RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
ORSTOM

RÉPUBLIQUE DU TOGO
Université du Bénin

SOLTROP 89

Actes du premier Séminaire Franco-Africain de Pédologie Tropicale Lomé, 6 - 12 février 1989

Editions de l'ORSTOM
INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION
Collection COLLOQUES et SÉMINAIRES
PARIS 1989

Séminaire sur invitation organisé par :

- Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en Coopération (ORSTOM)
- Université du Bénin – Lomé (UB)

avec le concours financier de :

- Ministère Français de la Coopération (sous – Direction de la Recherche)
- ORSTOM
- ACCT

COMITE D'ORGANISATION

G.	PEDRO	INRA/ORSTOM	Co – Président
K.F.	SEDDOH	UB	Co – Président
R.	POSS	ORSTOM	Secrétaire
S.	WOROU	INS	Secrétaire – adjoint
L.K.	ALLAGLO	INS	Membre
P.	BRABANT	ORSTOM	Membre
P.	FAURE	ORSTOM	Membre
M.	GAVAUD	ORSTOM	Membre
F.X.	HUMBEL	ORSTOM	Membre
K.	KOUNESTRON	UB	Membre

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 ayants cause, est illicite» (alinéa1er 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.

ISSN : 0767-2896
ISBN : 2-7099-0963-4

© ORSTOM 1989

SOMMAIRE

page

SEANCE D'OUVERTURE

Allocution de Monsieur le Recteur de l'Université du Bénin — 3
K.F. SEDDOH

Allocution de Monsieur le Représentant du Bureau Régional de la FAO pour l'Afrique — 7
R. SANT'ANNA

Allocution de Monsieur le Président de l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération — 11
M. LEVALLOIS

Allocution de Monsieur le Ministre de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique — 21
T.K. TCHALIM

Introduction par le Président du Séminaire — 25
G. PEDRO

L'ORGANISATION DES SOLS DANS LE PAYSAGE

La pratique des études de paysages pédologiques. Application à deux exemples de la zone tropicale (Vénézuela et Sénégal) — 35
M. GAVAUD

La connaissance de l'organisation des sols dans le paysage, un préalable à la cartographie et à l'évaluation des terres — 65
P. BRABANT

Exemples de morphopédologie tropicale 87
G. ROSSI

Discussions et synthèse 107

ASPECTS ACTUELS DE LA CONNAISSANCE DES SOLS A DIFFERENTES ECHELLES

Les couvertures pédologiques polygénétiques des régions soudano – guinéennes de l'Afrique de l'Ouest. Caractères et organisation spatiale des sols du nord – est Togo sur socle granito – gneissique 117
P. FAURE & B. VOLKOFF

Approche systémique appliquée à la cartographie morphopé – dologique du paysage 143
M. RAUNET

L'organisation des sols et la dynamique des nappes perchées semi – permanentes : un lien fonctionnel et un atout agronomique pour les cultures de contre – saison 179
S. WOROU

Les sols de la vallée du Moyen Niger : organisation – tendance évolutive actuelle 193
Y. GUERO

Discussions et synthèse 213

CARACTERISATION DES SOLS SOUS CULTURE

Démarche et perspectives en pédologie pour une utilisation agricole rationnelle des sols 219
R. MOREAU

Les états de surface des savanes de l'Ouest Africain : relations avec les sols et incidences sur l'économie en eau 243
C. VALENTIN

Discussions et synthèse 253

FONCTIONNEMENT DES SOLS ET ALIMENTATION DES PLANTES

Hydrodynamique interne et dynamique des éléments minéraux dans les sols tropicaux exondés. Concepts actuels et conséquences agronomiques 259
R. POSS

De la connaissance des terres et des climats à la recommandation agronomique 283
P. SIBAND

Les sols ferrugineux tropicaux lessivé à concrétions du Burkina – Faso : caractéristiques et contraintes pour l'utilisation agricole 307
F.J.P. PALLO & L. THIOMBIANO

Discussions et synthèse 329

EVALUATION DES TERRES POUR LA MISE EN VALEUR

Evaluation des terres. Quelques règles de base 333
P. BRABANT

Test d'adaptabilité des méthodes paramétriques dans le champ volcanique de Tshibinda – Tshibati (Sud – Kivu – Zaire) 335
B. FOURNIER, B. MAMBANI & P. MONDJALIS

Genèse, caractéristiques et contraintes d'aménagement des sols acides à horizon sombre de profondeur de la région de haute altitude du Rwanda 353
B. MUTWEWINGABO

Discussions et synthèse 387

SEANCE DE SYNTHESE

Rapport de synthèse 391
R. POSS

Exemple d'aménagement d'un bassin versant pour lutter contre la dégradation des sols. Bassin versant de Lassa – Badjo (Togo) 447

T.T. TCHEMI

Effets de la culture attelée sur l'érosion et la conservation des sols au nord Bénin 457

H.A. AZONTONDE

Effets du défrichement et de la mise en culture sur les caractères des sols. Exemples en Côte d'Ivoire 473

G. YORO

SEANCE D'OUVERTURE

ALLOCUTION DE MONSIEUR LE RECTEUR DE L'UNIVERSITE DU BENIN

K.F. SEDDOH
Université du Bénin – BP 1515 – Lomé – TOGO

Monsieur le Membre du Bureau Politique, Ministre de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique,

Messieurs les Membres du Comité Central,

Excellences, Messieurs les Ambassadeurs,

Monsieur le Directeur de Cabinet, Représentant le Membre du Bureau Politique, Ministre du Développement Rural,

Monsieur le Président de l'ORSTOM,

Honorables Délégués au Séminaire,

Mesdames et Messieurs les Directeurs et Chefs de Services,

Honorables Invités,

Mesdames, Mesdemoiselles, Messieurs,

A l'aube de ce Premier Séminaire Franco – Africain sur les Sols Tropicaux, je me réjouis de souhaiter la bienvenue à vous tous. L'Université du Bénin et le Comité d'Organisation du Séminaire vous remercient d'avoir bien voulu répondre à leur invitation.

Soyez les bienvenus au Togo de la Nouvelle Marche qui se veut terre de dialogue, haut lieu de concertation où tous les hommes de bonne volonté sont invités à se considérer comme chez eux.

*

Il y a environ deux ans, nous évoquions, Monsieur Georges Pédro, Président de la Commission Scientifique Hydrologie – Pédologie de l'ORSTOM et moi, la possibilité d'organiser quelque part en Afrique Sud – Saharienne une réunion sur les sols tropicaux. L'idée a été reprise par un pédologue opérant sur le terrain en Afrique, Monsieur Roland Poss, actuel secrétaire du comité d'organisation du séminaire. L'objectif du séminaire a été maintenu tel que défini dès le départ. Il s'agit avant tout de créer les conditions pour que s'organise un dialogue fécond entre chercheurs en Science des Sols et pédologues de terrain opérant en Afrique.

En effet, à cause des difficultés imposées par la conjoncture internationale, peu de pédologues de terrain ont les moyens de suivre les nombreux séminaires et colloques qui se multiplient de par le monde et où les dernières découvertes dans la spécialité sont communiquées au monde scientifique. Peu d'instituts ou de laboratoires des sols disposent de revues spécialisées où ces résultats sont publiés. Parfois même, lorsque ces revues sont disponibles, les contraintes imposées par le rôle écrasant de prestateur de service qui incombe aux laboratoires des sols sont tellement lourdes, qu'il ne reste plus suffisamment de temps à consacrer à la lecture de revues spécialisées.

De ce fait, l'écart se creuse entre les chercheurs spécialisés et les pédologues obligés de gérer le quotidien. Des innovations obtenues à l'issue de recherches très coûteuses dorment dans les tiroirs des laboratoires, ou restent simplement l'apanage d'une poignée d'initiés qui bénéficient de conditions de travail favorables. Les pédologues de terrain sont souvent coupés des idées et approches nouvelles qui émergent çà et là dans la spécialité.

Pourquoi ne pas organiser une rencontre qui permettrait aux uns et aux autres de faire le point et d'échanger les expériences ?

J'avoue avoir été séduit dès le départ par l'idée de cette réunion. Aussi est – ce avec plaisir et soulagement que j'ai enregistré quelques mois plus tard, en premier lieu l'appui matériel et financier de la Direction Générale de l'ORSTOM et, dans un deuxième temps, ceux du Ministère Français de la Coopération et de l'Agence de Coopération Culturelle et Technique.

Le décor était planté, le cadre défini. Toutes les conditions étaient réunies pour permettre à la machine de préparation du séminaire de se mettre en route, dynamisée par les mains expertes du Secrétaire du Comité

d'Organisation, et avec comme support scientifique la Commission de Science des Sols de l'ORSTOM, présidée par le Professeur Georges Pédro.

*

Enfin, nous voici à Lomé pour la dernière phase de l'opération. Je peux vous rassurer, il ne s'agit plus d'une aventure, mais d'un voyage confortable sur un itinéraire fléché où toutes les étapes sont organisées avec minutie.

L'occasion est donc propice pour adresser les remerciements du comité d'organisation à toutes les personnalités grâce auxquelles le projet de séminaire est devenu aujourd'hui une réalité concrète.

Je pense au Gouvernement Togolais, dont le Ministre de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique a été un ardent défenseur du projet et nous fait l'honneur de venir présider personnellement la cérémonie d'ouverture du séminaire.

Je pense au Gouvernement Français, dont l'imposante représentation à notre cérémonie d'ouverture est une manifestation d'intérêt évidente. L'Ambassadeur de France et le Chef de la Mission de Coopération ont permis de classer le séminaire SOLTROP 89 dans les actions prioritaires de l'année 1989.

Le Président de l'ORSTOM nous reconfirme son intérêt et son soutien en faisant coïncider sa première visite hors de France avec le début de notre séminaire. Sa présence à Lomé est pour nous un grand réconfort. Au-delà du séminaire, elle nous apporte la preuve de la priorité que l'ORSTOM tient à accorder à la formation et aux actions de développement en général.

Merci au Représentant de la FAO pour avoir répondu à notre invitation, nous apportant par la même occasion l'importante caution de son Organisation.

*

Il ne me reste plus qu'à me tourner vers les participants au séminaire. Je voudrais leur dire, au nom du Comité d'Organisation, que nous attendons d'eux une participation active. Ils doivent se considérer, vis-à-vis des conférenciers principaux, non comme des élèves ou des spectateurs, mais comme des interlocuteurs avertis. C'est en mettant en commun l'immense expérience accumulée par chacun de vous que notre réunion de Lomé

sera, comme nous le souhaitons, un véritable rendez-vous du donner et du recevoir.

L'Université du Bénin est heureuse de l'honneur qui lui est fait de prendre part à l'organisation de ce séminaire. Institution de formation et de recherche, elle a foi dans le rôle fondamental qui revient à la recherche comme outil principal de développement, un de ceux qui garantiront l'avenir de nos pays. C'est donc avec plaisir qu'elle prend part aujourd'hui et prendra part demain à toutes les initiatives qui auront pour objectif de renforcer et de valoriser la recherche au niveau de notre continent.

ALLOCUTION DE MONSIEUR LE REPRESENTANT DU BUREAU REGIONAL DE LA FAO POUR L'AFRIQUE

R. SANT'ANNA
FAO – BP 1628 – Accra – GHANA

Messieurs les Ministres,

Monsieur le Recteur de l'Université du Bénin,

Monsieur le Président de l'ORSTOM,

Chers Collègues,

Mesdames et Messieurs,

C'est pour moi un grand plaisir et un agréable devoir d'être associé aux cérémonies d'ouverture de ce Premier Séminaire Franco-Africain de Pédologie Tropicale. Aussi, au nom du Représentant Régional de la FAO pour l'Afrique, Monsieur Tarekegne Taka, je tiens à remercier très sincèrement les organisateurs de ce séminaire pour nous avoir invité à participer à cette manifestation dont l'intérêt pour la FAO est loin d'être négligeable.

Le séminaire qui nous réunit aujourd'hui est le premier du genre puisqu'il regroupe, autour d'un thème, des pédologues français et africains ayant en commun le français comme langue de travail, et nous ne pouvons que nous féliciter en constatant le nombre important de pédologues africains qui ont pu faire le déplacement de Lomé. Une telle affluence, est-il besoin de le dire, souligne l'importance que nos pays accordent aux problèmes relatifs à une meilleure connaissance de leurs ressources en sols, base indispensable du développement de leur agriculture. A ce stade, permettez-moi de remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin, ont permis la tenue de ce séminaire.

*

Excellences,
Mesdames et Messieurs,

Dès les premiers pas de l'agriculture africaine, le paysan africain a accordé au sol l'importance qui lui revient en tant que ressource de base de la production. Il identifia plusieurs catégories de sols en fonction de leur fertilité et de certaines contraintes majeures. Il chercha à améliorer la fertilité de son sol par l'apport de matière organique et la pratique de la jachère. L'évaluation et l'aménagement des terres étaient en pratique longtemps avant l'avènement de la Pédologie. Dans l'histoire humaine, la technologie a précédé la science et il en est de même dans le domaine des sols.

L'étude des sols de l'Afrique est strictement liée à son histoire pré et post coloniale. En effet, si nous devons à C.F. Marbut et Shokalskaya les premières esquisses de la carte des sols de l'Afrique, ce n'est que vers 1945 que les études pédologiques ont réellement débuté sur le continent. Les promoteurs de ces études étaient l'Office de Recherche Scientifique et Technique Outre – Mer (ORSTOM, France), l'Institut National pour l'Etude Agronomique au Congo Belge (INEAC, Belgique), la Junta de Investigaceo de Ultramar (JIU, Portugal), la East Africa Agricultural and Forestry Organisation (EAAFRO) et son pendant Ouest Africain le "Soil and Land Use Survey Departement" de l'ex "Gold Coast", c'est – à – dire du Ghana.

Avec les indépendances, l'Afrique a continué à assurer la formation de ses pédologues, non seulement dans les institutions des anciennes puissances coloniales, mais également en dehors de celles – ci et ce, en particulier, en Europe de l'Est, en Chine et aux Etats – Unis d'Amérique.

La contribution de toutes les institutions étrangères à la connaissance des sols de l'Afrique a été à plus d'un égard très appréciable. Toutefois, il faut reconnaître que les méthodes différentes de cartographie et d'évaluation, associées à différents systèmes de classification des sols, ont quand même parfois constitué une entrave à la promotion des échanges d'information et de connaissances scientifiques entre les pays.

Conscients de ce problème, les participants au séminaire d'évaluation des ressources en sols de l'Afrique de l'Ouest, organisé par la FAO en 1970 à Kumasi (Ghana) avaient unanimement recommandé que les Institutions chargées des sols :

- adoptent la légende FAO/UNESCO de la carte mondiale des sols comme système de référence pour les divers systèmes de classification des sols ;
- utilisent les directives FAO pour la description des sols, de même que les méthodes d'analyse préconisées par la FAO ;
- mettent en place des mécanismes de corrélation des sols, tant au niveau national que régional, en vue d'une meilleure évaluation des ressources en sols de l'Afrique ;
- fassent périodiquement le point des travaux pédologiques exécutés dans les domaines de l'évaluation, de l'aménagement et de la conservation des sols ;
- facilitent le transfert de l'information d'une région à l'autre.

La mise en oeuvre de ces recommandations par la FAO conduisit à l'établissement, en 1972, d'un Comité de Corrélation des Sols de l'Afrique de l'Ouest. A la demande des pays membres de la FAO, un comité semblable fut mis en place pour les pays de l'Afrique de l'Est en 1974, en même temps que les activités du Comité de l'Afrique de l'Ouest s'étendirent à l'Afrique Centrale. Les activités de ces comités, dont le secrétariat est assuré par le Bureau Régional de la FAO pour l'Afrique à Accra (Ghana), couvrent la cartographie et la classification des sols, la fertilité et l'évaluation des sols, l'aménagement et la conservation. Ces comités, qui regroupent actuellement 36 pays, se réunissent alternativement tous les deux ans pour discuter d'un problème particulier, et ce à la requête des pays.

Qu'il nous soit permis ici d'adresser nos sincères remerciements aux institutions d'assistance bilatérale et multilatérale qui ont toujours manifesté un intérêt constant aux travaux de ces comités.

*

Excellences,
Mesdames et Messieurs,

Nous voici réunis dans ce beau cadre de l'Hôtel 2 Février pour discuter des problèmes relatifs aux sols tropicaux, et plus particulièrement aux sols tropicaux africains. Pourquoi ? Tout simplement parce que le sol est le support de la production et que l'Afrique ne pourra sortir de la crise alimentaire qui la secoue depuis de nombreuses années qu'en repensant de fond en comble ses méthodes de production agricole.

En effet, d'après les projections des Nations – Unies, la population africaine sera de 873 millions d'habitants à la fin du siècle et atteindra 1 580 millions en l'an 2025, comparé aux 600 millions actuels. La signification de ces projections en matière d'alimentation est que la demande alimentaire va doubler, voire tripler au cours des prochaines trente années.

La question que l'on est en droit de se poser, maintenant plus que jamais, est de savoir s'il y aura assez de terres pour pouvoir nourrir cette population, où elles sont situées, quel type d'utilisation conviendra le mieux, quel niveau de technologie sera le plus approprié et quels seront les risques d'érosion et de dégradation. En plus de ces besoins alimentaires croissants, il faut aussi penser aux besoins en bois de toutes sortes, au bétail et à son alimentation, à l'habillement des hommes et à l'expansion des villes.

Pour satisfaire tous ces besoins, nos pays auront sans nul doute à intensifier la production agricole. Mais il faudra maintenir un équilibre entre cette intensification et la protection des ressources en sols de la dégradation. C'est un défi à la Pédologie, de fournir aux planificateurs, aux aménageurs et aux utilisateurs les informations de base nécessaires au maintien de cet équilibre. Pour relever ce défi, il nous faudra bien connaître les sols africains pour mieux les utiliser.

Les bien connaître présuppose une bonne perception de la dynamique interne qui les régit et une parfaite maîtrise des phénomènes externes qui les influencent. Les mieux utiliser, c'est avant tout tenir compte de leur capacité de production en fonction du climat et des techniques culturales disponibles. Toute tentative d'utilisation en dehors de ces limites entraîne non seulement érosion et dégradation, mais aussi réduction constante des rendements.

Sur ces mots, permettez – moi encore une fois de féliciter très sincèrement les organisateurs de ce séminaire pour l'initiative qu'ils ont prise de nous réunir, et pour les remercier d'avoir bien voulu inviter la FAO à y prendre part.

Je souhaite un plein succès à nos travaux.

ALLOCUTION DE MONSIEUR LE PRESIDENT DE L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

M. LEVALLOIS
ORSTOM Paris

Monsieur le Ministre de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique,

Monsieur le Ministre du Développement Rural,

Monsieur le Recteur de l'Université du Bénin,

Monsieur le Responsable Régional des Ressources en Sol pour la FAO,

Messieurs les Membres du Comité Central,

Excellences, Messieurs les Ambassadeurs et les Membres du Corps Diplomatique,

Messieurs les Représentants des Organisations Internationales,

Messieurs les Directeurs Généraux et Messieurs les Directeurs des Ministères,

Messieurs les Directeurs des Instituts de Recherche,

Messieurs les Chercheurs,

Honorables Invités,

Mesdames, Messieurs,

Pour ma première visite en Afrique en tant que Président du Conseil d'Administration de l'ORSTOM j'avais retenu Lomé et le Togo, terre d'accueil dont le nom est étroitement lié à la coopération inter – africaine et internationale.

Il m'est particulièrement agréable d'avoir pu faire coïncider cette visite avec l'inauguration du Séminaire SOLTROP, Premier Séminaire Franco – Africain sur les sols tropicaux, et je tiens à remercier ici les Autorités Togolaises (et en tout premier lieu le Général Gnassingbé EYADEMA, Président Fondateur du Rassemblement du Peuple Togolais, Président de la République), d'avoir bien voulu accueillir cette importante manifestation.

*

Le Togo compte parmi les premiers pays qui se sont dotés d'un Service des Sols, puisque cette création date de 1970, Service des Sols devenu depuis Institut National des Sols, avec lequel l'ORSTOM s'honore de coopérer de manière constante et fructueuse.

L'ORSTOM est au Togo depuis 1947 et son effort de recherche s'y est régulièrement amplifié. Mais c'est avec la transformation de l'Office en Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération, en 1982, que cet effort s'est accentué de manière significative.

La création au Togo d'une Direction de la Recherche Scientifique et la signature d'un accord de coopération scientifique en 1987 entre le Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique et l'ORSTOM ont encore consolidé cette coopération.

Le rôle international croissant du Togo donne en outre à la recherche scientifique dans ce pays un rôle de catalyseur pour un renforcement de la coopération scientifique inter – africaine, et le Directeur Général de l'ORSTOM, M. Philippe Tenneson, avait été sensible à l'honneur qui lui avait été fait en février 1988 d'être invité à prendre la parole durant la première réunion des directeurs de la recherche scientifique des pays d'Afrique qui s'était tenue à Lomé, à l'initiative du Ministre de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique. Il avait eu alors l'opportunité de préciser les orientations récentes de l'ORSTOM pour un approfondissement des relations de coopération orientées vers le développement.

Depuis, en liaison avec ses partenaires dans plus de cinquante pays, mais plus spécialement avec les pays africains où s'est forgée son expérience,

l'ORSTOM a poursuivi sa réflexion. Et c'est dans ce contexte que se situe la mise sur pied, de concert avec l'Université du Bénin (Togo), de ce Premier Séminaire Franco-Africain de Pédologie Tropicale : SOLTROP 89.

*

N'étant ni pédologue, ni géologue, ni géographe, je ne commettrai pas l'imprudence de confondre une allocution d'ouverture avec une leçon inaugurale. C'est à Monsieur le Professeur Pédro, initiateur et organisateur de ce colloque, de vous tracer les orientations scientifiques de vos travaux, d'en préciser l'enjeu.

Je voudrais cependant, avec votre autorisation, Monsieur le Ministre, et votre indulgence, Monsieur le Recteur, rappeler l'importance de la Pédologie pour l'Afrique et pour les pays tropicaux, et rappeler la place que cette discipline tient à l'ORSTOM.

Permettez-moi un souvenir. Lorsque je préparais le concours d'entrée à l'Ecole Nationale de la France d'Outre-Mer -il y aura de cela bientôt quarante ans- j'avais été frappé par la lecture du beau livre de Pierre Gourou "Les Pays Tropicaux", ce livre révolutionnaire qui, pour la première fois, dénonçait le trompe l'oeil de "ces pays où la vie est facile, la terre féconde et l'effort fructueux", ce livre qui appelait à une étude objective des contraintes propres à ces pays, avant toute intervention des techniques européennes. Paul Rivet, qui préfaçait ce livre, en appelait à la recherche contre le sentimentalisme de l'époque qui se nourrissait de rêves d'évasion et de conquête.

Ce n'est pas sans émotion que j'ai relu le chapitre que Gourou consacrait aux "sols tropicaux" ; je cite :

"Les sols tropicaux sont plus pauvres et plus fragiles que les sols des régions tempérées. Leur exploitation exige de grandes précautions si elle veut éviter leur appauvrissement et leur destruction. Ces conditions donnent à l'agriculture tropicale un caractère précaire que l'agriculture de la zone tempérée ne présente pas, sinon dans les régions de tendance aride où l'érosion guette les terres défrichées ...".

Et combien de fois n'ai-je pas relu ce passage sur la formation de la latérite, je cite encore : "cette lèpre pédologique qui se forme seulement

en climat chaud et pluvieux, avec des alternances de saisons humides et chaudes ...".

Il faudrait pouvoir citer tout le chapitre qui a la rigueur et la force d'un drame antique. Je ne le ferai pas, bien que s'y trouvent exposés les éléments constitutifs de cette jeune Science des Sols qui, en 1948, n'avait pas encore acquis ses titres de noblesse et qui a droit de cité aujourd'hui, sous le vocable de Pédologie.

C'est en effet au fil de ces quarante dernières années que cette science s'est constituée. Elle s'est constituée en grande partie à partir des sols tropicaux, ce qui prouve une fois de plus l'intérêt que les milieux tropicaux peuvent apporter à la recherche, trop souvent marquée par une vision occidentale, hexagonale, une vision de pays de climat dit "tempéré".

"Une civilisation ne peut se développer que si elle repose sur une stable maîtrise du sol. Il est plus malaisé d'acquérir cette maîtrise en pays tropical qu'en pays tempéré". Cette phrase de Gourou, et ce sera ma dernière citation, explique et éclaire le fait que la Science des Sols, la Pédologie, ait été une des disciplines fondatrices de l'ORSTOM, qu'elle soit aujourd'hui une activité essentielle de l'Institut, qu'elle soit au coeur de la recherche pour le développement en coopération et qu'elle soit le motif de ce séminaire scientifique, qui réunit pour une semaine à Lomé les spécialistes des sols qui travaillent en Afrique.

*

La Pédologie française avait bien eu quelques grands précurseurs avant-guerre. Cependant, en 1943, lorsque l'ORSTOM crée sa propre Section de Pédologie à vocation méditerranéenne et tropicale, tout restait à développer sinon à créer dans ces domaines.

C'est à Georges Aubert que fut confiée cette section. Beaucoup d'entre vous ont connu cet homme exceptionnel que j'ai eu récemment le plaisir de saluer dans son bureau de Bondy où il vient encore travailler. L'essor de la Pédologie française outre-mer, à laquelle a beaucoup contribué l'ORSTOM, s'est longtemps confondu avec son activité et son rayonnement.

Au témoignage du Professeur Boulaine, lorsque Georges Aubert prit les choses en main, il n'existait en France ni enseignement, ni revue, ni bibliothèque, ni laboratoire, ni tradition scientifique spécialisée. C'est à mettre en place des concepts, des méthodes, des équipes et des

infrastructures nouvelles que l'ORSTOM va se consacrer, ainsi qu'à la formation des hommes.

La marque propre de l'ORSTOM a été de développer :
- une approche naturaliste qui cherche à rendre compte de la nature et du comportement des sols, en les percevant dans leur environnement ;
- une approche globale et dynamique de l'objet – sol qui associe tous les aspects de la Science des Sols. Ce concept globaliste était révolutionnaire en France, car il s'opposait à un découpage strictement analytique de l'étude du sol.

Ainsi, l'Ecole ORSTOM a-t-elle été marquée par l'approche morpho-génétique de la caractérisation des sols et par l'élaboration d'une classification qui a longtemps fourni à la Pédologie des pays francophones des concepts directeurs et un langage unifié. Elle lui a aussi fourni, en les recrutant ou en les formant, quelque 370 chercheurs en 40 promotions, dont la moitié sont originaires de l'Afrique.

Ainsi, dès la fin de la dernière guerre mondiale, les pédologues de l'ORSTOM ont-ils commencé à prospecter la zone intertropicale où tout était à faire. Ces premières études ont permis, outre l'implantation de nombreux projets, de faire l'inventaire des grands types de sols. Une quinzaine d'années plus tard un ambitieux programme de cartographie régionale des sols a été lancé dans de nombreux pays qui sont maintenant entièrement couverts. D'autres pays bénéficient d'une couverture des zones les plus intéressantes du point de vue agricole. Ces cartes de base sont toujours largement utlisées pour tous les projets de planification.

Ces travaux de cartographie ont fait apparaître certains problèmes plus fondamentaux, qui ont généré des études approfondies. Ces études ont permis, entre autres, de préciser l'organisation des sols sur les versants en fonction des différents facteurs du milieu et de faire progresser les techniques de cartographie des sols. Il n'est pas exagéré de dire que l'Institut est le seul organisme de recherche dans le monde à avoir fait de l'étude des sols dans le paysage l'objet d'une véritable recherche.

Aujourd'hui, sous l'impulsion du Professeur Pédro, la Pédologie à l'ORSTOM travaille sur trois grands axes :
- le premier est l'analyse de la répartition spatiale des sols et de la structure de la couverture pédologique, analyse faite dans l'espace et dans le temps : c'est la pédogenèse qui est poursuivie à petite, à moyenne et à grande échelle ;

- le second axe est le fonctionnement hydrique, envisagé à travers la dynamique de l'eau et des substances solubles dans les sols ;
- le troisième axe est celui du sol en tant que milieu biologique, support des plantes cultivées.

D'autres recherches, liées elles aussi au sol, sont poursuivies, en particulier sur la géochimie des altérations tropicales et sur le ruissellement.

Tout ceci pour dire qu'aujourd'hui la Science des Sols orientée vers les pays tropicaux mobilise, avec les équipes de l'ORSTOM et du CIRAD, le tiers du potentiel des chercheurs français dans cette discipline.

Mais il n'est pas de science digne de ce nom qui ne soit contrainte de se remettre en question, d'utiliser de nouveaux concepts, en un mot d'évoluer, d'une part pour répondre aux questions que la recherche qui avance présente sans cesse aux chercheurs, d'autre part pour utiliser les progrès technologiques, qui offrent des moyens d'investigation et de représentation plus performants.

C'est ainsi qu'une conception originale concernant la caractérisation des sols tropicaux et la représentation spatiale de la différenciation des couvertures pédologiques est en train de voir le jour. Par ailleurs, une connaissance plus approfondie du terrain a permis de passer de la pédogenèse à proprement parler à des études de fonctionnement des sols et à une meilleure prise en compte de la complexité des terrains.

La Pédologie de l'ORSTOM a vu également évoluer sa mission et donc changer ses méthodes d'invervention.

Au cours de la grande phase d'inventaire et de caractérisation de l'après-guerre, des services nationaux des sols ont été créés, qui ont progressivement relayé les équipes de l'Institut pour la cartographie. L'ORSTOM a donc pu reporter ses efforts sur une recherche plus fondamentale et sur la formation.

Car si les chercheurs de l'ORSTOM doivent assurer un travail de recherche qui fasse avancer les connaissances, il doivent également fournir un appui aux pays où ils interviennent pour répondre à leurs problèmes concrets de développement. Ils doivent aussi assurer un encadrement et une formation aux étudiants et aux jeunes chercheurs. Ce programme ambitieux, mais stimulant, fait de notre organisme un partenaire scientifique qui doit rechercher non seulement la coopération, mais développer le

partenariat avec les institutions des pays où il travaille, partenariat avec les instituts locaux, les universités, etc ...

*

Qu'il me soit permis, à cette occasion, de vous dire quelques mots de la vocation de l'Institut aujourd'hui.

L'ORSTOM est un établissement de recherche, mais un établissement de recherche original puisqu'il a une mission spécifique qui doit prendre en compte trois dimensions : recherche dans la zone tropicale, recherche pour le développement, recherche en coopération.

Chacun des termes de cette définition est indispensable, mais il convient de conserver à chacun d'eux sa juste place. Les trois termes ne peuvent pas être en effet remplacés l'un par l'autre :

- **la recherche** : c'est le coeur de l'action de l'Institut, c'est sa tâche première, sa fonction fondatrice. C'est ce que le Gouvernement a voulu confirmer en dotant l'ORSTOM d'un nouveau statut qui le met au même rang que les autres organismes scientifiques, bien qu'il ait vocation à travailler plus spécialement dans la zone tropicale ;
- **le développement** : c'est la finalité de cette action, une action mise au service du développement des pays du tiers monde et de la promotion des hommes qui les habitent ;
- quant à **la coopération**, c'est le mode de réalisation de cette action, ce doit être le style d'exercice de la pratique de l'Institut.

De par son mode d'action "en coopération", l'ORSTOM constitue donc un instrument de la politique française de coopération et participe à sa mise en oeuvre. Il a notamment pour tâche d'aider à l'émergence ou au renforcement des capacités nationales ou régionales de recherche des pays où il intervient. C'est ainsi qu'il consacre la plus grande part de ses moyens au continent africain et à la coopération franco – africaine.

C'est dans cet esprit que, dès cette année, le Ministère de la Coopération et celui des Affaires Etrangères ont prévu d'affecter au budget de l'ORSTOM une dotation de 3,5 MF à un système de partenariat, qui sera proposé à des équipes et à des chercheurs des pays où travaille l'Institut.

Ces équipes (ou ces chercheurs), avec lesquelles des chercheurs de l'ORSTOM travaillent ou ont travaillé sur le terrain, pourront être reconnues sur la base d'un accord formel d'association. La qualité

"d'associé" sera donc contractuelle, soumise à des échéances, et à des évaluations scientifiques conjointes et, dès lors qu'elle aura été reconnue comme associée, l'équipe partenaire bénéficiera du soutien scientifique de l'équipe ou de l'Unité de Recherche ORSTOM, d'envois de documentation, d'échanges de missions et enfin d'appui financier.

Je souhaite que des expériences pilotes puissent être mises en oeuvre dès cette année, en priorité en Afrique.

Dans ce même esprit de coopération Nord – Sud et de partenariat, l'ORSTOM poursuivra ses efforts en matière de formation des jeunes scientifiques, notamment par le développement des contrats "formation – insertion", destinés à des jeunes chercheurs dans le cadre de programmes intéressant leur pays et leur garantissant un emploi au terme de leur formation. Un crédit de 800 KF a été inscrit à cette fin au budget de l'Institut.

*

Ce colloque SOLTROP 89 est une illustration exemplaire de cette nouvelle façon de travailler de l'ORSTOM, en même temps qu'il illustre la vitalité de la Pédologie tropicale, science encore jeune et toujours en pleine évolution.

C'est en collaboration avec l'Université du Bénin que ce séminaire a pu être organisé. Je l'en remercie. Il illustre les relations qui ont été tissées avec les structures nationales dont les préoccupations rejoignent les nôtres, car ce n'est qu'en définissant des priorités nationales et en étudiant ensemble les priorités qui correspondent aux thèmes scientifiques retenus par l'ORSTOM qu'une opération de longue durée peut être initiée.

