |
| ETP | 187 | 188 | 216 | 178 | 155 | 136 | 129 | 116 | 126 | 149 | 165 | 160 | 1905 | 2217 |
| Pluie | 0 | . 0 | i | 19 | 81 | 116 | 191 | 264 | 151 | 37 | 1, 0 | o | 860 | 100 |
| Ruiss. | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.5 | 3 | 5 | 7 | 4 | 0 | Ō | o | 21.5 | 2.5 |
| ETR brut . corrige | 0 | 0 | 1 | 19 | 78.5 | 113 | 129 | 116 | 126 | 337 149 | 0 82 | 0 | 619.5 813.5 | 72 94.6 |
| DV brut | 0 | О | 0 | 0 | 0 | 1 0 | 57 | 141 | 21 | 0 | 0 | 0 | 219 | 25.5 |
| corrigé | | | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | _ | _ | 1 | 2., | 23.5 |
| Var. stock = 194mm | • | • | | | 1 | 7 | <i>y</i> | <i>/</i> | 7- | `` | V | , | | |
| Année Humide | , | | | | | | | | | | | | | |
| ETP | 178 | 171 | 194 | 143 | 143 | 106 | 97 | 116 | 115 | 144 | 162 | 125 | 1694 | 163% |
| Pluie | 0 | 2 | 11 | 5 | 132 | 137 | 230 | 159 | 258 | 106 | 0 | 0 | 1040 | 100 |
| Ruiss. | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 7 | 12 | 8 | 13 | 5 | • | | . 52 | 5 |
| ETR brut | 0 | 2 | - 11 | 5 | 125 | 106 | 97 | 116 | 115 | 101 | 0 | 0 | 678 | 65.2 |
| corrigé | | | 1 | | ł | | 1 | į | 1 | 144 | 151 | 0 | 870 | 83.8 |
| DV brut | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 | 121 | 35 | 130 | 0 | 0 | 0 | 310 | 29.8 |
| corrigé | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 116 | 0 | 0 | 0 . | 0 | 116 | 11.2 |
| Var. stock = 194mm | 1 | ¥ | 74 | * | • | -8 | ~ | 1 | | 1 | 7 | <u> </u> | | |
| Année sèche | | | | | | | | | • | | | | | |
| ETP | 196 | 180 | 238 | 187 | 153 | 148 | 146 | 131 | 136 | 140 | 186 | 192 | 2033 | 309% |
| Pluie | 0 | 0 | 0 | 30 | 45 | 86 | 144 | 218 | 78 | 56 | 0 | 0 | 657 | 100 |
| Ruiss. | 0 | Ö | lŏ | 0 | 1 1 | 2 | 3 | 5 | ľ | l i l | Ö | ő | 13 | 2 |
| ETR brut | 0 | 0 | o | 30 | 44 | 84 | 141 | 131 | 77 | 55 | ŏ | ŏ | 562 | 85.5 |
| corrigé | | | [| | 1 | 1 | l | | . 136 | 78 | 0 | 0 | 644 | 98 |
| DV brut | 0 | 0 | 0 | 0 |) 0 | 0 | 0 | 82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 82 | 12.5 |
| corrigé | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | . 0 | 0 | 0 | 0 . | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Var. Stock = 194mm | - | * | 7 | • | • | * | * | جد ا | * | • | * | × | | |

ANNEXE III

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES ET PHYSIQUES DES EAUX

SUPERFICIELLES: MOYENNES PONDÉRÉES PAR LES VOLUMES

(MPV EN PPM), VALEURS FRÉQUENTES ET EXTRÊMES, TENEURS

MOYENNES ARITHMÉTIQUES ET DÉVIATIONS STANDARTS

(Tableaux A7.1 à 12)

==========

Tableau A7.1 : Caractéristiques des eaux sous forêt

ADIOPODOUME : 1966-1975

| | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---|--|---|
| | Teneurs m | oyennes por | dérées (en | ppm) : m | pv • | | · |
| | Pluie ciel ouv. s/forêt | Ruiss. | Drain. sup. ERLO | Drain. inf. ERLO | Drain.Sup. Lysi- mètres \(\text{haut} \) \(\text{bas} \) | Drain.Inf. lysi- mètres Haut bas * | Source** Jardin Botanique (ma) |
| Nombre échantillons | ∠43 à 53 ∠44 à 54 | - 9 9 à 104 | .50 à 152 | 32 à 99 | 44 ā 54 | 4+7 à 56 | 64 à 83 |
| pН | ر6.7 6.7 | 6.7 | 6.3 | 6.8 | ر _{6.6} | ر6.6 6.5 | 5.3 |
| Résistivité ohms.cm | 48.800 25.000 | 28.700 | 27.200 | 17.900 | ر ₃₉₀₀ | <5400 3000 | 38.100 |
| Ca | <3.8 €3.8 | 5.6 | 3.7 | 6 . 9 | ر ^{10.3} | (17.4 (33.8 | 2.4 |
| Mg | <0.4 2.2 | 2.7 | 1.8 | 5.1 | ζ ^{3.8} 10.9 | ⟨6.3 10.3 | .5 |
| K . | ر ^{0.3} 3.9 | 4.8 | 2.6 | 13.1 | ζ_3^2 | ζ ¹ 1.5 | .1 |
| Na | <0.82 | 1.91 | 2.64 | 3.12 | ζ ^{3.64} _{2.82} | ۲ ^{4.88} 3.95 | 2.43 |
| C | <1.3 7.4 | 11.2 | 8.7 | 8.1 | ⟨1.5 ⟨3.9 | ζ ^{1.4} | 1. |
| N tot. | | 4.5 | ·3.3 | 3.4 | ₹36.7 | ζ ^{21.8} 40.7 | 1.6 |
| n no ₃ | ⟨°.26 °.74 | 1.17 | .77 | 1.61 | ζ ₃₃ | \(\frac{21.3}{39.1}\) | .17 |
| n nh ₄ | < .24 .27 | .73 | .30 | .42 | ζ. ₃₇ | ر.39 43 | .16 |
| PO ₄ | د : ³² 87 | ζ ^{2.23} _{1.52} | . 67 | .77 | ζ.25 .25 | ۲ <mark>.</mark> 22 | 1.25 |
| Fe ₂ 0 ₃ | ⟨.04 ⟨.12 | .75 | .26 | .30 | د.03 د.05 | ۲.06 03 | .06 |
| A1203 | ر .08 ۱۱، | .28 | .28 | .35 . | ₹.11 ₹.47 | ر.31 د.10 | .07 |
| sio ₂ | ζ _{1.3} .7 | 3.5 | 7.2 | 8.3 | ₹5.7 8.4 | ₹5.8 7 | 8.4 |
| ************ | | | | | | | |
| so ₄ . | <1.2 2.5 | 3.1 | 5.1 | 6.2 | ر _{6.8} | ∠2.1 ∠2.7 | 1.4 |
| C1 | ζ ^{2.1} 4.9 | 2.8 | 4.4 | 6.6 | ζ ^{7.1} _{7.9} | ζ ^{7.7} 9.5 | 3.9 |
| CO3H | ∠ ¹⁵ . | 28.2* | 13.9 | 49.4* | | | 5.40* 12.6 |

CO3H a été estimé par calcul de la balance ionique.

ROOSE ,1979

^{* :} Aucune végétation ne pousse dans les lysimètres situés à I/2 pente (= bas)
Par contre un léger sous-bois se développe dans les lysimètres de haut de pente.

^{🖚 :} Ne disposant d'aucun débit de la source, on a reporté dans cette colonne les moyennes arithmétiques (ma) u es teneurs en soluble.

Tableau A7.2 : Caractéristiques des eaux sous forêt

Moyennes arithmétiques, déviation standard et valeurs fréquentes

- ADIOPODOUME : 1966-1975 -

| | | MOYENNES (m déviation s | | | VA | LEURS FREQU | ENTES | |
|--------------------------------|--|----------------------------|--|----------------------|---|-------------|----------------------------------|------------------|
| | PLUIE / à ciel ou- vert sous forêt | RUISS. | DRAINAGE / ERLO \ DV | SOURCE | PLUIE ciel ou- vert sous forêt | RUISS. | DRAINAGE CRLO DV | SOURCE |
| Nombre échantillons | √53 √54 | 100-102 | | 82-83 | | | | |
| рH | <6.7 ± .4 6.7 ± .4 | 7 [±] .4 | 6.8 ± .5 6.7 ± .5 | 5.3 [±] 0.5 | 6.3 à 7.3 6.2 à 7 | 6.5 à 7.7 | /5.8 à 7.6 | 4.6 a 6.5 |
| Résistivité | 49100 ± 27000 22400 ± 13000 | 15600 ± 13500 | (16000 [±] 12300 4900 [±] 3300 | | 15à110000 6à45000 | 2 à 52000 | (1 à 45000 1 à 12000 | 28000 a 50000 |
| Ca | <pre>< 1.96 ± 1.5 4.2 ± 2.5</pre> | 11.2 [±] 10.5 | \(\begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} 10.3 \div \begin{array}{c} 10.4 \\ 27.4 \div \begin{array}{c} 23.6 \end{array} \end{array} | 2.4 [±] .8 | (1.3 à 3 1.8 à 7 | 1 à 25 | \ \ \langle 1 \ \ta 40 \ \ 1 - 7 | 1 2 4 |
| Mg | | 6.3 [±] 7 | $\left\langle {}^{6.2}_{8.7} \stackrel{+}{=} {}^{5.6}_{8.4} \right.$ | .5 ± .3 | 0.1 à 1.2 .2 à 7 | 1 à 18 | 1 a.20 | .1 à 1.2 |
| K | \(\langle \frac{.52 \div .8}{4.8 \div 5.5}\) | | $\left\{\begin{array}{c} 12.5^{\pm}17.3 \\ 2.2 \pm 2.1 \end{array}\right\}$ | | (·1 à 1.4 .5 à 10 | 1 à 40 | 1 à 50 | .05 à .5 |
| Na | <pre>< '.99 ± 1 2.1 ± 1.9</pre> | 5.8 [±] 9.8 | $\binom{4.8 \pm 5.7}{5.3 \pm 5.6}$ | 2.4 + .3 | (.1 a 1.4 (.6 a 4 | 1 à 15 | 1 à 10 | 2 3 3 |
| С | <pre></pre> | 25 ~ 22 | $\binom{15.8^{\pm}14.8}{2.6^{\pm}2.5}$ | 1 + 1 | (.1 à 2.5 (.5 à 21 | 1 à 65 | 3 à 35 1 à 7 | 0.1 à 2 |
| N tot. | $\left\langle {}^{1.5}_{3}{}^{\pm}_{2.1}\right\rangle$ | 8.8 [±] 9 | $\left\langle {}^{7}_{27.5\stackrel{+}{=}24}^{18.5} \right.$ | 1.6 -1.9 | (.3 à 2.5 1 à 6 | 0.1 à 20 | (1 à 20 1 à 100 | 0.3 à 3 |
| PO ₄ | <.89 ± .7 | 1.7 - 1.6 | 1 ± 32 | | (.1 à 1 · (.1 à 1.5 | .2 à 3 | 0.3 à 5 | 0.1 à 2 |
| Fe ₂ 0 ₃ | $\left\langle {}^{.06}_{.14} \pm {}^{+}_{.12} \right\rangle$ | 1.7 ± 2.1 | $\binom{2.05^{\pm}2.3}{.06^{\pm}.09}$ | .06 - 0.0 | IX | .1 à 5 | 0.1 à 10 0.01 à 0.5 | 0.01 à .3 |
| A1 ₂ 0 ₃ | $\langle .06 \pm .08 \rangle$ | .57 ± .9 | $\begin{pmatrix} 1.03^{\pm}1.1 \\ .21 \pm .91 \end{pmatrix}$ | .07 [±] .07 | (.01 à .1 | .1 à 2.5 | 0.1 à .5 | 0.01 à .2 |
| SiO ₂ | $\begin{array}{c} 1412 \\ 12 \\ 12 \\ 12 \\ 12 \\ 12 \\ 12 \\ 12 $ | 6.9 [±] 5.9 | \\ \begin{pmatrix} 8.6 \\ \displaystyle - 6.2 \\ 6.6 \\ \displaystyle - 1/6 \end{pmatrix} | 8.4 1.7 | C.02 à 1.2 | .5 à 10 | (1 à 20 3 à 10 | 7 à 11 |