Le thème de votre séminaire concerne la connaissance des couvertures pédologiques pour mieux les gérer. C'est, bien sûr, une préoccupation majeure de nombreux pays africains. Tout le travail de cartographie des sols et de caractérisation des comportements doit maintenant être synthétisé. Il faut établir un état des connaissances actuelles sur les sols tropicaux et diffuser largement les résultats, afin de progresser le plus rapidement possible dans la voie d'une gestion rationnelle des sols africains, actuellement gravement menacés par la surexploitation et l'érosion.

J'ai noté qu'au cours des sept journées que durera le séminaire, trois journées seront consacrées aux séances en salle. Monsieur Pédro et le

comité d'organisation ont souhaité laisser une large part aux discussions entre tous les participants. Je ne doute pas que tous les participants, qui viennent de dix-huit pays africains et de quatre pays européens, exprimeront leurs préoccupations et leur souhaits, afin qu'à l'issue de votre travail des modalités d'action pour la Science des Sols en zone intertropicale puissent être identifiées.

Je vous assure de mon appui et de celui de mon organisme, pour que l'effort actuel en vue d'une meilleure connaissance des sols soit poursuivi, afin de parvenir à la meilleure gestion à long terme de la terre africaine.

*

Il est temps de conclure.

Il est deux façons de le faire : une façon ambitieuse qui dilate le sujet et le prolonge en ouvrant de larges perspectives ; il est tentant de le faire en disant que le monde tropical peut répondre aux demandes élémentaires d'une humanité en expansion : "surface triplée, rendements à l'hectare doublés, production totale multipliée par six, voilà ce qui pourrait se produire si l'ensemble du monde tropical était exploité au même degré que l'Asie tropicale" concluait Gourou dans son dernier livre "Terres de bonne espérance". Cette conclusion est sans doute utile pour tordre le cou à certains pessimismes, pour préserver toutes les chances d'un développement agricole, condition primordiale du développement tropical.

Mais je préférerais terminer par une conclusion plus modeste : en rappelant que les travaux de recherche et les recherches sur les sols ne suffiront pas à assurer le démarrage agricole des pays tropicaux si les hommes et les femmes de ces pays ne sont pas les acteurs et les conducteurs de ce développement.

Messieurs, je vous remercie de votre attention.
Je vous souhaite un excellent travail.

ALLOCUTION DE MONSIEUR LE MINISTRE DE L'EDUCATION NATIONALE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

T.K. TCHALIM
MENRS – BP 12175 – Lomé – TOGO

Messieurs les Membres du Bureau Politique et du Comité Central,

Excellences, Messieurs les Ambassadeurs et Représentants du Corps Diplomatique,

Monsieur le Président de l'ORSTOM,

Messieurs les Directeurs et Chefs de Services,

Honorables Délégués,

Mesdames, Messieurs,

Je me réjouis de l'honneur qui m'est fait de vous accueillir à Lomé et de vous souhaiter la bienvenue, au nom de notre Parti, le Rassemblement du Peuple Togolais et de son Président Fondateur, le Général Gnassingbé EYADEMA. Je souhaite que l'hôtel du 2 Février, symbole de notre Libération Economique, offre un cadre propice au bon déroulement de vos travaux.

Le séminaire que vous débutez ce jour se tient sous deux signes aussi évocateurs l'un que l'autre : la priorité à l'agriculture, qui caractérise tous les pays représentés ici, et la consolidation de l'espace francophone. En effet, comment ne pas souligner la place déterminante qu'occupe la spécialité dans laquelle vous évoluez pour le développement rationnel de l'agriculture dans nos pays ? La connaissance des sols tropicaux demeure un des défis majeurs pour le développement agricole dans nos pays africains, où l'accroissement démographique rapide rend indispensable une augmentation accélérée de la production agricole. L'amélioration de la fertilité des sols est une des conditions inéluctables de cet accroissement des rendements.

*

Or, les sols tropicaux déjà peu fertiles à l'état naturel, sont soumis à l'agressivité des pluies qui entraîne des phénomènes d'érosion intenses. Cela explique l'accent prioritaire mis sur la connaissance des sols des pays tropicaux, pour laquelle l'ORSTOM a joué un rôle déterminant depuis une quarantaine d'années.

Des surfaces considérables ont été couvertes par des travaux de cartographie à toutes les échelles. D'importants progrès ont ainsi été enregistrés dans la connaissance des sols tropicaux et dans celle de leur répartition dans le paysage. Il est admis que, loin de constituer une mosaïque, l'ensemble des sols d'une région s'organise suivant des règles bien définies qui ressortent des cartographies réalisées. Par ailleurs, la genèse et l'évolution des sols relèvent souvent d'une dynamique complexe dont la compréhension est indispensable pour la réalisation d'une bonne cartographie.

Il faut également étudier les mesures à prendre pour limiter les conséquences néfastes de certaines modifications des écosystèmes qui peuvent avoir des conséquences nuisibles à la fertilité.

Pour tous ces sujets, l'expérimentation agronomique s'est largement développée. Elle a permis entre autre de mieux définir les mesures à prendre pour valoriser les sols, notamment la composition et la dose des engrais à apporter à chaque culture.

Mais très souvent ce développement de l'expérimentation s'est fait indépendamment de celui de la connaissance des sols. Certaines expérimentations agronomiques approfondies ont été effectuées sur des sols

peu représentatifs, alors que dans d'autres cas des études pédologiques ont été réalisées sans suffisamment préciser le comportement des plantes sur chaque unité de sol. Il est extrêmement important de réaliser rapidement une intégration entre les deux approches, ce qui permettra de mieux situer les expérimentations agronomiques dans l'espace et de rendre plus fiable l'extrapolation des résultats. Cela conduira également à une meilleure valorisation des résultats pédologiques tout en ouvrant la voie pour de nouvelles orientations de la recherche.

Le thème que vous avez choisi pour votre séminaire, *"les sols tropicaux : bien les connaître pour mieux les utiliser"*, vous situe au coeur de tous ces problèmes.

*

Je voudrais mettre l'accent sur un deuxième signe, que votre réunion de Lomé me rappelle avec insistance. C'est que nous sommes ici entre francophones. Votre séminaire peut donc être considéré comme une manifestation du monde francophone, au cours de laquelle pays du Nord et pays Africains du Sud tous francophones se donnent la main pour cheminer ensemble dans cet important domaine de la Sciences des Sols. Comment ne pas s'en réjouir, à l'heure où les sommets successifs des Chefs d'Etats recommandent fermement que la consolidation de l'espace francophone donne une priorité accrue au développement de la Science et de la Technologie ?

Sommes – nous à l'aube de la création d'un nouveau réseau ? Je souhaite que vos travaux vous permettent de vous pencher sur cette préoccupation.

Il ne me reste plus qu'à formuler le voeu que les sept jours que vous allez passer ensemble vous permettent de faire le point des connaissances actuelles sur les sols tropicaux.

Les préoccupations concernant la classification des sols sont importantes. Mais je suggère que vous alliez au – delà, pour vous consacrer à l'étude de l'organisation de ces sols ainsi qu'à leur évolution et aux relations qui existent entre les sols et le comportement des plantes cultivées.

Toutes ces découvertes devront faire l'objet de la diffusion la plus large possible, afin que la connaissance des sols constitue une des clés qui permettra à notre continent de maîtriser son autosuffisance alimentaire.

Séance d'ouverture

Je déclare ouvert le Premier Séminaire Franco – Africain de Pédologie Tropicale organisé par l'ORSTOM et l'Université du Bénin.

Vive la Coopération entre les Hommes et les Etats pour une meilleure maîtrise des outils de notre développement.

INTRODUCTION PAR LE PRESIDENT DU SEMINAIRE

G. PEDRO
ORSTOM Paris

L'importance des sols de la planète à l'époque actuelle ne fait plus l'objet de discussions. Elle n'a jamais été mise en doute dans les régions tropicales ; elle était moins évidente jusqu'ici, pour beaucoup, dans les zones tempérées, l'occupation des sols et la mise en culture étant réalisées depuis très longtemps. Il n'en est plus de même à notre époque, la "déprise" des terres posant beaucoup de problèmes aux pays des latitudes moyennes, problèmes qu'on ne peut résoudre convenablement qu'en disposant de bonnes références sur les sols (références qui n'existent pas ou bien qui n'existent pas suffisamment).

Or, dans le même temps, la Science des Sols (= Pédologie) semble se trouver à une croisée des chemins, croisée sur laquelle les pédologues se doivent de réfléchir, ensemble et le plus vite possible.

Ceci est apparu plus ou moins, j'en suis sûr, à beaucoup d'entre vous ; à moi-même, cela a été clair à partir du moment où j'ai été chargé, ces dernières années, de procéder à des bilans et d'établir des rapports, soit pour le compte d'instances gouvernementales en France (1986), soit au titre de la Banque Mondiale (1987), soit encore dans le cadre de mes fonctions scientifiques à l'ORSTOM (1988).

Dans le même temps, l'image que l'on a des pédologues n'est pas -il faut bien le savoir- toujours excellente, bien que cette attitude soit en grande partie erronée par suite du manque d'informations quant à l'intense évolution en profondeur qui s'est produite depuis la dernière décennie en Science des Sols, surtout dans le domaine intertropical.

C'est donc pour cet ensemble de raisons que nous sommes réunis aujourd'hui à Lomé ; il s'agit avant tout de réfléchir à ce qui ne va pas (c'est-à-dire ce qui est désuet), de tenter de faire le point sur l'état de la Pédologie à l'heure actuelle, et enfin de promouvoir les conceptions les

plus modernes de cette discipline, vis – à – vis en particulier de tous ceux qui, sans être pédologues, ont besoin à quelque niveau que ce soit des résultats de la Science des Sols. Pour la première phase de ces réflexions, il nous a paru intéressant d'initier une réunion en Afrique tropicale et dans le cadre de l'Espace francophone.

*

Ceci étant, il est bon de rappeler dès le départ plusieurs éléments :

- D'abord la Pédologie est – il faut en être conscient – une science difficile, du fait de son enveloppe et de son domaine d'action :
  1) Elle implique en effet la maîtrise d'un grand nombre de connaissances portant sur les sciences de base (physique, chimie, minéralogie), sur les sciences naturelles (géologie, botanique ...), sur les sciences géographiques (géomorphologie ...).
  2) Elle se pratique avant tout dans le milieu naturel (terrain), mais en même temps au laboratoire ; d'une façon générale, elle couple donc implicitement les données de l'observation avec celles résultant de l'expérimentation et de l'analyse.
  3) Elle se doit de prendre en compte à la fois les notions d'espace et de temps ; celle de temps est toujours délicate à intégrer dans les raisonnements pédologiques.

Tout ceci est vrai dans la plupart des milieux de la surface du globe. Mais cela l'est encore plus pour les régions tropicales, qui ont subi l'action des phénomènes pédologiques depuis des milliers et, le plus souvent, des centaines de milliers d'années ; d'où la complexité des objets pédologiques (par rapport en particulier aux sols qui se sont développés en Europe en moins de 20 000 ans après la fin de la dernière glaciation), et d'où la longue marche scientifique nécessaire pour élucider les problèmes pédologiques de ces régions (et ils sont loin de l'être tous !). Une des premières "lois" de la Science des Sols, particulièrement vraie en zone tropicale, pourrait s'exprimer de la façon suivante :

"Il faut d'autant plus de temps pour caractériser une couverture pédologique que celle – ci a mis du temps à s'individualiser, donc qu'elle est plus vieille et qu'elle a été de ce fait le siège de multiples événements au contact de la bio – atmosphère".

- En second lieu, la Science des Sols constitue un des piliers des opérations de développement agricole et, de ce fait, on lui demande

beaucoup. Si elle a déçu dans un certain nombre de cas, c'est certes dû pour une part à elle-même (et nous allons essayer de voir pourquoi), mais cela résulte aussi de l'attitude scientifique de certains partenaires, agronomes notamment. Arrêtons nous quelques instants sur ce dernier point :

Sur quoi reposait l'agronomie jusqu'à une date récente ? Sur le trépied classique :

Amélioration des plantes	Fertilisation (des sols)	Protection des cultures

Que représente le sol dans tout cela ? Pas grand chose, en dehors d'être le support des cultures. En fait, en agronomie classique, il n'était pas pris réellement en considération, sauf indirectement, et uniquement en ce qui concerne l'horizon de surface sous le seul aspect de sa fertilisation (sol réservoir d'éléments fertilisants).

L'approche des problèmes d'agronomie était donc essentiellement chimique, en relation avec la mise en place d'expérimentations de laboratoire et de plein champ ; d'où la tendance à ne pas se référer à des travaux pédologiques, qui envisageaient le sol autrement, c'est à dire dans son intégralité et comme un véritable "corps naturel".

Il faut dire que dans ces conditions le rapprochement était difficile, car la Pédologie au départ s'est beaucoup investie dans l'étude de la genèse des sols, qui l'a aidée à reconnaître les grands types de sols de la planète, ceux-ci étant alors répertoriés, puis classés comme dans toute science naturelle. Mais les sols ayant une certaine couverture spatiale, la question de leur délimitation, donc de leur cartographie s'est vite posée ; c'est ce que l'on a tenté de résoudre en s'appuyant sur le "couplage" classification-cartographie.

Notons d'ailleurs que l'utilisation de ce couplage a pu se faire de diverses façons :

. recherche des types et classification	puis	délimitation spatiale

ou

. délimitation des unités de terrain	puis	dénomination pédologique de l'objet représentatif à l'aide de la classification

Il n'y a pas lieu de s'appesantir dès maintenant sur cet aspect des choses que nous reprendrons ensemble ultérieurement, mais il est bon de dire très clairement que dans tous les cas cette façon de procéder, basée sur la notion d'"entité – sol", a eu tendance à isoler les pédologues des autres communautés en les rendant *ésotériques* (et de plus en plus ésotériques d'ailleurs), à les dissocier des réalités du milieu naturel (rendant leur approche de plus en plus artificielle), et à les détacher ainsi de ceux qui, en amont ou en aval, avaient besoin de s'appuyer sur des données concernant les sols, tels les agronomes, les hydrologues, les géologues et les géographes.

Or, si la vitrine de la discipline se présente aujourd'hui de la sorte, c'est que les recherches pédologiques les plus approfondies effectuées depuis une quinzaine d'années, et les réflexions qui en découlent, ne sont pas encore bien entrées dans les mentalités, aussi bien au sein de la commu – nauté qui s'implique dans le sol que dans celles des disciplines voisines. A première vue tout se passe comme si, dans ce domaine, on utilisait encore souvent des lampes à huile alors qu'on a l'électricité à sa portée.

Il est certain qu'aujourd'hui, à la lueur des travaux récents effectués dans des domaines variés de la Science des Sols, tout apparaît coordonné dans la caractérisation des sols :

constitution et structure
genèse et fonctionnement
caractérisation et cartographie

en sorte qu'il n'est plus possible :

- de se contenter d'étudier la fonction chimique (nutrition minérale des plantes) en délaissant les autres fonctions du sol qu'on peut appeler :

. circulatoire (eau),

ou

. respiratoire (air),

celles – ci étant très importantes dans le maintien de l'intégrité du sol au cours de son évolution et de sa mise en culture. Ceci est vrai partout, mais en particulier dans les régions tropicales où les sols sont extrêmement fragiles, et donc susceptibles d'être la proie de phénomènes irréversibles de dégradation, de compaction et de prise en masse ;

- de continuer à n'utiliser, dans l'approche spatiale, que la bijection "classification – cartographie", alors qu'il est clair aujourd'hui que la compartimentation de l'espace pédologique est une chose, et que l'existence d'un référentiel scientifique, permettant le transfert des informations pédologiques, en est une autre ;

- de ne pas prendre assez en compte la notion d'échelle dans l'analyse de l'espace pédologique, notion qui est fondamentale pour représenter les "données – sol" en fonction de leur "pas" au sein du milieu naturel, c'est – à – dire de la taille caractérisant leur motif de répétition. Ceci est vrai dans tous les cas, mais cela l'est spécialement au plan agro – pédologique ; il est clair par exemple que la réussite dans ce domaine implique avant tout d'effectuer des descriptions pédologiques et des observations agronomiques à la *même* échelle.

On pourrait continuer dans cette voie, mais cela n'est pas indispensable, parce que les différents points pourront (et devront) être évoqués au cours du séminaire. Il s'agissait simplement de rappeler dans cette introduction quelques remarques toutes simples, comme par exemple :
- l'évaluation d'un sol ne se résume pas à la seule connaissance des caractéristiques *chimiques* des horizons supérieurs ;
- l'étude pédologique ne se borne pas à des problèmes de classification.

C'est en partant de ces éléments que le comité d'organisation a été amené à bâtir le projet scientifique du séminaire. Il l'a fait autour du sol considéré comme un *tout* (objet organisé aux diverses échelles) et de la Pédologie envisagée comme la "Science des Sols", dans le sens le plus général du terme. De ce point de vue, nous avons retenu de nous intéresser à la caractérisation des sols aux différents points de vue qui paraissent importants à ce jour, à savoir :
- caractérisation dans le but de connaître et de préciser leur distribution spatiale à différentes échelles ;

- caractérisation en vue de contrôler leur évolution sous l'influence de la mise en culture ;
- caractérisation afin de mettre en évidence leur fonctionnement ainsi que leur comportement ;
- caractérisation en vue de leur évaluation.

Ce sont ces différents aspects qui constitueront la trame du programme.

Nous discuterons en premier lieu des problèmes relatifs à l'aspect : "**bien connaître les sols**" : il s'agit avant tout de réfléchir à la compartimentation de l'espace pédologique à différentes échelles, c'est-à-dire depuis le paysage jusqu'à la parcelle et le champ. Nous commencerons dès ce matin (M. Gavaud), puis nous consacrerons cet après-midi et demain matin à la présentation de cette question.

Nous passerons ensuite en revue les thèmes relatifs à la connaissance des sols "**pour mieux les utiliser**". Cela concerne essentiellement l'étude des sols en relation avec les plantes qu'ils supportent, avec deux aspects :
- il s'agira tout d'abord de la caractérisation des sols à la suite de la mise en culture (mardi après-midi) ;
- viendra ensuite l'étude du fonctionnement des sols en relation avec l'alimentation hydrique et minérale des plantes (mercredi matin).

En troisième lieu, nous envisagerons les questions de ressources en sols et d'évaluation des terres, en rapport avec les problèmes d'aménagement et de mise en valeur (mercredi après-midi).

Ce qui nous conduira à la tournée de terrain de trois jours vers le Nord Togo (jeudi, vendredi et samedi) où seront abordés, dans la mesure du possible, les différents aspects discutés en salle.

Il ne nous restera plus, dimanche prochain, qu'à dresser le bilan des travaux et à faire le point des discussions, avant de prononcer la clôture du Séminaire.

*

Ainsi que vous pouvez le constater, l'enveloppe est assez ambitieuse ; c'est la raison pour laquelle le comité d'organisation a adopté des modalités de travail qui permettront, nous l'espérons, de fonctionner intellectuellement dans les meilleures conditions. Nous avons retenu ainsi le principe de deux à trois exposés par séance, ces exposés liminaires permettant en quelque sorte de faire un peu le point de la question, et surtout d'initier la discussion. Les sessions en salle doivent en effet être conçues comme des

séances de travail et non, à l'image des Congrès habituels, comme une succession de communications diverses où les discussions se limitent à quelques questions.

Certains d'entre vous ont déjà indiqué les points qu'ils voulaient voir aborder, d'autres le feront en cours de séance et même pendant les pauses. Des posters ont été préparés afin de favoriser les échanges en dehors des sessions. Ils doivent être envisagés comme des lieux de rencontre privilégiés permettant de discuter en petits groupes sur les différents problèmes évoqués. C'est une méthode de travail efficace, qui tend à se généraliser et qui devrait rester comme un des aspects marquants de ce séminaire.

Le programme général étant ainsi établi, il ne reste donc qu'à nous mettre au travail et à espérer de fructueux développements.

BIBLIOGRAPHIE

PEDRO (G.), 1986. – La Science des Sols en France. 1 vol. Ed. de l'ORSTOM, 335 p.

PEDRO (G.) et KILIAN (J.), 1987. – Les travaux pédologiques et les études des milieux physiques réalisés par les organismes français de recherche pour le développement dans les régions chaudes – Séminaire "Sols et Eaux" – Banque Mondiale, Washington, 15 – 16 mai 1986, pp. 7 – 65 (bilingue français – anglais).

PEDRO (G.), 1987. – La thématique scientifique en Pédologie tropicale. Réflexions à partir de l'expérience ORSTOM. *Cahiers ORSTOM*, Sér. Pédol., 23(4) : 295 – 302.

L'ORGANISATION DES SOLS DANS LE PAYSAGE

LA PRATIQUE DES ETUDES DE PAYSAGES PEDOLOGIQUES.
Application à deux exemples de la zone tropicale (Vénézuela et Sénégal)

M. GAVAUD
ORSTOM - BP 1386 - Dakar - SENEGAL

RESUME

Cette communication tente de faire le point sur la pratique des études pédologiques. En essayant de mettre de l'ordre dans ce domaine, cinq groupes de méthodes relatives à la connaissance et à l'expression de la distribution spatiale des sols ont pu être distingués :

1 - représentation globale et cartographie à petite échelle,
2 - représentation taxonomique et cartographie par associations,
3 - segmentation et cartographie géographiques,
4 - toposéquences et relation de voisinage,
5 - analyse "structurale" complète.

Une application de ces conceptions est présentée dans la seconde partie. Elle est fondée sur l'étude de deux cas choisis en zone tropicale : Amazonie vénézuélienne (climat tropical humide) et Sénégal (climat tropical sec).

INTRODUCTION

Il existe des relations entre la modélisation pédologique et la perception du paysage. Cette communication en présente quelques modalités pratiques illustrées de cas concrets, afin d'en préciser l'exercice et la portée.

Un catalogue de solutions au problème de l'inclusion de critères de nature spatiale dans la caractérisation d'une couverture pédologique est proposé en première partie. Il est fondé avant tout sur le fait que les ensembles principaux de références morpho-analytiques, taxonomiques et géographiques appliqués successivement aux sites, aux collections et aux paysages, et permettant d'organiser les données de l'inventaire et de la cartographie,

ne sont pas indépendants. Ils sont en effet construits et associés en fonction de l'état des connaissances et de l'ordre de grandeur des phénomènes. Pour les besoins de la mise au point envisagée, la documentation peut être répartie entre cinq groupes selon la nature, la richesse et l'intégration de l'information.

Le premier groupe privilégie les facteurs et, comme expression géographique, la zonalité. Une présentation de la dégradation des sols au Sénégal montre qu'il garde une valeur didactique. Le second groupe, taxonomique mais assorti d'indications d'ambiance pédogénétique, structure toujours le message pédologique, la documentation cartographique et une grande partie des applications. Le troisième prend les segments du paysage comme éléments de la stratification des observations. Il a la faveur des géographes, des pédologues et des naturalistes car de conception simple et facilitant la multidisciplinarité, il donne une première approximation du maillage paysagique à un coût acceptable. Le quatrième groupe ajoute une restitution à peu près continue des horizons dans une direction privilégiée et dans celle des voisinages probables. Le cinquième est celui de l'analyse "structurale" proprement dite, dont la valeur heuristique tient à ce qu'elle atteint la continuité tridimensionnelle et qu'elle assure l'indépendance des observations de la surface à l'égard de celle des structures profondes.

Après cette revue, la seconde partie est consacrée à l'emploi de méthodes relevant des groupes 3 et 4 dans deux pays fort différents, l'Amazonie vénézuélienne humide sur socle et le Sénégal sec et sédimentaire. La dépendance entre la distribution des terrains et de leur nature d'une part, et les méthodes de travail et de formalisation d'autre part, est analysée. Un tableau des objets d'étude et des méthodes de description servira à présenter la conclusion.

I - REVUE DES METHODES USUELLES EN VUE D'EXPRIMER LA DISTRIBUTION SPATIALE DES SOLS

1 - Premier groupe : Représentation globale et cartographie à petite échelle

Les descriptions les plus simples et les plus spontanées de la couverture se limitent aux caractères corrélables à des données géographiques d'extension connue à petite échelle. La répartition par grands volumes, enveloppant tout ou une partie des

profils avec des désignations immédiates et faciles, est en effet suffisamment évidente pour être souvent accessible à une simple étude préliminaire. La géographie zonale utilise des critères d'ordre climatique ou biocénotique. Les reconstitutions historiques d'échelle continentale (PEDRO et VOLKOFF, 1984) associent une synthèse pédologique à une chronologie. L'emploi d'une taxonomie de rang élevé ou de références générales est alors indispensable. Le premier cas relève des classifications génétiques qui y trouvèrent leur origine et y conservent leur meilleur emploi. Le second, basé sur les références générales, implique ce que, depuis peu, on nomme "ensembles cognats" (*) (AFES, 1988).

L'intérêt didactique de cette procédure, venu d'un accord entre l'échelle et une présentation globale des faits, est renforcé par le flou conceptuel et le manque de données entre les unités de terrain les plus petites et les plus grandes, entre les toposéquences et les surfaces ou les zones. On peut en donner comme exemple l'état de la dégradation des sols du Sénégal (GAVAUD, 1988). Celui-ci a été établi en s'appuyant sur la carte des isohyètes et de leur déplacement pendant la sécheresse (LE BORGNE, 1988, fig. 1), sur la carte des dégradations de la végétation estimées sur l'imagerie satellitaire (USAID, 1986), sur un ensemble de notices pédologiques (dont celle de MAIGNIEN, 1965), enfin sur des observations de terrain récentes effectuées dans tout le territoire. Ces dernières ont montré qu'une présentation par petites régions était la meilleure, parce que l'érosion dépend fortement de conditions locales, physiques et humaines. En raison des références bibliographiques disponibles et, dans le même temps, pour rester dans une terminologie familière, on a eu en fait recours à la démarche ordinaire consistant à croiser une carte morphopédologique au niveau des surfaces globalisant les réponses spécifiques des sols (fig. 2), avec les cartes des isohyètes (*Cf.* fig. 1) qui permettent de déterminer l'intensité de la dégradation (fig. 3). Cet exercice géographique est bien conforme à la définition liminaire, puisqu'il revient à

(*) ensemble cognat : ensemble de sols de types différents, mais ayant en commun un caractère important.

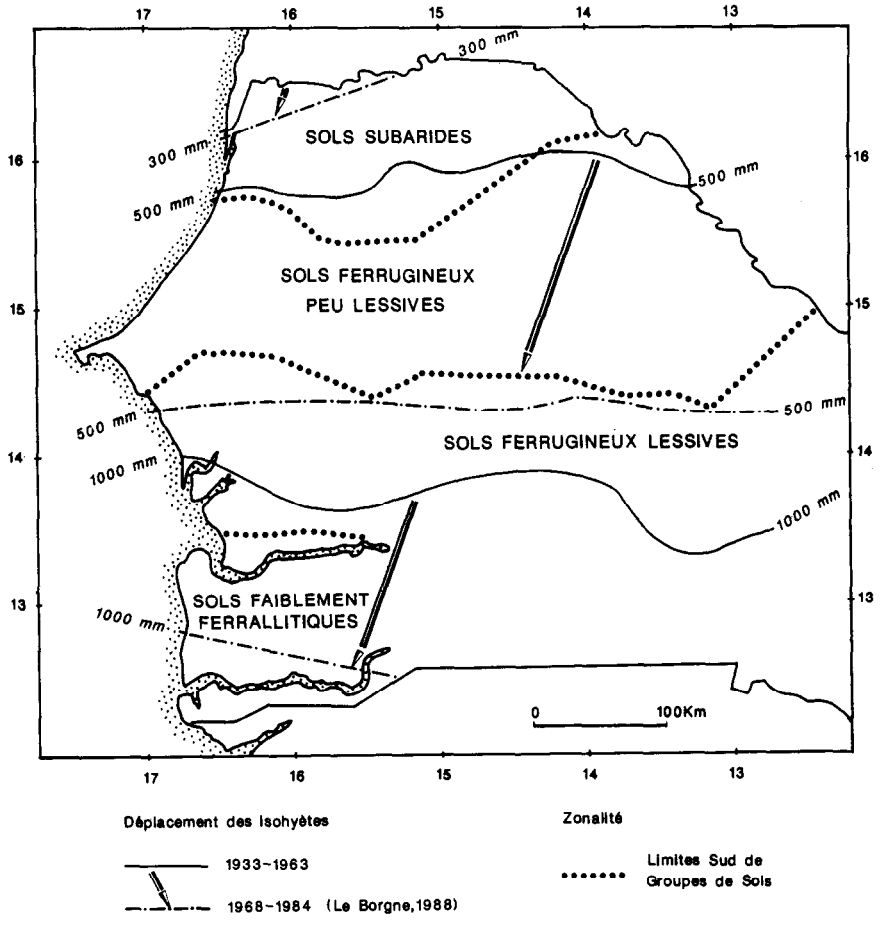


Figure 1 : *Variation de la dégradation des sols dues à la sécheresse au Sénégal.*
I – Zonalité et déplacements des isohyètes

généraliser la distribution des caractères, physiques et texturaux, et à l'associer à celle des pluies et de la végétation. Le modèle verbal associé le plus simple consiste alors à décrire les progrès de la dégradation par un déplacement vers le sud au moment de la sécheresse, des zones biocénotiques, modulé par les propriétés des "ensembles cognats" précités. Aux dépens de la rigueur scientifique, on a gagné en force expressive : on a pu décrire aisément l'avancée de 180 km

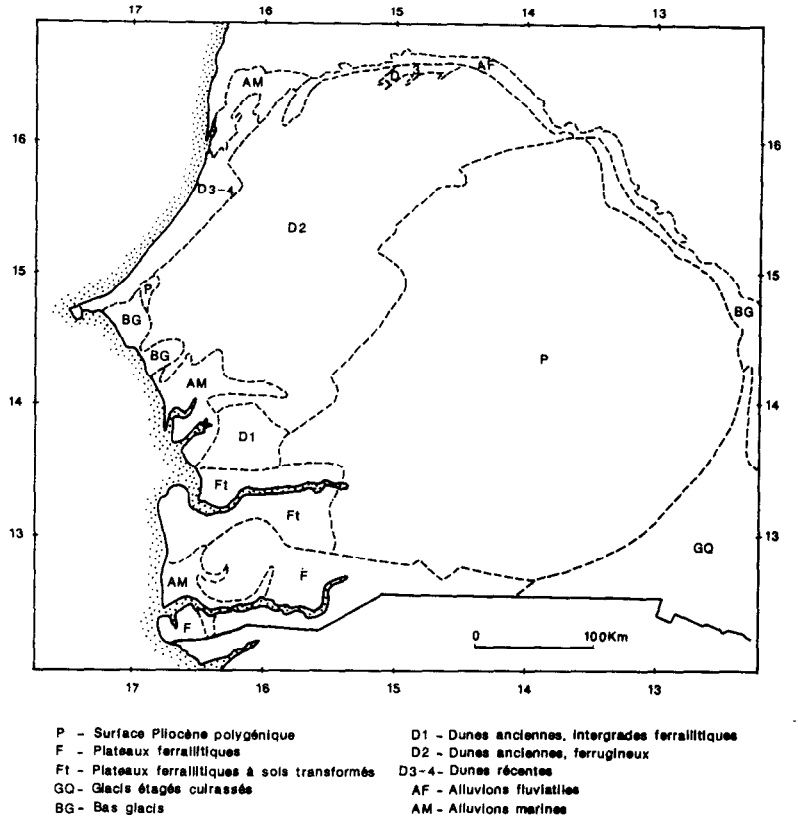


Figure 2 : *Variations de la dégradation des sols dues à la sécheresse au Sénégal.*
II – Grandes unités morpho-pédologiques

vers le sud du décapage mixte aréolaire hydrique et éolien du domaine subaride, et celle de 100 km de la dégradation propre aux sols ferrugineux peu lessivés.

La géographie des sols, pratiquée à ce niveau, représente plus qu'une expression commode d'une sorte de thématique à petite échelle. Elle est indispensable à l'étude comparée des caractères ou des compartiments superficiels des sols, qui se modifient à peu près au même rythme et à la même échelle que les facteurs et les composantes climatiques et biocénotiques et qui, de ce fait, ne peuvent plus être assignés

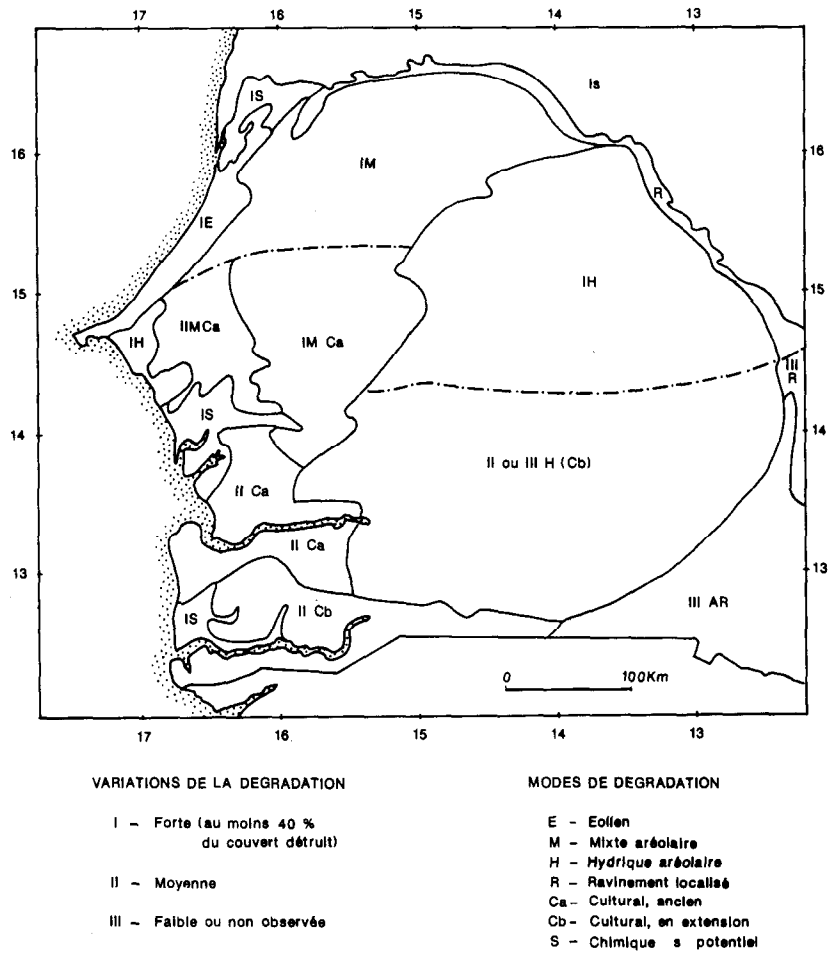


Figure 3 : *Variations de la dégradation des sols dues à la sécheresse au Sénégal*

III – Facteurs zonaux x grandes unités pédo – morphologiques.

à toute autre structure plus ancienne, inerte et localisée de la couverture pédologique. Nombreuses sont les études contenant des indications éparses mais convergentes d'une pédogenèse "apicale", à déterminisme surtout climatique, dont l'autonomie ou même la discordance par rapport au reste du solum ont

été progressivement démontrées depuis une vingtaine d'années. Si, jusqu'en 1965, on étendait à tout le sol la dynamique que suggéraient les concordances avec une végétation encore diversifiée (MAIGNIEN, *op. cit.*), en 1985, à l'issue des massives destructions résultant de la sécheresse, la totale indépendance des organisations superficielles à l'égard du reste du sol était démontrée (VALENTIN, 1985), avec comme conséquence l'ouverture d'un nouveau chapitre de l'étude des redistributions horizontales (BOULAINE, 1986). Entre-temps de nombreuses adaptations rapides à la végétation et au climat étaient établies pour les structures des horizons de surface ferrallitiques (HUMBEL, 1976 ; CHAUVEL, 1977), pour les matières organiques (FELLER, 1977) et les solutions du sol (ROOSE, 1981). Beaucoup reste à faire cependant, quant à la prise en compte géographique de ces phénomènes.

2 - Deuxième groupe : Représentation taxonomique et cartographie par associations

La plupart des références, professionnelles ou vulgarisées, sont contenues dans ce second groupe documentaire, qui inclut la majorité des cartes régulières à petites et moyennes échelles. Elles sont construites selon les règles classiques fondées sur l'existence de surfaces élémentaires à la fois homogènes et correspondant à des volumes de bas niveau taxonomique : polypédons et *soil landscape bodies* (SCHELLING, 1970). La diversité de la couverture est modélisée par la combinaison de telles surfaces. Elle s'exprime toute entière par les variations taxonomiques des contenus et par la géométrie des contours (FRIDLAND, 1974 ; BOULAINE, 1975). Les descriptions étant normalisables et leur interprétation étant indépendante de tout voisinage interne et externe, la méthode par associations taxonomiques possède une grande efficacité. C'est la raison qui la fit s'imposer, dès les années 1930 (CONACHER et DALRYMPLE, 1977), au détriment de conceptions parfois aussi anciennes mais qui ne purent pas être formalisées, telles la *catena* de MILNE (1935), qui intégrait le voisinage topographique, et la *tessera* de JENNY (1958, *in* CRUICKSHANK, 1972), qui accrochait un petit morceau de la biocénose à l'unité de description pédologique. Comme il n'est pas si facile de trouver toujours des surfaces élémentaires homogènes, comme il n'est pas si sûr d'autre part que le sens

des descriptions soit indépendant du site où celles – ci sont relevées, comme on peut préférer encore, même pour une taxonomie, exprimer plutôt des variations que de codifier des standards, les pédologues de terrain, depuis près de 60 ans, sont souvent conduits à outrepasser, pour exprimer des différenciations pédologiques et des régularités géographiques, un langage qui gomme ces différenciations et ignore les régularités. Les solutions à ce double problème peuvent être classées selon le poids relatif des caractéristiques pédologiques ou paysagiques en une série, dont deux extrêmes sont présentés ci – dessous, pris dans la collection de cartes du Sénégal :

- en 1966, KALOGA a recours à un "profil – type" accompagné, pour chaque taxon, d'une liste unique d'horizons décrits avec une marge de variations suffisante pour intégrer les observations de nombreux sites. Le paysage est condensé en s'appuyant sur les notations indispensables à la définition d'une "ambiance pédogénétique" et à la compréhension de son fonctionnement.

- en 1986, l'USAID choisit l'autre alternative. La description pédologique tend à se réduire alors aux références taxonomiques et elle est croisée, dans la légende, avec une typologie géomorphologique et lithologique indépendante.

Dans le cas général, pour ne pas déborder exagérément les capacités d'information de la taxonomie, il faut soit amalgamer les observations pédologiques, soit gommer l'organisation du paysage, en prétextant par exemple de l'échelle. De leur côté, les spécialistes ont proposé des solutions pour améliorer le rendu de la continuité par des modèles verbaux et géométriques (FRIDLAND, 1974 ; BOULAINE, 1975), ou encore par la statistique des variables pédologiques et des distances d'observation (GIRARD, 1983). De fait, les premiers ont été utilisés pour améliorer les légendes du troisième groupe présenté ci – après. Quant à la seconde, elle exige une densité d'observations qui n'est pas atteinte dans les études courantes où, précisément et paradoxalement, on demande aux corrélations géographiques (qui ne sont exprimées que dans l'approche suivante) de réduire les coûts.

3 - Troisième groupe : Segmentation et cartographie géographiques

La forme la plus simple et la plus employée, aux échelles moyennes de la cartographie des paysages, fait d'une segmentation systématique du modelé sur des critères externes un préalable obligatoire à la stratification des observations pédologiques. Un taxon ou une suite définie de taxons ou de types caractérisent ces unités élémentaires du modelé, facettes ou segments (BEAUDOU et SAYOL, 1980). La juxtaposition ordonnée de ces derniers recompose le paysage (*land system*). Cette procédure convient à la couverture tropicale, fortement structurée, où des associations spécifiques des sols, des formes et de la végétation sur des panneaux bien délimités suggèrent une histoire ou un déterminisme propre à chacun. Les cartographies de ce groupe tendent à augmenter. Mais elles témoignent, par leur diversité de présentation, d'une doctrine en pleine évolution ou, si l'on préfère, de difficultés nombreuses et mal résolues, tenant d'un côté à la conception du paysage pédologique, et d'un autre à l'intégration des données et à leur expression.

. Le premier obstacle est qu'il n'existe pas de doctrine unique qui permette de définir le paysage et ses parties, donc de procédure universelle de découpage. Les plus pessimistes des géographes pensent même que cette opération est parfaitement arbitraire, car il n'y aurait pas d'objets naturels spatiaux significatifs (OPENSHAW, 1981). Les optimistes croient au contraire que "taxonomie et chorologie aboutissent au même résultat", et que les ressemblances et les proximités ajoutent leur sens (RICHARD, 1974). La cartographie strictement taxonomique s'accommode de l'option pessimiste, mais celle des paysages implique une adhésion au moins partielle à l'option optimiste. Il n'est d'ailleurs pas si facile d'éclairer ce problème, car les règles de partition dépendent de trois logiques d'ordonnancement :
  - la première, géographique, est celle des unités dynamiques, des hiérarchies de bassins versants ;
  - la deuxième, pédogénétique et historique, est celle des volumes de sols, correspondant à des surfaces morphologiques à petite échelle, aux segments à grande échelle ;

- la troisième s'exprime par des variations de complexité ou de niveau de la classification.

La voie choisie le plus souvent est mixte (POSS, 1982) : pédologique aux débuts de l'agrégation avec des segments et des séquences, mais géographique ensuite en acceptant un morcellement des surfaces entre des paysages distincts. Cette solution est actuellement la meilleure pour les paysages d'entaille, de contact, alors que pour les paysages à vieilles surfaces d'altération réparties par blocs massifs il est possible de conserver une logique plus purement pédologique de bout en bout, comme nous le verrons pour l'Amazonie vénézuélienne.

. Le second problème est celui de l'intégration des données et de la définition synthétique des parties de paysage. LUCAS (1978) a fait une analyse des procédés et des recherches en ce domaine.

Rappelons la démarche géométrico – taxonomique de FRIDLAND (1974). BEAUDOU et CHATELIN (1977) et BEAUDOU et SAYOL (1980) proposent une série d'objets de taille croissante, plutôt conçus en volume pour les plus petits (phase, horizon, pédon, segment), en surface pour les plus grands (paysage, région). KILIAN (1974) et TRICART (1974) ne retiennent que les caractères significatifs de la stabilité du paysage pour leurs cartes "écographiques intégrées". CONACHER et DALRYMPLE (1977) proposent un référentiel de "surfaces unités" fondé sur des processus pédo – morphologiques. Aucune de ces solutions n'est générale et nombreux sont les auteurs à choisir pour leurs cartes et notices d'exposer séparément, en série ou en parallèle, deux ou trois modes d'association des sols dans la taxonomie, dans les unités dynamiques, dans les ensembles géomorphologiques et biocénotiques. Les artifices sont divers, et vont d'un texte multiple (VALLERIE, 1973) à une mise en colonne astucieuse (LUCAS, 1978). Le procédé est lourd mais inévitable,car il vaut mieux conserver l'information que la perdre dans une synthèse qui n'aurait qu'une valeur locale. Il faut ajouter que certaines réalisations graphiques présentent une grande force expressive et dépassent leurs

commentaires, telles les cartes à fin pastillage segmentaire de Centrafrique (BOULVERT, 1976 et 1983).

. Le troisième obstacle est lexicographique. Si les données sont malaisément intégrables, ce n'est, d'après certains naturalistes et géographes, que parce qu'elles sont exprimées dans des langages incomplets et incompatibles, propres surtout à l'analyse dans des domaines techniques séparés. S'appuyant sur une critique en règle (CHATELIN, 1979 et CHATELIN *et al.*, 1982), ceux-ci proposent une solution radicale (BEAUDOU *et al.*, 1978). Ils divisent tout l'espace bio et lithosphérique en couches successives, qu'ils décrivent au moyen d'une nomenclature unifiée, transdisciplinaire et néologique, privilégiant l'expression immédiate et synthétique des données structurales. L'apprentissage lexical fait, cette terminologie offre des possibilités combinatoires étendues dans le champ géographique. On peut par exemple créer des graphes de "types" morphologiques, pédologiques et phytostructuraux ou des "modèles verbaux" appropriés à la description de tout ou partie d'un paysage. Le vocabulaire "systémique" n'associe qu'un nombre limité de caractères simples pour rester dans les limites d'un volume acceptable. C'est un défaut qu'il partage avec les taxonomies, autres langages synthétiques ; il se prête donc mal aux études détaillées productrices d'un flot considérable d'informations. A l'enthousiasme des géographes répond ainsi la réticence des spécialistes.

En résumé, dans cette géographie des sols, la division du paysage dépend de la nature de ce dernier. Elle est de type pédologique sur les surfaces d'altération et mixte dans les entailles. La répétition des divers aspects de l'agrégation paye sa sûreté par un manque d'élégance, lié au fait qu'elle veut intégrer toutes les données.

4 – Quatrième groupe : Toposéquences et relation de voisinage (fig. 4 et 5)

Ce groupe de travaux introduit dans la cartographie géographique de troisième type les données plus détaillées d'études de toposéquences ou de périmètres limités. La méthode tend à une reconstitution complète des horizons dans une direction

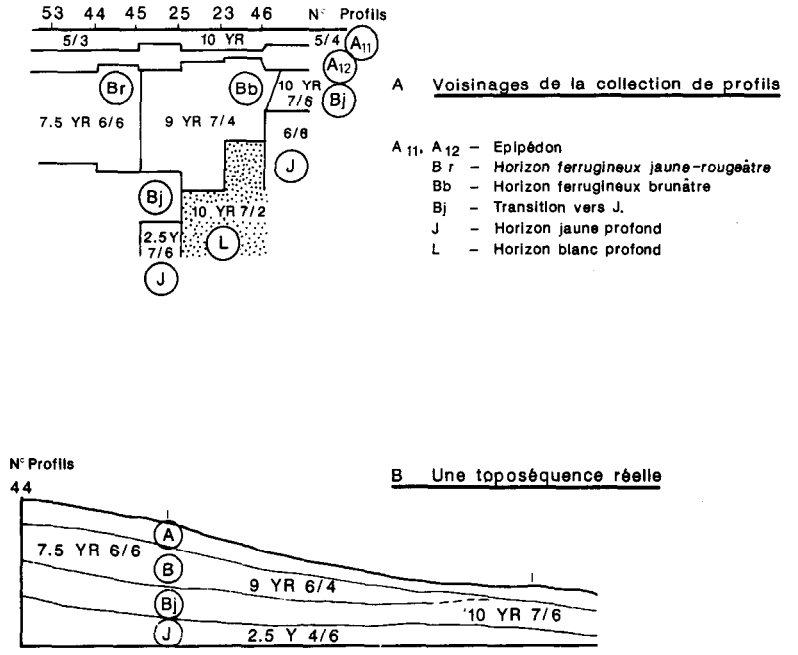


Figure 4 : *Voisinages probables dans un type de modelé dunaire : règle de la succession des couleurs des horizons B (d'après FELLER, 1974).*

privilégiée pour les unités paysagiques les plus importantes et à celle des voisinages probables de ces mêmes volumes partout. Les procédés ont été explicités lors d'une cartographie au Nord Cameroun (BRABANT et GAVAUD, 1985). A l'origine, ils se proposaient de visualiser des anisotropies verticales taxonomiquement inextricables par des dispositions latérales simples d'horizons. Ces procédés se sont développés par la suite, dès lors que ces structures se sont révélées modélisables.

Les unités de description sont ici des horizons de référence, dont il faut dresser un catalogue *ad hoc* adapté au terrain local. Les unités pédologiques de terrain sont des combinaisons spécifiques de ces horizons, conçues en trois dimensions mais échantillonnées et modélisées suivant deux dimensions. Les modèles ou "catégories", dont le nombre limité a rendu possible le développement de cette méthode, sont définis par un ensemble d'horizons de référence et par un schéma conservant les propriétés topologiques de continuité et de

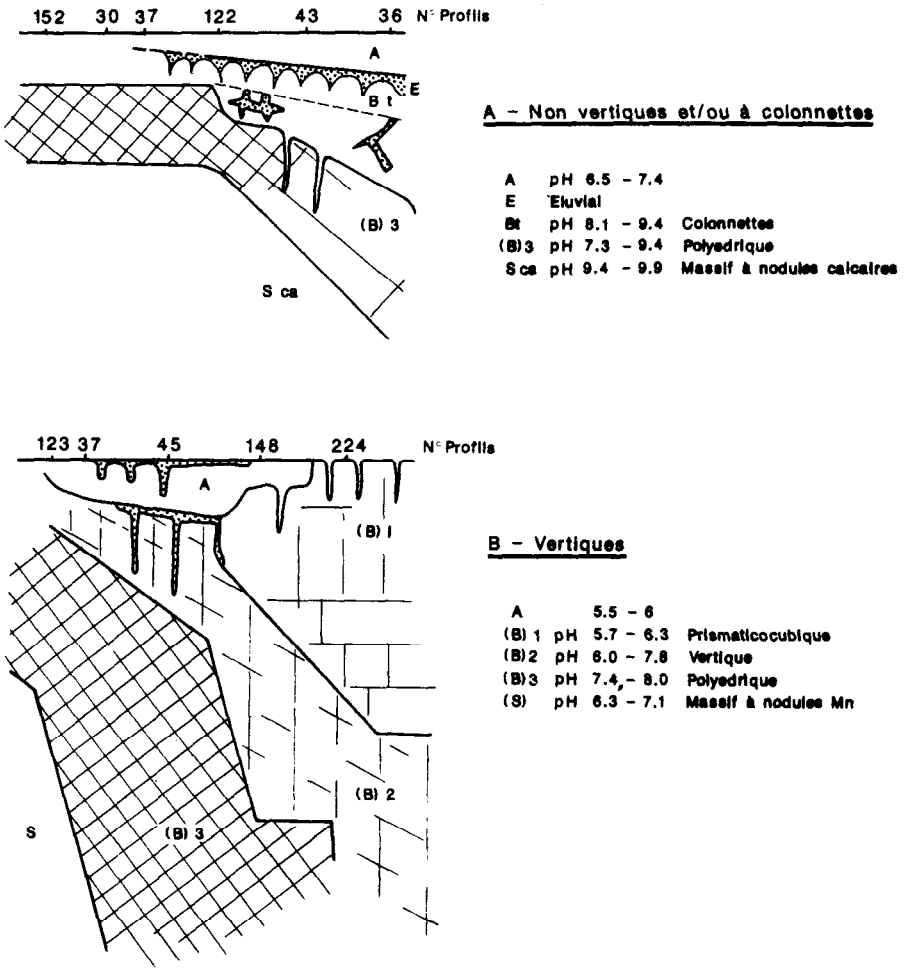


Figure 5 : *Voisinages probables dans une collection de sols mal drainés : règle des profondeurs croissantes vers l'aval des volumes massifs, polyédriques et prismatico – cubiques corrélés avec les pH (d'après FELLER, 1975).*

voisinage de l'original, ainsi qu'une partie des propriétés géométriques (proportions, sens des pentes et des courbures). Les figures les plus simples correspondent aux unités à organisation verticale, réelles comme les séries, ou fictives lorsque, faute de données, on adopte le profil – type utilisé

dans le second groupe méthodologique. Les dessins les plus complexes viennent des unités à organisation latérale, *catenas* ou toposéquences. Elles représentent des objets assez grands dont l'ordre de grandeur va du polypédon à celui d'un nombre limité, souvent un seul, de segments fonctionnels. Les références à la classification ne sont données que sur des verticales appropriées, correspondant à une identification taxonomique certaine. En revanche, les espaces intercalaires correspondent au champ laissé libre aux identifications intermédiaires ou impossibles, et aux améliorations éventuelles. Toute la variabilité pédologique n'est donc pas exprimée en termes taxonomiques, d'abord par principe, mais aussi parce qu'il est toujours difficile d'intégrer les données détaillées et non standardisées des études approfondies.

Il faut cependant noter que les catégories prises comme un tout peuvent se situer dans le champ taxonomique comme n'importe quel assemblage ordonnable d'horizons. De ce fait, les unités cartographiques ascendantes par rapport à la catégorie peuvent être construites par tous les procédés mentionnés pour le troisième groupe documentaire, la voie pédologique étant toutefois davantage dans l'esprit de la méthode. En particulier, le tracé des limites autour d'ensembles modélisés par ces "catégories" est facilité, parce que les changements dans les toposéquences correspondent à des modifications appréciables des facteurs d'état. Les légendes cartographiques peuvent aussi être disposées pour la triple lecture sus-mentionnée. Les unités cartographiques descendantes sont, soit subordonnées à une thématique particulière, soit articulées sur ce que HUMBEL (1984) nomme les "points de différenciation", limites des enveloppes des horizons caractéristiques.

On peut aussi concevoir la "catégorie" comme une suite de pédons dans laquelle les rangements des divers groupes de caractères sont corrélés, par exemple le drainage avec la couleur des horizons B oxiques, la nature et l'épaisseur des épipédons. Si un territoire est organisé de la sorte, cette propriété doit apparaître en sériant une collection de ses profils prélevés systématiquement ou au hasard sur toute son étendue. En faisant un pari sur la véracité de la réciproque – à savoir que si une collection est ordonnable de la sorte, le

terrain correspondant est modélisable – il est possible de restituer les "voisinages probables" des horizons en redistribuant convenablement des ensembles de descriptions pris dans les travaux de cartographie de détail. La méthode est laborieuse et suppose une bonne connaissance du terrain, mais le faible volume de la documentation directement utilisable pour les études de paysages vaut tous les efforts pour l'augmenter.

5 – Cinquième groupe : L'analyse "structurale" complète

Il ne sera fait état ici que des avantages pratiques de cette méthode (BOULET *et al.*, 1982), avantages que ne possèdent pas, ou à un moindre degré, les autres procédures.

Le relevé tridimensionnel donne la géométrie exacte des organisations ; les sections les plus significatives, supposées ordinairement dans le sens de la pente, sont situées avec certitude.

L'indépendance des observations des caractères est améliorée par la possibilité de les représenter séparément dans des volumes complètement définis. Les corrélations, qui servent à définir les volumes de référence, sont alors établies avec plus de sûreté.

L'indépendance des observations relatives au sol, à la topographie et à la biocénose, est également améliorée par une cartographie complète et séparée. Les concordances ou discordances sont ainsi observées avec plus de certitude, car elles sont lues sur un réseau de lignes et non plus ponctuellement sur des verticales.

Les inférences dynamiques ou historiques sont mieux déduites, et l'agrégation spatiale de type pédologique peut être fondée sur des bases génétiques ou fonctionnelles.

La densité et la pertinence des observations permettent de définir des "champs géométriques" homogènes au sens de MATHERON (1962), où les calculs géostatistiques sont valides. De même, la vérité de terrain des signatures et des structures de l'imagerie est plus assurée.

Enfin, comme la masse d'informations produite par cette méthode (FRITSCH *et al.*, 1986) n'est absorbable par aucune taxonomie ou typologie connue, le système de référence est encore plus local que dans la procédure précédente.

6 - CONCLUSION

Les procédures descriptives dépendent des propriétés naturelles et de contingences pratiques. Inversement, des facilités éprouvées à employer une méthode particulière on peut déduire, aux biais techniques près, les lois d'organisation du milieu correspondantes. Deux exemples, très différents, vont préciser cette relation. Le premier, celui de l'Amazonie vénézuélienne, se situe près de l'équateur, sur un socle à épeirogenèse positive, avec une végétation indemne, et présentant des corps pédologiques très individualisés. Le second, celui du Sénégal, offre des climats tropicaux secs, de grands bassins sédimentaires, des biocènoses dégradées ainsi que des volumes pédologiques séparés ou polygéniques.

II - PRESENTATION DE DEUX EXEMPLES : AMAZONIE VENEZUELIENNE ET SENEGAL

1 - L'Amazonie vénézuélienne (fig. 6)

Couvert de forêts et de marais, ce territoire ne se prêta jamais à une approche rapide et globale. Lorsque l'imagerie radar fut disponible (M.A.R.N.R., 1981 - 1987), la disposition des vastes ensembles qu'elle révélait a paru trop compliquée pour être immédiatement élucidée par une combinaison simple de facteurs. Finalement, l'inventaire terminé, le poids extrême de la composante chronologique dans le déterminisme des sols et de leur végétation a réduit la cartographie à petite échelle au dessin des surfaces d'aplanissement.

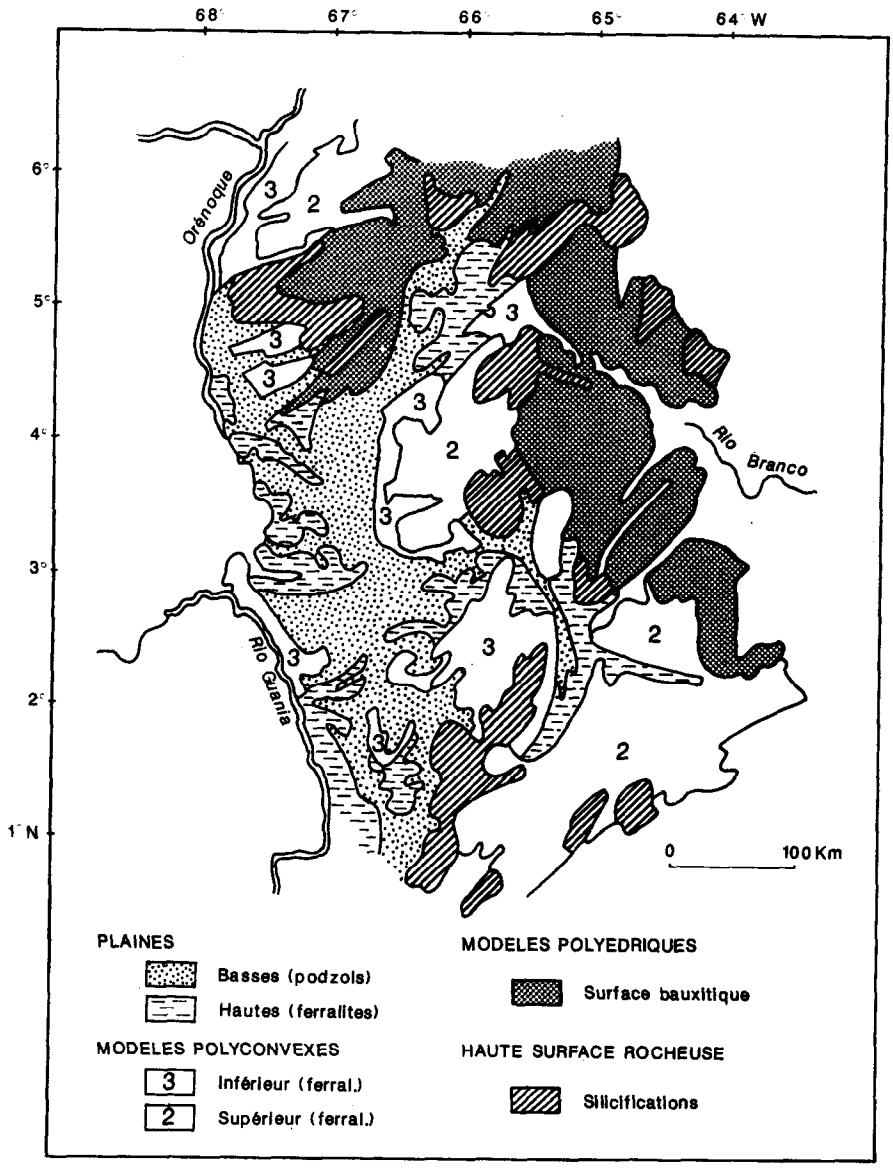


Figure 6 : *Paysages pédologiques de l'Amazonie vénézuelienne.*

La méthode des associations fut écartée pour donner plus de fidélité et d'ampleur à la présentation des cartes. La lecture des travaux des voisins brésiliens (RADAMBRAZIL, 1976) et colombiens (CIAF, 1980) révélait des incertitudes dans le maniement de la Soil Taxonomy pour les sols les plus fréquents : Oxisols et Ultisols. Il paraissait d'autre part indispensable de restituer les structures évidentes de l'imagerie et du terrain. Une liste d'horizons principaux, avec des modifications locales par rapport aux définitions originales, un étiquetage taxonomique des segments, et la constitution de profils – types pour la caractérisation globale de grandes unités constituèrent le système de référence ; celui – ci étant descriptif et sans portée cartographique.

Ce sont les fortes structures du paysage, admirablement rendues par le radar, faites de multiples ensembles bien cernés et possédant leurs propres associations de formes, qui imposèrent une procédure relevant du troisième groupe et inspirèrent les hypothèses de travail suivantes (GAVAUD *et al.*, 1986) : "la couverture de sols est modélisable par un nombre fini de volumes regroupés en ensembles distincts, ordonnés par emboîtements et juxtapositions, correspondant à des échelles de différencia – tion du paysage successives". Les plus petits volumes étant ici des horizons, ceux – ci se groupent sur de faibles distances en une toposéquence ou en un petit nombre de toposéquences, puis ces dernières se juxtaposent sans grandes variations sur des surfaces beaucoup plus étendues, qui à leur tour se groupent en un ordre défini. La variété varie par sauts en fonction de la distance, comme dans le modèle de base utilisé en phytogéographie. Les formes varient de façon parallèle. La forme élémentaire du terrain – colline à modelés polyédriques ou polyconvexes – correspond aussi au motif élémentaire de l'imagerie, parce qu'il est le support du petit groupe de toposéquences qui se répète indéfiniment sur la surface. Elle est segmentée selon les coupes topographiques, biocénotiques et autres pour les besoins de l'étiquetage taxonomique. En se reproduisant par juxtaposition répétitive, le motif compose dans l'image une mosaïque spécifique d'un "type de relief" (*land system*). La juxtaposition de mosaïques analogues engendre le "type de paysage" (*land region*) d'une surface

bien définie. Entre la surface et l'unité de modelé, il peut exister des regroupements intermédiaires, types de paysages légèrement différents constituant les divers panneaux d'une même surface qui ont acquis quelque individualité de nature géométrique ou quantitative (contours des collines, importance des horizons glébulaires, etc...) du fait de différences locales d'ordre le plus souvent lithologique.

L'étagement admettant une telle description est tout entier sur le socle précambrien, complet sur les granitoïdes, lacunaire mais analogue sur le sédimentaire ou le métamorphique siliceux. Comme il paraît corrélable avec d'autres parties du Gondwanaland (Madagascar, Cameroun), la méthode d'étude qu'il a inspiré pourrait avoir quelques généralités. Il comprend :

- entre 1 000 et 1 700 m, une haute surface rocheuse protégée par de très anciennes silicifications (DUBROEUCQ, 1986) ;
- entre 1 100 et 1 400 m, une haute surface bauxitique à modelé polyédrique ;
- entre 825 et 500 m, puis entre 100 et 500 m, deux surfaces ferrallitiques polyconvexes comparables aux surfaces néogènes de Guyane (BLANCANEAUX, 1981) ;
- une plaine d'altération à sols ferrallitiques jaunes et humifères (Acric Umbriorthox) ;
- enfin, entre 70 et 100 m, une plaine d'érosion à podzols et tourbes.

Toutes les limites sont fortes : escarpements, lignes de fractures, limites du front de granitisation, fronts d'érosion régressive et de transformation.

Les insuffisances techniques ou de fond sont apparues pendant et après les travaux. Dans les plaines, le recours à des toposéquences détaillées a été nécessaire, parce que le repérage topographique disparaît et que le calage des sols par des critères de surface ne peut plus être préjugé. Sur les hautes surfaces ferrallitiques, le relevé même systématique des segments au niveau taxonomique ne donne qu'une faible idée de la complexité pédologique (MULLER, 1988).

2 – Le Sénégal

La période pluvieuse de 1945 à 1967, qui permettait de corréler les sols et une végétation alors plus diversifiée, fut largement mise à profit pour bâtir une zonalité allant des sols subarides aux sols ferrugineux (MAIGNIEN, 1965, *Cf.* fig 1). Les études ultérieures, révélant les héritages dans tout le domaine tropical (GAVAUD, 1968), auraient dû restreindre ce déterminisme aux épipédons. Or, il n'en a rien été, et même elles le firent oublier, jusqu'à ce que les destructions massives de la sécheresse récente amènent à le réintroduire à propos des pellicules sahéliennes.

La cartographie taxonomique fut ensuite pratiquée avec un succès préparé par la classification (AUBERT, 1964), qui était un épitomé de grands paysages pédologiques locaux : dunes des sols subarides, glacis des sols ferrugineux lessivés, plateaux des sols faiblement ferrallitiques. En réaction contre les difficultés qu'elle ne résolvait pas, elle se prolongea par des travaux de détail.

Ce ne fut donc pas la cartographie des paysages qui la remplaça, en dehors de travaux limités de l'école écographique (BERTRAND, 1972). Toutefois, les grands ensembles pédo – géomorphologiques, dont nous avons déjà noté que leur mise en évidence ne relève pas d'une analyse très fouillée, étaient connus à l'époque (MICHEL, 1973). Il est dès lors intéressant de relever ce qui, dans les structures locales, a pu contribuer à en différer l'étude systématique.

Les beaux étagements des surfaces mésozoïques et néogènes n'existent plus ou sont réduits à des chicots. Les formations les plus anciennes ayant une certaine importance sont les grands monoclinaux pliocènes du "relief intermédiaire", produits de la dernière pédiplanation tropicale généralisée (GRANDIN et THIRY, 1983) ; ceux – ci annonçant, par le caractère ferrugineux de leur cuirasse, la pédogenèse quaternaire. Les glacis cuirassés qui lui succèdent se réduisent essentiellement à l'épisode "moyen – glacis" (ESCHENBRENNER et GRANDIN, 1970) qui par ailleurs se propage, par des chanfreins étendus mais peu décelables,

sur les plateaux pliocènes. En aval, les sols d'altérations du "bas – glacis", puzzle d'assemblages minéralogiques variés, prennent peu d'extension au sud entre les cuirasses et disparaissent au nord sous plusieurs formations de remblais et de dunes. Or le tout tient sur 100 m de dénivelée au plus, en général sur 50 m. Au sud du pays, dans le bassin subsident de Basse Casamance, on voit même les vieux plateaux ferrallitiques s'enfoncer littéralement sous des terrasses marines holocènes. En dehors d'une marge du socle au sud – est, où les étagements quaternaires ont été décrits, les formes s'étirent interminablement ; elles se simplifient même sur la couverture sédimentaire où, entre le vieux plateau et le versant remblayé, il n'y a guère que d'étroites corniches cuirassées ou éboulées. A l'uniformité topographique s'ajoute paradoxalement une diversité interne foisonnante de la couverture, qui est malaisément exprimée au plan taxonomique et dont le repérage externe est par ailleurs effacé dans les bassins dégradés. Le qualificatif polygénique est venu à propos pour réserver l'étude des petites stratigraphies qui empilent ce qui devrait s'étager. Ces stratigraphies polygéniques sont générales sur la couverture sédimentaire et ses marges : conglomérats et cuirasses, dunes et remblais, croûtes calcaires et jusqu'aux lithométéores de la frange sud – sahélienne (Mc TAINSH, 1984). Dans les matériaux homogènes, la seule différencia – tion pédologique crée autant de diversité : *polysequa* dunaires, compartiments apicaux transformés superposant volumes ferrugineux et ferrallitiques (CHAUVEL, 1977), horizons de nappe effondrés. Sur les "bas – glacis", de subtiles litho – dépendances (BLOT et LEPRUN, 1973) s'ajoutent aux systèmes de transformation (BOULET, 1978). L'agrégation spatiale elle – même ne trouve pas de solution facile dans les paysages d'entaille, qui couvrent les deux tiers de ce qui n'est pas sous les dunes. Les unités dynamiques n'ont pas en effet d'homogénéité pédogénétique, puisqu'un petit bassin peut contenir des volumes pris dans toutes les formations quaternaires.