| | TENEURS MOYE | ENNES PONDE | REES (en ppm) | • | N | | |
|------------------------|---|----------------|---|----------------------|--------------|----------------------|---------------------|
| | Forêt 2aire Vers 150cm ERLO-DV | Ananas 1975 | Panicum non irrigué Fært. 1 2 3 | | | Dose s I 2 | Variation totale |
| Nombre échantillons | 155 | 60 | 80 | 80 [;] . | 54 x 2 | 54 x 3 | |
| Ca | 7 ~ 17 | 23.3 | 6.6 13.2 31.6 | 10.4 28.6 30.4 | 9.1 12.2 | 19.5 39.8 40.4 | 6 - 40 |
| Мд | 5 - 6.3 | 11.1 | 1.18 2.83 5.57 | 1.32 5.40 6.32 | 2.1 2.5 | 4 4.1 5.8 | 1 - 11 |
| K | 13 - 1 | 0.10 | 0.65 0.84 0.31 | 0.33 0.71 0.71 | 5.80 3.41 | 0.48 0.45 3.49 | 0.1 - 13 |
| c . | 8 - 2 | 3.5 | 2.49 2.73 2.88 | 4.23 4.88 3.58 | 1.4 1.5 | 1.1 1.3 1.8 | 1 - 8 |
| N tot. | · 3 - 22 | 21.4 | 1.4 1.2 2.5 | 5.2 13.1 16.2 | 8 7.9 | 7.9 12.6 23 | 1 ~ 23 |
| PO ₄ | .72 | traces | 0.19 0.22 0.25 | 0.30 0.24 0.19 | 0.06 0.05 | 0.05 0.07 0.13 | 0.017 |
| sio ₂ | 8.3 - 5.8 · | | | | 7.30 7.35 | 5.4 5.9 6.4 | 5 - 8 |
| CO ³ H | 15 ~ 30 | | | | 22.3 19.3 | 15.7 17.9 .1 | 15 - 30 |
| so ₄ | 6.2 - 2 | | 8.9 32.4 85.3 | 8.1 23 36.5 | 10.2 14.9 | 37.3 58 98.6 | ` 2 - 99 |
| C1 | 6 - 9 | | | | 2.4 3.9 | 5.3 9.4 14.8 | 2 - 15 |

| | Teneurs mcyer | mes (mpv en 1 | opm) | Valeurs fre | quentes | | Extrêmes |
|---|-----------------|-----------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------------|
| | RUISS. | DRAIN. supér ie ur | AGE OBLIQUE inférieur | RUISS. | DRAINAGE | inférieur | |
| | | | <u> </u> | | supérieur | Interteur | |
| Nombre échantillons | 130 à 149 | 100 à 123 | 70 à 88 | | | | · |
| T° | 23.9 | 24.5 | 24.5 | | | | 20 à 26° |
| pН | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.3 à 7.5 | 6.1 a 7.1 | 6 à 7 | 4 a 9 |
| Résistivité | 32300 | 21800 | 19600 | 5000 à 37000 | 1000 a 30000 | 8000 à 28000 | 1000 à 40000 |
| Ca | 3.7 | 6 | 6.5 | . 1 à 15 | 2 à 20 | 2 à 14 | 1 à 130 |
| Mg . | 2.3 | 3.3 | 3.8 | 1 à 8 | 2 a 20 | 1 à 11 | 0.3 à 90 |
| K | 4.6 (3.2) | 5.3 | 6.7 | 1 à 25 | 2 a 40 | 3 à 15 | 1 à 230 |
| Na | 1.2 (0.8) | 1.85 | . 2 | 0.3 à 6 | 1 à 10 | 1 à 5 | 0.2 à 75 |
| C | 11.5 | 11.3 | 11.4 | 6 à 40 | 5 à 30 | 6 à 31 | 1 à 163 |
| N tot. | 3.6 | 4.3 | 5.9 | 1 a 28 | 1 a 30 | 1 a 22 | 0.5 à 89 |
| N NO3 | 0.51 | 1.13 | 1.70 | 0.05 à 2 | 0.3 à 6 | 0.7 à 5 | 0.01 à 24 |
| n nh ₄ | 0.58 | 0.52 | 0.60 | 0.1 à 4 | 0.1 à 2.1 | 0.1 a 3.5 | 0.02 à 23 |
| : 2 3 4 3 y 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 | 2. 法未会的证明被完全不是证 | ************** | 3 杯勒里型水堆和油量接触水池 | | ****** | | - 大型水面等 N 电电话用电话用电话用 |
| PO ₄ | 0.84 | 1.10 | 0.98 | 0.2 à 4 | 0.4 à 2 | 0.1 à 2 | 0.01 à 17 |
| Fe ₂ 0 ₃ | 0.61 (0.4) | 1.44 (0.5) | 1.59 (0.7). | 0.2 à 2.5 | 0.2 à 3 | 0.2 à 2.5 | 0.1 à 11 |
| A1203 | 0.35 (0.25) | 0.99(0.4) | 1.03 (0.3) | 0.1 à 1.5 | 0.2 à 2.4 | 0.2 à 1.6 | 0.01 à 5 |
| sio ₂ | 2.2 (1.4) | 3.8 (3) | 5.2 (1.5) | 0.5 à 11 | 1 à 9 | 1.5 à 9 | 0.3 à 26 |
| | | | | | | | |
| so ₄ | 8.8 | 12.6 | 17.6 | 2 à 25 | 4 à 23 | 5 à 24 | 1 à 25 |
| C1 | 3.5 | 5.2 | 8.4 | 2 à 40 | 2 à 12 | 3 a 15 | 0.1 à 82 |
| co ³ H | 100/N-1 | 16/N=2 | 21/N=2 | | | | |

Tableau A7.5 : Caractéristiques des eaux de ruissellement & de drainage recueillies sous une forêt

de drainage recueillies sous une forêt

de drainage recueillies sous une forêt

de drainage recueillies sous une forêt

de drainage recueillies sous une forêt

| | Teneur pondé | rée (mg/l) | | Valeurs fréque | entes (mg/l) | | Extrêmes (mg/1) |
|------------------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | RUISS. | DRAINAGE H.supérieur | DRAINAGE H. inférieur | RUISE. | DRAINAGE H.supérieur | DRAINAGE H. inférieur | |
| T° (forêt | 23.6 | 23.7 | 23.8 | , | | | 22 à 25 23 à 26 |
| pH (forêt | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 5.7 à 7.5 | 6 à 7 | 5.8 à 6.8 | 5.2 à 7.8 |
| banan. | 6.5 | 6.3 | 6 | 5.5 à 7.2 | 5.5 à 6.2 | 5.2 à 6.7 | 5 à 7.8 |
| Re s. \forêt | 34000 | 23000 | 22500 | 3000 à 43000 | 8000 à 31000 | 8000 à 29000 | 2000 à 43000 |
| banan. | 7000 | 3700 | 3200 | 3000 à 12000, | 2000 à 4000 | 1400 à 3500 | 1000 à 16000 |
| Ca (forêt | 3.6 | 4.3 | 4.1 | 2 a 6 | 2 à 9 | 4 à 10 | 2 à 19 |
| banan. | 13 | 34 | 35 | 9 a 22 | 22 à 51 | 30 à 55 | 9 à 55 |
| Mg (forêt | 0.9 | 1.6 | 1.4 | 0.5 à 2 | 1 à 3 | 1 à 3 | 0.1 à 9 |
| banan. | 7.8 | 1.2 | 17 | 2 à 12 | 6 à 20 | 10 à 24 | 1 à 16 |
| K (forêt | 1.4 | 1.3 | 0.9 | 1 à 10 | 0.5 à 3 | 0.3 à 2 | 0.3 à 27 |
| banan. | 29 | 45 | 42 | 13 à 60 | 20 à 60 | 27 à 65 | 9 à 68 |
| Na (forêt | 1 | 1.8 | 2.4 | 0.6 à 6 | 1 a 3 | 1.8 à 4.6 | 0.5 à 7 |
| baman. | 2.2 | 3.1 | 3.8 | 1 à 6 | 2 a 9 | 2.5 à 10 | 0.7 à 10 |
| c. <pre>c. <pre>foret</pre></pre> | 9 | 15 | 9.7 | 6 à 20 | 5 à 20 | 5 à 18 | 4 à 42 |
| | 14 | 24 | 13 | 6 à 27 | 14 à 35 | 10 à 25 | 5 à 53 |
| N.totforêt | 5.4 | 2.3 | 2.2 | 1.5 à 9 | 1 à 16 | 1 à 5 | 1 à 23 |
| banan. | 8.7 | 25.2 | 24.5 | 3 à 26 | 8 à 30 | 10 à 41 | 2 à 98 |
| N-NO forêt | 0.4 | 0.9 | 0.9 | 0.1 à 4 | 0.2 à 4 | 0.2 à 2.3 | 0.1 à 5 |
| 3banan. | 4.8 | 14.7 | 17.8 | 1 à 10 | 3 à 27 | 4 à 33 | 0.5 à 57. |
| N-NH forêt | 0.6 | 0.25 | 0.2 | 0.1 à 1.1 | | 0.05 à 0.7 | 0.01 à 1.5 |
| 4banan. | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.05 à 1.5 | | 0.1 à 0.8 | 0.01 à 6 |
| PO ₄ Chanan. | 1.13 | 0.8 | 1 | 0.3 à 3.2 | 0.1 à 2.3 | 0.1 à 2.2 | 0.1 a 4 |
| | 1.85 | 1.2 | 0.9 | 0.3 à 3.6 | 0.4 à 2.4 | 0.2 à 2.5 | 0.1 a 3.7 |
| E 20 forêt | 0.4 | 0.35 | 0.27 | 0.01 à 1.5 | | 0.05 à 0.8 | 0.01 a 4 |
| 20 3banan | 0.6 | 0.9 | 0.6 | 0.01 à 3.3 | | 0.01 à 1.3 | 0.01 a 4 |
| Al ₂ 03 forêt banan. | 0.23 0.2 | 0.24 0.6 | 0.27 0.4 | 0.01 à 0.4 0.01 à 1.2 | | | 0.01 à 1.6 0.01 à 1.7 |
| SiO ₂ (forêt | 4 | 5.4 | 5.6 | 0.8 à 7.4 | 1.8 à 7 | 3 à 7 | 0.6 à 18 |
| banan. | 4.7 | 9.6 | 9.4 | 0.1 à 13 | 4.5 à 15 | 5 à 13 | 0.1 à 19 |
| SO ₄ /forêt | 3.5 | 5 | 3.6 | 0.5 à 4 | 2.5 à 13 | 1.5 à 5 | 0.5 à 19 |
| | · 25 | 37 | 40 | 2 à 40 | 10 à 72 | 10 à 86 | 0.5 à 86 |
| Cl (forêt | 1.2 | 2.8 | 3.7 | 1 à 5.5 | 2.4 à 6 | 2.5 à 4.5 | 1 a 11 |
| baṇan. | 20 | 51 | 67 | 10 à 42 | 17 à 125 | 42 à 140 | 10 a 150 |
| CO ₃ H (forêt banan. | 12.5 | 12.6 | 11.4 | | | | |