Les propriétés que ce milieu Ouest – Africain oppose à l'analyse pédologique et géographique ordinaire relevant du troisième groupe sont donc :

- l'uniformité topographique des bassins et de leurs marges, où la tectonique et l'eustatisme jouent faiblement ;
- le biseautage stratigraphique ;
- la pédogenèse quaternaire résultant de climats contrastés ;
- enfin, l'uniformisation par disparition des biocénoses et par "sahélisation" (ALBERGEL et VALENTIN, 1988) due aux crises climatiques.

Cependant, le fait que ce type de couverture ne se prête pas à une diagnose taxonomique simple, ni à un repérage facile, ne signifie pas que les études de type géographique ne doivent pas y être entreprises, parce qu'elles n'auraient qu'un faible rendement pour la recherche. Relativement bon marché, pouvant prendre en compte toutes les contingences des situations particulières, l'étude de type géographique permet d'explorer les échelles intermédiaires entre les toposéquences, les segments et les surfaces, échelles qui sont souvent bien mal connues.

CONCLUSION

Les sols et les études pédologiques ont été comparés dans deux régions intertropicales à tectonique lente, séparées par l'Atlantique. Les objets de la pédo – géographie y appartiennent à deux ensembles :

- le premier est celui des organisations et réorganisations de surface, dont l'échelle de temps est celle des variations bioclimatiques actuelles et dont l'échelle d'espace peut être zonale ;
- le second est celui des couvertures pédologiques successives (et de leurs parties) avec une subdivision au niveau de la surface pliocène. Les recherches en sont déjà assez nombreuses pour pouvoir aboutir très prochainement à une synthèse.

Les procédures d'études sont des adaptations compliquées, et se présentent comme des compromis entre le niveau de perception, le terrain et les techniques. La fonction d'approximations successives des structures est incomplète. L'analyse structurale, exacte ou adaptée, modélise bien les motifs de base et leurs premiers assemblages, mais les ensembles les plus grands relèvent plus d'une appréciation synthétique immédiate que d'une

reconstruction. Les études des objets intermédiaires ne sont pas assez nombreuses et ne disposent pas d'une méthode d'intégration des données satisfaisant à la fois les tenants de la géographie des sols et les spécialistes.

La dégradation récente des régions sèches a proposé de nouveaux objets à la pédologie zonale et a conduit à redéfinir ses objectifs. La procédure par associations, un peu délaissée localement, a par contre enrichi d'autres méthodes en s'appuyant, soit sur des modèles verbaux, soit sur des modèles mathématiques complets. Les premiers ont essaimé dans les colonnes des cartes pédo-géographiques pour caractériser un des modes d'agrégation. Quant aux modèles mathématiques, ils paraissent venir à point, afin de compléter l'étude des champs homogènes dont la réalité, pour un naturaliste, est d'abord établie par l'analyse structurale. L'emploi exclusif de la taxonomie rencontre toujours les inconvénients habituels : elle convient peu à l'étude des variations, elle transmet mal l'information détaillée ou nouvelle, et elle est délocalisée. Pour un géographe, un sol est un petit morceau d'une partie d'une couverture déterminée ; pour un taxonomiste, c'est une réalisation dans l'espace des caractères pédologiques fondamentaux. Les procédures géographiques relevant du troisième groupe sont plus faciles dans les vieux paysages et les communautés non dégradées. L'analyse structurale, toujours utile, devient un préalable indispensable dans l'étude de la pédogenèse quaternaire, l'examen des systèmes dégradés ainsi que de la caractérisation des structures fines ; elle est aussi une condition indispensable à un emploi efficace des méthodes coûteuses comme la géostatistique ou la télédétection.

Finalement, on est conduit d'une manière très générale à :
- souhaiter plus d'ampleur et de suivi aux études concernant les structures de base de la couverture, les organisations intermédiaires et les compartiments apicaux ;
- recommander ensuite une synthèse préalable des surfaces comme cadre général de la pédogenèse ;
- et enfin orienter les recherches taxonomiques en prenant plus en compte aussi bien la continuité que la complexité génétique et géographique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALBERGEL (J.) & VALENTIN (C.), 1988 - Sahélisation d'un petit bassin versant. Colloque Nordeste-Sahel. IHEAL, Paris.

A.F.E.S., 1988 – Référentiel Pédologique Français ; deuxième proposition. Novembre 1988. I.N.R.A., prog. II ; 248 p.

AUBERT (G.), 1964 – La classification des sols utilisée par les pédologues français en zone tropicale aride. *African Soils*, 9(1) : 97 – 105.

BEAUDOU (A.), CHATELIN (Y.), 1977 – Méthodologie de la représentation des volumes pédologiques. Typologie et cartographie en milieu ferrallitique. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 15(1) : 3 – 18.

BEAUDOU (A.), COLLINET (J.), BLIC (Ph. de), FILLERON (J.C.), GUILLAUMET (J.L.), KAHN (F.), ZUELI (K.), RICHARD (J.F.), 1978 – Recherche d'un langage transdisciplinaire pour l'étude du milieu naturel (tropiques humides). ORSTOM, Travaux et Documents n° 91.

BEAUDOU (A.G.), SAYOL (R.), 1980 – Etude pédologique de la région de Boundiali – Korhogo ; Nord de la Côte – d'Ivoire. Métho – dologie et typologie détaillée. ORSTOM, Travaux et Documents n° 112, 282 p.

BERTRAND (R.), 1972 – Morphopédologie et orientations culturales des régions soudaniennes du Sine Saloum (Sénégal). *L'Agron. Trop.*, 27(2) : 1 115 – 1 190.

BLANCANEAUX (P.), 1981 – Essai sur le milieu naturel de la Guyane. ORSTOM, Travaux et Documents n° 137.

BLOT (A.) & LEPRUN (J.C.), 1973 – Influence de deux roche – mères de compositions voisines sur les altérations et les sols. Un exemple sur le socle cristallin au Sénégal Oriental. *Cah. ORSTOM*, sér. Géologie, 5(1) : 45 – 57.

BOULAINE (J.), 1975 – Géographie des sols. P.U.F., coll. "Le Géographe", 197 p., 29 fig.

BOULAINE (J.), 1986 – La dispersion latérale des sols, ou de l'horizontalisme au verticalisme. Essai sur la loxostasie. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 22(3) : 319 – 328.

BOULET (R.), 1978 – Toposéquence de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibre et déséquilibre pédobioclimatique. ORSTOM, Mémoires n° 85, 272 p.

BOULET (R.), CHAUVEL (A.), HUMBEL (F.X.) & LUCAS (Y.), 1982 – Analyse structurale et cartographie en pédologie. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 19(4) : 309-341 et 323-339.

BOULVERT (Y.), 1976 – Carte pédologique de la République Centrafricaine. Feuille Bangui à 1/200 000. ORSTOM, Notice n° 64, 116 p.

BOULVERT (Y.), 1983 – Carte pédologique de la République Centrafricaine à 1/1 000 000. ORSTOM, Notice n° 100, 126 p.

BRABANT (P.) & GAVAUD (M.), 1985 – Les sols et les ressources en terres du Nord-Cameroun (Provinces du Nord et de l'extrême Nord). ORSTOM, Notice n° 103.

CHATELIN (Y.), 1979 – Une épistémologie des sciences du sol. ORSTOM, Mémoire n° 88, 152 p.

CHATELIN (Y.), RICHARD (J.F.), LENEUF (N.), 1982 – Modèles verbaux et transdisciplinarité dans l'étude des sols et des paysages (tropiques humides). *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 19(1) : 51-79.

CHAUVEL (A.), 1977 – Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges de Moyenne Casamance (Sénégal). ORSTOM, Travaux et Documents n° 62, 532 p.

C.I.A.F., 1980 – La Amazona Colombiana y sus recursos. Proradam, Bogota 1979 y revista C.I.A.F., 5(1) : 1-226.

CONACHER (A.J.) & DALRYMPLE (J.B.), 1977 – The nine unit landsurface model, an approach to pedo-geomorphic research. *Geoderma*, 18(1-2), : 1-145.

CRUICKSHANK (J.G.), 1972 – Soil Geography. David and Charles ed. Newton Abbot, Devon.

DUBROEUCQ (D.), 1986 – Note sur la haute surface rocheuse de l'Amazonie vénézuelienne. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 22(1) : 3 – 16.

ESCHENBRENNER (V.) & GRANDIN (G.), 1970 – La séquence de cuirasses et ses différenciations entre Agnibilekrou (Côte – d'Ivoire) et Diebougou (Haute – Volta). *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 2(2) : 205 – 245.

FELLER (C.), 1974 – Etude pédologique de la région de Panal. Rapp. ORSTOM (Dakar), multigr.

FELLER (C.), 1975 – Etude des pâturages naturels du Ferlo – Bondou. Rapp. ORSTOM (Dakar), multigr.

FELLER (C.), 1977 – Evolution des sols des défriches récentes dans les régions des Terres Neuves (Sénégal Oriental). *Cah. ORSTOM*, sér. Biologie, 12(3) : 195 – 207 et sér. Pédologie, 15(3) : 291 – 302.

FRIDLAND (V.M.), 1974 – Structure of the soil mantle. *Geoderma*, 12(1 – 2) : 35 – 41.

FRITSCH (E.), BOCQUIER (G.), BOULET (R.), DOSSO (M.) & HUMBEL (F.X.), 1986 – Les systèmes transformants d'une couverture ferrallitique de Guyane Française. Analyse structurale d'une formation supergène et mode de représentation. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 22(4) : 361 – 396.

GAVAUD (M.), 1968 – Les sols bien drainés sur matériaux sableux du Niger. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 6(3 – 4) : 273 – 307.

GAVAUD (M.), 1988 – La dégradation des sols au Sénégal. Sém. Dégradation des sols. Univ. Dakar.

GAVAUD (M.) & BLANCANEAUX (Ph.), DUBROEUCQ (D.), POUYLLAU (M.), 1986 – Les paysages pédologiques de l'Amazonie vénézuelienne. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 22(3) : 265 – 284.

GIRARD (M.C.), 1983 – Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Sols, XII, INA, Paris – Grignon.

GRANDIN (G.) & THIRY (M.), 1983 – Les grandes surfaces continentales tertiaires des régions chaudes. Succession des types d'altération. *Cah. ORSTOM*, sér. Géologie, 13(1).

HUMBEL (F.X.), 1976 – L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun. ORSTOM, Travaux et Documents n° 54, 310 p.

HUMBEL (F.X.), 1984 – L'analyse structurale des couvertures de sol. Une base pour la cartographie des sols en Guyane. A.F.E.S. Livre jubilaire du cinquantenaire. 1934 – 1984. : 181 – 194.

KALOGA (B.), 1966 – Carte pédologique du Sénégal au 1/200 000. Feuille Dalafi. Rapp. ORSTOM (Dakar), 83 p., multigr.

KILIAN (J.), 1974 – Etude du milieu physique en vue de son aménagement. Conceptions de travail. Méthodes cartographiques. *L'Agron. Trop.*, 29(2 – 3) : 141 – 153.

LE BORGNE (J.), 1988 – La pluviométrie au Sénégal et en Gambie. Univ. Cheikh Anta Diop (Dakar), lab. Climatalogie, 94 p.

LUCAS (Y.), 1978 – Méthodologie de la représentation cartographique des sols. Un exemple dans le domaine ferrallitique. Région de Mouyondzi, République populaire du Congo. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 16(4) : 348 – 368.

MAIGNIEN (R.), 1965 – Carte pédologique du Sénégal au 1/1 000 000. ORSTOM, col. Notices.

MATHERON (G.), 1962 – Traité de géostatique appliquée. Mémoires du B.R.G.M., n° 14, t.I. Ed. Technip.

Mc TAINSH (G.), 1984 – The nature and origin of aeolian mantles of central Northern Nigeria. *Geoderma*, 33(1) : 13 – 38.

M.A.R.N.R., 1981 – 1987 – Atlas de los suelos del Territorio Federal Amazonas. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Renovelables. Caracas, Venezuela.

MICHEL (P.), 1973 – Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie (Etude géomorphologique). ORSTOM, Mémoire n° 63, 752 p.

MILNE (G.), 1935 – Composite units for the mapping of complex soils associations. III[e] Congr. ISSS (Oxford), pp. 345 – 347.

MULLER (J.P.), 1988 – Analyse pétrologique d'une formation latéritique meuble du Cameroun. Essai de traçage d'une différenciation supergène par les paragenèses minérales. ORSTOM, Thèse Paris.

OPENSHAW (S.), 1981 – Le problème de l'agrégation spatiale en géographie. *In* l'Espace Geographique, I : 15 – 24. Doin ed..

PEDRO (G.) & VOLKOFF (B.), 1984 – Les grandes provinces pédologiques du Brésil. Cadre général de l'évolution pédologique. C.R. sém. lab. géologie. *Cah. ORSTOM*, sér. géologie, 12(2) : 165 – 169.

POSS (R.), 1982 – Etude morphopédologique de la région de Katiola (Côte – d'Ivoire). Cartes des paysages et des unités morpho – pédologiques à 1/200 000. ORSTOM, Notice n° 94.

RADAMBRAZIL, 1976 – Levantamento de recursos naturais, vol. 8, folha NA20 Boa vista. Projeto Radam, Ministerio das Minas e Energia, Departamento Nacional de Produçao Mineral, Rio de Janeiro.

RICHARD (J.F.), 1974 – Paysage, écosystème, environnement. ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé (Côte – d'Ivoire), 26 p., multigr..

ROOSE (E.J.), 1981 – Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et des sols ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. ORSTOM, Travaux et Documents n° 130, 569 p.

SCHELLING (J.), 1970 – Soil classification and soil survey. *Geoderma*, 4(3) : 165 – 194.

TRICART (J.), 1974 – De la géomorphologie à l'étude cartographique intégrée. *L'Agron. Trop.*, 29(2 – 3) : 122 – 132.

U.S.A.I.D., 1986 – Cartographie et télédétection des ressources de la République du Sénégal. Direction de l'Aménagement du Territoire du Sénégal, Dakar.

VALENTIN (C.), 1985 – Organisations pelliculaires de quelques sols des régions subdésertiques (Agadez, République du Sénégal). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. ORSTOM, Etudes et Thèses, 260 p.

VALLERIE (M.), 1973 – Contribution à l'étude des sols du Centre – Sud Cameroun. Travaux et documents ORSTOM (Paris) n° 29, 112 p.

VOLKOFF (B.), 1984 – Organisations régionales de la couverture pédologique du Brésil. Chronologie des différenciations. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédologie, 21(4) : 225 – 236.

WOROU (S.) & SARAGONI (H.), 1988 – La culture du maïs de contre saison est – elle possible au Togo méridional ? Rapport ORSTOM – I.N.S. (Lomé), 19 p. multigr.

LA CONNAISSANCE DE L'ORGANISATION DES SOLS DANS LE PAYSAGE, UN PREALABLE A LA CARTOGRAPHIE ET A L'EVALUATION DES TERRES

P. BRABANT
ORSTOM Bondy

RESUME

L'analyse des travaux sur les sols réalisés dans les régions tropicales depuis 40 ans ont amené les pédologues à rechercher s'il était possible de faire des regroupements parmi ces diverses activités. En effet, celles-ci semblent parfois être menées de manière assez peu cohérentes.

Nous avons ainsi été amenés à les ordonner et à distinguer 5 niveaux de connaissance des sols. Ces niveaux sont hiérarchisés, et vont des études à l'échelle du paysage aux travaux à l'échelle de la parcelle et du champ de culture.

Cette distinction en 5 niveaux, hiérarchisés et ordonnés, est fondée sur le constat suivant : il existe des relations étroites entre la nature du sol, le matériau originel, les formes du modelé et la végétation naturelle.

Autrement dit, pour comprendre la distribution des sols, il faut toujours les situer dans le paysage (au sens général du terme), et ceci, quelle que soit l'échelle des travaux.

Les 5 niveaux de connaissance consistent donc à analyser comment sont distribués les sols dans un paysage régional, sur un versant et dans une parcelle avant de passer au stade de la cartographie, de l'évaluation des terres et de leur aménagement.

Les niveaux 1, 2, 3 ont trait à la connaissance des sols proprement dite :
- *le niveau 1 correspond à la phase exploratoire à très petite échelle, de l'ordre du million ;*

- *le niveau 2 est celui des études détaillées, réalisées sur des sites représentatifs sélectionnés à la suite de la phase 1. C'est le niveau – clé de la connaissance des sols ;*
- *le niveau 3 correspond à l'inventaire à petite échelle (1/500.000e) des ressources en sols d'un pays.*

Les niveaux 3 et 4 consistent en des travaux débouchant directement sur l'utilisation des sols :

- *le niveau 4 a pour objectif de déterminer la faisabilité d'un projet à partir de travaux à moyenne échelle (1/50 000e) ;*
- *le niveau 5 correspond aux études pour la mise en oeuvre d'un projet, à très grande échelle (1/5 000e).*

Ceci étant posé, l'attention doit être portée sur les quelques points suivants :

- *il est recommandé de situer chaque programme d'étude sur les sols par rapport à un de ces 5 niveaux ;*
- *l'identification des "entités pédologiques naturelles" est une première étape nécessaire à la connaissance des sols ;*
- *le repérage des relations existant entre la nature du sol et les formes du modelé est une donnée très utile pour la cartographie et l'aménagement ;*
- *il est important de déterminer si, dans chaque forme du modelé, le sol constitue un "bloc homogène" ou bien s'il est hétérogène en raison des variations latérales ;*
- *enfin, et seulement après que toutes ces données aient été acquises, il devient possible de faire référence aux diverses classifications de sols et de procéder ainsi à la corrélation des travaux d'une région à l'autre ou d'un pays à l'autre.*

INTRODUCTION

La communication présentée à Lomé a été faite sous forme d'un commentaire d'une série de 12 posters, spécialement préparés pour le Séminaire SOLTROP 89 et intitulés : "Bien connaître les sols pour mieux les utiliser"[1].

[1] La liste des posters est reportée page 427.

simultanément. Nous allons présenter cependant les principales idées formulées au cours des exposés oraux, en les illustrant par quelques schémas nécessaires à la compréhension du texte, inspirés principalement d'une étude réalisée au Nord Cameroun (BRABANT et GAVAUD, 1985).

Les diapositives des posters, qui seront fournies ultérieurement aux participants, pourront compléter cet article.

LES NIVEAUX DE CONNAISSANCE (se reporter au poster n°1)

Pour mieux utiliser les sols, il est nécessaire de bien les connaître. Pour cela, il faut étudier d'une part l'organisation de leurs constituants et leur fonctionnement saisonnier, d'autre part leur répartition et leur extension dans le paysage.

Cette étude comporte 5 niveaux de connaissance, qui sont hiérarchisés comme l'indique la figure 1.

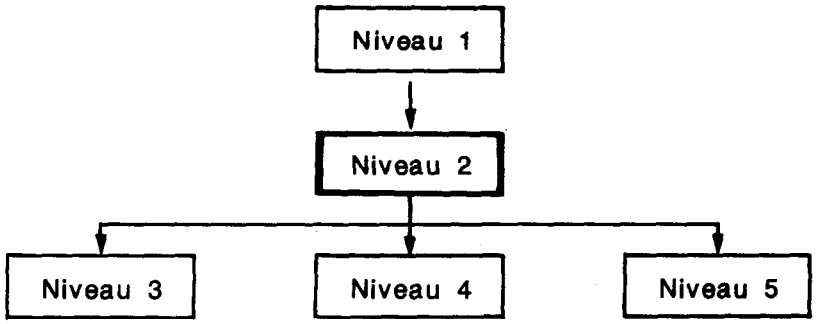


Figure 1 : *Les 5 niveaux d'étude des sols*

Les niveaux 1, 2 et 3 concernent principalement la connaissance des sols. Ils ont pour objectif :
- au niveau 1 : les travaux exploratoires ;
- au niveau 2 : l'étude détaillée des sols dans des sites représentatifs ;
- au niveau 3 : l'inventaire national ou régional des ressources en sols, exprimé par des cartes à petite échelle (1/200 000 à 1/500 000).

Les niveaux 4 et 5 concernent des travaux directement appliqués à l'utilisation des sols :

- au niveau 4 ce sont des études de faisabilité pour des projets de développement, produisant des cartes de sols et d'évaluation des terres à moyenne échelle (1/50 000 par exemple) ;
- au niveau 5 ce sont des études pour la mise en oeuvre des projets de développement dont la faisabilité a été reconnue ; elles conduisent à des cartes de sols et d'évaluation des terres à grande échelle (inférieure à 1/5 000).

Les études du niveau 2 occupent une position particulière : elles constituent en effet le meilleur moyen d'obtenir des résultats pertinents pour effectuer les travaux de pédologie appliquée en vue du développement rural.

Nous dirons que le niveau 2 est le niveau – clé pour connaître les sols afin de mieux les utiliser.

Le but de cette communication est d'examiner successivement chacun des cinq niveaux d'étude des sols, tels qu'ils viennent d'être présentés.

1. Niveau 1 – Travaux exploratoires (Se reporter aux posters 2 et 3).

Objectif

Il est d'identifier des "entités naturelles", de les délimiter approximativement, puis de les représenter sur une carte.

Méthode

Elle consiste à utiliser des images – satellite et radar qui, associées à des cartes topographiques, géologiques et géomorphologiques, sont les meilleurs outils pour effectuer ce travail exploratoire.

Résultats

Ils sont exprimés sour la forme d'une carte exploratoire.
- *l'échelle de cette carte* : elle est très petite, généralement supérieure à 1/1 000 000 ;
- *les unités cartographiques* : les polygones tracés sur la carte représentent la superficie occupée par diverses "entités naturelles". Les "entités naturelles" de même nature sont regroupées pour constituer les unités cartographiques de la légende.

La légende

Ces "entités naturelles" sont dénommées ici des *systèmes – sols* (BRABANT, 1989).

Un système – sol peut être caractérisé dans la légende d'une carte exploratoire par quatre variables principales :
- le modelé du terrain,
- la nature du matériau originel,
- le type de végétation naturelle ou le mode d'utilisation du sol,
- la nature du sol.

Par exemple, le tableau 1 montre comment peut être rédigée la légende concernant trois types de systèmes – sols dans une carte exploratoire.

Tableau 1 : *Légende d'une carte exploratoire (exemple)*

Système sol	Modelé	Matériau originel	Végétation ou utilisation du sol	Sol dominant*
1	Collines à forte pente (25%)	Roche basique	Savane à Boswella et à épineux en bas de versant	Sol fersiallitique
2	Plaine alluviale	Sédiments fluvio – lacustres	Cultures de sorgho de décrue	Vertisol
3	Glacis d'érosion à faible pente (5 %)	Granite	Savane arborée et arbustive en bas de versant	Sol ferrugineux

* Le sol peut être caractérisé par un terme emprunté aux classifications de sols, au niveau le plus élevé (classe ou ordre)

Une coupe très schématique peut illustrer cette légende (fig. 2).

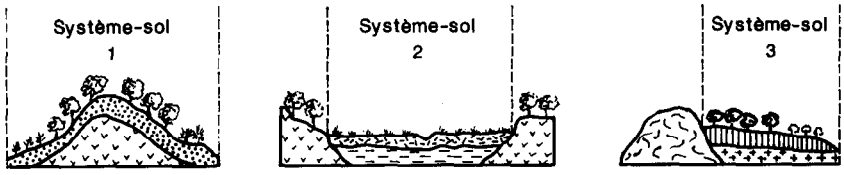


Figure 2 : *Coupe schématique de trois types de systèmes – sols*

* Remarque.
En l'absence d'un référentiel des systèmes – sols répertoriés dans la région, la nature du sol d'une unité cartographique peut être caractérisée par un terme emprunté aux classifications de sol au niveau le plus élevé (ordre ou classe) ; cela indique simplement le type de sol observé le plus fréquemment dans des fosses creusées sur le terrain dans les zones correspondant à cette unité cartographique.

2. Niveau – Etude de sites représentatifs (se reporter aux posters 3, 4 et 5)

Méthode

La connaissance approfondie des systèmes – sols requise pour effectuer les travaux des niveaux 3, 4 et 5 nécessite une étude très détaillée, réalisée dans des sites représentatifs sélectionnés à partir des travaux exploratoires.

Le choix des sites est facilité par le fait qu'un système – sol se présente souvent dans les régions tropicales comme un modèle répétitif et ordonné en fonction de la topographie. L'étude de toposéquences constitue donc la méthode la mieux adaptée pour réaliser les travaux du niveau 2 (fig. 3).

Ce type d'étude se limite généralement, pour des raisons économiques, à un ou deux sites représentatifs pour un système – sol, les travaux étant relativement longs et coûteux. La durée moyenne d'une étude est de trois ans, ce qui permet de suivre plusieurs cycles saisonniers.

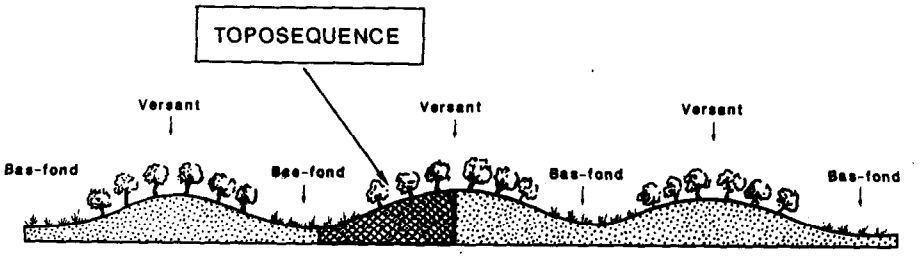


Figure 3 : *La toposéquence, unité représentative d'un système – sol.*

Acquisition des résultats

Les résultats acquis par cette étude doivent comporter au minimum :
- l'identification des horizons et leur disposition dans le paysage ;
- le repérage des corrélations existant entre la nature du sol, les formes du modelé et la végétation naturelle ;
- des clés d'identification, utiles au prospecteur et à l'utilisateur pour reconnaître et cartographier les systèmes – sols à différentes échelles hors des sites représentatifs ;
- des données sur les constituants, sur leurs organisations macro et microscopiques, sur les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques ; enfin des données sur le fonctionnement saisonnier, en particulier sur le régime hydrique.

Interprétation des résultats

Les résultats sont ensuite interprétés en vue de plusieurs utilisations possibles. Voici deux exemples :

Exemple 1 : Pour une utilisation agricole ou en vue de travaux d'urbanisme.

Un système – sol est segmenté en blocs, latéralement homogènes, présentant une même succession verticale d'horizons et ayant le même régime hydrique.

Ces blocs sont dénommés *compartiments verticaux* : ils sont numérotés en chiffres arabes, en partant du point topographique le plus haut vers le point le plus bas de la toposéquence.

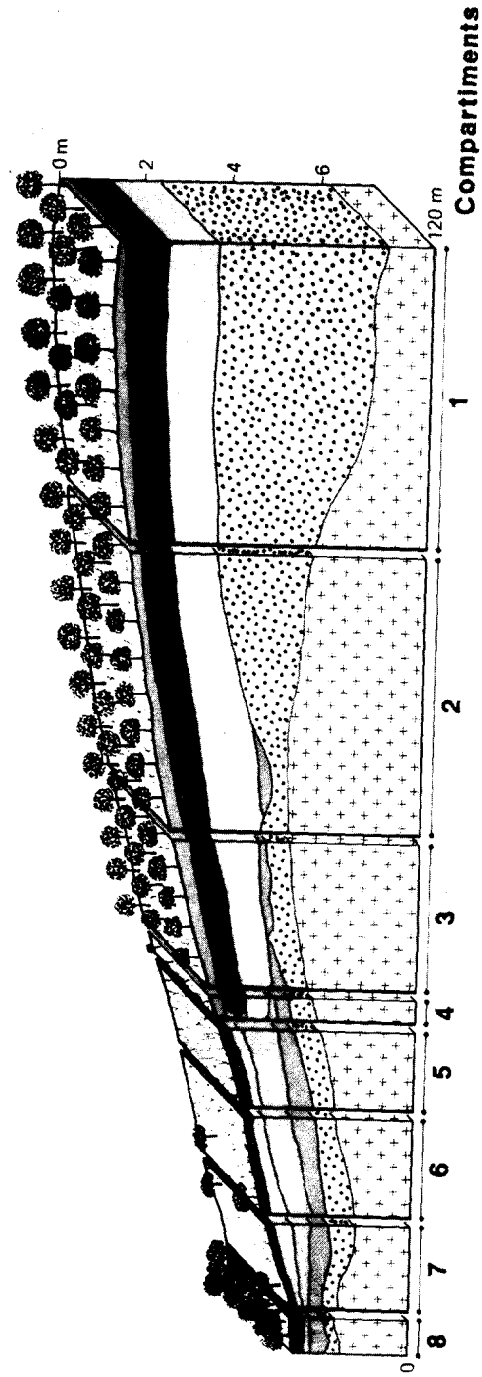


Figure 4 : *Les compartiments verticaux d'un système – sol.*

La figure 4 illustre l'exemple d'un système – sol comportant 8 compartiments verticaux.

Exemple 2 : Pour des travaux de génie civil ou d'hydrologie.

Dans ce cas, un système – sol peut être segmenté en compartiments horizontaux qui sont constitués d'un groupe d'horizons ou d'un seul horizon (fig. 5 et fig. 6).

3. Niveau 3 – Inventaire national ou régional des ressources en sol (se reporter aux posters n° 7 et 8)

Objectif

Il est d'identifier les systèmes – sols, de les localiser de manière aussi précise que possible, puis de les représenter sur une carte, et enfin de mesurer la superficie couverte par chacun d'entre eux.

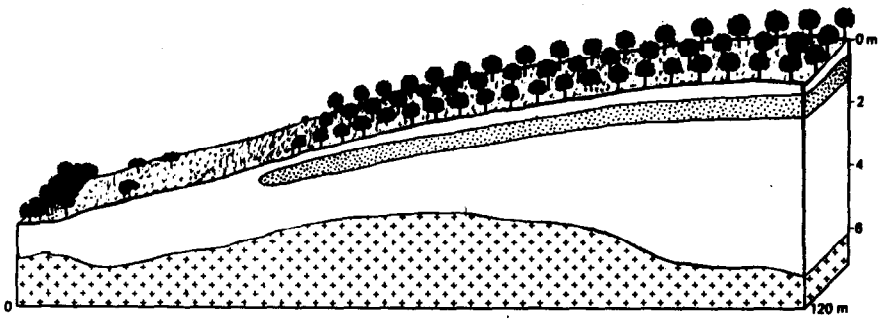


Figure 5 : *Exemple de compartiment horizontal dans un système – sol : l'horizon argileux gravillonnaire ("latérite" du génie civil).*

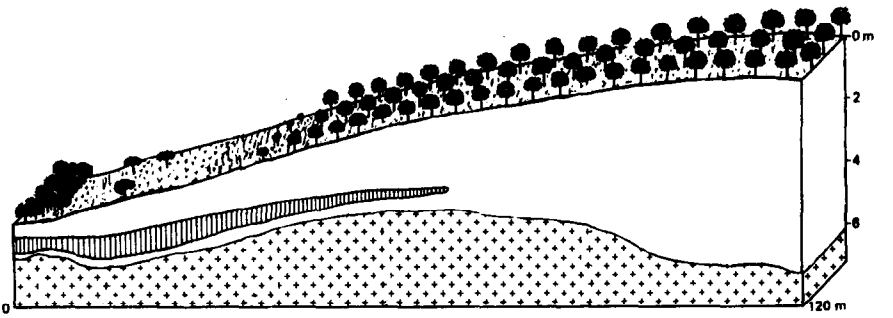


Figure 6 : *Exemple de compartiment horizontal dans un système – sol : les horizons sableux éluviés à dynamique de l'eau latérale.*

Méthode

Elle consiste principalement à utiliser les clés d'identification des systèmes – sols d'une part sur des images – satellite, radar et sur les photographies aériennes, d'autre part sur le terrain ; ces clés sont fournies par les études du niveau 2.

Ainsi *une prospection par un quadrillage systématique du terrain n'est pas nécessaire* ; en général, des contrôles sur le terrain après l'interprétation des images aérospatiales sont suffisants.

Il en résulte un gain de temps et une économie d'argent très importants.

Résultats

Ils sont exprimés sous la forme d'une carte accompagnée d'une légende.

Les unités cartographiques

Les polygones tracés sur la carte représentent chacun une superficie occupée par un système – sol. Tous les polygones représentant un même type de système – sol sont regroupés pour constituer une unité cartographique.

Il est réalisé ainsi une carte d'inventaire localisant et délimitant des systèmes – sols, et non pas une carte faisant apparaître la répartition sur le terrain d'unités taxonomiques de diverses classifications de sols.

L'échelle

Elle n'a qu'une importance mineure, dans une gamme allant de 1/200 000 à 1/1 000 000, puisqu'un polygone, quelle que soit sa dimension, ne représente que la superficie équivalente couverte par un type de système – sol sur le terrain.

Par contre, cette échelle doit être adaptée à :
- la surface totale du pays ou de la province,
- la qualité des cartes topographiques utilisables,
- la somme d'argent disponible pour les frais d'impression.

Notons que les frais d'impression de la même superficie de terrain représentée sur une carte sont 6 fois moins coûteux à l'échelle du 1/500 000 qu'à celle du 1/200 000.

La légende

Celle – ci a une *importance majeure.* Elle doit être présentée de telle façon que l'utilisateur puisse visualiser le paysage qui caractérise chaque système – sol, ainsi que l'agencement des horizons dans le paysage.

Les résultats des travaux du niveau 2 sont largement utilisés pour illustrer cette légende. Cela permet d'indiquer le nombre, la localisation et la nature des compartiments verticaux ou horizontaux de chaque système – sol.

Le bloc – diagramme de la figure 7 indique quels sont dans un système – sol :
- l'aspect général du paysage,
- les différentes formes du modelé,
- l'aspect de la végétation,
- la nature du matériau originel,
- le nombre et la nature des horizons,
- leur agencement dans le paysage.

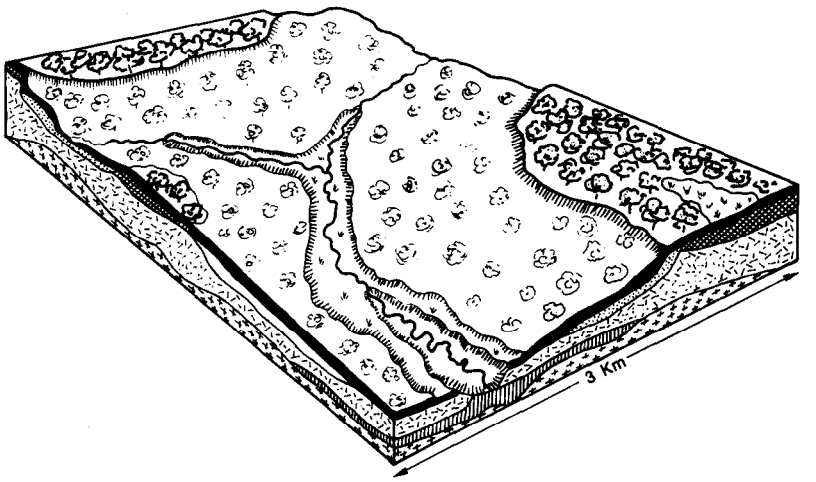


Figure 7 : *Représentation d'un système – sol sous forme de bloc – diagramme.*

4. Niveau 4 – Travaux appliqués à des projets de développement (se reporter aux posters 9 et 10)

Les données fournies par les études des niveaux 2 et 3 sont maintenant suffisantes pour aborder les travaux directement applicables à des projets de développement.

Objectif

Il consiste à sélectionner d'abord sur la carte d'inventaire un périmètre à prospecter, qui semble favorable à un projet déterminé. La superficie de ce périmètre varie de 20 000 à 100 000 hectares environ.

Il faut ensuite :
- délimiter différentes zones à l'intérieur de ce périmètre, en tenant compte des objectifs du projet ;
- représenter ces zones sur une carte à moyenne échelle ;
- calculer la superficie en hectares de chaque zone ;
- faire une évaluation des terres pour les objectifs du projet.

Tout cela permet de déterminer le degré de faisabilité du projet.

Méthode

Elle consiste à identifier d'abord le ou les systèmes – sols existant dans le périmètre à prospecter, puis à rechercher dans la légende de la carte et dans les résultats des études de sites représentatifs toutes les données utilisables.

Connaissant ainsi la corrélation qui existe dans un système – sol entre les diverses formes du modelé et la nature du sol dans chacune de ces formes, on utilise l'examen stéréoscopique des photographies aériennes pour identifier et délimiter les formes du modelé dans ce système – sol.

Cette méthode permet d'effectuer, non pas une prospection par un quadrillage systématique du terrain, mais seulement une série de contrôles sur le terrain, orientés par les résultats de l'examen des photographies aériennes.

Résultats

Le premier résultat de ces travaux consiste à dresser une *carte morpho – pédologique* et le second à faire une *évaluation des terres*.

. *LA CARTE*

Les unités cartographiques

Chaque polygone de la carte représente la superficie couverte par une forme de modelé dans chaque système – sol. Celui – ci comporte en moyenne deux à quatre formes de modelé, rarement plus de cinq.

La figure 8 montre un système – sol comportant quatre formes de modelé ; celles – ci sont numérotées en chiffres romains en partant du point topographique le plus haut vers le point le plus bas.

Les unités cartographiques sont constituées par les formes du modelé distinguées dans chaque système – sol. Le bloc – diagramme de la figure 9 fait apparaître quatre formes du modelé (I, II, III, IV), qui correspondent à quatre unités cartographiques.

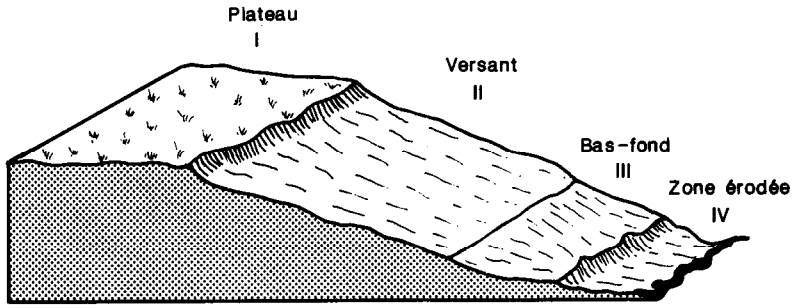


Figure 8 : *Les formes de modelé, unités cartographiques de base des travaux appliqués à des projets de développement.*

L'échelle

Elle varie en général de 1/20 000 à 1/50 000, et elle est déterminée par l'échelle du fond topographique disponible, la superficie totale du périmètre à cartographier et la dimension des formes du modelé les moins étendues qui sont à représenter sur la carte.

La légende

Système-sol	Nbre d'U.C. constituant le système-sol	U.C. Numéro	Superficie en ha.	Superficie en % du système-sol	Forme de la limite avec l'U.C.II	Forme du modelé	Longueur de la pente	Pourcentage de pente
Modèle KATIOLA	Quatre	I	1500	12	Ressaut avec 4 m de dénivelée	Plateau à faible pente	400 à 500 m	0 - 1%

Végétation	Epaisseur du sol totale	Epaisseur du sol utilisable	Matériau originel	Nombre de compartiments verticaux	Numéros des compartiments dans le système-sol	Pourcentage approximatif dans l'U.C. II	Unité taxonomique caractéristique (CPCS)
Savane arborée et herbeuse	10 m	< 0,5 m	Granite	2	N°1 N°2	90% 10%	N°1 : Sol ferrugineux induré N°2 : Sol hydromorphe à pseudogley, à cuirasse peu profonde

Tableau 2 : *Exemple de légende d'une carte destinée à un projet de développement.*

Elle est rédigée à partir des données acquises par les études de niveau 2, de la légende de la carte d'inventaire et des résultats obtenus par les travaux de niveau 4.

Le tableau 2 donne un exemple de légende explicative pour l'unité cartographique I d'un système – sol qui est modelisé sur le bloc – diagramme de la figure 8.

. *L'EVALUATION DES TERRES*

Tous les résultats précédents, associés à d'autres données (climatiques et hydrologiques par exemple), sont ensuite exploités pour procéder à l'évaluation des terres.

Celle – ci consiste à faire :
- l'évaluation de *l'aptitude actuelle et potentielle* de chaque unité cartographique pour chaque type d'utilisation, par exemple pour le coton, le riz de bas – fond ou encore le reboisement (*Cf.* tableau 3) ;
- le classement par ordre décroissant d'aptitude des unités cartographiques pour chacun de ces trois types d'utilisation (*Cf.* tableau 4).

Tableau 3 : *Evaluation des aptitudes actuelles des unités cartographiques pour diverses cultures*

Unité	APTITUDE ACTUELLE		
cartographique	Coton	Riz de bas fond	Reboisement
I	moyenne	inapte	faible
II	élevée	inapte	élevée
III	inapte	élevée	faible
IV	inapte	moyenne	moyenne

Tableau 4 : *Classement de l'aptitude des unités cartographiques pour différentes cultures*

	CLASSEMENT DES TERRES		
	Coton	Riz de bas-fond	Reboisement
Par ordre décroissant d'aptitude	II I	III IV	II IV I III
Terres inaptes	III IV	I II	

5. Niveau 5 – Travaux appliqués à la mise en oeuvre de projets de développement (se reporter aux posters n° 11 et 12)

Objectif

Un périmètre de quelques hectares à quelques milliers d'hectares est délimité sur la carte morpho-pédologique du niveau 4 en vue de la mise en oeuvre d'un projet dont l'objectif est bien déterminé.

Cela concerne par exemple :
- la cartographie d'une station de recherche ou d'une exploitation ;
- l'étude d'un bassin versant ;
- la prospection d'un périmètre pour un projet d'irrigation ou de reboisement, pour une plantation industrielle etc...

L'objectif des travaux est de :
- délimiter les zones occupées par chaque compartiment vertical (ou horizontal) d'un système-sol dans le périmètre concerné ;
- reporter celles-ci sur une carte à grande échelle ;
- calculer la superficie de chaque zone ;
- faire une évaluation des terres pour l'utilisation prévue.

Méthode

Il s'agit d'abord d'identifier le ou les systèmes-sols existant dans le périmètre de prospection.

L'interprétation des photographies aériennes, même si elles sont à grande échelle, ne permet pas en général de repérer et de délimiter séparément chaque compartiment vertical ou horizontal.

Par conséquent, il est nécessaire ici de procéder à une *prospection systématique du terrain* selon un quadrillage dont la maille est à déterminer en fonction de la dimension et de la répartition des compartiments reconnus au cours des travaux du niveau 2.

Les clés d'identification des différents compartiments sur le terrain ont été fournies aussi par les travaux du niveau 2.

Résultats

Ceux-ci sont exprimés sous la forme d'une carte des sols et d'une évaluation des terres.

. *LA CARTE*

Les unités cartographiques

Prenons l'exemple d'une carte des compartiments verticaux en vue de l'implantation d'une station d'essais culturaux.

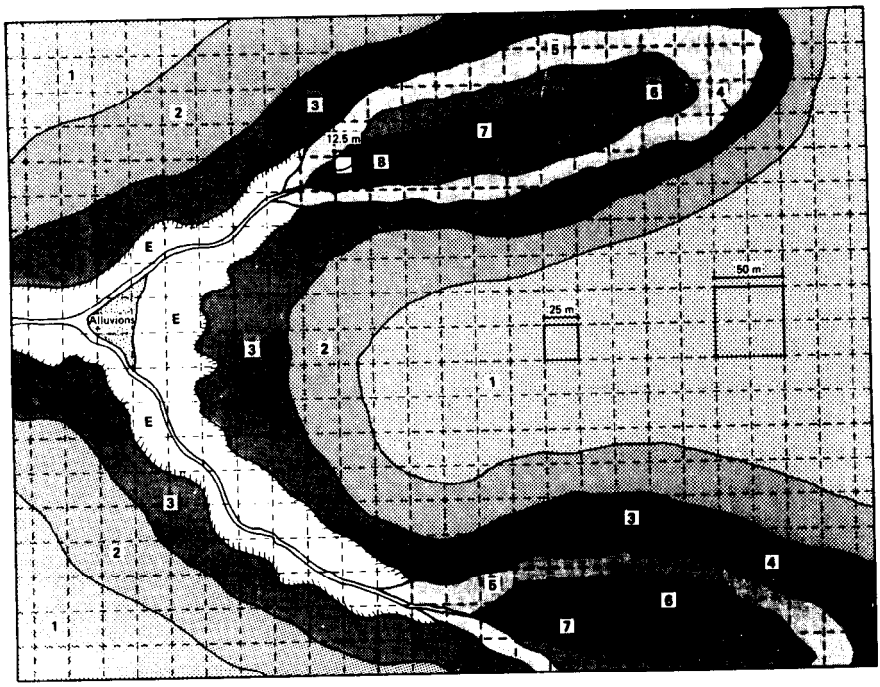
Chaque polygone de la carte représente la superficie couverte par un compartiment vertical. Tous les polygones représentant le même type de compartiment vertical sont regroupés pour constituer une unité cartographique.

Comme ces compartiments ne présentent pas de variations latérales de leurs propriétés, ils équivalent en quelque sorte à des *"blocs homogènes"*.

L'examen des deux figures 9 et 10 montre que chaque unité cartographique correspond à un compartiment vertical de système-sol.

L'échelle

Elle est déterminée par celle du fond topographique disponible et les caractéristiques du terrain. Elle varie en général de 1/2 000 à 1/5 000.



Maille de prospection

Unités cartographiques

Nette rupture de pente

Zone érodée

Figure 9 : *Exemple de carte à grande échelle pour la mise en oeuvre de projets de développement.*

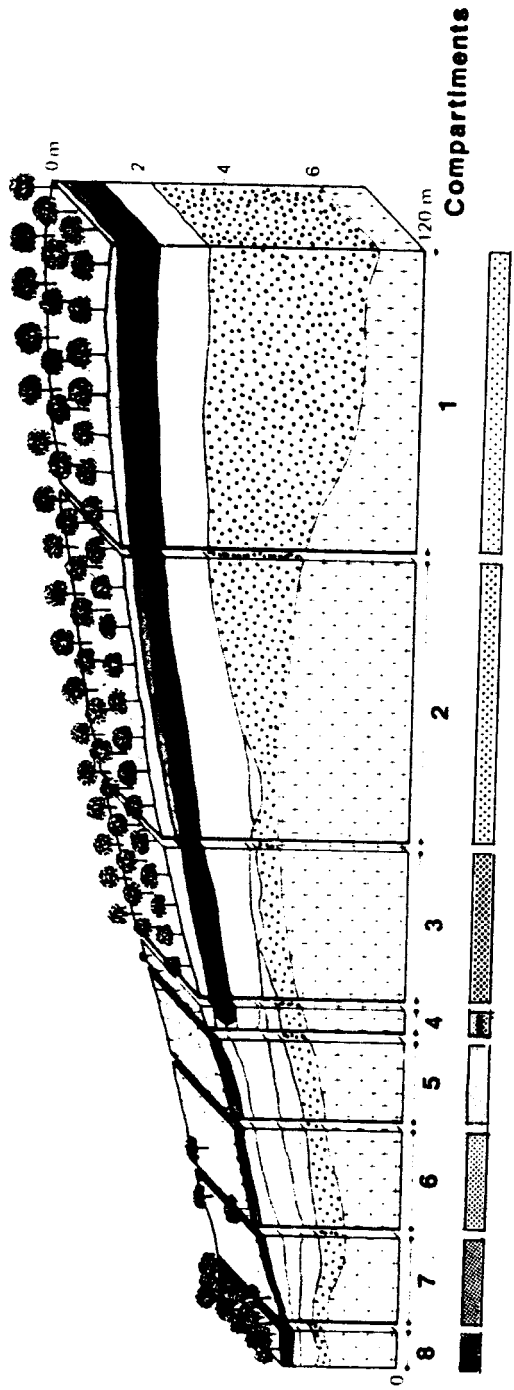


Figure 10 : *Organisation des différents compartiments verticaux correspondant aux unités cartographiques de la figure 9.*

La légende

Elle utilise toutes les données acquises par les études des niveaux 2, 3 et 4.

La corrélation avec les classifications de sols

Une coupe verticale observée dans chaque "bloc homogène" peut être dénommée en se référant aux termes des classifications de sols, en particulier à ceux des groupes et des sous-groupes.

Le tableau 5 résume toutes ces indications pour le bloc homogène correspondant à l'unité cartographique I de la carte ci-dessus (*Cf.* fig. 9).

Tableau 5 : *Dénomination d'une unité cartographique dans divers systèmes de classification*

Classification	C.P.C.S.	Légende F.A.O.	Soil Taxonomy
Unité cartographique	Sol ferrugineux tropical lessivé modal	Luvisol chromique	Ultic haplustalf

. *L'EVALUATION DES TERRES*

Elle consiste à déterminer :

- *L'aptitude actuelle et potentielle* de chaque unité cartographique pour chaque type d'utilisation prévu.
  Par exemple, pour la culture du coton :
  . d'un point de vue *qualitatif* : le degré d'aptitude pour cette culture ;
  . d'un point de vue *quantitatif* : production prévisible de coton, connaissant la superficie de chaque "bloc homogène" et le rendement moyen pour cette culture dans le système d'exploitation choisi.
- *le classement* des unités cartographiques par ordre décroissant d'aptitude, qualitative et quantitative, pour cette culture.

CONCLUSION

Cette étude a été réalisée pour ordonner et coordonner les problèmes de cartographie des sols dans les régions tropicales.

La méthode d'étude est fondée sur une définition de l'objet – sol différente de celle du pédon. Cet objet – sol, dénommé système – sol, a une dimension beaucoup plus grande que celle du pédon.

Cinq niveaux de connaissance ont été retenus correspondant, pour chacun d'entre eux, à des analyses et à des expressions spatiales spécifiques.

Le niveau 2 comporte l'étude structurale et fonctionnelle des sites représentatifs de systèmes – sols. Elle est effectuée sur un versant, un interfluve ou dans un bassin versant, sans donner lieu systématiquement à la réalisation d'une carte. Ce niveau constitue le *pivot* des opérations à réaliser.

Les niveaux 1, 3, 4 et 5 conduisent à des cartes qui ont des échelles variées (1/100 000 à 1/2 000) et où les polygones représentent la superficie occupée par divers volumes de sols : ensemble de systèmes – sols (niveau 1), systèmes – sols (niveau 2), découpage morphopédologique de chaque système – sol (niveau 4), enfin découpage vertical de chaque unité morpho – pédologique (niveau 5).

On aboutit ainsi à un schéma bien structuré des opérations pédologiques, qui se distingue des autres approches envisagées jusqu'ici, en particulier de celles qui reposent avant tout sur les classifications de sols.

BIBLIOGRAPHIE

BRABANT (P.) & GAVAUD (M.), 1985 – Les sols et les ressources en terres du Nord – Cameroun. Editions ORSTOM.

BRABANT (P.) – Le sol des forêts claires du Cameroun – Etude d'un sol des régions tropicales en vue de la cartographie et de l'évaluation des terres. Editions ORSTOM (A paraître – 1989).

EXEMPLES DE MORPHOPEDOLOGIE TROPICALE

G. ROSSI

RESUME

Dans le monde tropical, la distinction entre géomorphologie et pédologie est souvent artificielle : les formes du relief se développent surtout aux dépens d'altérites et de sols. Le type de forme, sa dynamique, conditionnent les sols qui leur sont associés, leur évolution, leur plus ou moins grande sensibilité à l'érosion.

Deux exemples choisis dans des milieux et des conditions morpho-structurales très différents illustrent cette interdépendance.

Au Rwanda, l'évolution morpho-tectonique de l'ensemble de la région conditionne la stabilité ou l'instabilité des versants et des sols qui leur sont associés.

Au Nord-Togo il existe, pour chaque unité lithologique, une étroite dépendance entre sols et formes du relief.

Aussi est-il important que les spécialistes des deux disciplines prennent en compte les données et les approches méthodologiques de la discipline voisine. La morpho-pédologie constitue de ce point de vue un domaine de réelle interdisciplinarité.

INTRODUCTION

Pédologie et géomorphologie sont deux disciplines dont les objectifs, les concepts, les vocabulaires, se côtoient tout en différant notablement.

Mais, en milieu tropical, les interactions entre altérations, type et évolution des sols, forme et évolution du relief sont constantes, au point que l'on peut parler à juste titre de morphopédologie pour désigner le domaine commun, et que l'on pourrait souvent invoquer, au même titre que la

lithodépendance, une morphodépendance dans la répartition des sols et leur organisation à l'échelle d'une région ou d'un système de versants. Ces faits sont connus et ont été soulignés par de nombreux auteurs, par exemple, pour ne parler que de régions proches, par GRANDIN (1976). En effet, quelques faits majeurs donnent à la morphopédologie tropicale sa raison d'être et sa spécificité :

- en milieu tropical, l'essentiel de la morphogenèse s'effectue aux dépens d'altérites et de sols ; cette morphogenèse retentit sur la formation, l'âge et la localisation de ceux-ci, certains types de sols étant liés à certains types de formes ;
- le cuirassement, phénomène en grande partie pédologique, induit une morphogenèse et une morphologie des versants spécifiques ;
- le ruissellement, agent de la morphogenèse, joue un grand rôle dans la mise en place des horizons superficiels, donc dans la détermination de leurs propriétés physico-chimiques.

Le sujet est vaste et complexe, il mériterait un colloque à lui seul et nous ne pourrons donc ici que l'effleurer.

Deux exemples, très différents par leur contexte géographique, leur échelle, les types d'interactions entre pédologie et morphologie vont tenter d'illustrer cette importance de la morphopédologie et cette morphodépendance.

I - EQUILIBRE DES VERSANTS ET EROSION DES SOLS : LE CAS RWANDAIS

Le Rwanda, pays de 26.000 km^2 situé au coeur des hauts plateaux d'Afrique Centrale, entre 1° et 3° de latitude sud constitue un cas particulièrement intéressant pour examiner comment l'évolution morpho-tectonique d'une région détermine à la fois la répartition des types de sols et le degré de sensibilité des versants à l'érosion. En effet, ce qui frappe au Rwanda, c'est, avec l'intense mise en valeur, l'apparente stabilité des versants même sur des pentes importantes.

Il s'agit d'une région essentiellement montagneuse, dont 70 % environ de la surface cultivée offre des pentes supérieures à 10 % ; 5 % encore excèdent 80 % et certains terroirs dominant le lac Kivu sont établis sur des pentes supérieures à 100 %. Mais c'est aussi un

pays caractérisé par une densité de population extrêmement élevée pour l'Afrique. A l'horizon 1990, la densité rurale rapportée à la surface agricole utile devrait dépasser 500 ha/km^2, le record étant détenu par la région de Butaré, qui doit actuellement atteindre 800 ha/km^2.

Cette exploitation intensive sur des pentes considérables et sous un climat à forte pluviométrie pose avec acuité le problème de l'évolution des versants, dans un pays où la préservation du potentiel agro – pédologique est une question vitale (fig. 1).

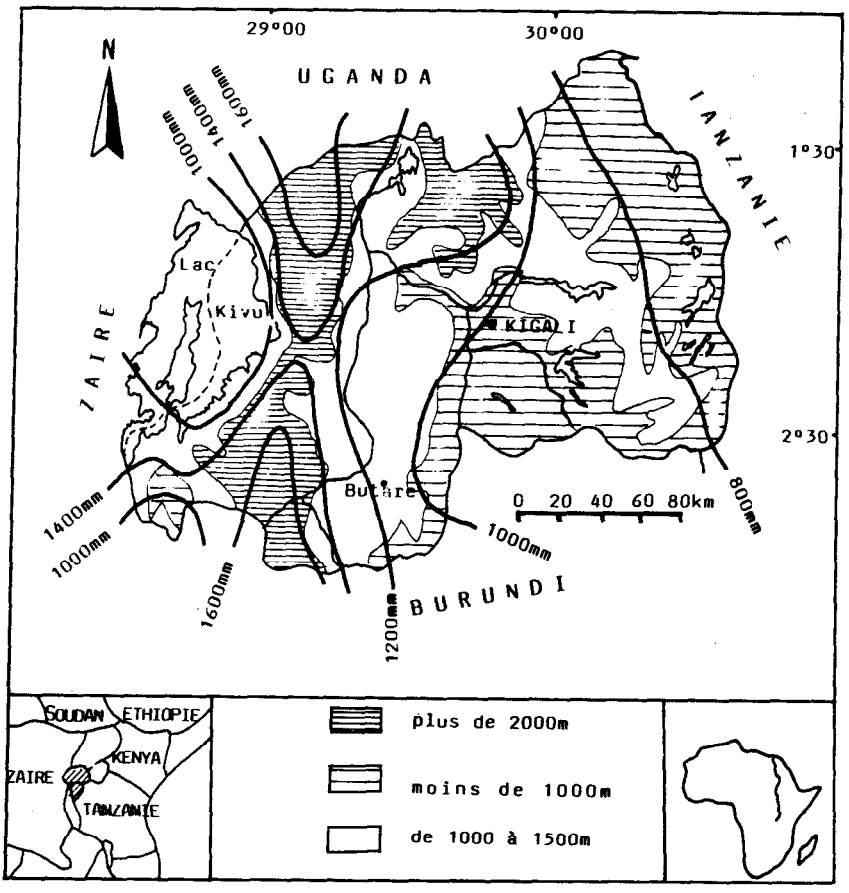


Figure 1 : *Le relief et la pluviométrie au Rwanda*

1. La mise en place des versants résulte d'une longue évolution

A la dissection de quatre surfaces d'aplanissement étagées de l'ouest vers l'est entre 2.600 et 1.400 m, se superpose, dès le Miocène, une importante tectonique qui, avec l'ouverture du Rift puis la formation de l'ensemble volcanique des Birunga au nord, est responsable des bouleversements successifs du drainage de la région.

Jusqu'alors le réseau hydrographique du Rwanda se dirigeait vers le Nil au nord (fig. 2) ; il va désormais rejoindre vers l'est la cuvette subsidente du lac Victoria (fig. 3). Actuellement, l'évolution de l'ensemble du réseau hydrographique, et donc des systèmes de versants, dépend de deux seuils. Celui de la Rusumo, sur l'Akagera, commande tout le réseau à l'est de la crête Zaïre – Nil ; celui de Bukavu règle l'altitude du lac Kivu, niveau de base des bassins versants situés à l'ouest de la crête (ROSSI, 1984).

Les vallées qui dépendent du réseau de la Nyabarongo – Akagera présentent toutes, à quelques variantes près, les mêmes caractères : profils en long à pente très faible ou même pratiquement nulle ; profil transversal en berceau évasé, à fond plus ou moins concave, empâté par l'accumulation des colluvions au bas des versants. Le drainage est toujours médiocre. L'Akagera et le Nyabarongo en aval de Kigali offrent de parfaits exemples de ces vallées dont le niveau de base s'est trouvé relevé à la suite de l'inversion vers l'est du drainage. Le plan d'eau, élevé subitement, a ennoyé les vallées qui se sont peu à peu colmatées par décantation de la charge alluviale en arrière du seuil de la Rusumo. C'est ce relèvement du niveau de base qui a modifié la pente générale et, partant, réduit la compétence des écoulements concentrés, déclenchant un processus d'alluvionnement régressif sur l'ensemble des bassins – versants. Les organismes fluviaux paraissent incapables d'assurer l'évacuation des débris, et la morphologie des vallées exprime bien la nette prédominance des apports colluviaux sur le transport longitudinal. Cette faible capacité de transport des écoulements concentrés est l'un des facteurs fondamentaux de l'évolution des versants.

Il ne faut pas, toutefois, généraliser ce tableau à l'ensemble du Rwanda car, à l'ouest de la crête, les bassins – versants dépendant du lac Kivu connaissent des conditions d'évolution tout autres. Là

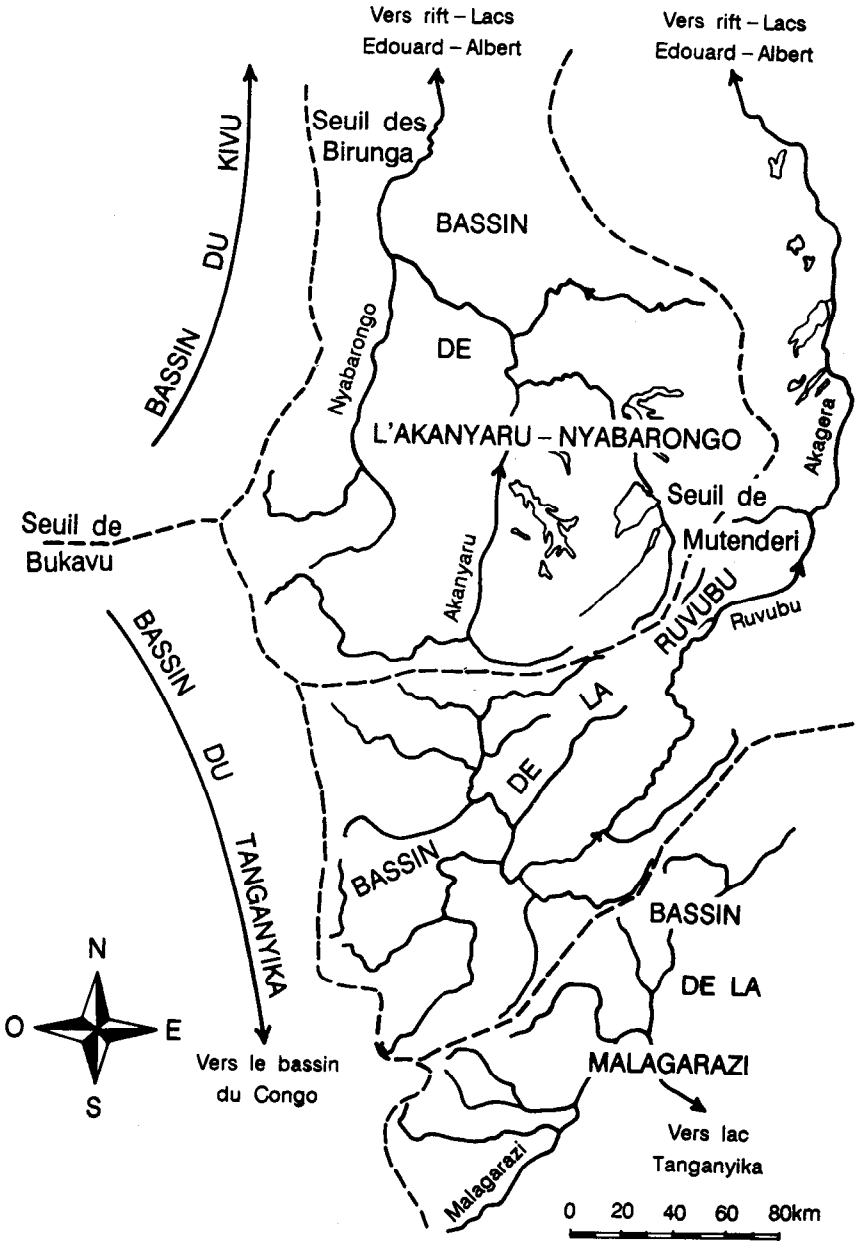


Figure 2 : *Schéma du drainage plio – quaternaire*

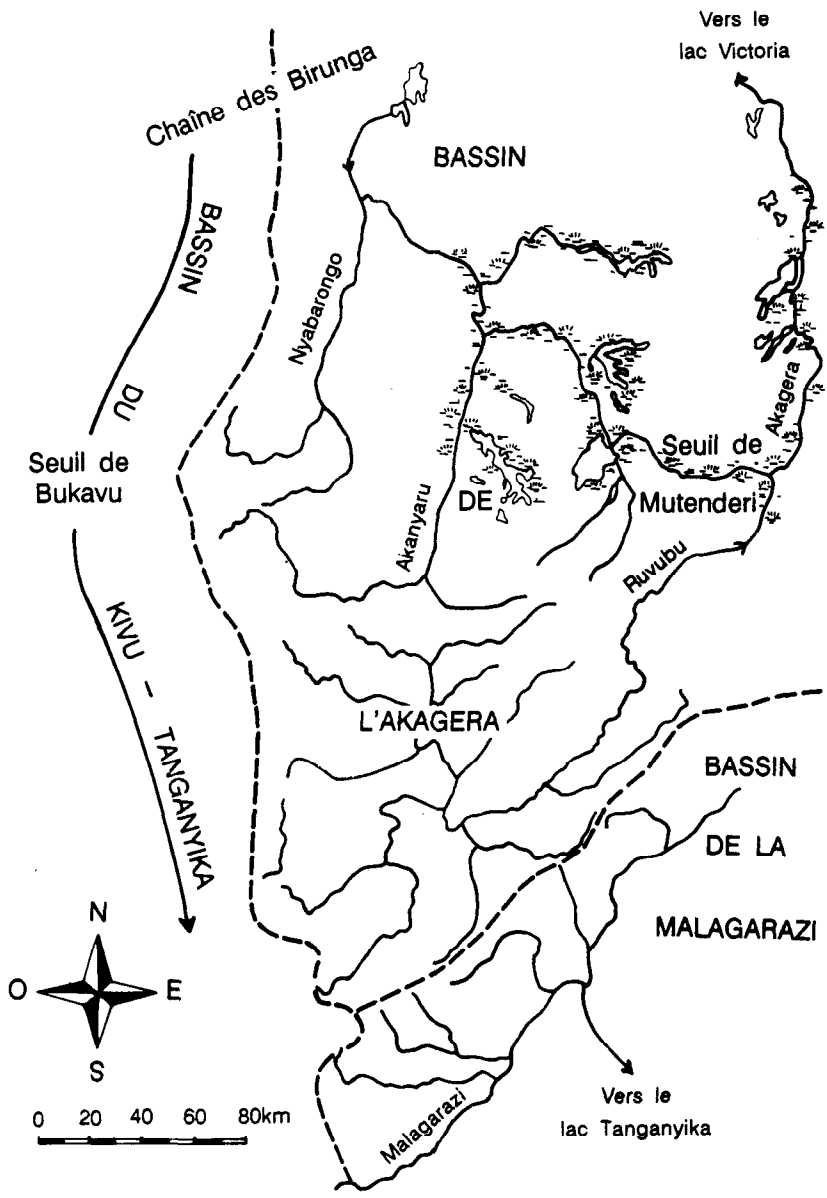


Figure 3 : *Schéma du drainage actuel*

au contraire, à des pentes très fortes (excédant souvent 100 %), qui résultent de la dissection de l'escarpement oriental du Rift, s'ajoute l'abaissement important (190 m au moins, d'après l'examen de volcans d'origine sous-lacustre), récent et brutal du niveau de base, consécutif à la vidange du lac par-dessus le seuil de Bukavu vers 8 000 B.P. (POUCLET, 1975).