Les teneurs sont exprimés en mg/l - la température: en degrés centigrades, le pH et la résistivité (ohms.cm).

| | Teneur s | moyennes (1 | mpv en ppm) | | | | Teneurs | fréquentes |
|--------------------------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------|---------|----------|---------|------------|
| | RUISS. | 1DRAII | NAGE OBLIQU | E | TRAIN. | VERTICAL | Mini. | Maxi. |
| | | 20-50cm | 100-150 | | 40+80cm | 140+180 | | |
| Nombre échantillons | 164 | 40-43 | 35-42 | 5-9 | 124-136 | | | |
| pН | 6.7 | 6.7 | 7 | 7.1 | 6.8 | 7 | 5.8 | 7.7 |
| Résistivité | 18100 | 9500 | 77 00 | 5400 | 4700 | 5500 | 25000 | 2000 |
| Са | 7 | 8.2\$ | 11.8 | 12.3 | 13.7 | 6 | 2 | . 22 |
| Mg | 1.9 | 5** | 6.5 | 12.1 | 11.4 | 11.3 | 0.5 | 21 |
| K | 5.1 | 19.6 | 16.4 | 37.5 | 11.4 | 3.8 | 1 | 62 |
| Na | 0.67 | 3.74* | 2.7 | 8.8 | 2 | 3.3 | 0.4 | 20 |
| c | 12.9 | 14.6* | 7.3 * | 11.2 | 2.9 | 1.7 | i | 36 |
| N tot | 4.4 | 6.1* | 5.9 [*] | 12.9 | 22 | 16.4 | 3 | 29 |
| n no ₃ | 2.40 | 3.5* | 3.7 [*] | 8.9 | 18.4 | 14 | 1 | 23 |
| N NH ₄ | 0.72 | 0.67 | 0.24 st | 0.23 | 0.36 | 0:40 | 0.1 | 1.5 |
| PO ₄ | 1.27 | 0.97 | 0.38 | 0.49 | 0.16 | 0.09 | 0.1 | 3.3 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.34 [*] | 0.55 | 0.34 | 0.41 | 0.04 | 0.05 | 0.02 | 1.6 |
| A1 ₂ 0 ₃ | 0.20 [*] | 0.41 | 0.24 | 0.35 | 0.07 | 0.05 | 0.01 | 0.7 |
| S iO ₂ | 3.6* | 11.5 | 13.9 | 15.5 | 17 | 14.4 | 1.4 | 21 |
| so ₄ | 5.7 | 10.7 | 2.8 | 5.3 | 8.4 | 4.5 | 0.5 | 34 |
| 4 C1 | 3.2 | 10.4 | 6.4 | 6. 5 | 3.5 | 8.4 | 1 | 34 |
| co₃∺ ^{≭≭} | 18 | 40 | | | - | | | |
| ~~3 ^m | 10 | 40 | 64 | 125 | 23 | 27 | | |

^{* :} teneurs trop fortes éliminées : 67 et 68

ROOSE-JAD IN (11/79)

[:] estimation de HCO3 par balance ionique

| | | Teneurs | moyennes | (mpv en p | pm) | | | Valeur | s fréquentes |
|--------------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------|--------------------------------------|--|--------|--------------|
| | | RUISS. | IDR AINA | GE OBLIQU | E | DRAIN. V | ERTICAL | MINI. | MAXI. |
| | | | 20-50ඎ | 100-150 | 190 | 40+90 | 140+180 | | |
| Nombre échantill | ons (c | Z127à130 36à39 | <pre>21a24</pre> | \(\frac{20a26}{14a16}\) | (5à9 1 1 | <pre>59a65 65a71</pre> | 65a71 67a73 | | · |
| pН | ζ ^f _c | ζ ^{6.8} 6.4 | ۷ ^{6.7} | <7.1 6.9 | 7.1 ((7.6) | ر _{6.6} | . 27.1 . 6.9 | 5.8 | 7.7 |
| Řésistivi | té (^f | ζ ¹⁶⁶⁰⁰ 23000 | <9300 9800 | 6600 9600 | (5400 (2000) | 4600 4700 | く ⁴⁵⁰⁰ く ₆₅₀₀ | 25000 | 2000 |
| Ca | ر f د | ζ ^{7.7} 4.6 | <pre>6.9* </pre> | <12.6 10.5 | ζ ^{12.3} 15.3 | ζ ¹⁶ 11.5 | (8.8 3.3 | 2 | 22 |
| Mg | (fc | <1.8 2.2 | < 5.8* 4.4 | <3.7 | ۲ ^{12.2} | ζ ^{10.8} 11.9 | (¹⁴ 8.5 | 0.5 | 21 |
| ĸ | ζ ^f _c | ζ ^{4.1} _{8.3} | $\zeta_{18.7}^{20.3}$ | ₹18.7 12.2 | ζ ^{37.9} | ۲ _{14.3} | ر 6.1 1.4 | 1 . | 62 |
| Na . | ۷°c | ⟨0.62 ⟨0.82 | ζ ^{4.36} _{3.25} | ζ ^{2.7*} _{2.8} | 8.68 ((12.6) | ζ ^{1.86} _{2.13} | ζ ^{3.28} ζ3.37 | 0.4 | 20 |
| c · | رf د | ر اعدو اعدو | <pre> </pre> <pre></pre> | ⟨6.5 ⁴ 7.8 | (10.7 (43.6) | ζ ^{2,5} ζ ^{3,3} | ζ ² _{1.4} | 1 , | 36 |
| N tot. | ₹ C | ۲ <mark>8.8*</mark> | <7.8* 4.8 | ۲۰5 * 4.9 | ζ ^{12.8} (17.8)- | ر ^{23.8} 20.3 | ر ^{19.3} ر _{13.5} | 3 | 29 |
| N NO3 | ۷¢ | ζ ^{2.46} _{2.15} | ۲ ^{4.30*} | ۲ ^{3.4*} | , 8.8 (16.5) | ر 20.29 16.61 | ζ ^{16.78} | 1 | 23 |
| n nh ₄ | ⟨cfc | ζ ^{0.75} 0.63 | ⟨°.76 °0.55 | ζ ^{0.29} 0.19 | (0.22 (0.26 | 0.26 0.45 | ζ 0.47 ζ 0.33 | 0.1 | 1 . 5 |
| PO ₄ | ۷ ^f c | ζ ^{1.27} | (1.04 (0.88 | ۷ <mark>0.34</mark> 0.47 | (0.44 (3.23) | ر 0.10 0.22 | ζ ^{0.07} 0.11 | 0.1 | 3.3 |
| Fe ₂ 03 | ۲ ^f c | ⟨1.18 [★] 0.33 | ₹. 52 ₹. 58 | د.34 د.34 | ⟨.40 ⟨.80 | ر 0.03 0.04 | ر0.06 0.04 | 0.02 | 1.6 |
| A1 ₂ 0 ₃ | <cff< td=""><td>ζ^{0.59*} 0.19</td><td>۲^{.37} 46</td><td>د.26 د.20</td><td>(.66</td><td>ر 0.04 0.11</td><td><0.05 0.05</td><td>0.01</td><td>0.7</td></cff<> | ζ ^{0.59*} 0.19 | ۲ ^{.37} 46 | د.26 د.20 | (.66 | ر 0.04 0.11 | <0.05 0.05 | 0.01 | 0.7 |
| SiO ₂ | ۲ ^f | ⟨7.4 [*] 2.4 | ζ ^{10.6} _{12.6} | ζ ^{14.1} ζ _{13.6} | (15.6 (11.2 | ر18.5 1 5. 6 | ۲ ^{13.9} | 1.4 | 21 |
| so ₄ | ζfc | ر6.1 5.5 | ⟨9.8 ⟨11.7 | ₹2.3 ₹3.6 | (4.7 (34) | ر 3.7 12.5 | (6.7 2.3 | 0.5 | 34 |
| C1 | ۲ ^f | ر _{2.5} | ζ ₁₀ ^{11*} | ۲ ^{4.9} 9.1 | , 6.3 (16.4) | 3.5 (₍₃₃₎ | ر 4.9 ر 12 | 1 | 34 |
| CO3H | ۷ ^f c | ر18.6 17.1 | ۲ ^{42.1} 37.4 | د89.3 ر39.3 | 12,5 | 22.6 | . 27.2 | | |

valeurs 67 et 68 trop élevées éliminées

ROOSE-JADIN (11/1979)

 $[\]star\star$: $\mathrm{CO_3^H}$ estimé par différence ionique

f = forêt - c = cacao + recru forestier dans les interlignes plus engrais

^{() =} valeurs aberrantes

Tableau A7.8 : Caractéristiques des eaux de BOUAKE

- savane arborée : 1967-1973 -

- cultures riz - maïs/ coton fertilisés (IRAT, 1974)

| | Teneurs moy | vennes (mp | v en ppm | | Teneurs | fréquentes | | |
|--------------------------------|-------------|-------------|------------------------|---|-------------|------------|-------|---------|
| | RUISS. | DRAIN. | OBLIQUE | DRAINAGE VERTICAL culture fertilisée | Dr'AIN. "VI | ERTICAL | MINI | MAXI |
| | | 25-50cm | 100-180 | 45 à 80 10 l y s. | 45-90 | 120-170 | | |
| N | 47 à 49 | 11 à 13 | 3 à 4 | 1973-76 | 44 à 50 | 48 à 54 | | |
| pН | 6.8 | 6.8 | 6.6 | - . | 6.7 | 6.8 | 6.4 | 7.2 |
| Résistivité ohms.cm | 27700 | 19000 | 17300 | | 32600 | 25600 | 10000 | 36000 |
| Ca | 4.5 | 3.4 | 3.5 | ** 13 à 30 | 2 | 2.2 | 1.5 | 8 |
| Mg | 1.2 | 2.5 | 2.8 | 3 à 10 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 4 |
| K | 4.1 | 12.3 | 14.4 | 1 à 3 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 18 |
| Na | 0.66 | 2.39 | 1.93 | 1.482.6 | 0.81 | 0.96 | 0.4 | 4 |
| С | . 8.5 | 11.4 | 10.5 | ** | 2.3 | 1.4 | 1 | 20 |
| N tot | 4.5 | 5.3 | 1:7 | 15 à 25 | 1.9 | 1.9 | 0.6 | 10 |
| n no ₃ | 0.46 | 0.46 | 0.11 | 10 à 23 | 0.74 | 0.93 | 0.1 | 3 |
| n nh ₄ | 0.25 | 0.31 | 0.20 | (0.9) | 0.14 | 0.13 | 0.1 | 0.6 |
| PO ₄ | 1.02 | 1.09 | 0.99 | | 0.38 | 0.26 | 0.3 | 2.4 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.59 | 2.03 | 1.62 | | 0.07 | 0.05 | 0 05 | 3 |
| A1203 | 0.51 | 2.97 | 0.14 | | 0.09 | 0.04 | 0.03 | 4 |
| sio ₂ | 5.1 | 8.4 | 5.7 | | 2.4 | 2.8 | 1.5 | 10 |
| so ₄ | 0.8 | 5.4 | 4.3 | | 1.8 | 1.2 | 0.5 | 6 |
| c1 co ₃ н* | 1.1 22* | 3.5 33** | 2.9 40 [±] | | 1.6 2* | 0.8 4* | 0.4 | 4 35 |

^{** :} tiré des rapports 1973-1976 IRAT-C.I.

^{* :} CO3H calculé par balance ionique.