L'augmentation considérable et brutale de la pente des cours d'eau et l'abondance des précipitations ont entraîné une crise morphogénique, encore accentuée depuis les défrichements résultant de la mise en valeur. Ainsi, par contraste avec les régions drainées vers le Nil où la situation est nuancée, les pentes qui dominent le Kivu sont-elles un domaine soumis à une forte ablation.

2. La dynamique actuelle des versants

Nous l'avons déjà dit : ce qui frappe l'observateur, c'est la relative stabilité apparente des versants rwandais. De toute évidence le versant est de la crête Zaïre-Nil n'est pas une terre d'érosion catastrophique.

La quasi-absence de mouvements de masse pose un premier problème, car les pentes atteignent des valeurs importantes, les altérites sont épaisses et les précipitations considérables. La solution de ce paradoxe doit être recherchée, à notre avis, dans la conjonction d'une série de facteurs. Certes, les pentes sont fortes, mais on sait que les pentes d'équilibre sur les altérites ferrallitiques peuvent atteindre 50 ° : à calculer les pentes des versants les plus impressionnants, on constate qu'effectivement, rares sont celles qui dépassent cette valeur. Ces versants sont donc, sauf exception, en-deçà du seuil de déséquilibre. Par ailleurs, ces altérites sont poreuses et perméables, et elles sont susceptibles d'absorber une quantité d'eau d'autant plus grande que leur épaisseur peut être supérieure à 100 m : la roche-mère est trop profonde pour jouer le rôle de plan de glissement. Enfin, les précipitations sont assez bien réparties et n'ont qu'exceptionnellement des intensités considérables (les pluies supérieures à 80 mm en 24 h sont rares). Au total, le régime pluviométrique n'est pas très favorable au ravinement, d'autant qu'il permet l'existence d'une couverture végétale continue, qu'il s'agisse de la forêt de la crête ou des savanes de l'est.

Le paradoxe n'est donc qu'apparent : les conditions nécessaires à d'importants mouvements de masse ne sont pas réunies actuellement.

L'importance du colluvionnement des versants montre que le ruissellement diffus est le principal agent d'évolution des versants. Son intensité est cependant variable. Elle est modérée dans le centre et l'est, mais sur le versant ouest de la crête Zaïre – Nil, là où la forêt vient d'être défrichée, les horizons humiques sont soumis à un décapage très rapide ; dans le secteur de Rangiro, où leur épaisseur moyenne est de 30 cm, ils ont été déblayés en 4 ou 5 ans. Mais il s'agit de sols sans cohésion, fragiles, mis en culture sur des pentes toujours proches de 100 % et dans un bassin – versant où se manifeste une forte reprise d'érosion.

En définitive, les profils des versants à l'est de la crête Zaïre – Nil semblent globalement en équilibre et, sur l'ensemble des bassins versants dépendant du seuil de la Rusumo, il ne se manifeste aucune reprise d'érosion susceptible d'entraîner une exportation importante de matière. De ce fait, le ruissellement a pour effet d'user la partie haute des versants et d'en colluvionner la partie basse, les ravinements étant l'exception.

3. Conclusions

Si l'on excepte le bassin – versant du Kivu, dans lequel le réajustement morphodynamique n'est pas terminé, l'évolution des versants du Rwanda est dominée par deux faits majeurs : une stabilité d'ensemble du géosystème et un impact relativement faible de la mise en valeur, pourtant particulièrement intense. Le renversement du drainage vers l'est et l'apparition d'un nouveau niveau de base supérieur à l'ancien, le seuil de la Rusumo, a bouleversé la dynamique des écoulement et, partant, celle des versants.

L'absence de creusement fluviatile et la faiblesse de l'évacuation des apports latéraux, constituent les causes fondamentales de la stabilité des versants. A ce titre, tout abaissement du seuil de la Rusumo entraînerait une reprise d'érosion dont les conséquences seraient à coup sûr catastrophiques : enfoncement des talwegs, mise en déséquilibre du profil des versants, accélération de l'ablation des sols.

Cette stabilité est renforcée par les facteurs du milieu. La perméabilité des altérites, leur épaisseur, la persistance d'une couverture végétale contrarient les mouvements de masse, freinent la concentration du drainage et diminuent les effets d'un ruissellement diffus peu agressif du fait de la rareté des pluies à forte intensité.

II - SEQUENCES MORPHOPEDOLOGIQUES AU NORD-TOGO

L'étude des niveaux cuirassés du nord Togo (POSS et ROSSI, 1987) permet de retrouver deux surfaces d'aplanissement. Le niveau le plus élevé (500 mètres) est attribué au milieu du Tertiaire, alors que la surface inférieure (300 mètres), qui constitue l'armature à partir de laquelle s'est différencié le modelé actuel, est d'âge fini-tertiaire.

A l'échelle d'une unité litho-structurale, l'organisation morphopédologique des versants est constante : les témoins de la surface fini-tertiaire (sur lesquels un niveau cuirassé surmonte des altérites ferrallitiques) se raccordent à un glacis polygénique quaternaire très élaboré où les sols ferrugineux tropicaux dominent. Le bas de versant est soit recouvert par des colluvions, soit incisé, en fonction des reprises d'érosion subactuelles.

1. **Sur le socle birrimien** (fig. 4 et 5) les témoins les plus anciens sont ceux de la topographie fini-tertiaire. La ligne de partage des eaux entre le bassin de l'Oti et celui de la Volta correspond à la zone où les témoins de cette topographie sont les plus nombreux et où les versants postérieurs présentent le développement maximum.

   Ces buttes tabulaires d'une vingtaine de mètres de hauteur sont entièrement cuirassées, avec des pentes régulières de l'ordre de 1 à 2 %, mais très peu étendues (quelques hectares). La cuirasse, épaisse de 1 à 2 mètres, présente une morphologie d'altérite indurée de couleur ocre-jaune à la base, la partie supérieure comportant fréquemment des éléments détritiques centimétriques. Des minéraux altérés y sont discernables et elle contient parfois des filons de quartz en place ; il s'agit donc probablement d'un ancien sol ferrallitique qui a été tronqué jusqu'à l'altérite lors de l'élaboration finale de la surface fini-tertiaire. Au-dessus de la

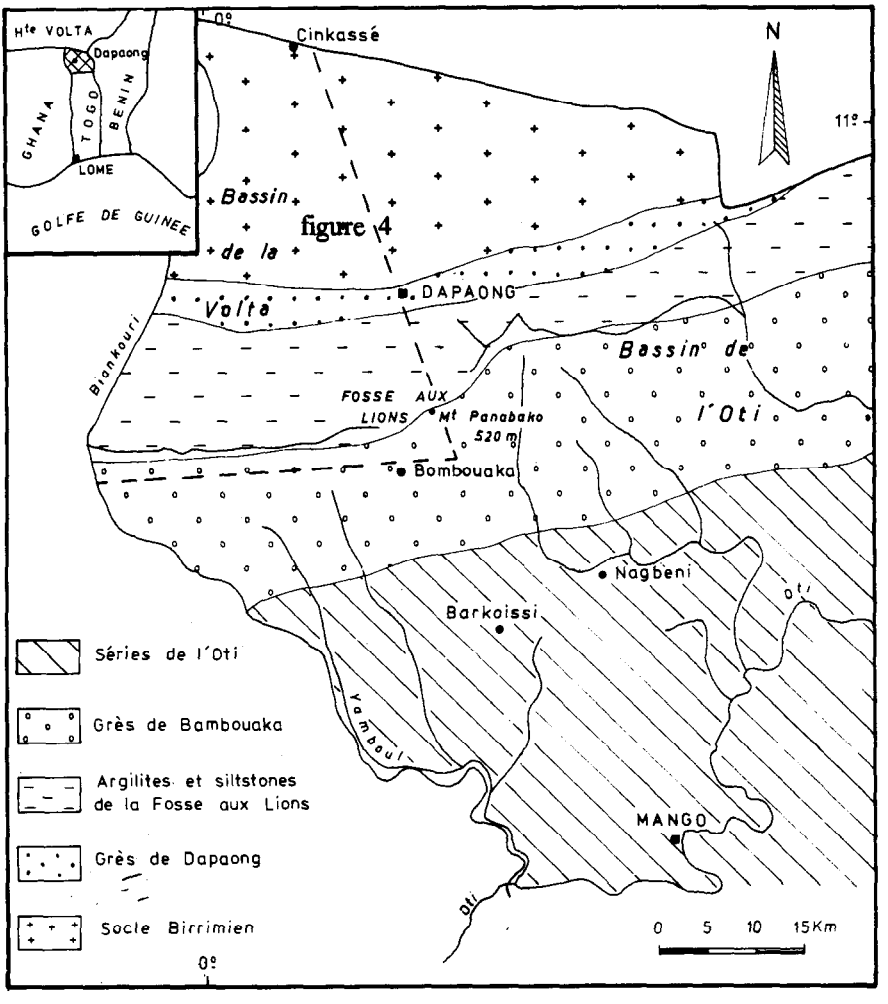


Figure 4 : *Carte géologique schématique du Nord Togo*

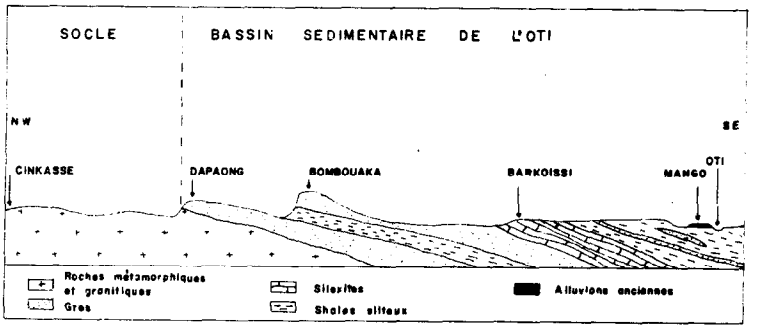


Figure 5 : *Coupe géologique schématique du Nord Togo*

cuirasse les sols sont squelettiques, très riches en gravillons et impropres à l'agriculture malgré un taux élevé de matière organique.

A l'aval, ces versants se raccordent à un glacis polygénique très élaboré, pouvant atteindre 3 km de longueur, avec des pentes très régulières comprises entre 1 et 3 %. A l'inverse de ce qui a pu être observé en Côte d'Ivoire (POSS, 1982) et au Burkina Faso (BOULET, 1970), les altérites ferrallitiques anciennes y ont été déblayées par suite de la proximité des niveaux de base locaux. L'organisation des sols est constante et relativement indépendante de la nature de la roche – mère (sols ferrugineux tropicaux). La roche altérée, partiellement argilifiée, est surmontée brutalement, vers un mètre de profondeur, par une nappe détritique de composition complexe, dans laquelle il est possible de retrouver des débris de cuirasse, des graviers de quartz, ainsi que des concrétions ferrugineuses. En surface, les horizons sans éléments grossiers ont une épaisseur variable, de l'ordre de quelques décimètres, sans doute en partie d'origine faunique (LEVEQUE, 1979). La base de la nappe de gravats constitue une discontinuité majeure dans le profil. On peut l'interpréter comme une couverture colluviale résultant du démantèlement de la cuirasse qui scelle la surface fini – tertiaire.

Au niveau de cette discontinuité une nappe soutirante se crée actuellement au cours de la saison des pluies. Il y a donc, ici, cumul entre une ablation superficielle, accentuée par la mise en

valeur intense de ces sols et le faible taux de matière organique qui en résulte (moins de 1 %), et une érosion interne, tout à fait comparable aux mécanismes d'appauvrissement mis en évidence dans le sud du Burkina Faso (BOULET, 1978 ; LEPRUN, 1979). Localement, en particulier à l'aval des glacis, la nappe détritique s'indure, surtout après la disparition des horizons superficiels. Indépendamment de cette prise en masse, la mise à l'affleurement des horizons gravillonnaires limite l'érosion régressive, car la présence d'éléments grossiers favorise la pénétration de l'eau à l'intérieur du sol (COLLINET et VALENTIN, 1979).

Ces observations mettent en évidence la réalité de l'individualisation de glacis de substitution à la fois par soutirage et par ruissellement superficiel.

Ces glacis sont actuellement entaillés par une reprise d'érosion de faible amplitude (quelques mètres), qui concerne entre 40 et 50 % des sols du socle et se traduit par des pentes plus fortes, de l'ordre de 4 à 5 %. La nappe détritique a été intégralement déblayée, ce qui a rapproché l'altérite de la surface du sol. Aussi, à l'inverse des autres sols du versant, la nature de la roche – mère détermine d'organisation des profils. Sur les roches basiques ou ultra – basiques (amphibolites au sens large), qui représentent environ 25 % des roches du socle, l'altération libère une quantité importante d'argiles gonflantes et la pédogenèse est orientée vers les sols vertiques, voire de véritables vertisols. Sur les roches plus acides ou moins altérables (granito – gneiss), la néosynthèse de minéraux argileux est très limitée et des sols pénévolués sableux parsemés d'affleurements rocheux se développent. L'importance de ces phénomènes d'érosion est très mal saisie par les paysans. En effet, la disparition de la nappe de gravats et la mise à nu de l'altérite se traduit par une augmentation brutale de la fertilité, les sols érodés étant plus légers, donc plus faciles à travailler, et mieux pourvus en bases. Il est difficile de faire admettre que cette amélioration est transitoire et que l'évolution, inéluctable, conduit à la stérilité de la moitié des sols de la région.

A mesure que l'on s'éloigne de la ligne de partage des eaux, le système de versants évolue progressivement par accentuation des phénomènes d'érosion (fig. 6). Dans un premier temps les témoins cuirassés de la topographie fini – tertiaire se dégradent et sont remplacés par des sols gravillonnaires rouges riches en débris de

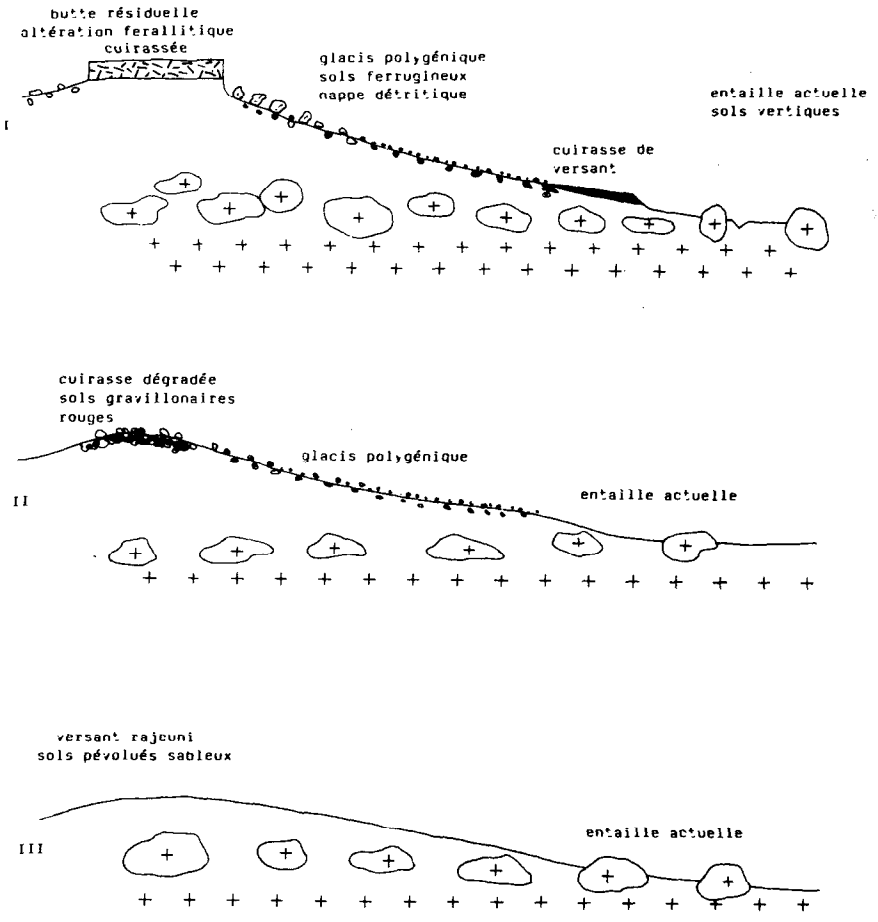


Figure 6 : *Organisation et évolution morphopédologique des versants sur socle*

cuirasse. Ensuite ces horizons gravillonnaires rouges cèdent la place à des sols peu évolués à altérite proche de la surface, le glacis polygénique se maintenant sur les versants. Le stade ultime, qui apparaît sur les formes les plus rajeunies, est un versant convexo – concave surbaissé, entièrement dans des sols peu évolués.

2. **Les shales silteux** occupent la partie centrale du bassin sédimentaire du Voltaïen. La granulométrie de la roche est

généralement fine (moins de 62,5 micro-mètres), avec quelques passées gréseuses. Sa composition comprend toujours une part importante de quartz, la fraction argileuse étant constituée de proportions variables de kaolinite, de smectites, d'illite ainsi que de quelques interstratifiés. Son litage fin est subhorizontal et, dans la zone étudiée, aucune fracture ne vient perturber l'organisation monoclinale. Cette roche constitue donc un matériau particulièrement imperméable, impropre, de plus, au stockage de l'eau.

L'organisation des versants sur les shales silteux est voisine de celle du socle : à un témoin fini-tertiaire succède un glacis polygénique entaillé par une reprise d'érosion récente. Mais chacun des éléments morphologiques diffère profondément de son homologue du cristallin.

Les éléments cuirassés de la topographie fini-tertiaire sont très démantelés et le passage au glacis polygénique est insensible, marqué principalement par une diminution de l'induration. A la base de la cuirasse, composée principalement de goethite et d'hématite mêlées à des argiles héritées de la roche-mère, aucune altération ferrallitique n'a été observée, peut-être en raison de la faible altérabilité de la roche.

Le glacis polygénique, très régulier, avec des pentes inférieures à 3 %, atteint jusqu'à 6 km de longueur. Il est recouvert par des sols ferrugineux tropicaux très fortement gravillonnaires (plus de 80 % en masse), la roche en place apparaîssant vers 1 mètre de profondeur. Ces horizons gravillonnaires ne possèdent qu'une faible capacité de rétention et, rapidement après le début de la saison des pluies, le flux hydrique atteint la roche. Il se crée alors une nappe perchée dans laquelle la roche se délite "en savonnettes" et les particules se mettent en suspension (les mesures de résistivité indiquent que les matières en solution sont négligeables). Or, malgré la faiblesse de la pente, cette nappe circule rapidement. Des marquages au chlorure de sodium ont indiqué des vitesses de circulation atteignant 50 cm/h. Etant donné la granulométrie très fine de la roche, tous les minéraux sont exportés : il ne subsiste aucune structure héritée de la roche-mère au-dessus du plancher de la nappe. Le squelette des horizons supérieurs est constitué par des concrétions ferrugineuses au contact les unes des autres créant une macro-porosité très grossière favorable à la

circulation de la nappe. Les pertes par soutirage qui en résultent peuvent être évaluées, en prenant une durée d'engorgement moyen de 1 mois et une charge de 0,3 g/l, à 0,2 mm par an. Ce phénomène, déjà mis en évidence plus au sud dans la région de Bassar (LE COCQ, 1986), explique l'origine de dépressions fermées d'une centaine de mètres de diamètre assez fréquentes sur les versants : la roche a fondu sur place, la matière étant évacuée à l'intérieur même du sol. Il est d'ailleurs frappant que les axes de drainage de premier ordre aient, en dehors des périodes de crue, des charges solides comparables à celles mesurées dans les nappes perchées. Il faut toutefois noter que cette évolution est liée au climat actuel : si le phénomène est très général avec la pluviosité moyenne de la région (1 000 – 1 100 mm), il devient très rare lorsque le total pluviométrique tombe à 650 mm, comme en 1983, ce qui interdit d'extrapoler le bilan à une échelle de temps plus grande, mais permet de supposer que ce phénomène de soutirage a une répartition zonale (BOULET, 1978).

Cette érosion interne se double d'une érosion externe : d'une part le sol est très peu couvert par la végétation après les feux de brousse (recouvrement de 25 % dans les zones où la savane boisée est la mieux conservée) ; d'autre part, il se glace, en raison de sa texture fine et du faible taux de matière organique (souvent inférieur à 1 %). Ainsi, malgré les remontées de vers de terre, abondantes par endroits, l'épaisseur des horizons superficiels sans éléments grossiers dépasse rarement 10 cm. Dans les zones les mieux drainées, généralement boisées, les sols présentent également des phénomènes de décuirassement qui apparaissent simultanément à la surface et à l'intérieur même du sol (LEPRUN, 1979) : les blocs de cuirasse se retrouvent isolés au sein d'horizons gravillonnaires résultant de leur dégradation. En surface le processus est surtout mécanique (racines, pédofaune) alors qu'il est à dominante physico – chimique à la base, déterminé par l'apparition de la nappe perchée temporaire. Il s'agit donc là d'un remarquable exemple de glacis de substitution actuellement fonctionnel, dont l'évolution dépend à la fois de pertes de matière par soutirage hypodermique et par ruissellement diffus superficiel ; seuls les éléments fins sont exportés, ce qui explique, tout à la fois, le passage brutal de l'altérite à la nappe de gravats et le caractère grossier de celle – ci.

En raison de la proximité de l'Oti, la reprise d'érosion est vive. Les versants des talwegs peuvent entailler le glacis sur près de 2 km avec des pentes rectilignes de 3 à 5 %. Grossies par les apports de l'amont, les circulations latérales sont très importantes dans ces sols où l'on observe de nombreux horizons blanchis par départ de matière. Cependant les oxydes métalliques ne sont pas exportés et ils sont responsables de traits morphologiques particuliers dans les profils : même dans les sols les plus jeunes les résidus de désagrégation de la roche s'imprègnent d'oxydes de fer avant de se prendre en masse. Sur ces versants, toute diminution du décapage superficiel conduit à la formation d'une induration continue, voire d'une cuirasse, par coalescence des litho-reliques. C'est l'ampleur et la rapidité du phénomène qui explique le mimétisme entre les témoins fini-tertiaires et les glacis de substitution polygéniques.

Vers l'aval, la pente du glacis diminue insensiblement et l'on passe aux sols hydromorphes de la plaine de débordement de l'Oti dont la largeur peut atteindre une dizaine de kilomètres.

3. Conclusion

L'extrême nord du Togo montre, à côté d'une stricte lithodépendance de la morphologie, l'existence de liens constants entre formes et sols.

Deux séries de facteurs dynamiques permettent d'expliquer la répartition des sols et les profils observés : le drainage hypodermique et le ruissellement diffus.

L'évolution morphologique y est commandée en grande partie par érosion interne au sein de la nappe de gravats.

III - CONCLUSION GENERALE

Les exemples que nous venons d'envisager très rapidement montrent quels types de relations s'établissent entre deux disciplines qui ont, pour comprendre la complexité des paysages, tout à gagner à travailler ensemble.

Sans revenir sur une discussion sans doute aujourd'hui dépassée entre autochtonistes, partisans d'une évolution strictement verticale, et tenants du pur latéralisme, il est permis de penser qu'une collaboration entre pédologues et géomorphologues eut plus rapidement révélé la réalité, à savoir que la vérité se situe presque toujours à mi – chemin.

La troncature des altérites sur les glacis d'ablation/transit est une constante et explique le contact brusque entre celles – ci et la mince nappe détritique qui les recouvre. Beaucoup de coupes de cuirasses, indubitablement d'accumulation relative, montrent à leur partie supérieure des traces de remaniement et de transport parce qu'elles sont associées à des versants – glacis.

Une forme, quelle qu'elle soit est le résultat d'une dynamique de surface spécifique, dont on retrouve inévitablement les traces dans les profils. Comment expliquer, par exemple, qu'au Sud de Dapaong (Nord Togo) des sables provenant des grès se retrouvent à 15 km au sud des derniers affleurements, discordants sur toutes les autres roches de la région ?

A l'inverse, comment expliquer, par la seule dynamique de surface, l'évolution encore actuelle de versants – glacis cuirassés de plusieurs kilomètres de long dont les pentes sont, parfois, largement inférieures à 1 % ? L'abaissement d'un versant suppose une exportation de matière et on ne peut concevoir (et on n'observe d'ailleurs pas) d'évacuation des débris par ruissellement superficiel sur des pentes aussi faibles.

Si l'on ne recourt pas au lessivage oblique et au drainage hypodermique, ces formes, très unies, sont inexplicables, même si le terme, commode, de "fonte sur place" est excessif car dans la phase initiale de réalisation du glacis, le ruissellement joue un rôle majeur qui décroît relativement, ensuite, au fur et à mesure de la diminution de pente. Là encore une combinaison de processus variables dans le temps et l'espace explique ce qu'une vision réductrice est tentée de considérer comme une forme simple.

Aussi, au – delà d'une collaboration dans la recherche, doit – on souhaiter que la formation dans nos disciplines fasse largement appel aux concepts et aux acquis de la spécialité voisine.

IV – BIBLIOGRAPHIE

BOULET (R.), 1970 – La morphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale. *Cah. ORSTOM* (Paris), sér. Pédologie, 8(3) : 245-272

BOULET (R.), 1978 – Toposéquence de sols tropicaux en Burkina-Faso : équilibres dynamiques et bioclimats. *Mém. ORSTOM* (Paris) n° 85, 272 p.

COLLINET (J.) & VALENTIN (C.), 1979 – Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cah. ORSTOM* (Paris), sér. Pédologie, 17(4) : 283-328.

GRANDIN (G.), 1976 – Aplanissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. *Mém. ORSTOM* (Paris) n° 82, 275 p.

LARNAUDE (M.), 1950 – Un haut pays d'Afrique : le Rwanda-Ouroundi, *Rev. Géogr. Alp.* 3, Grenoble.

LE COCQ (A.), 1986 – Région de Bassar. Les sols et leurs capacités agronomiques. Notice expl. ORSTOM (Paris) n° 102, 103 p., 2 cartes h.t.

LEPRUN (A.), 1979 – Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche – Genèse – Transformations – Dégradations – *Mém. BRGM* n° 58 (Orléans), 222 p.

LEVEQUE (A.), 1979 – Pédogénèse sur le socle granito-gneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. *Trav. et Doc. ORSTOM* (Paris) n° 108, 224 p.

POSS (R.), 1982 – Etude morpho-pédologique de la région de Katiola (Côte d'Ivoire). Notice expl. ORSTOM (Paris) n° 94, 2 cartes h.t.

POSS (R.) & ROSSI (G.), 1987 – Systèmes de versants et évolution morphopédologique au Nord-Togo. *Zeit. für Geomorphologie* N.F., 31(1) : 21-43.

POSS (R.) & VALENTIN (C.), 1983 – Etude des relations eau – sol – végétation sur une toposéquence ferrallitique de savane. Katiola, Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM* (Paris), sér. Pédol., 20(4) : 341 – 360.

POUCLET (A.), 1975 – Histoire des grands lacs de l'Afrique Centrale, mise au point des connaissances actuelles. *Rev. Geogr. Phys. Géol. Dyn.* (Paris), 19(2).

ROSSI (G.), 1984 – Evolution des versants et mise en valeur agricole au Rwanda. *Annales de géographie* (Paris), n° 515 : 23 – 43.

SIRVEN (P.), GOTANEGRE (J.F.) & FRIOUL (C.), 1974 – Géographie du Rwanda, Ed. A. de Boeck, Bruxelles.

DISUSSIONS ET SYNTHESE SUR LE THEME DE L'ORGANISATION DES SOLS DANS LE PAYSAGE

Président : **J. BINDZI**
Vice – Président : **B. KEITA**
Rapporteur : **M. GAVAUD**

COMMUNICATION DE M. GAVAUD

Question de B. VOLKOFF : Quelles sont les organisations pédologiques cartographiables à petite échelle et de nature zonale. Comment les met – on en évidence et les cartographie – t – on ?

Réponse de M. GAVAUD : Depuis la zone des forêts jusqu'au désert, de nombreux travaux ont montré que, dans les compartiments apicaux, des redistributions de matière et des réorganisations manifestaient deux propriétés : la première traduit une mise en équilibre rapide avec les conditions bioclimatiques actuelles, tout particulièrement avec l'état de la végétation, la seconde se manifeste par une discordance de ces réorganisations par rapport au reste du solum. De la sorte, ces volumes ne peuvent plus être assignés à une partie précise des toposéquences par exemple mais sont corrélables avec le facteur climatique, directement ou par l'intermédiaire de la végétation. L'exemple le plus spectaculaire est celui du développement des organisations pelliculaires caractéristiques de la "sahélisation" dû à la sécheresse récente. Mais on sait depuis longtemps que certains paramètres, tels les pH, les taux de matière organique, avaient une distribution zonale, toutes conditions égales bien entendu.

Question : Etat de la question sur les podzols tropicaux.

Réponse de M. GAVAUD : Les podzols du Vénézuela et des parties adjacentes du Brésil sont des podzols humiques de nappe, formés sur de vastes étendues et de grandes épaisseurs, tout en aval de la couverture

pédologique locale. Formés sur granitoïdes et sous une végétation "tundricoïde" très adaptée, ils composent un des paysages les plus étranges d'Amérique du Sud.

Réponse de G. PEDRO : La podzolisation est un processus biogéochimique d'altération dû, à l'exclusion de toutes autres conditions, notamment de pluviosité et de température, à la présence de petites molécules organiques acides dans la solution du sol. Ces acides sont produits lorsque, l'activité biologique étant fortement ralentie, les produits de décomposition de nature organique ne se polymérisent pas. Les podzols tropicaux ont été décrits dès 1941 à Bornéo, 1956 en Côte d'Ivoire. Ils y prennent un énorme développement, de l'ordre de la dizaine de mètres pour l'horizon A_2, qui en fait de véritables formations superficielles. Au contraire, sous les climats boréaux froids favorables à leur développement, les podzols sont généralisés, mais le A_2 est toujours peu épais (centimétrique).

Question de B. MUTWEWINGABO : Les podzols peuvent-ils être un héritage paléoclimatique ?

Réponse de G. PEDRO : Les podzols géants tropicaux ont obligatoirement demandé du temps pour se former, mais leur évolution se poursuit toujours dans le bassin de l'Amazone, car un énorme réseau de rivières collecte encore des "eaux noires" (Rio Negro) caractéristiques de ce type de processus.

COMMUNICATION DE P. BRABANT

"LA CONNAISSANCE DE L'ORGANISATION DES SOLS DANS LE PAYSAGE : UN PREALABLE A LA CARTOGRAPHIE ET A L'EVALUATION DES TERRES".

RESUME – La présentation orale est conforme au résumé publié – s'y reporter

QUESTIONS

Question de B. VOLKOFF : A propos des niveaux 1 et 3, P. BRABANT a dit que l'échelle était sans importance. L'échelle ne doit-elle pas être adaptée à la dimension des corps naturels correspondants ?

Le postulat de la répétition de la même unité de modelé à l'intérieur d'une unité naturelle n'est-il pas infirmé par l'expérience ? En effet chaque colline est différente et les agriculteurs leur donnent des noms différents ?

Intervention de C. CHEVERRY : Comment choisir l'unité de modelé représentative ?

Réponse de P. BRABANT : Les capacités du traitement infographique, qui sont à même de calculer les surfaces des plus petites aires de la carte avec une bonne précision, font que les latitudes dans le choix de l'échelle sont devenues très grandes et que le coût devient le premier élément à prendre en compte, tout particulièrement en ce qui concerne l'inventaire national.

Le choix du modelé représentatif est délicat et sa pertinence n'est démontrée qu'*a posteriori*.

Commentaire du rapporteur : C'est la modélisation, c'est à dire la dégradation correspondante de l'information, qui rend possible l'équivalence des unités de modelé dans leur unité naturelle.

L'échantillonnage n'est évaluable que si le terrain est suffisamment étendu pour que chaque unité naturelle puisse être examinée plusieurs fois. Il est alors possible de calculer la limite maximum des surfaces non représentées dans l'échantillonnage.

Question : L'imagerie SPOT est-elle utilisée comme pour une thématique classique ou à la façon employée pour définir les états de surface du sol dans les zones sensibles ? Quel type d'image choisir ?

Réponse de P. BRABANT : Les images destinées à l'étude des états de surface, changeants par nature, doivent être faites à plusieurs dates dans l'année. La meilleure se situerait ici en novembre, 15 jours après le début de la dessication des sols qui provoque une forte différenciation de l'état

végétatif. En première approche, le choix des images redressées est plus avantageux que celui du traitement numérique des bandes, car on dispose immédiatement d'un document exploitable. Le choix entre l'imagerie LANDSAT ou SPOT est une affaire de budget.

Question de M. KHOUMA : Demande un état de la question pour le radar.

Réponse de P. BRABANT : Le radar à visée latérale (SLAR) embarqué sur avion a été le plus utilisé (Brésil, Bornéo, ...). Outre son utilité bien connue dans les zones forestières ou nuageuses, il possède des propriétés intéressantes en zone aride, grâce à sa capacité de traverser plusieurs mètres de sable sec, par exemple.

Réponse de B. VOLKOFF : Un radar à faible résolution a obtenu quelques images avec une navette spatiale comme plateforme (SIRA). Un radar à forte résolution (10 m) est en projet pour le satellite ERTS 1 prévu pour 1991 – 1992 ; il faut rappeler que la résolution est indépendante de l'altitude ; comme il n'a pas été prévu de station fixe de réception en Afrique Centrale, l'emploi de station mobile pourrait y suppléer.

Question de M. KILASARA : Depuis 20 ans, les pédologues ont obtenu beaucoup de résultats et fait de nombreuses cartes, mais les rendements des cultures restent médiocres. Est – ce parce que les problèmes de fond n'ont pas été abordés ou est – ce parce que les moyens de les utiliser font défaut ? L'exemple de sols profonds en Tanzanie, où la fumure minérale n'avait accru les rendements que de 20 %, alors que la correction du déficit hydrique les avaient augmenté de 40 %, est démonstratif de l'insuffisance des critères habituels de classement des terres.

Réponse de P. BRABANT : Abonde dans le sens qu'effectivement les données des travaux pédologiques n'ont pas toujours été bien reliés aux problèmes d'utilisation.

Question de J. BINDZI : Qu'est – ce qu'un "système – sol" ? Comment définir l'individu – sol dans des unités aussi complexes ?

Réponse de P. BRABANT : Le système – sol est à peu près équivalent au "*land unit*", unité naturelle formée d'une même succession des mêmes horizons dans un contexte pédogénétique semblable (roche, végétation, élément du modelé).

Commentaire général de J.C. GRIESBACH : Une échelle n'est pas seulement une relation graphique, elle a aussi des implications conceptuelles. Par exemple, les aspects qualitatifs peuvent être développés davantage aux moyennes échelles, pour lesquelles par ailleurs l'imagerie LANDSAT a été optimisée.

COMMUNICATION DE G. ROSSI

QUELQUES EXEMPLES DE MORPHOPEDOLOGIE TROPICALE

RESUME DE LA COMMUNICATION ORALE (pour mémoire et situer les interventions)

Deux exemples de corrélations entre les sols et la géomorphologie sont présentés : le Rwanda et le Nord – Togo.

Au Rwanda trois caractéristiques essentielles : de fortes pluviosités à gradient orographique, des pentes fortes et des côtes souvent élevées (dorsale jusqu'à 3 000 m, plateau des mille collines (surface mi – tertiaire), versants à pentes raides vers le rift...) et enfin un très important colmatage des axes alluviaux. Ce dernier est une conséquence de l'inversion du réseau de drainage primitif à un niveau de base supérieur à l'ancien provoqué par l'ouverture (au quaternaire ancien) du rift et au volcanisme qui lui est associé, ainsi que par la formation d'une synéclise vers l'est. L'incision du réseau a ainsi été stoppée, l'érosion des versants bloquée, celle des sols limitée à une ablation pelliculaire modérée en dépit de fortes pentes et autres conditions favorisantes de l'érosion. Il n'y a pas d'érosion catastro – phique.

Au Nord Togo, sur des séries métamorphiques et gréseuses, un long glacis polygénique s'abaisse aux pieds de témoins cuirassés de la surface fin tertiaire. Le glacis est couvert d'un cailloutis hérité de la cuirasse, sans relation avec la roche mère, ferritisé et induré en aval. Lorsque la butte cuirassée diminue d'importance, le glacis s'abaisse, sa pente atteint de très faibles valeurs, peu compatibles avec une érosion de surface ; le cailloutis disparaît également. Or sur les shales, entre le cailloutis et le bed rock, une très forte circulation endogée de la nappe a été mise en évidence (jusqu'à 50 cm/h). Ce soutirage hypodermique transporte assez de particules en suspension pour provoquer une ablation de l'ordre de

0,2 mm/an (R. POSS) et est donc le mécanisme responsable du façonnement du glacis.

QUESTIONS

Question de B. MUTWEWINGABO : La végétation luxuriante du Rwanda ne signifie pas que l'érosion y soit limitée, ce d'autant plus que si certaines formes d'érosion spectaculaire sont absentes, l'érosion en nappe, bien visible sous culture, peut être importante. Par ailleurs, je suis d'accord avec l'auteur sur ce qu'une meilleure connaissance de la pédomorphogénèse améliorerait beaucoup celle de la pédogénèse. Je poserai donc deux questions :

. Qu'est-ce qu'une érosion catastrophique ?
. Comment expliquer les dépôts alluviaux actuels de plusieurs centimètres dans les grandes vallées ?

Réponse de G. ROSSI : Il s'agit d'une faiblesse relative de l'érosion. Sur des pentes dépassant 100 % avec une pluviosité de 3 m et plus, des altérites épaisses de 100 m, une pression culturale très forte liée à une densité démographique exceptionnelle (800 h/km^2), qu'il n'y ait pas davantage d'érosion est remarquable. S'il est vrai, par exemple, que sous certaines cultures (haricots, maïs) de petites rigoles puissent se former, on n'observe pas les grands glissements, les profondes entailles telles que, par exemple, les lavaka malgaches. Le relèvement du niveau de base du réseau hydrographique peut expliquer que cette érosion ne se soit pas produite.

Question de R. SANT'ANNA : Quel est le couvert et le type de sols dans les régions épargnées par l'érosion ?

Réponse : se reporter à la réponse précédente.

Question de B. VOLKOFF : Quel est le sens de l'expression "sol indépendant de la roche" au Nord-Togo ?

Réponse de G. ROSSI : au sens d'une allochtonie observée dans la fosse.

Question de J.C. GRIESBACH : Je ne connaissais pas l'expression "soutirage hypodermique". Que devient le matériel solide transporté en suspension ?

Réponse de R. POSS, co-auteur : après l'arrêt du ruissellement succédant à une pluie, la couleur laiteuse des marigots indique que le soutirage

COMMENTAIRES FINAUX

J. BINDZI : Le Président de séance invite à réfléchir au commentaire de M. KILASARA sur l'efficacité de nos travaux. Ces derniers s'adressant d'abord aux agriculteurs, ils doivent être en mesure de les utiliser si tous les efforts de vulgarisation sont faits.

CONCLUSIONS

Les trois communications sont des exposés méthodologiques illustrés d'exemples récents. P. BRABANT propose une norme des études cartographiques formée de cinq niveaux d'échelle croissante, depuis le champ jusqu'au paysage. Le niveau 2, celui de l'étude de référence des organisations toposéquentielles, joue le rôle de source d'information pour tous les autres. M. GAVAUD décrit une série de procédures de description de la couverture de sols qui approchent progressivement de l'analyse structurale, complétée par l'adjonction successive de caractères généraux, de la taxonomie, de la segmentation des paysages et de la géométrie bi et tridimensionnelle des horizons de sol. Chacune de ces procédures trouve un emploi préférentiel dans un ou plusieurs des niveaux de la norme de P. BRABANT. G. ROSSI complète ces deux exposés en introduisant la dynamique du paysage par deux exemples, l'un de stabilisation de l'érosion au Rwanda par relèvement du niveau de base, l'autre de façonnement de glacis peu déclivé par écoulement de nappe endogée.

Il y eut peu de questions portant sur les méthodes. L'une classique, soulève la difficulté du choix de l'unité de modelé représentative pour une étude de détail qu'il est matériellement impossible de répéter. L'autre relève de la latitude d'appréciation de l'échelle dans la norme de P. BRABANT. Dans une séance ultérieure C. CHEVERRY fit remarquer que la géométrie des organisations pouvait ne pas suffire à prévoir par exemple l'alimentation hydrique des plantes. Il fut alors précisé que les études de niveau 2 ne sont pas isolées, mais précédées ou suivies de travaux qui les préparent et les vérifient, que l'infographie limite le nombre des échelles utiles et que les études de fonctionnement doivent compléter l'analyse des structures.

L'organisation des sols dans le paysage

La géographie des couvertures de sols n'a pas fait l'objet de remarques, l'intérêt se portant davantage vers certains types de sols (podzols) ou de mécanismes particuliers ou encore vers l'imagerie.

ASPECTS ACTUELS DE LA CONNAISSANCE DES SOLS A DIFFERENTES ECHELLES

LES COUVERTURES PEDOLOGIQUES POLYGENETIQUES DES REGIONS SOUDANO-GUINEENNES DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

Caractères et organisation spatiale des sols du nord-est Togo sur socle granito-gneissique

***P. FAURE & **B. VOLKOFF**

**ORSTOM Bondy & **ORSTOM - BP 1857 - Yaoundé - CAMEROUN*

RESUME

Les paysages actuels de l'Afrique soudano-guinéenne, dans les régions de l'interfluve majeur entre le bassin du Niger et les bassins des fleuves de l'Atlantique, sont profondément marqués par l'ancienne couverture latéritique cuirassée sur laquelle ils se sont développés. Au Togo-Bénin, cette couverture a été fortement modelée par un rajeunissement provoqué par l'enfoncement du réseau hydrographique. Dans le Nord-Togo, sous un climat tropical à saisons contrastées avec une pluviosité moyenne annuelle de 1 500 mm, et sous une végétation de savane arborée claire, l'équilibre n'est pas encore atteint, comme en témoignent des dénivelées topographiques de près de 300 m au sein d'une même région. De ce fait, les sols développés sur formations précambriennes présentent une grande variabilité de morphologies et d'intensités d'évolution pédogénétique. Au demeurant la constitution générale de la couverture est basée sur l'existence de trois ensembles d'horizons :

- *un ensemble meuble supérieur sans ou avec très peu d'éléments grossiers (niveau I) ;*
- *un ensemble médian constitué d'horizons graveleux riches en éléments grossiers, lithiques et/ou ferrugineux variés (niveau II) ;*
- *un ensemble inférieur d'horizons non perturbés, conservant ou non la structure du matériau parental (niveau III).*

A partir de là les caractéristiques principales des horizons appartenant à chacun de ces ensembles sont reliées aux différents paramètres de l'environnement :

- *roche-mère,*
- *forme de modelé,*
- *position dans l'unité de modelé,*
- *éloignement par rapport aux niveaux de base local et régional ...,*

qui en déterminent la nature. Mais on observe aussi que les extensions spatiales des individus de chacun de ces ensembles ne sont pas concordantes

dans le paysage. En effet, les facteurs qui régissent leur individualisation ne sont, ni systématiquement identiques, ni systématiquement dépendants. Ainsi le niveau II à gravillons latéritiques peut présenter une extension plus large que celle du manteau latéritique lorsqu'après une profonde entaille ce manteau est totalement éliminé par érosion sélective des matériaux fins. La prise en compte des facteurs de l'environnement permet malgré tout de dégager plusieurs ensembles de relations qui explicitent localement le déterminisme de la différenciation de la couverture pédologique dans le paysage. On peut ainsi exprimer à diverses échelles la variabilité des sols et leur répartition spatiale, ce qui permet leur inventaire et leur cartographie.

INTRODUCTION

En milieu tropical, peut-être plus qu'ailleurs, les sols se distribuent de façon ordonnée dans le paysage et s'organisent en séquences le long des versants.

Les relations entre formes du modelé et couvertures pédologiques définies chacune par un type de toposéquence, ont souvent été décrites en Afrique de l'Ouest et plus spécialement dans sa partie soudano-guinéenne (BOULET, 1978 ; CHAUVEL, 1976 ; GAVAUD, 1977 ; BRABANT et GAVAUD, 1985). Si plusieurs toposéquences sont mises en évidence, leur association est toujours explicitée à partir du moment où l'on montre comment l'une dérive de l'autre ; ceci est aisé lorsque la couverture pédologique est constituée d'un nombre limité de volumes élémentaires homogènes, cas très fréquent en Afrique soudano-guinéenne.

Dans le grand interfluve fleuve Niger-fleuves de l'Atlantique, à proximité des zones guinéennes, les sols s'ordonnent aussi en toposéquences, mais le nombre de volumes pédologiques élémentaires rencontré est beaucoup plus grand. D'où la diversité des types de séquences et d'associations de séquences qui ont pu être répertoriés dans cette partie de l'Afrique (ESCHENBRENNER et BADARELLO, 1978 ; FAURE, 1977 ; KALOGA, 1968 ; LEVEQUE, 1979b ; VOLKOFF, 1976).

Les raisons de cet état de fait sont connues : grande diversité des roches mères du socle granito-gneissique et caractère polygénétique des couvertures pédologiques lié à une histoire morpho-pédologique longue et complexe.

Les paysages actuels sont en effet profondément marqués par une ancienne couverture latéritique cuirassée (BOULET, 1978 ; ESCHENBRENNER, 1988 ; FAURE, 1975 ; GAVAUD, 1977 ; GRANDIN, 1976 ; KALOGA, 1987 ; LEPRUN, 1979 ; LEVEQUE, 1979a). Si les sols n'en proviennent pas tous directement, la plupart en ont conservé des reliques sous forme de gravillons latéritiques, sinon sous forme de matériau originel (LEVEQUE, 1979a ; FAURE, 1978).

Les transformations de l'héritage latéritique cuirassé ont ou bien des causes climatiques (BOULET, 1970 ; CHAUVEL, 1976), ou bien sont liées à des modifications du pédo – environnement consécutives à des changements de niveau de base (FAURE, 1978 ; LEVEQUE, 1969) qui ont provoqué d'intenses rajeunissements par érosion superficielle (MICHEL, 1973), par érosion interne (FAURE, 1979) et par dégradation géochimique (FRITSCH, 1984).

Ces facteurs de transformation ont agi simultanément, mais chacun avec une intensité et sur des périodes de temps différentes, d'où l'existence d'une couverture pédologique d'une grande diversité. Dans ces conditions, s'il est relativement facile de décrire les sols et de les cartographier à l'échelle des unités de différenciation élémentaires, c'est – à – dire des versants (où d'ailleurs on rencontre de grandes difficultés de représentation), cela devient plus difficile dès que l'on passe à l'échelle des paysages pédologiques.

Une étude détaillée a été réalisée dans le nord – est du Togo (FAURE, 1985). Elle a permis d'analyser les causes de cette variabilité, d'expliquer la répartition complexe des sols et de procéder à leur cartographie. Elle a par ailleurs conduit à proposer une approche d'inventaire et de cartographie des couvertures pédologiques adaptée à un type d'environnement morpho – pédologique particulièrement fréquent en Afrique soudano – guinéenne et guinéenne.

I – CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA REGION

1.1. La localisation

La région de la Kara s'étend, entre 9° 20' et 10° 10' de latitude nord, entre le frontière du Bénin à l'est et la barrière montagneuse quartzitique de l'Atacora, qui la domine à l'ouest

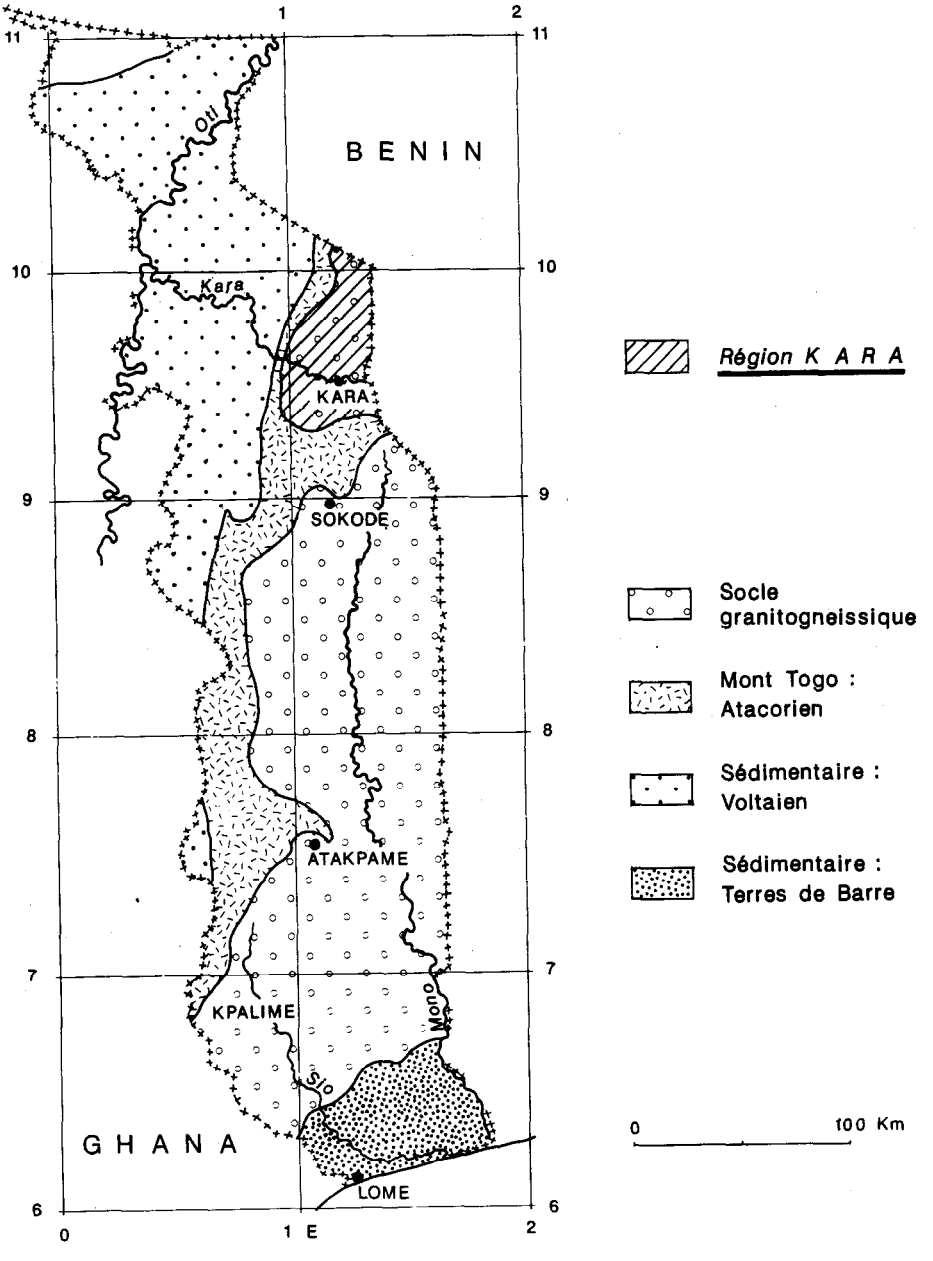


Figure 1 : *Principales unités géologiques du Togo et situation de la région de la Kara*

(fig. 1). Elle est située sur un des grands panneaux du socle précambrien qui constitue la plus grande partie du substrat géologique du Togo. Ce socle granito-gneissique est très diversifié dans le détail, avec de nombreux faciès allant du pôle acide granitique leucocrate au pôle basique, amphibolo-pyroxénique, particulièrement bien représenté sur le secteur de la Kara, sous forme de petits massifs montagneux.

1.2. Le climat

Il est typiquement soudano-guinéen à saisons contrastées avec une saison sèche de 4 à 5 mois (fig. 2) et une pluviosité moyenne annuelle proche de 1 500 mm. Si la moyenne annuelle des températures est voisine de 26 °C, les extrêmes passent de plus 36 °C à moins de 15 °C en saison sèche, tandis que la moyenne en saison des pluies est un peu supérieure à 20 °C. L'hygrométrie varie aussi dans de fortes proportions au cours de l'année, de 30 à près de 100 % ; il en est de même pour l'évapotranspiration qui varie entre 30 et plus de 300 mm par mois.

1.3. La végétation

Les formations climaciques, que l'on trouve dans les secteurs de réserve ou protégés, sont une savane arborée claire en position de bon drainage ; et, dans les zones à drainage médiocre, une savane arbustive basse ou une savane purement herbeuse. Mais la densité de cette végétation est souvent très réduite car, dans cette région à forte activité humaine, les taux d'occupation des sols par les façons culturales sont en moyenne de 70 % et atteignent même 90 % dans les secteurs les plus peuplés.

1.4. Le modelé et l'hydrographie

La région de la Kara se présente comme un ensemble de plateaux, dont l'altitude diminue progressivement du nord-ouest au sud-est de 500 à 300 m, et qui sont dominés par les quatre massifs montagneux basiques du Kabyé, et séparés d'eux par de profondes dépressions périphériques (fig. 3). L'extension de ces plateaux est de plus en plus limitée au fur et à mesure que l'on se rapproche des niveaux de base que constituent les grands axes de drainage (Kara, Kpelou, Kmelou, Masabo, Kueli ...).

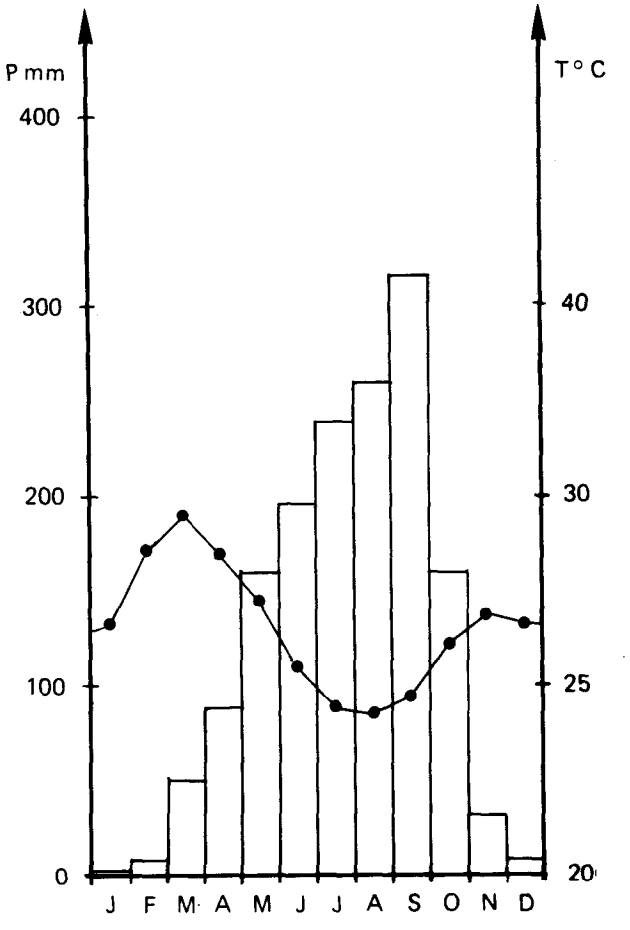


Figure 2 : *Diagramme pluviométrique et thermique de la région de la Kara*

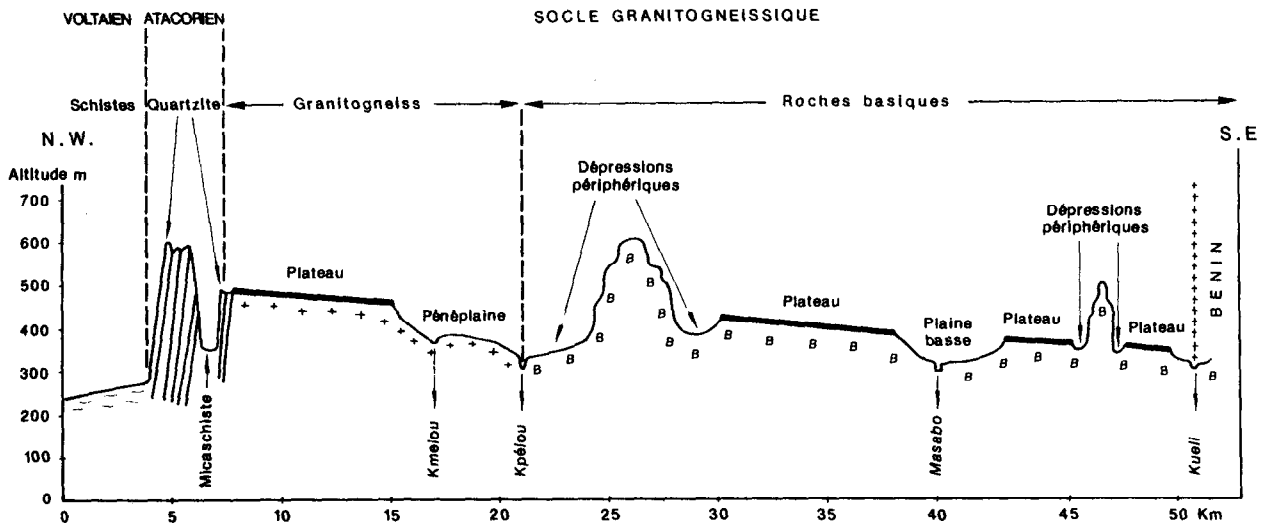


Figure 3 : *Coupe topographique schématique nord-ouest/sud-est de la région de la Kara*

Ceux-ci, entre 300 et 220 m d'altitude, les entaillent en effet fortement, faisant place à un ensemble de pénéplaines et plaines à interfluves plus ou moins courts et à pentes plus ou moins fortes. Le réseau hydrographique présente ainsi une hiérarchisation, une pente et une compétence qui varient en fonction de l'éloignement du niveau de base régional que constitue la rivière Kara.

II - METHODES D'ETUDE

2.1. Méthode d'approche et d'analyse cartographique du terrain

La couverture pédologique est considérée comme une superposition de volumes pédologiques élémentaires homogènes. Leur inventaire systématique a été réalisé par prospection le long d'itinéraires et de transects sélectionnés : levés de profils en long, ouverture de fosses pédologiques, description et échantillonnage pour analyses de laboratoire.

2.2. Analyses de laboratoire

Les fractions fines (<2 mm) et grossières (>2 mm) des échantillons ont été séparées par tamisage et analysées séparément, notamment en ce qui concerne la composition chimique totale des terres fines et éléments ferrugineux figurés (analyse triacide) et la minéralogie. Les descriptions micromorphologiques ont été faites sur des lames minces d'échantillons non pertubés.

2.3. Etablissement de la carte pédologique

L'extension de chaque zone cartographique, reconnue sur le terrain et caractérisée par une superposition déterminée de volumes pédologiques, a été délimitée sur photographies aériennes à 1/25 000. Une carte de l'ensemble de la région a été dressée en deux coupures, à l'échelle du 1/50 000, précisant la répartition des 128 unités cartographiques reconnues en 4 420 zones cartographiques (FAURE, 1985).

2.4. Analyse infographique de la carte pédologique

La carte pédologique de la Kara a été numérisée et traitée avec le logiciel infographique FORBAN (FAURE et BENIZRI, 1988), qui permet de créer et de restituer des cartes à thèmes sélectionnés et croisés. Ces cartes ont été confrontées à d'autres données cartographiques, géologiques et topographiques, ce qui a permis de corréler chacun de ces thèmes aux différents facteurs de l'environnement. Ce type d'analyse infographique a porté sur les 225 000 ha de la région Kara, mais les résultats présentés ne concerneront qu'une "fenêtre" de cette carte.

III - RESULTATS

L'inventaire systématique montre que la couverture pédologique de la région étudiée est constituée d'un nombre considérable de volumes élémentaires. Au demeurant, si on sélectionne les principaux caractères (minéralogie, couleur, texture, éléments grossiers), on regroupe tous ces volumes en trois grands ensembles d'horizons ou niveaux (LAPORTE, 1962 ; LEVEQUE, 1979a).

3.1. Typologie des niveaux ou ensembles d'horizons

Les sols présentent des profils où l'on distingue trois grands ensembles morphologiques (fig. 4) :

- un ensemble inférieur, *niveau III*, d'horizons non perturbés, qui englobe les horizons C et une partie plus ou moins importante des horizons B ;
- un ensemble graveleux, *niveau II*, d'horizons riches en éléments grossiers, lithiques et ferrugineux, qui inclut une partie des horizons B, ou la partie supérieure des horizons B et les horizons A ;
- un ensemble meuble supérieur, *niveau I*, qui regroupe les horizons B et A, pauvres ou dépourvus d'éléments grossiers.

La nature de chacun de ces ensembles est variable, mais ils présentent un nombre de caractères typologiques limité (tableau 1).

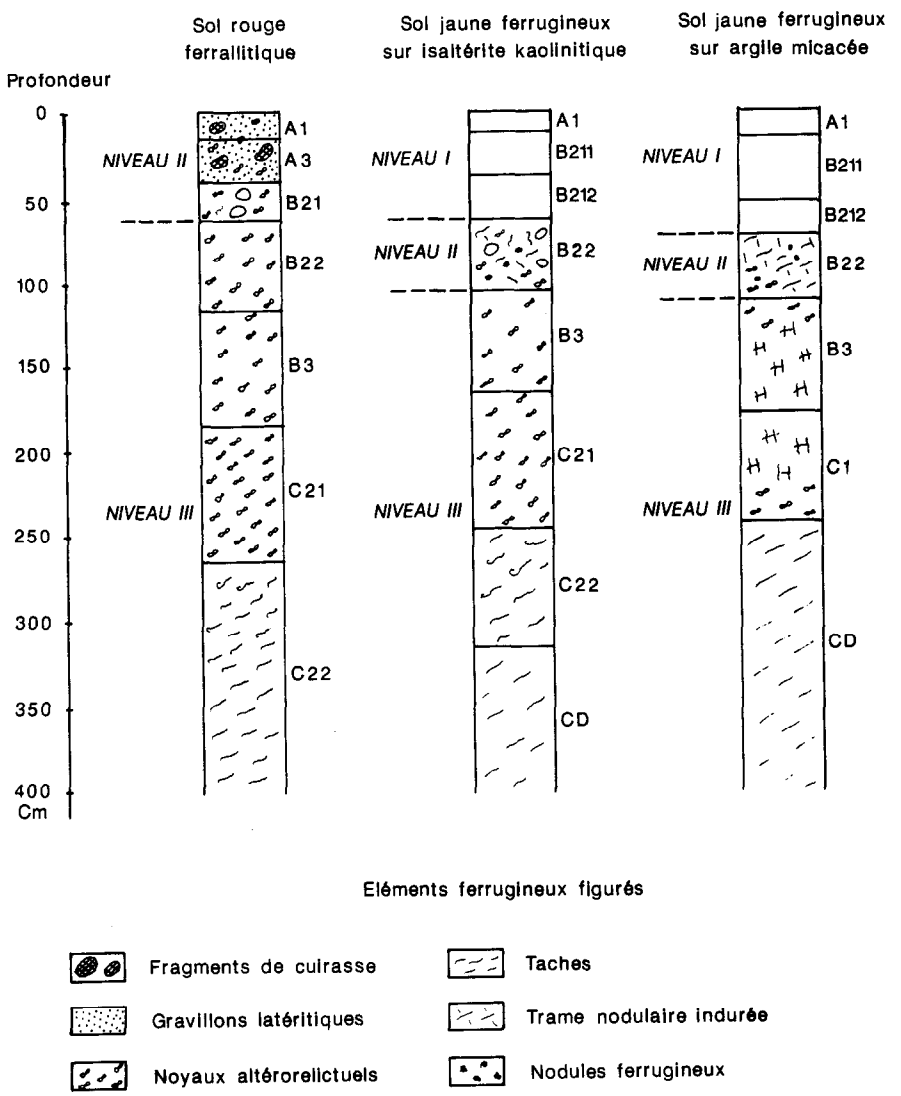


Figure 4 : *Profils schématiques de trois sols typiques de la région de la Kara avec leurs grands ensembles d'horizons (niveaux I, II et III)*

Dans la région de la Kara, les ensembles d'horizons inférieurs du *niveau III* sont de cinq types :
- latéritiques : à minéraux argileux kaolinitiques avec ou sans gibbsite ;
- vertiques : à minéraux smectitiques dominants et à caractères vertiques morphologiquement exprimés (faces de glissement) ;
- argileux gonflants : à proportions d'argiles smectitiques variables et sans caractères morphologiques vertiques ;
- argileux illitiques : à minéraux argileux micacés dominants ;
- arénacés : peu argilisés, à texture légère et riches en minéraux primaires altérables.

Les ensembles d'horizons graveleux du *niveau II* contiennent les trois types d'éléments grossiers (FAURE, 1986 et 1987), exclusivement ou en proportions variables :
- gravillons et/ou altéroreliques latéritiques,
- nodules ferrugineux,
- graviers et cailloux quartzeux et/ou lithiques.

Les ensembles d'horizons meubles supérieurs du *niveau I* se différencient principalement par leur couleur (rouge, jaune, beige, brun et gris) et leur texture (toutes les valeurs entre argileuse et sableuse). Six types sont les plus fréquents :
- rouge argileux,
- rouge argilo – sableux,
- jaune argilo – sableux, tacheté,
- gris – brun, argilo – sableux,
- gris – beige, sablo – argileux,
- beige sableux.

Le tableau 1 détaille les caractéristiques typologiques de chaque représentant des trois niveaux en fonction de la nature des roches mères.

On montre ainsi qu'on peut caractériser synthétiquement les sols de la région par la juxtaposition de trois (ou deux) de chacun de ces niveaux.