Tableau A7.9 : Caractéristiques des eaux recueillies à KORHOGO •

Plue - Ruissellement - Drainage vertical et oblique - Source -

. 1967 - 1975 (ROOSE, 1979)

| Teneurs moyennes pondérées/volumes (mp en mg/1) | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|-----------------------|------------------|---------------------------------|---|---------------------------|----------------------------------|----------------|--------------------------|-----------------------------------|
| | | Teneurs 1 | moyennes p | ondérées/a | rolumes (mp | en mg/1 |) | | -1 | Variation totale |
| | | PLUIE air libre | PLUIE s/herbe | RUISS. | DRAIN Horiz <u>on</u> oblique | Sup. | DF Horizon oblique | inf. vert. | SOURCE Dokaha (ma) | TOUS TYPES D'EAUX CONFONDUS |
| T° | ζ ^{Sav.} | _ | - | 22.9 | ζ ^{22.7} d. 1 | 23 23.6 | <22.8 d.2 | 23.1 23.9 | | 20 à 29° C |
| рН | ζ ^{Sav.} | 6 | 6.2 | ₹6.9 6.8 | ⟨6.6 d.1 | 6.8 6.6 | ⟨ 7 d.2 | 6.9 6.8 | 6.1 | 5.5 à 7.8 |
| Résist. | ζ ^{Sav.} Cult. | 68 900 | 54000 | ∠46900 54900 | ⟨35800 d.1 | 28100 18000 | ⟨¹6300 d.2 | 30100 16600 | 44600 | 10000 à 80000 |
| Ca | ζ ^{Sav} . | 1.9 | 2.4 | ⟨2.1 1.9 | ⟨2.6 d.1 | 2.6 3.6 | ⟨6.2 d.2 | 2.1 5.2 | 1.7 | 0.8 à 3.7 |
| Mg | ζSav. ζCult. | .1 | .4 | ∠.6 .2 | ζ _{d.1} ^{1.2} | .6 .6 | ر ³ d.2 | .3 | .4 | 0.1 à 2 |
| ĸ | ζ ^{Sav.} | .3 | 1.3 | ζ ^{1.33} | ⟨3.2 d.1 | .4 | ζ ^{13.8} _{d.2} | .3 | 1 | 0.1 à 13 |
| Na | S av. | .15 | .20 | ζ.35 ζ.13 | ⟨d.1 | .34 .43 | ζ _{d.2} ^{1.57} | .22 | 1.80 | 0.1 a 2 |
| мо. | ζ ^{Sav} . | 1.07 | 3.8 | ζ ^{5.2} _{1.4} | ر5.2 ط.1 | 1.5 | ⟨4.9 d.2 | 1.1 | 1.2 | 0.2 à 12 |
| N tot | ⟨Sav. Cult. | .9 | 1.1 | ζ _{0.9} | ζ _{d.1} ^{1.5} | .9 2 | ⟨3.4 ⟨d.2 | .9 1.9 | .8 | 0.1 à 8 |
| и ио3 | <pre> ⟨Sav. Cult. </pre> | .48 | .21 | ⟨.20 ⟨.54 | ζ _{d.1} .38 | .12 0.94 | ⟨1.96 d.2 | .06 | 0.03 | 0.01 à 5 |
| N NH ₄ | ζ ^{Sav.} cult. | .26 | .10 | ⟨.13 ⟨.16 | ⟨.12 d.1 | .16 .37 | ⟨d.2 .47 | .09 .18 | 0.09 | 0.01 à 1.4 |
| PO ₄ | ζSav. Cult. | .30 | .38 | ζ: ⁷⁴ 32 | ر -78 ط. ا | .36 .42 | ζ ^{1.47} _{d.2} | .32 .25 | 0.92 | 0.1 à 3 |
| Fe ₂ 0 ₃ | ζSav. | .13 | .12 | <.30 <.09 | <d.1< td=""><td>.13 .35</td><td>⟨d.2</td><td>.14</td><td>0.14</td><td>0.01 a 2</td></d.1<> | .13 .35 | ⟨d.2 | .14 | 0.14 | 0.01 a 2 |
| A1 ₂ 0 ₃ | ζSav. Cult. | .07 | •07 | ۲ <mark>.38</mark> | <d.1 98<="" td=""><td>.38 .22</td><td><1.16 d.2</td><td>.10</td><td>0.16</td><td>0.01 a 3</td></d.1> | .38 .22 | <1.16 d.2 | .10 | 0.16 | 0.01 a 3 |
| sio ₂ | ⟨Sav. Cult. | .7 | 1.4 | ζ ^{3.1} | ⟨7.9 d.1 | 5.8 5.7 | ζ ^{6.4} d.2 | 6.2 6.1 | 19.2 | 0.1 à 23 |
| so ₄ | ⟨Sav. Cult. | 1 | 1.7 | ζ ^{2.1} _{2.4} | ⟨3.8 d.1 | 4.3 12.6 ³² | ζ ⁸ .8 d.2 | 1.6 10.8* | 2.3 | 1 2 8 |
| Ċ1 | ⟨Sav. Cult. | .3 | .8 | ζ ¹ .3 | <3.3 d.1 | 1.6 | ⟨3.8 d.2 | 1.2 | 0.3 | 0.1 a 9 |
| HCO3 | رSav. Cult. | 4.8 | 6.2 | ζ _{8.1} ^{9.2} | ۷ ^{9.6} | 20.9 14.2 | ζ ^{20.2} d.2 | 20.2 20 | 8.6 | 4 à 30 |

Tableau A7.10: Caractéristiques des eaux de ruissellement & de drainage

Jachère jeune & sorgho fertilisé en parcelle P7 -

- SARIA P7: :1971 à 1974 -

| <u> </u> | | Teneur; por | dérées (mg/1 |) | Valeurs f | réquentes (1 | mg/1) | Variation totale |
|---------------------|-----------------------------|--|--|---------------|------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|
| | | RUISS. | DRAINAGE hor.sup. | NAPPE (ma) | RUISE. | DRAINAGE hor.sup. | NAPPE | |
| T° | | - | - | ٠ | 22 à 25° | 23 à 27° | - | 20 à 29° |
| pН | ∠jach. ∠Sorg. | 6.4* 6.2* | 6.5 [±] 7.2 [±] | 6.9 | 5 à 7 | 5.5 à 7.5 | 6.5 à 7.3 | 5 à 7.8 |
| Résistivité | Jach. Sorg. | 76540 [*] 40130 [*] | 24740 [±] 10950 [±] | 21850 | 4 à 60000 2 à 30000 | 2 à 21000 1 à 18000 | 20. à 24000 | 1000 à 108000 |
| Ca | ζ ^{Jach} . | 2.32 4.04 | 7.7 12.7 | 3.4 | 1 à 4 2 à 8 | 1.5 à 14 8 à 20 | 3 à 4.2 | 1 a 25 |
| Мg | ζJach. ζsorg. | 0.47 1.17 | 2.4 3.2 | 0.6 | 0 à 2 0.1 à 3 | 0.1 à 9 1 à 10 | 0.4 à 0.7 | 0.1 à 15 |
| ĸ | Jach. Sorg. | 1.14 4.11 | 2.9 3.1 | 1.3 | 0.5 à 2 0.8 à 10 | 0.6 à 4 1.3 à 5 | 1 à 1.5 | 0.5 à 20 |
| Na . | ζJach. Sorg. | 0.38 0.47 | 4.7 5.4 | 6 | 0.01ā0.5 0.1 à 1 | 0.4 à 11 2.6 à 11 | 5.9 à 6.2 | 0.01 à 15 |
| м.о. | ζ ^{Jach.} Sorg. | 2.49 2.57 | 1.1 | 0.7 | 1.5à4 1.2 à 5 | 0.1a2.8 0.3 a 3 | 0.2 à 1.4 | O.1 2 8 |
| N tot | Jach. Sorg. | 1.11 | 1.9 7.8 | 1.34 | 0.3à2.5 0.5à3 | 0.2ā5 0.2ā15 | 0.4 à 2 | 0.2 à 20 |
| PO ₄ | Sorg. | 0.91 1.89 | 0.13 0.08 | 0.15 | 0.2a2.5 0.3a3.5 | 0.1ã0.6 0 ã 0.5 | 0. 05à0.25 | 0.01 à 5 |
| Fe 2 ⁰ 3 | ⟨Jach. Sorg. | 0.15 0.49 | 0.07 0.03 | 0.15 | 0.01ā0.6 0.01ā2.5 | 0 à 0.3 0 à 0.2 | 0.02à0.6 | 0.01 à 3.8 |
| A1203 | ⟨Jach. ⟨Sorg. | 0.05 0.52 | 0.11 0.04 | 0.01 | 0 à 0.15 0.1à1 | 0 à 0.4 0 à 0.2 | 0.0120.06 | 0 à 1.5 |
| sio ₂ | ⟨Jach. ⟨Sorg. | 1.05 2.43 | 16.3 15 | 35.6 | 0.5a2.5 1 a 4 | 10 à21 9 à 20 | 30à37 | 0.5 à 23 |
| so ₄ | ∠Jach. | 2.14 11.14 | 3.4 2 | 1.6 | 1 à 5 3 à 18 | 0.3 a 6 0.7 a 5 | 0.6à3.7 | 0.3 ā 40 |
| Cl | Jach. Sorg. | 0.75 4.31 | 2.3 1.9 | 1.9 | 0.1à1.5 0.5à 5 | 0.5à4.5 0.5à4 | 1.5a2.5 | 0.1 à 35 |
| созн | 6- | | | 27.9 | | | 25 à 31 ° | |

Tableau A7.11 : Caractéristiques des eaux de ruissellement et de drainage
________ Jachère vieille et sorgho fertilisé sur sol gravillonnaire

- SARIA protection : 1971-1974 -

| | | | . 1 | | | |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------|--|-----------------|--------------------------------|------------------|
| | | Teneur por | ndérée (mg/1) | Valeurs fréques | ntes (mg/1) | Variation totale |
| | | RUISS. | Drainage h. supérieur | RUISS. | Drainage h.supérieur | - |
| T° | | - | - | 23 à 26° | 23 à .28° | 22 à 29° |
| pН | Jach. | 6.1 [*] | 7.5* - 7.3 | 5 à 7 | 7.1 à 7.8 5.5 à 7 .5 | 5 à 7.8 |
| Résist | Jach. Sorg. | 36300 [*] | 6.620 [*] 7.420 [*] | 1500à40000 | 3 à 18000 3 à 14000 | 1000 à 63000 |
| Ca . | Sorg. | 3.32 | 31 20 | 2 à 4 | 10 à 52 10 à 32 | 2 à 55 · |
| Mg | (Sorg. | 0.73 | 6.3 5 | 0.2 à 1 | 1.5 à 16 2 à 16 | 0.2 à 48 ~ |
| K. | ζ Jach. Sorg. | 2.41 | 4.9 6 | 2 a 5 | 1 à 11 1 à 15 | 0.5 à 22 |
| Na | ζ ^{Jach} . Sorg. | 0.45 | 1.9 4.6 | 0.1 à 1 | 1.2 à 2.5 1.4 à 13 | 0.1 à 27 |
| м.о. | Jach. | 4.72 | 1.3 1.9 | 1.5 à 6 | 0.7 à 3.4 0.8 à 5 | 0.7 à 7 |
| N tot | ζ _{Sorg} . | 1.47 | 2.8 2.9 | 1 2 2.4 | 0.2 à 3 0.2 à 8 | 0.1 à 13 |
| PO ₄ | ζ _{Sorg} . | 1.45 | 0.1 0.2 | · 0.5 à 1.2 | 0 à 0.2 0.à 0.4 | 0 à 1.5 |
| Fe2 ⁰ 3 | Jach. Sorg. | 0.11 | 0.05 0.08 | 0.01 à 0.2 | 0 à 0.2 . 0 à 0.3 | 0.01 à 0.3 |
| A1 ₂ 0 ₃ | ζSorg. | 0.01 | 0.03 0.10 | 0.01 | 0 à 0.4 0 à 0.6 | 0.01 à 0.7 |
| SiO ₂ | ζSorg. | · 0.90 | 14.3 11.7 | 0.5 à 2 | 11 à 18 9 à 17 | 0.5 à 20 |
| so ₄ | Jach. (Sorg. | 2.04 | 1.8 3 | 1.5 à 3.5 | 0.7 à 5 0.1 à 8.5 | O.1 a 46 |
| Cl | Jach. Sorg | 0.88 | 2.3 3 | 0.2 à I | 0.3 à 8 1.7 à 11 | 0.2 a 28 |
| | | | | | | |

Les teneurs sont exprimées en ppm ou mg/l, la température en °C., la résistivité en ohms.cm.

^{* :} moyenne pour 1974 (mesures de pH effectuées sur place)

| · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | Teneur | pondérée(👊 | g/1) | Valeurs | fréquentes | s (cg/1) | Variation totale |
|---------------------------------------|--------|--------------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| | RUISS. | DRAINAGE h.sup. | DRAINAGE h. inf. | RUISS. | DRAINAGE h. sup. | DRAINAGE h. inf. | |
| T° | _ | - | - | 23 à 27 | 25 à 28 | 26 à 27 | 22 à 30 |
| pН | 6.4 | 7 | 6.6 | 6 à 7.3 | 6.5a7.5 | | |
| Résistivité | 31800 | 27700 | 25900 | 15à45000 | 3à30000 | 2à27000 | 1000285000 |
| Ca | 4.9 | 4.8 | 7.3 | 1 & 8 | 3 à 10 | 5 à 14 | 0.3 à 20 |
| Mg | 0.7 | 0.8 | 1.6 | 0.1a3 | 0.3a3 | 0.5ã5 | 0.05 à 15 |
| K | 1.8 | 1.7 | 3.3 | 0.283 | 1 à 4 | 1 à 6 | 0.1 à 16 |
| Na | 0.2 | 0.6 | 1 | 0.1a1.5 | 0.3ã2 | 0.5 à 3 | 0.05 à 12 |
| M.O. | 3.2 | 3 | 4.5 | 1 à 12 | 1 à 9 | 2 à 6 | 1 à 20 |
| N tot. | 2.8 | 2.4 | 2.3 | 0.3a12 | 0.3à12 | 0.3ãS | 0.1 à48 |
| P0 ₄ | 1 | 0.8 | 0.7 | 0.2à2.5 | 0.1a1.5 | | 0.17/ |
| • |] | | | | | · " | 0.1à4 |
| Fe ₂ 0 ₃ | 0.10 | 0.17 | 0.10 | 0.05à0.9 | 0.05à1 | 0.05à0.5 | 0.05à4 |
| A1203 | 0.08 | 0.30 | 0.06 | 0.0120.5 | 0.05à1 | 0.01ã0.5 | 0.01ā4 |
| sio_2 | 3.9 | 4.4 | 6.5 | 0.238 | 0.5210 | 0.7112 | 0.2à30 |
| so ₄ | 1.3 | 3 0.4 | 6 0.8 | 0.6 à 2 0.01à3 | 1 à 6 0.2à2 | 2 à 7 0.5à2 | 0.5 à 31 0.01 à 33 |

ANNEXE IV

COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS DE LA TERRE ÉRODÉE, DES TERRES REMONTÉES EN SURFACE PAR LA MÉSOFAUNE ET DES HORIZONS SUPERFICIELS ENVIRONNANTS

(Tableaux A7.13 à 19)

Tableau A7.13 : Comparaison entre la terre erodée et le sol superficiel en place

sous mais (E = 90000kg/ha dont 11% de suspension) et forêt pente 65%

Forêt pente 11% (E = 50kg/hadont 80% suspension) (E=450kg dont 33.3% de suspension)

. Forêt pente 65% (E = 450kg dont 33.3% de suspension).

| | CULTURE pente | - | | FORET (| | | | FORET (R2 pente 6 | | TURRICULES R3 |
|---|------------------------------------|--|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| ADIOPODOUME | Erosion | sol 0-10cm 2.73* | Indice Sélect. 1/3 | Erosion | So1 . 0-7 cm | Indice sélect. 4/5 | Erosion | sol 0-5cm | Indice Sélect. 7/8 | KJ |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| GRANULOMETRIE | | | | | | | | | | |
| Argile 7 Limon fin 7 Limon grossier 7 Sable fin 7 Sable grossier 7 | 14.1 3.7 2.1 16.6 63.5 | 11.4 2.8 2.2 29.5 54.1 | 1.24 1.32 0.95 0.56 1.17 | 43.4 26.3 4.5 12 13.8 | 11.7 2.6 2 23.5 60.2 | 3.71 10.1 2.25 0.51 0.23 | 28.4 12.5 4.7 15.8 38.6 | 12.3 1.9 3.2 24.J 58.5 | 2.31 6.58 1.47 0.66 0.66 | 15.2 2.7 3.2 39.7 39.2 |
| MATIERES ORGANIQUES Carbone °/ Azote °/ C/N Acides humiques °/ fulviques " Taux Carbone humifié Z | 20.01 1.59 | 18.5 10.8 0.84 12.9 1.45 1.46 | 1.85 | 260.6 21.56 23.98 25.30 | 23.8 1.51 2.87 2.28 | 10.9 14.2 8.36 11.1 | 92.87 6.46 14.4 14.6 6.17 | 36.34 2.60 14 1.90 1.94 | 2.56 2.48 7.7 3.2 | 52.56 30.49 2.75 11.1 4.87 8.47 |
| CATIONS ECHANGEABLES Ca mé/100g. Mg K Na C.E.C. pH eau | 1.92 0.57 0.31 0.14 | 0.82 0.46 0.14 0.01 3.63 | 2.34 1.25 2.22 14 | 10.5 5.38 0.61 0.44 | .45 .90 .11 .03 | 23.4 6 5.5 14.5 | 11.4 5.57 0.50 0.11 23.2 | 6.40 3.90 0.17 0.06 14.7 | 1.78 1.43 2.94 1.89 1.58 | 1.23 1.54 0.13 0.05 |
| ELEMENTS TOTAUX (triaci Perte au feu % Résidus insolubles Sidice combinée % Al 0 % | de) | | | 7 3.8 | 5.1 82.1 6.2 4.1 | 1.13 | 8.8 7.47 | 5.70 3.58 | 1.54 2.08 | 7.5 78.9 5.8 4.5 |
| Fe ₂ 0 ₃ \ \text{total} \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ | 0.76 | 0.64 0.15 | 1.19 | 3.1 - 0.55 1.59 0.39 | 2.4 1.3 0.8 0.710 0.070 | 1.3 - 0.7 2.24 5.60 | 0.60 2.423 0.6 | 1.85 0.43 1.839 0.1 | 1.66 1.40 1.32 6 | 2.52 1.52 0.38 0.600 0.120 |
| Ca en mé/100g. Hg l' K " Na " | 2.63 1.86 1.25 0.51 | 2.08 2.70 1.20 0.50 | 1.26 1.09 1.03 1.02 | 12.26 5.3 1.3 0.58 | 0.68 1.56 0.54 0.42 | 18 3.4 2.4 1.4 | 16.57 5.77 1.90 0.80 | 8.90 4.50 0.55 0.70 | 1.86 1.28 3.45 1.14 | 1.65 2.85 0.50 0.26 |

^{* :} analyses 3 x 15 priæs.em 2.73 (vbir tableau 51.3, ROOSE 1973 Thèse)
Toutes les granulometries ont été ajastées à 100% de matières minérales.

[:] Les indices de sélectivité sont inférieurs à la réalité puisqu'on a négligé les pertes en solubles dans les eaux de ruissellement.

Les teneurs en fines, matières organiques & éléments nutritifs échangeables & totaux sont nettement plus élevées dans les terres érodées que dans le sol en place d'autant plus que l'érosion est faible (sélectivité forêt 11% forêt 65% > culture maïs)

Tableau A7.14 : Comparaison de l'analyse des terres érodées et de l'horizon superficiel du sol en place IRCA - Moyennes des années 1966 à 1969

| | Terre de fond 143,8 kg/ha/an % | Suspension 54.3kg/ha/an % | Total 197kg/ha/an % | Sol 0-5cm % | Coefficient de sélectivité terre érodée/sol superficiel |
|--|--|---|--|---|--|
| GRANULOMETRIE Argile % Limon fin " Limon grossier " Sable fin " Sable grossier " SF/SG | 10.45 3.74 1.37 16.34 66.56 0.246 | 43.61 27.39 5.41 4.50 9.89 0.456 | 19.04 9.96 2.42 12.76 49.73 0.256 | 13.2 3.7 0.9 16 63.6 0.251 | 1.44 2.69 2.68 0.80 0.78 |
| MATIERES ORGAN. / | 3.572 0.105 | 13.325 0.606 | 6.09 0.244 | 4.224 0.180 | |
| CATIONS ECHANGEABLES Ca mé/100g Mg " K " Na " | 4.19 1.75 0.24 0.07 | 9.35 1.85 0.34 0.10 | 5.64 1.79 0.26 0.08 | 2.50 1.56 0.34 0.09 | 2.26 1.15 0.76 0.89 |
| ELEMENTS TOTAUX P205 % Ca mé/100g Mg " K " Na " | 0.083 12.87 3.81 0.94 0.79 | 0.287 10.01 3.65 2.50 0.49 | 0.140 12.15 3.79 1.37 0.71 | 0.062 3.30 2.95 0.67 0.25 | 2.26 3.68 1.28 2.04 2.84 |

mé/100g signifie milliéquivalent pour 100 grammes de terre fine (0-2000 microns).

Tableau A7-15: Parcelles ERLO d'AZAGUIE - coefficient et sélectivité de l'érosion sous forêt et bananeraie
Forêt E moyen = 150kg dont 80% de suspensions fines
Bananeraie E moyen = 2000kg dont 80% de suspensions fines

| • | | . TEN | EURS MOYENNES | 3 | | FORET | TENI | EURS MOYENNI | ES | | BANANERAIE |
|---|----------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | . • | terre de fond | suspension | Ernsion totale | sol en place 0-5 cm | Coef. de sélecti- vité 3/4 | terre de fond | suspen- sion | Erosion totale | sol en place ** O-25cm | Coef. de sélectivité 8/9 |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | . 10 |
| GRANULOMETRI | E | | | | | | | | | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | |
| Argile' Limon fin Limon grossi sable fin sable grossi | | 10.1 6.4 22.9 31.2 26.4 | 53 21 10 2.3 0.03 | 48.7 19.5 11.3 5.2 2.9 | 13.2 6.2 13.5 29.7 34.5 | 3.69 3.15 0.84 0.17 0.08 | 17.9 12.2 17.4 20.4 29.2 | 42:1 28:7 15:1 6:2 1:1 | 37.3 25.4 15.5 9 6.7 | 14.6 7.8 14.3 33.3 27.8 | 2.55 3.26 1.09 0.27 0.24 |
| CATIONS ECHA | ngeables | | | | | | | | | | |
| Ca 1 Mg K | mé/100g | 3.64 1.4 0.20 | 0.68 0.80 0.31 | 0.97 0.86 0.30 | 0.39 00.13 0.07 | 2.49 6.62 4.27 | 8.6 2.7 0.7 | 4.3 1.8 1.2 | 5.2 1.98 1.10 | 5 1.4 0.7 | 1.04 1.41 1.57 |
| ELEMENTS TOTA | AUX | | | | | | | | | | |
| Mg K | mé/100g | 5.2 3.7 2.8 | 1.5 7.6 7.4 | 1.87 7.21 6.94 | 0.95 2.35 2.49 | 1.97 3.07 2.79 | 19.1 9.4 4.3 | 8.1 13.9 15 | 10.3 13 12.9 | 7.9 2.7 1.4 | 1.30 4.81 9.19 |
| SiO ₂ | 7 | 1.3 | 21.9 5.8 | 20.15 | 8.1 | 2.49 | 5.9 | 17.5 | 15.2 | (10) | 1.52 |
| Fe ₂ 0 ₃ P ₂ 0 ₅ total | °/., | 0.23 | 1.08 | 5.35 l | 1.8 0.23 | 2.97 4.35 | 2.1 1.5 | 5.7 3.7 | 4.93 3.26 | 2.4 0.93 | 2.08 3.51 |
| A1203 | 7 | 3.2 | 18 | 16.52 | 6.3 | 2.62 | 0.1 | 14 | 12.02 | (8) | 1.50 |
| MATIERES ORGA | ANIOUES | | | | ، بیربی، ده بنه می ساده ده جه جه ر، | | | | | | |
| Carbone Azote | °/•• , | 29.2 | 84.7 6.53 | 79.15 5.05 | 15.2 1.1 | 5.21 5.50 | 29.6 2.2 | 64.1 4.56 | 57.2 4.09 | 19.1 1.38 | . 2.99 2.96 |

* voir ROOSE, 1976, p. 12 Comparaison turricules - sol en place le 5.11.70 NN Analyse 1966 horizon O-25cm tiré de ROOSE, -GODEFROY, 1967.

Tableau A7.16 : Fiche analytique des terres érodées : DIVO : 1967-1974

| | Terre de fond 100kg/ha | Suspension 30kg/ha | Erosion 130 kg/ĥa | Sol en place 0-10cm | Imice Sélectivité 3/4 |
|---|---|--|---|---|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | .5 |
| GRANULOMETRIE Argile 7 Limon fin " Limon grossier " Sable fin " Sable grossier " Refus " | 2.9.0 7.7 3.9 13.8 54.6 0 | 73.1 22.7 1.9 1.6 0.7 | 32.3 11.2 3.4 11 42.2 | 25.9 3.7 1.4 13.2 51.4 4.4 | 1.25 3.02 2.46 0.83 0.82 |
| MATIERES ORGANIQUES °/00 Carbone °/00 Azote " Acides humiques fulviques Taux Carbone humifié % | 100.9 58.5 4.28 2.3 4.9 | 118.6 68.8 6.27 5 11 | 105 60.9 4.74 | 10.4 6.4 0.57 0.21 0.81 | 10.1 10.1 8.3 - 0.86 |
| CATIONS ECHANGEABLES Ca mé/100g Mg " K " Na " C.E.C. | 7.4 2.9 0.65 0.04 12.3 | 4.3 1.7 0.6 0.11 | 6.7 2.6 0.64 0.06 | 2 1.6 0.03 0.04 4.1 | 3.34 1.64 21.3 1.40 |
| ELEMENTS TOTAUX (triacide) perte au feu Z résidus insolublesZ Silice combinée " Al ₂ 0 ₃ combinée " | 12.8 65.3 10.3 7 | 22.7 14.3 29.3 23.8 | 15.2 10.9 | 4.4 72.5 10.1 9.5 | 1.51 |
| Fe ₂ 0 ₃ /tota1 " Ti0 ₂ " P ₂ 0 ₅ /tota1 '/oo Ca mé/100g Mg " K " | 2.8 2.7 0.4 0.825 0.200 11.1 4.9 2.5 | 6.6 3.6 1.3 1.700 0.700 5.8 4.8 3.6 | 3.68 2.9 0.61 1.027 0.315 9.9 4.9 2.75 | 2.82 1.8 0.62 0.330 2.7 4.3 0.6 | 1.30 1.61 0.98 3.11 3.66 1.14 4.59 |

Note : il n'y a pas de différence de composition des terres érodées sous forêt & sous cacaoyère.

Tableau A7.17 : Sélectivité de l'érosion & des remontées biologiques par rapport au sol en place

| | | SAVANE | | | SOL NU | | REMON | TEES BIOLO | GIQUES |
|--|--|--|---|---|--|--|---|--|-------------------------------------|
| Копнодо | Erosion | Sol en place 0-15cm | Sélect. 1/2 | Erosi on | sol en place 0-15cm | sélect. 4/5 | terre digérée par mésof. | sol en place O-15cm | Coeff. Sélect. 7/8 |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | . 6 | 7 . | 8 | 9 |
| GRANULOMETRIE Argile Z Limon.fin " Limon grossier " Sable fin " Sable grossier " Refus | . 59 30.3 2.2 4.4 4.1 0 | 4.9 2.7 1.9 7.3 14.3 | 12 10.4 1.2 0.6 0.3 | 14.1 6.9 2.1 9.8 32.2 34.9 | 4.9 2.7 1.8 7.3 14.3 | 2.98 2.66 1.2 1.3 2.2 0.5 | 20.3 14.3 11.6 37.7 16.1 | 4.9 2.7 1.8 7.3 14.3 | 4.1 5.3 6.4 5.1 1.1 |
| MATIERES ORGANIQUES C N P total P ass. | 54.6 4.6 2.45 1.46 | 4.94 0.27 0.04 0.01 | 11.1 17 61.3 146.8 | 9.02 0.64 0.36 0.08 | 4.94 0.27 0.04 0.01 | 1.8 2.4 9 8 | 19.62 1.04 0.42 0.07 | 4.94 0.27 0.04 0.01 | 4 3.8 10.5 7 |
| BASES ECHANGEABLES Ca mé/100g Mg " K " Na " | 2.26 0.92 0.35 0.25 | 0.72 0.78 0.06 0.01 | 3.1 1.2 5.8 25 | 1.38 0.31 0.10 0.016 | 0.72 0.78 0.06 0.01 | 1.9 0.4 1.7 1.6 | 3.79 2.49 0.51 0.01 | 0.72 0.78 0.06 0.01 | 5.3 3.2 8.5 1 |
| ELEMENTS TOTAUX SIO ₂ comb. | 26.35 22.45 6.94 3.20 9.62 4.52 2.75 | 4.19 3.89 1.33 1.05 1.84 0.26 0.11 | 6.3 5.8 4.8 3 5.2 17.4 25 | 10.39 9.63 4.64 2.22 3.12 2.18 1.28 | 4.19 3.89 1.33 1.05 1.84 0.26 | 2.5 2.5 3.5 2.1 1.7 8.4 11.6 | 12.9 11.2 4 4.33 4.75 4.15 1.18 | 4.19 3.89 1.33 1.05 1.84 0.26 0.11 | 3.1 2.9 3 4.1 2.6 16 |

Afin d'estimer la sélectivité de l'érosion, on a tenu compte des refus pour pondérer les teneurs observées à l'analyse de la terre fine. Par contre, on a négligé les pertes solubles dans le ruissellement, en réalité la sélectivité est encore plus forte pour les éléments.

ပ္ပါ

Tableau A7.18 : Indices de sélectivité de l'érosion en fonction des traitements SARIA : campagne 1971 à 1974.

| | Vielle jachère Sélectivité | Jeune jachère Sélectivité | Sorgho butté Sélectivité | sol nu à plat sélectivité |
|---|--|--|---|--|
| GRANULOMETRIE Argile Limon fin Limon grossier Sables fins Sables grossiers | 1.54 2.91 0.85 0.83 0.65 | 1.89 0.96 0.86 0.96 0.94 | 5.45 3.32 0.82 0.45 0.30 | 4.56 3.25 1.27 0.45 0.27 |
| MATIERES ORGANIQUES Carbone Azote Phosphore | 9.3 12.1 2.9 | 4.9 6.2 3 | 5.6 6.4 2.7 | 3.4 3.8 2.3 |
| CATIONS ECHANGEABLES Ca Mg K Na | 33.7 33.8 75.2 54.2 | 13.4 11.2 25.5 31 | 9.9 11.2 <u>33.2</u> 14 | 4.3 .4 5.2 .4 |
| ELEMENTS TOTAUX SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ Ca Mg K Na | 2.7 2.3 1.7 5.6 2.9 9.5 16.1 | 1.1 0.9 0.9 8 1.8 5.6 11.8 | 2.5 2.3 1.4 5.9 2.8 10.7 | 1.9 1.8 1.2 2.9 2 8.4 11.6 |

55

Tableau A7.19 : Comparaison des caractéristiques analytiques des terres erodées, de terre de termitières & de l'horizon superficiel du sol GONSE : campagnes 1968-74.

| | | | | <u> </u> | | <u> </u> | |
|--|---|--|---|--|--|--------------------------------------|--|
| | E Suspension (135kg) | ROSIO Terre de fond (15kg) | N total (\$50kg) | S ol en place (N=22) O - 10cm | Termitières médiane N = S | Coefficient de Erosion/sol 3/4 | sélectivité Ter./sol 5/4 |
| | 1 | 2 | 3 | · 4 | 5 | 6 | 7 |
| GRANULOMETRIE Argile % Limon fin " Limon grossier " Sable fin " Sable grossier " | 52.6 23.1 8.1 6 | 6.2 3.3 11.7 26.8 52.1 | 48 21.1 8.5 8.1 7.5 | 7.7 6.7 12.2 35.2 37.1 | 16.6 9.1 17.3 24 31.6 | 6.2 3.1 0.69 0.23 0.90 | 2.2 1.7 1.4 0.68 0.85 |
| MATIERES ORGANIQUES Carbone %/ Azote " | 64 3.95 | 16.5 0.93 | 59.3 3.65 | 5.54 0.38 | 14.6 0.71 | 10.7 9.6 | 2.6 1.9 |
| BASES ECHANGEABLES Ca mé/100g Mg " K " Na " C.E.C. | 2.7 1.1 0.55 0.14 17.2 | 3.9 1.2 0.26 0.05 4.69 | 2.82 1.11 0.52 0.13 15.95 | 1.87 0.95 0.10 0.02 3.20 | 3.22 2.66 0.84 0.02 6.12 | 1.5 1.2 5.2 6.5 | 1.7 2.8 8.4 1 |
| ELEMENTS TOTAUX P205 total %/00 Olsen " Ca mé/100g Mg " K " Na " | 1.41 - 7.4 13.6 10.1 2.5 | 0.30 0.07 6.5 3.6 0.83 0.60 | 1.30 7.31 12.6 9.2 2.31 | 0.15 0.03 3.48 3.62 1.11 0.48 | 0.22 0.05 4.49 5.28 2.97 0,43 | 8.7 - 2.1 3.5 8.3 4.8 | 1.5 1.7 1.3 1.5 2.7 0.9 |

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

- 1.1. Carte de situation des stations de mesure de l'érosion et du drainage.
- 1.2. Carte géologique de la Côte d'Ivoire.
- 1.3. Schéma de la toposéquence d'Adiopodoumé.
- 1.4. " d'Anguedédou.
- 1.5. " d'Azaguié.
- 1.5b. Vues de la case Erlo installée dans la bananeraie IRFA d'Azaguié.
- 1.6. Schéma de la toposéquence de Divo.
- 1.7. " de Bouaké.
- 1.8. " de Korhogo.
- 1.9. " de Saria.
- 1.10. " de Gonsé.

CHAPITRE II

- 2.1. Schéma d'une case de lessivage oblique.
- 2.2. Schéma d'une case de drainage vertical.
- 2.3. Trois types de turricules de vers de terre.
- 2.4. Configuration des nids de Trinervitermes Geminatus.

CHAPITRE III

- 3.1. Intensité max. de ruissellement dans les conditions d'humectation les plus favorables.
- 3.2. Influence du temps écoulé entre deux averses sur la lame ruisselée.
- 3.3. Influence du temps écoulé entre les averses et de l'intensité des pluies sur la charge solide totale.
- 3.4. Courbes "intensité durée" pour des averses de fréquence décroissante.
- 3.5. Schéma de répartition de l'indice d'érosivité des pluies.
- 3.6. Lame ruisselée en fonction des précipitations : Azaguié.
- 3.7. " " " " " " Korhogo.
- 3.8. Evolution de l'intensité du ruissellement en fonction des techniques culturales sur deux types de sol, au cours d'une averse simulée.

CHAPITRE IV

- 4.1. Couverture du sol par l'ananas et ses résidus de culture.
- 4.2. Evolution du couvert végétal de différentes cultures au cours de l'année.
- 4.3. Fasteur topographique (S.L) de l'équation de Wischmeier.
- 4.4. Nomographe déterminant l'érodibilité d'un sol (d'après Wischmeier et al., 1971).
- 4.5. Influence du taux de cailloux et de matières organiques sur l'érodibilité des sols tunisiens (d'après Dumas, 1965).
- 4.6. Diagramme de Hjulström.

CHAPITRE V

- 5.1. Dégradation spécifique des bassins versants en fonction des précipitations annuelles moyennes.
- 5.2. Schéma de réponse des parcelles à l'agressivité des pluies en fonction du climat, du sol et de la végétation.

CHAPITRE VI

- 6.1. Les écoulements intermédiaires.
- 6.2. Etude méthodologique de quatre types de lysimètre.
- 6.3. Variation saisonnière du profil hydrique sous forêt à Adiopodoumé.
- 6.4. Variation saisonnière du profil hydrique sous forêt à Azaguié.
- 6.5. Profondeur atteinte par le front d'humidité (Gonsé, 1969 à 1973).
- 6.6. Schémas de bilan hydrique moyen mensuel à Adiopodoumé, Divo, Korhogo et Ouagadougou.
- 6.7. Niveau de la nappe phréatique au puits n° 10 à Korhogo.
- 5.8. " " " à la parcelle 7 à Saria.
- 6.9. Schéma général du bilan hydrique annuel le long de la séquence bioclimatique.

CHAPITRE VII

- 7.1. Variation saisonnière de la résistivité des eaux de drainage oblique (Adiopodoumé).
- 7.2. Répartition saisonnière de la résistivité des eaux de pluviolessivage (Adiopodoumé).
- 7.3. Influence du volume écoulé sur la résistivité des eaux de drainage oblique (Adiopodoumé).
- 7.4. Baisse de la teneur en calcium si le volume des écoulements augmente.
- 7.5. Teneur en silice (peu variable) en fonction du volume écoulé (drainage oblique).
- 7.6. Teneur moyenne estimée en HCO₃ dans les eaux de surface en milieu tropical naturel en fonction de la conductivité moyenne (estimation par balance ionique).

CHAPITRE VIII

- 8.1. L'azote (surtout NO₃) participe activement à la lixiviation des bases.
- 8.2. Evolution du taux de carbone de l'horizon superficiel en fonction du type d'aménagement.

CHAPITRE IX

- 9.1. Courbes de répartition de l'argile en fonction de la profondeur dans le cas d'un sol lessivé classique et d'un sol appauvri.
- 9.2. Taux d'argile et de limons dans la terre fine des profils des cases Erlo sous forêt.
- 9.3. Taux d'argile et de limons dans la terre fine des profils des cases Erlo sous savane.
- 9.4. Poids cumulés de turricules au cours de trois cycles annuels (Téké, 1970-73).
- 9.5. Production journalière de turricules (gr.m⁻².J⁻¹) en fonction de la hauteur de pluie (mm) tombée pendant la période comprise entre deux mesures.

- 9.6. Poids des termitières en fonction du diamètre moyen de leur base (Gonsé : 1970-75).
- 9.7. Estimation du poids de termitières (T/ha) en fonction de la surface du sol couverte par la base des nids de Trinervitermes Geminatus (Gonsé et Saria).

CHAPITRE X

néant.

CHAPITRE XI

- 11.1.- Diagramme d'équilibre "albite x montmorillonite x kaolinite x gibbsite" d'après Tardy, 1969.
- 11.2.- Solubilité du quartz, de la kaolinite et de la gibbsite, d'après Gardner, 1970.

CHAPITRE XII

12.1.- Influence bioclimatique sur l'évolution du profil pédologique d'une couverture kaolinique en Afrique Occidentale.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1

- 1.1. Caractéristiques du milieu où furent entreprises les expérimentations.
- 1.2. Caractéristiques climatiques des stations étudiées.
- 1.3. a et b Fiche analytique et description du profil R₂ à Adiopodoumé.
- 1.4. a et b Fiche analytique et description du profil Erlo à Anguédédou.
- 1.5. a et b Fiche analytique et description du profil Erlo à Azaguié.
- 1.6. a et b Fiche analytique et description du profil Erlo à Divo.
- 1.7. a et b Fiche analytique et description du profil Erlo à Bouaké.
- 1.8. a et b Fiche analytique et description du profil Erlo à Korhogo.
- 1.9. a et b Fiche analytique et description du profil P7 à Saria.
- 1.10. a et b " protection à Saria.
- 1.11. a et b " Erlo à Gonsé.

CHAPITRE 2

2.1. - Dispositifs et types de mesures effectuées dans les stations d'observation.

CHAPITRE 3

- 3.1. Précipitations journalières de retour 1 à 100 ans (d'après Brunet-Moret, 1963 et 67).
- 3.2. Variabilité de l'indice d'agressivité climatique (Rusa de Wischmeier) en Afrique de l'Ouest.
- 3.3. Calcul de l'énergie cinétique des pluies et du ruissellement (d'après HUDSON, 1973).
- 3.4. Effets du feu de brousse sur le ruissellement d'une parcelle (Gonsé 1967-73).
- 3.5. Influence de la protection intégrale et de la litère sur le ruissellement (Saria, 1971)74).
- 3.6. Influence de la pente et des techniques culturales sur le ruissellement sous ananas (Adiopodoumé, 1975-76).
- 3.7. Influence du travail du sol sur le ruissellement et l'érosion de parcelles nues (d'après KALMS, 1975).
- 3.8. Ruissellement et érosion sous végétation naturelle ou cultivée et sur sol nu en dix stations d'Afrique occidentale.

CHAPITRE 4

4.1. - Erosion sur sol nu et sous ananas en fonction du mode d'utilisation des résidus de la culture de l'ananas et de la pente (Adiopodoumé 1975-76).

- 4.2. Facteurs couvert végétal x techniques culturales (C) pour diverses cultures d'Afrique.
- 4.3. Erodibilité de quelques sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux (K usa)
- 4.4. Pratiques antiérosives (facteur P)

CHAPITRE 5

- 5.1. Comparaison du ruissellement et de l'érosion mesurés sur parcelles et bassins versants
- 5.2. Ruissellement et érosion en milieu sahélien (Vuillaume, 1968)
- 5.3. Erosion spécifique moyenne en fonction de la taille du bassin versant au Maroc (d'après Heusch, 1970)

CHAPITRE 6

- 6.1. Les précipitations annuelles.
- 6.2. Le ruissellement (KRAM % des pluies).
- 6.3. Drainage oblique sur des parcelles de 2 mètres de large et 25 à 50 m. de long.
- 6.4. Le drainage vertical sous quatre types de lysimètres.
- 6.5. Le drainage vertical mesuré en lysimètres de sol non remanié en six stations.
- 6.6. Comparaison des estimations du drainage à Gonsé.
- 6.7. Schémas de bilans hydriques à Adiopodoumé, Korhogo et Ouagadougou.
- 6.8. L'évapotranspiration potentielle calculée selon la formule de Turc(d'après Eldin 1967 à 1979).
- 6.9. Variation saisonnière du stock d'eau cumulé (en mm.) dans les profils des cases ERLO.
- 6.10. Bilan hydrique calculé en année moyenne, humide et sèche sous végétation naturelle.
- 6.11. Bilan hydrique calculé en année moyenne, humide et sèche sous culture.
- 6.12. Evolution des termes du bilan d'une année sèche à une année humide de fréquence 1/10.
- 6.13. Evolution du drainage et de l'ETR en fonction de la réserve hydrique et de la profondeur du sol utilisée par les végétaux.
- 6.14. Variations saisonnières du niveau de la nappe phréatique à Korhogo et Saria (P7).
- 6.15. Bilans hydrologiques sur de petits bassins versants situés entre Abidjan et Ouagadougou.
- 6.16. Comparaison des bilans hydriques sur parcelles et petits bassins versants.

CHAPITRE 7

- 7.1. _ Influence du volume des écoulements sur les teneurs en éléments eaux superficielles d'Adiopodoumé. .
- 7.2. Comparaison interstation des différents types d'eau sous végétation naturelle.
- 7.3. " " " " " " " "
- 7.6. Analyse de 20 échantillons de floculats (CNRS Nancy)

```
En annexe 4
 A 7.1. - Caractéristiques des eaux sous forêt Adiopodoumé (mpv)
                                  11
                                                               (ma - st. dev.)
                   11
                                      de drainage sous divers couverts + fumure
    7.3. -
                                                                     (Adiopodoumé)
                                     sous hévéa · Anguédédou
    7.4. -
                              Ħ,
                                     sous forêt et bananeraie à Azaguié
    7.5. -
                                     sous forêt et cacaoyer non confondu à Divo
    7.6. -
                   Ħ
                              11
    7.7. -
                                     sous forêt et cacaoyer confondu à Divo
    7.8. -
                                     sous savane arborée et culture à Bouaké
                              11
    7.9. -
                                     sous savane et culture à Korhogo
                              **
                                  11
   7.10. -
                                     sous jachère et sorgho à Saria (P7)
                              11
                                  11
   7.11. -
                                                                     protection
                              11
   7.12. -
                                          savane arborée à Gonsé
En annexe 5
 A 7.13. - Comparaison terre érodée et horizon superficiel à Adiopodoumé
                                                               Anguédédou
  7.14. -
                                          11
                         **
                                                               Azaguié
   7.15. -
                         11
                                 11
                                                               Divo
   7.16. -
                                                               Korhogo
   7.17. -
                                 "
                         11
                                                               Saria
   7.18. -
                                                               Gonsé
   7.19. -
CHAPITRE 8
   8.1.- Influence de la distance à l'océan du lieu de captage et du couvert
         végétal sur la composition des eaux de pluie et sur les apports an-
         nuels moyens (kg/ha/an).
   8.2. - Apports en éléments nutritifs (kg/ha/cycle) sous culture.
   8.3. - Schéma de bilan géochimique : Adiopodoumé, forêt dense
                                                    , maīs fertilisé.
   8.4.-
                                      : Anguédédou, hévéa non fertilisé
   8.5.-
                                      : Azaguié, forêt dense
   8.6.-
                                               , bananeraie fertilisée
   8.7.-
                                      : Divo, forêt dense ou cacaoyère
   8.8.-
                                      : Korhogo, savane arbustive
   8.9.-
                                                 mais fertilisé
  8.10.-
                                      : Saria P7, savane herbacée jeune.
  8.11.-
                                                 ; sorgho fertilisé ·
  8.12.-
                                      : Gonsé, savane arborée
  8.13.-
  8.14. - Evolution des pertes par drainage et par érosion en milieu na-
         turel ou cultivé.
  8.15. - Pertes moyennes par drainage en milieu naturel ou cultivé (kg/ha/an).
  8.16. - Exportations minérales par les grains et pailles de céréables
         ainsi que par les bananes.
```

- 8.18. Remontées d'éléments nutritifs par la mésofaune en milieu naturel.
- 8.19. Immobilisation minérale dans différents types de végétation.

8.17. - Chute annuelle de litière fine dans quelques forêts (d'après

BERNHARD-REVERSAT, 1975).

8.20. - Stock d'éléments nutritifs dans les horizons superficiels du sol (30 cm) sous végétation naturelle et cultivée.

CHAPITRE 9

- 9.1. Analyse comparée des turricules et du sol en place (0 à 20 cm) en haut de pente (nov. 1970)
- 9.2. Analyse comparée des turricules et du sol en place (0 à 20 cm) à mi-versant (nov. 1970).
- 9.3. Analyse comparée des turricules et du sol en place (0 à 20 cm) en bas de pente (nov. 1970).
- 9.4. Comparaison des propriétés hydrodynamiques des sols de deux versants voisins avec et sans vers de terre.
- 9.5. Caractéristiques d'une population en équilibre de nids de Trinervitermes à Gonsé.
- 9.6. Analyse comparée des termitières épigées de Trinervitermes et du sol en place (Gonsé).
- 9.7. Comparaison des charges colloïdales des eaux de percolation (moyennes pondérées mpv en mg / 1.) recueillies à différentes profondeurs dans les diverses stations.
- 9.8. Evaluation de la vitesse actuelle de l'appauvrissement en particules fines en fonction du type d'aménagement dans six stations.

CHAPITRE 10

- 10.1.- Relation entre le débit spécifique moyen annuel et le taux de boisement (d'après GARCZYNSKI, 1980).
- 10.2. Influence de la végétation sur le bilan hydrique (Saria : P7).
- 10.3.- Ruissellement et érosion en fonction du couvert végétal à Séfa (d'après CHARREAU, 1970).

CHAPITRE 11

- 11.1.- Variation des paramètres d'altération L et R définis par PEDRO (1964) en fonction de l'aridité du climat et du type d'eau.
- 11.2. Variation du paramètre RE d'altération de TARDY (1969) en fonction de l'aridité du climat et du type d'eau.

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|---|------|
| AVANT-PROPOS | I |
| RESUME | VIII |
| ENGLISH ABSTRACT | XIII |
| SOMMAIRE | 1 |
| INTRODUCTION | 3 |
| PREMIERE PARTIE : LES CONDITIONS GENERALES DE L'ETUDE | 9 |
| CHAP. I. CARACTERES GENERAUX DU MILIEU NATUREL ETUDIE | 13 |
| 1. Les principaux éléments du milieu | 15 |
| 1.1. Extension géographique | 15 |
| 1.2. Les différences climatiques | 15 |
| 1.3. Le couvert végétal | 18 |
| 1.4. Les roches | 21 |
| 1.5. Les paysages | 23 |
| 2. Les sols situés dans leurs toposéquences | 25 |
| 2.1. Adiopodoumé | 25 |
| 2.2. Anguededou | 31 |
| 2.3. Azaguié | 35 |
| 2.4. Divo | 41 |
| 2.5. Bouaké | 47 |
| 2.6. Korhogo | 53 |
| 2.7. Saria | 59 |
| 2.3. Gonsé | 67 |
| 3. Conclusions sur le milieu de l'expérimentation | 73 |

| CHAP. 2. LES METHODES | 7 | 75 |
|---|-------------------------|-----|
| 1. Justification des méthodes | 7 | 75 |
| 2. Description et analyse critique principaux | | 77 |
| 2.1. Les cases d'érosion | 7 | 77 |
| 2.2. Les cases de mesure de l'ér ment et du lessivage obliqu | | 31 |
| 2.3. Les cases de drainage verti | cal (DV) 8 | 35 |
| 2.4. Le simulateur de pluie | 9 |) 1 |
| 3. Les méthodes de mesure d'autres taux | | 95 |
| 3.1. Les capteurs des eaux de pl | uie 9 | 95 |
| 3.2. Les dispositifs de mesure d fine par la mésofaune | | € |
| 4. Conclusions | 10 |)2 |
| DEUXIEME PARTIE : LES PHENOMENES D'EROSION. S | YNTHESE DES RESULTATS | |
| ACQUIS ET DES RESULTATS NOU | VEAUX 10 |)5 |
| GUAN O THE GAVERE DE L'ADRESON | | |
| CHAP. 3. LES CAUSES DE L'EROSION | 11 | |
| 1. La pluie, cause première de | | |
| 2. Le ruissellement | 12 | |
| 3. Conclusion sur les causes d | e l'érosion 14 | łC |
| CHAP. 4. LES FACTEURS DE L'EROSION | 14 | 19 |
| 1. L'érosion dans le milieu na | turel 15 | 5C |
| 2. L'érosion dans le milieu am | énagé 15 | 52 |
| 3. Conclusions sur les facteur | s conditionnels de | |
| l'érosion | 17 | 15 |
| CHAP.5. DISCUSSION ET CONCLUSIONS SUR LES | PHENOMENES D'EROSION 17 | 7 |
| 1. Comparaison des mesures de | ruissellement et d'é- | |
| rosion effectuées sur parce | lles et bassins ver- | |
| sants | 17 | 7 |
| 2. Conclusions sur les phénomè | nes d'érosion 18 | 39 |
| | | |
| TROISIEME PARTIE : LES BILANS DE MATIERES. | 19 |)7 |
| | | |
| CHAP. 6. LE BILAN HYDRIQUE | 20 |)1 |
| 1. Définition des termes | 20 |)3 |
| 2. Le bilan hydrique mesuré | 20 |)5 |

| | 3 | . Le bilan hydrique calculé | 220 |
|-------|----------|--|-----|
| | Լ | . Confrontation avec d'autres approches et discussion sur la validité de la méthode | 240 |
| | 5 | . Conclusions sur les bilans hydriques | 249 |
| CHAP. | 7. | LA COMPOSITION DES CHARGES SOLUBLES ET SOLIDES DES | |
| | · | | 253 |
| | 1 | . Composition chimique des différents types d'eaux superficielles | 253 |
| | . 2 | . Composition de la charge solide des eaux | 283 |
| | 3 | . Conclusions sur la composition des charges solubles et solides des eaux de surface | 290 |
| CHAP. | 8. | LES BILANS GEOCHIMIQUES | 291 |
| | 1. | Les flux positifs | 291 |
| | | 1.1. Les apports par les eaux de pluie | 291 |
| | | 1.2. Les apports par les engrais | 295 |
| | | 1.3. Les apports résultant des remontées biologiques | 296 |
| | 2. | Les flux négatifs | |
| | | 2.1. Les pertes chimiques par érosion | 297 |
| | | 2.2. Les pertes chimiques par les eaux de drainage | 299 |
| | | 2.3. Les pertes chimiques par l'exportation des ré- coltes | 304 |
| | 3. | Les flux internes | 306 |
| | | 3.1. Le pluviolessivage | 306 |
| | | 3.2. Le recyclage des éléments contenus dans les li- tières et les résidus de culture | 309 |
| | | 3.3. Le brassage des horizons superficiels par la mésofaune | 311 |
| | 4. | Les stocks contenus dans la végétation et le sol | 316 |
| | | 4.1. L'immobilisation minérale dans la végétation | 316 |
| | | 4.2. La réserve minérale du sol | 319 |
| | 5. | Tendances évolutives du sol selon son utilisation | 322 |
| | | 5.1. Sous les forêts denses humides | 323 |
| | | 5.2. Sous les savanes | 325 |
| | | 5.3. Sous culture | 326 |
| | | 5.4. Remarques complémentaires | 328 |
| | | a)accumulation relative du fer et de l'alumine | 328 |
| | | b)bilan des matières organiques du sol | 329 |
| | 6. | Conclusions | 332 |

| CHAP.9. | LES ASPECTS GRANULOMETRIQUES DES TRANSFERTS DE MATIERES | ET LES |
|--------------|---|--------|
| | PHENOMENES D'APPAUVRISSEMENT | 345 |
| 1. | L'érosion sélective | 349 |
| 2. | Le rôle de la mésofaune et du labour mécanique | 353 |
| | 2.1. Travail des vers de terre à Azaguié | 353 |
| | 2.2. Travail des termites à Gonsé et Saria | 365 |
| | 2.3. Remontées par la mésofaune dans les autres stations | 369 |
| | 2.4. Conclusions | 371 |
| 3. | Le lessivage vertical et oblique | 373 |
| 4. | Données micromorphologiques | 379 |
| 5. | Vitesse actuelle de l'appauvrissement | 381 |
| 6. | Conclusions . | 385 |
| QUATRIEME PA | ARTIE : INTERPRETATION D'ENSEMBLE | 389 |
| INTRODU | CTION | 391 |
| CHAP. 1 | O. INFLUENCE DE LA VEGETATION SUR LE BILAN HYDRIQUE | 393 |
| | Introduction | |
| 1. | Les idées relatives au rôle de la végétation forestière | 394 |
| 2. | Influence de la végétation en milieu tropical humide | 396 |
| 3. | Influence de la végétation en milieu tropical sec et aride | 399 |
| 4. | Conclusion | 404 |
| CHAP. 1 | 1. ASPECT GEOCHIMIQUE DES TRANSFERTS | 407 |
| | Introduction | 407 |
| 1. | Application de la méthode des bilans | 408 |
| | a) Utilisation des paramètres de Pédro | 409 |
| | b) Utilisation des paramètres de Tardy | 411 |
| | c) Conclusions | 413 |
| 2. | Utilisation des diagrammes d'équilibre | |
| | a) Diagramme d'équilibre de l'altération de l'albite | 415 |
| | b) Diagramme concernant l'équilibre quartz-kaolinite- gibbsite | 416 |
| | c) Conclusions | |
| 3. | Rôle de l'aridité climatique et de l'activité biolo- gique | 417 |
| 4. | Influence de l'aménagement du milieu sur la charge so- luble | 420 |
| 5. | Conclusions . | 422 |
| | Note complémentaire sur l'origine de la charge des plus | ies |

| CHAP. 12. DYNAMIQUE DES PROFILS PEDOLOGIQUES : IMPORTANCE DES | |
|---|-----|
| TRANSFERTS PARTICULAIRES | |
| 1. Les études antérieures : bref rappel | 427 |
| 2. Apports de cette étude expérimentale | 432 |
| 3. Discussion sur les transferts de matière en phase solide | 435 |
| 4. Conclusions | 439 |
| CHAP. 13. L'AMENAGEMENT DU MILIEU TROPICAL OUEST AFRICAIN | 443 |
| 1. Le stade du défrichement | 444 |
| 2. L'aménagement au niveau du versant | 447 |
| 3. L'exploitation du patrimoine foncier | 451 |
| 4. Conclusions | 462 |
| | |
| CONCLUSIONS GENERALES | 465 |
| 1. Rappel des principaux résultats | 466 |
| 2. Enseignements généraux | 472 |
| BIBLIOGRAPHIE . | 475 |
| ANNEXES | 513 |
| LISTE DES FIGURES | 557 |
| LISTE DES TABLEAUX | 561 |
| TABLE DES MATIERES | 565 |

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Direction générale :

24, rue Bayard - 75008 PARIS

Service des Publications : 70-74, route d'Aulnay - 93140 BONDY

O.R.S.T.O.M. Éditeur Dépôt légal : 2e trim. 1981 I.S.B.N.: 2-7099-0594-9