Tableau 1

	Roches basiques	Socle mésocrate	Socle leucocrate
NIVEAU III Non perturbé inférieur	Latéritique Vertique Argileux gonflant	Latéritique Argileux gonflant	Latéritique Arenacé Argileux Illitique
NIVEAU II Graveleux médian	Gravillonnaire Nodulaire Pas de niveau II	Gravillonnaire Nodulaire Graveleux Lithique	Gravillonnaire Nodulaire Graveleux Quartzeux
NIVEAU I Meuble supérieur	Rouge argileux Jaune/tacheté Gris – brun	Rouge Argilo – sableux Jaune/tacheté Gris – beige	Rouge Argilo – sableux Beige – sableux

3.2. Organisation spatiale des niveaux et de leurs juxtapositions

Un exemple de la répartition spatiale de trois classes de l'ensemble inférieur, *niveaux III* latéritiques, argileux gonflants et autres, montre (fig. 5) que cette répartition n'est pas aléatoire. Si on l'analyse conjointement avec la topographie, on constate (fig. 6) que les ensembles inférieurs non latéritiques occupent les dépressions périphériques et les entailles les plus profondes du plateau, et que les *niveaux III* argileux gonflants et vertiques présentent une extension de plus en plus vaste au fur et à mesure que l'on se rapproche du niveau de base régional. La variabilité typologique de ces *niveaux III* intervient donc à l'échelle du paysage régional.

Une extraction thématique de trois classes de *niveau II*, gravillons latéritiques en surface, gravillons latéritiques en profondeur, et sans gravillons latériques (fig. 7), montre que la répartition spatiale de ces trois classes peut être mise en rapport avec différents types de paysages pédologiques élémentaires (fig. 8).

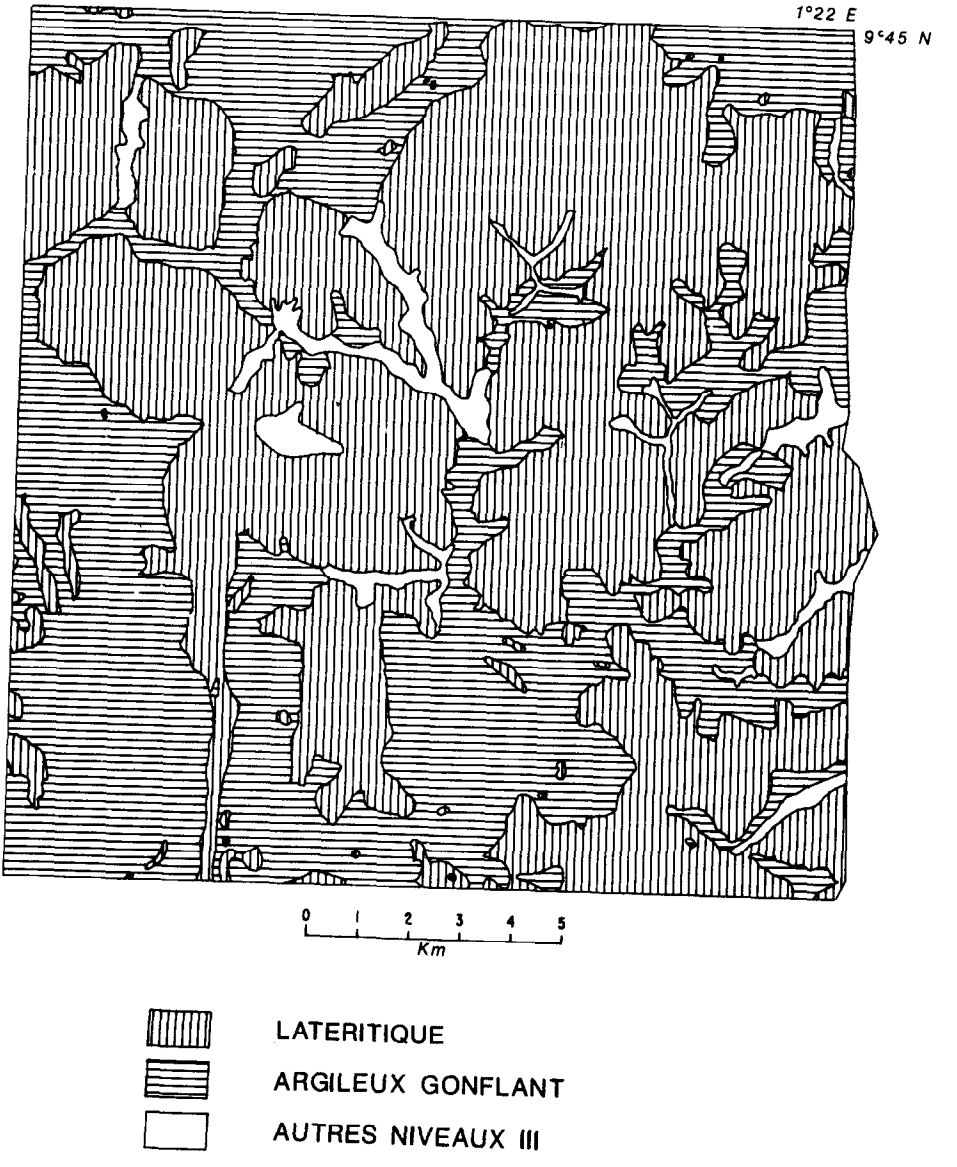


Figure 5 : *Exemple de répartition spatiale de trois classes d'ensembles altéritiques (niveau III) dans la région de la Kara*

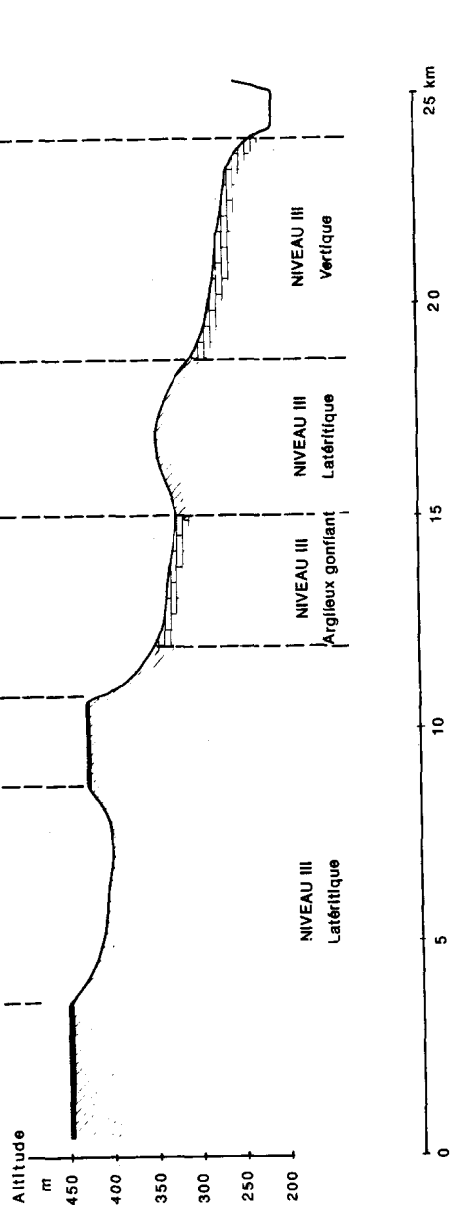


Figure 6 : *Coupe schématique montrant la variabilité régionale de l'ensemble altéritique (niveau III) sur roches basiques, dans la région de la Kara*

En confrontant les deux extractions thématiques précédentes, on constate qu'il n'y a pas forcément concordance entre les zones à niveaux gravillonnaires latéritiques (fig. 7) et celles à niveaux inférieurs latéritiques (fig. 5). On remarque également que les ensembles gravillonnaires latéritiques ne sont pas toujours présents au-dessus des ensembles inférieurs latéritiques. Ils peuvent, par contre, surmonter des *niveaux III* à argile gonflante (fig. 8).

L'extraction thématique de 4 classes de *niveau I*, meuble, supérieur, rouges, jaunes, autres couleurs ou absents (situations où le *niveau II* graveleux est affleurant), montre (fig. 9) que la répartition spatiale de ces classes dépend de la forme des versants et de leur position sur les différents segments qu'ils comportent (fig. 10).

En confrontant cette dernière extraction aux deux précédentes, on vérifie qu'il n'y a pas de concordance entre les différents types de *niveau I* et les différents types de niveaux sous-jacents.

L'importante diversité de la variabilité des trois niveaux peut ainsi s'exprimer, au sein d'un même interfluve, lorsque les versants sont dissymétriques.

Sur l'exemple présenté (fig. 11), l'axe de drainage ouest est plus enfoncé que l'axe de drainage est. Le plateau latéritique initial est donc plus profondément entaillé à l'ouest qu'à l'est. Ceci se traduit par l'existence de secteurs distincts caractérisés chacun par un type de modelé, un type de versant et un type de superposition des niveaux pédologiques.

Le *niveau III* latéritique est présent sous le plateau et sous le versant concave nord-ouest, peu entaillé par l'axe de drainage est. Ailleurs sur l'interfluve, il a été érodé et le *niveau III* est alors de type argileux gonflant.

Le *niveau II* contient de fortes proportions de gravillons latéritiques, et il est affleurant sur le plateau. Dans la partie amont de l'interfluve, que les versants soient convexes (transect A) ou rectilignes (transect B), le *niveau II* est également gravillonnaire, mais il est alors situé à moyenne

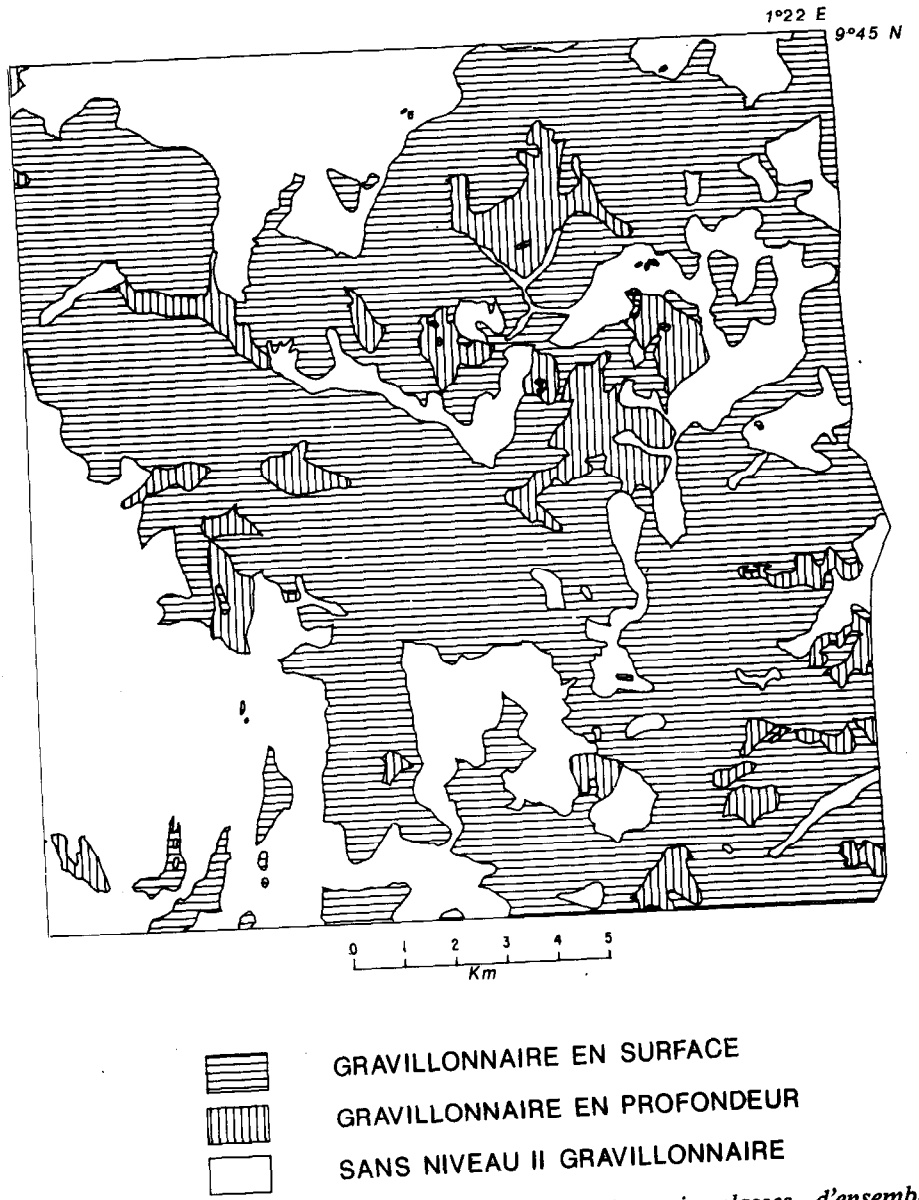


Figure 7 : *Exemple de répartition spatiale de trois classes d'ensembles gravillonnaires (niveau II) dans la région de la Kara*

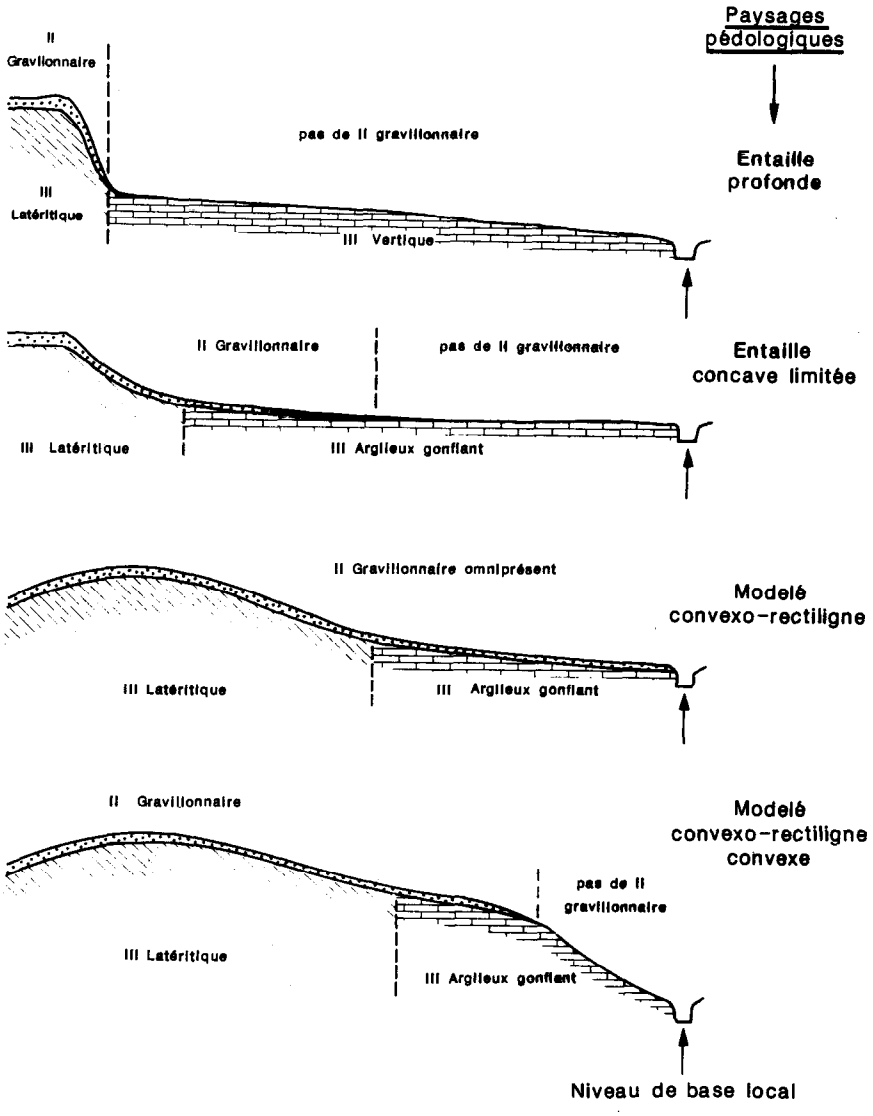


Figure 8 : *Coupes schématiques montrant la variabilité de l'ensemble médian gravillonnaire (niveau II) dans différents types de paysages pédologiques de la région de la Kara*

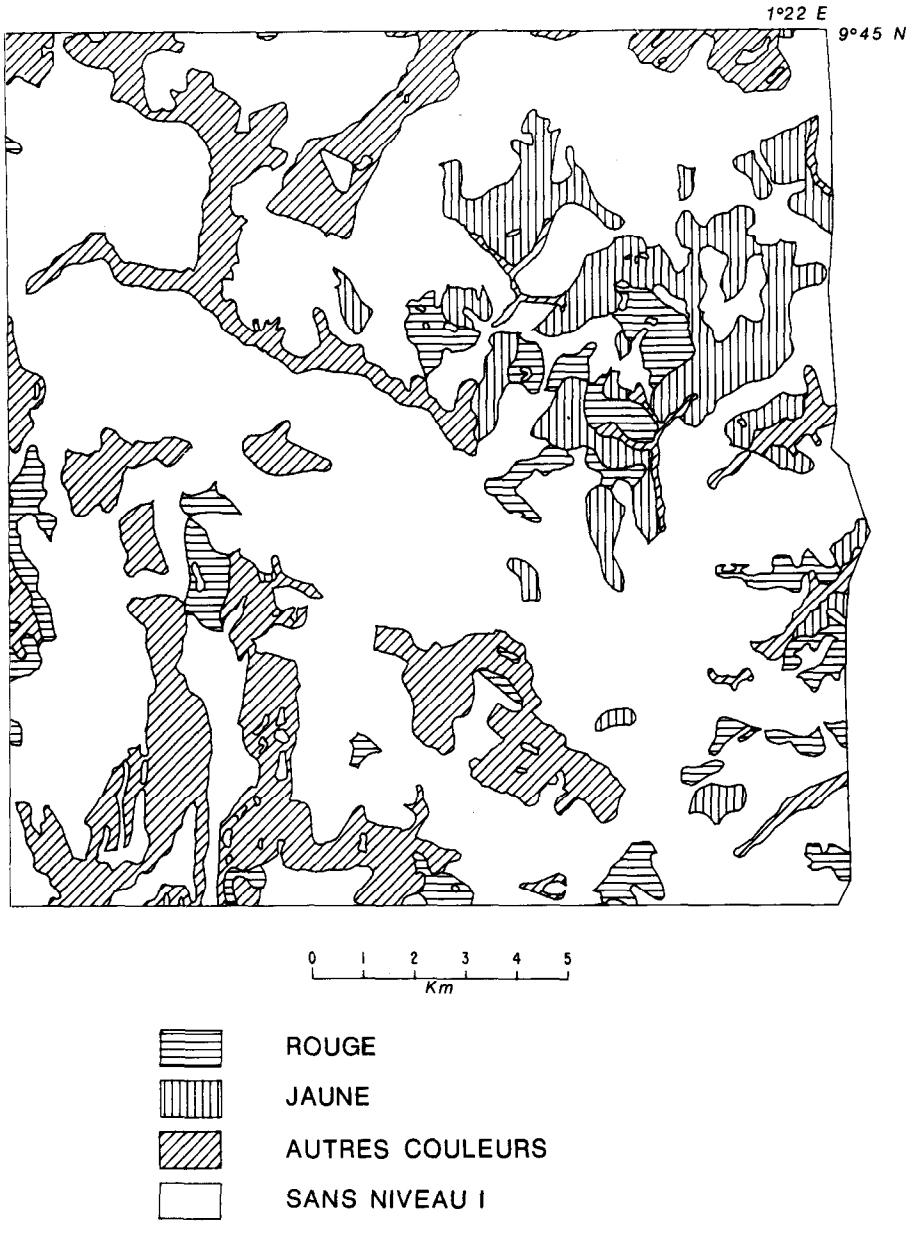


Figure 9 : *Exemple de répartition spatiale de quatre classes d'ensembles meubles supérieurs (niveau I) dans la région de la Kara*

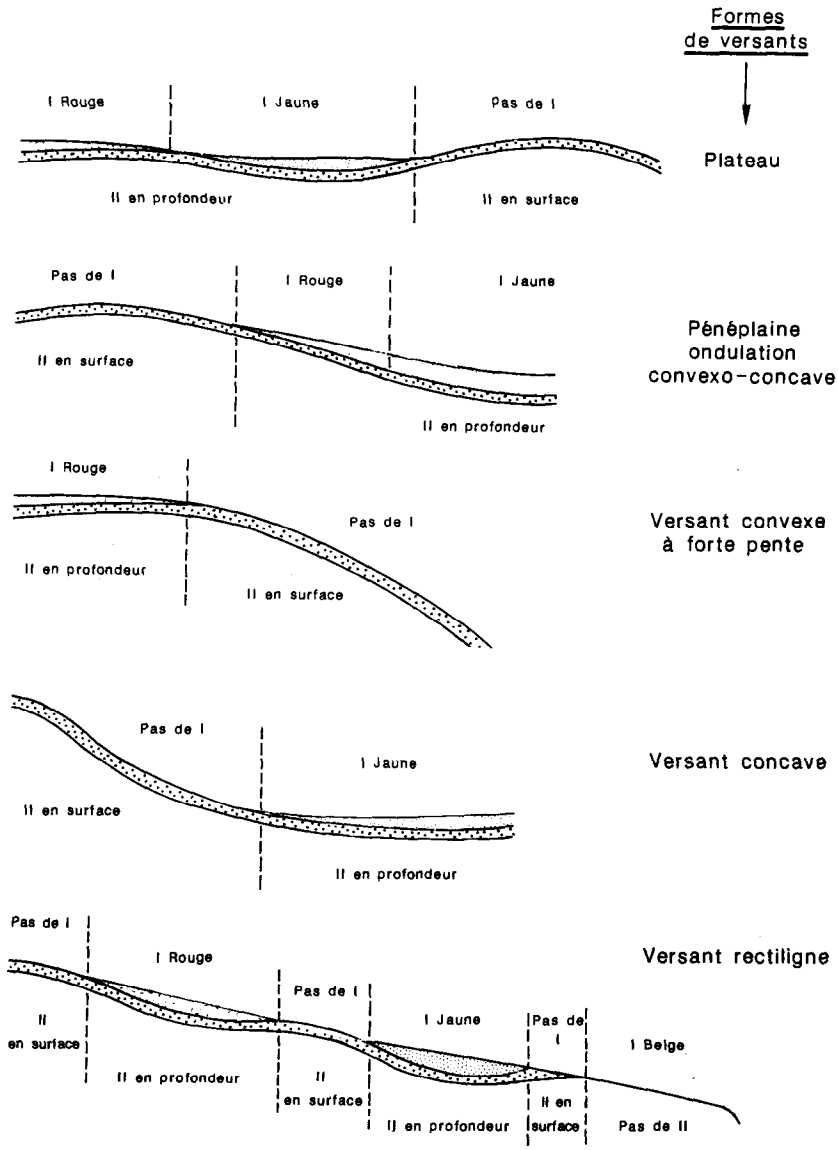


Figure 10 : *Variabilité des ensembles meubles supérieurs (niveau I) et des ensembles gravillonnaires (niveau II) à l'échelle du versant dans la région de la Kara*

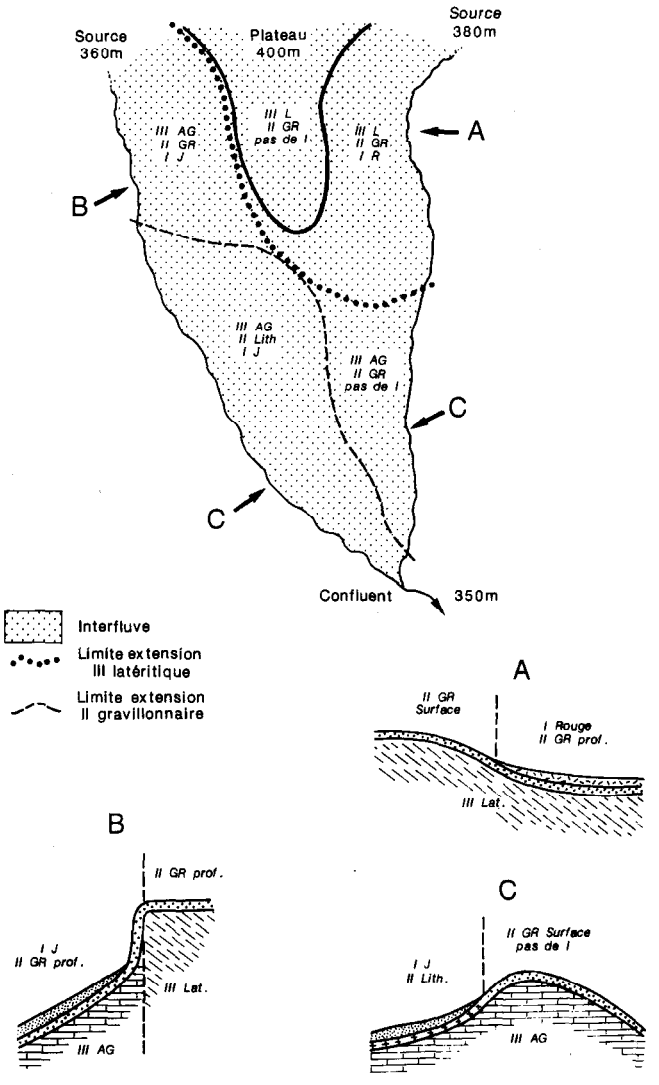


Figure 11 : *Exemple de variabilité spatiale des ensembles d'horizons (niveaux I, II et III) au sein d'un interfluve dans la région de la Kara (A : coupe suivant le transect A ; B : coupe suivant le transect B ; C : coupe suivant le transect C)*
(IIIL : niveau III latéritique ; IIIAG : niveau III argileux gonflant ; IIGR : niveau II gravillonnaire ; IILith : niveau II lithique ; IR : niveau I rouge ; IJ : niveau I jaune)

profondeur. Dans la partie aval de l'interfluve, les versants du transect C sont dissymétriques. A l'est le segment convexe a subi une érosion limitée aux matériaux fins et le *niveau II*, affleurant, contient encore des gravillons latéritiques. A l'ouest, le versant concave présente un *niveau II* graveleux exclusivement lithique.

Le *niveau I* meuble supérieur est absent sur le plateau et sur le versant convexe est de la partie aval de l'interfluve. Ailleurs, il est présent, avec des caractéristiques de couleur variables : rouge sur le versant est concave à faible pente de la partie amont (transect A), jaune sur les deux versants ouest, rectiligne à forte pente à l'amont (transect B), et concave à pente plus limitée à l'aval (transect C ouest).

La couverture pédologique, qui est la superposition de ces niveaux, présente donc, sur cet interfluve, un éventail de caractéristiques spécifiques, qui ne sont invariantes qu'à l'intérieur de chacun des secteurs.

IV - DISCUSSION

Facteurs de variabilité des trois niveaux

Alors que la variabilité des *niveaux III*, non perturbés inférieurs, se situe à une échelle pluri-kilométrique, celle des *niveaux II*, graveleux médians, se situe à une échelle kilométrique, tandis que la variabilité des *niveaux I*, meubles supérieurs, se manifeste à l'échelle hectométrique du versant.

La nature de la roche-mère intervient certes sur la variabilité typologique des représentants de chacun des trois niveaux, mais les facteurs liés à la topographie et au modelé sont nettement plus déterminants en ce qui concerne la variabilité spatiale (tableau 2).

Si l'on considère les caractéristiques propres à chacun des niveaux, on constate que leurs extensions respectives ne sont pas concordantes dans le paysage. S'il n'y a pas concordance, c'est que les facteurs qui régissent la différenciation de chacun d'entre eux ne sont pas systématiquement les mêmes.

Tableau 2

NIVEAUX	FACTEURS DE VARIABILITE
NIVEAU III Non perturbé inférieur Variabilité régionale	– Substrat – Position par rapport au niveau de base régional – Type de modelé : région pédologique
NIVEAU II Graveleux médian Variabilité à l'échelle de l'interfluve	– Substrat – Position par rapport au niveau de base local – Forme de modelé : paysage pédologique
NIVEAU I Meuble supérieur Variabilité à l'échelle du versant	– Substrat – Forme de versant – Position sur le versant : segment pédologique

Si on analyse séparément chacun de ces niveaux, on peut dégager des règles simples de distribution de leurs individus :

- *la diversification de l'ensemble inférieur* est due à des éléments liés à l'environnement régional : variations du faciès de la roche-mère et persistance ou non du manteau latéritique ancien. Ce dernier se maintient principalement en fonction de son éloignement du *niveau de base régional* ;
- *la nature de l'ensemble graveleux* est déterminée par la lithologie (importance et nature des éléments grossiers lithiques), et dépend des proportions d'héritages latéritiques gravillonnaires. Celles-ci varient en fonction du type des entailles et de l'intensité du décapage (mécanique et géochimique), donc de la morphogénèse à l'échelle du bassin-versant qui est commandée par le *niveau de base local* ;
- *la nature de l'ensemble meuble superficiel*, en particulier son épaisseur, est déterminée par la morphogenèse à l'échelle du versant ; elle dépend des segments qui constituent ce versant, notamment de leur forme et de leur pente.

CONCLUSION

Les paysages de l'Afrique guinéenne dérivent pour la plupart d'une ancienne couverture latéritique cuirassée. Les modifications des niveaux de base régionaux et locaux ont fortement rajeuni le modelé et contribué à une compartimentation de l'espace géomorphologique en ensembles paysagiques constitués d'unités de modelé plus ou moins emboîtées.

Du fait des âges différents des entailles, et de l'action des facteurs locaux, qui accélèrent ou ralentissent la morphogenèse des entailles les plus récentes, le rajeunissement n'a pas joué partout avec la même intensité. Il est donc difficile de trouver des ensembles homologues, puisque très peu ont subi des évolutions identiques.

Pour les mêmes raisons la couverture pédologique est aussi très diversifiée et la plupart de ses caractéristiques essentielles ne peuvent généralement s'expliciter qu'au cas par cas en fonction des spécificités locales du modelé.

Un nombre restreint d'éléments constitutifs de la couverture pédologique, tels que le niveau altéritique inférieur, le niveau graveleux médian, le niveau meuble supérieur, sont cependant ordonnés dans le paysage, mais chacun a une organisation indépendante : *le premier s'organise à une échelle régionale, le second à l'échelle des interfluves, le troisième à l'échelle des versants.*

Le paysage sur le socle granito-gneissique du nord-est Togo est donc une succession d'unités de modelé très variées, dont l'assemblage aboutit à une grande diversité des formes. La couverture pédologique, directement déterminée par le modelé, présente donc une grande complexité et ne peut se définir par de simples schémas de distribution.

Pour chaque type de paysage il existe néanmoins, dans une situation donnée, des relations entre le modelé et certains éléments caractéristiques de la couverture pédologique, dont la distribution a ses propres règles à une échelle déterminée.

Ce travail montre, en définitive, que pour comprendre et expliquer la variabilité de la typologie et de la différenciation spatiale d'une couverture pédologique polygénétique à organisation complexe, il faut prendre en considération, non seulement les mécanismes de la pédogenèse au sens strict, mais aussi, et surtout, les mécanismes liés à la morphogenèse. La

description des couvertures de ce type nécessite également l'utilisation de critères morphologiques synthétiques directement liés à leur état antérieur et à leurs modes d'évolution.

Ces principes étant acquis, on peut exprimer la variabilité des sols, aux échelles où elle se manifeste, et expliciter leur répartition spatiale, ce qui permet l'inventaire des sols et leur cartographie.

BIBLIOGRAPHIE

BOULET (R.), 1970 – La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale. *Cah. ORSTOM*, Sér. Pédol., 13(3) : 245-271.

BOULET (R.), 1978 – Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibre et déséquilibre pédobioclimatique. Mém. ORSTOM (Paris) n° 85, 272 p.

BRABANT (P.) & GAVAUD (M.), 1985 – Les sols et les ressources en terre du nord Cameroun. ORSTOM, 285 p., cartes h.t.

CHAUVEL (A.), 1976 – Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Trav. et Doc. ORSTOM (Paris) n° 62, 532 p.

ESCHENBRENNER (V.) & BADARELLO (L.), 1978 – Etude pédologique de la région d'Odienné (Côte d'Ivoire). Carte des paysages morphopédologiques. Feuille Odienné à 1/200 000. Notice explicative ORSTOM (Paris) n° 74, 123 p., 8 cartes.

ESCHENBRENNER (V.), 1988 – Les glébules des sols de Côte d'Ivoire. Nature et origine en milieu ferrallitique. Modalités de leur concentration. Rôle des termites. Trav. et Doc. (Micr.) ORSTOM (Paris), 498 p.

FAURE (P.), 1975 – Les associations de sols rouges et jaunes au nord-ouest Dahomey. Caractères des sols et des séquences. *Cah. ORSTOM*, Sér. Pédol., 13(2) : 119-157.

FAURE (P.), 1977 – Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin. Feuilles Djougou, Natitingou, Porga – Karimama à 1/200 000. Notices explicatives ORSTOM (Paris) n° 66 (4, 6, 8), 49 p., 68 p., 3 cartes.

FAURE (P.), 1978 – Les formations pédologiques anciennes dans la région de la Kara, nord – est Togo. Communication à la II Biennale de la WASA, Lomé, Togo, 10 p., multigr.

FAURE (P.), 1979 – Les phénomènes de transport de matière dans la différenciation des sols rouges et jaunes au nord Togo – Bénin. ORSTOM, Lomé, 8 p., multigr. Compte – rendu ATP – CNRS, Strasbourg.

FAURE (P.), 1985 – Les sols de la Kara, nord – est Togo. Relations avec l'environnement. Trav. et Doc. ORSTOM (Paris) n° 183, 281 p., cartes à 1/50 000 et 1/200 000.

FAURE (P.), 1986 – Caractères et origines des éléments ferrugineux figurés dans les sols rouges ferrallitiques et les sols jaunes ferrugineux tropicaux associés en séquences au nord Togo. Communication à la 11ème Réunion des Sciences de la Terre, Clermont – Ferrand, Symposium Latérites, 14 p. multigr.

FAURE (P.), 1987 – Les héritages ferrallitiques dans les sols jaunes du nord Togo. Aspects micormorphologiques des éléments figurés. Actes du VIIe Congrès International de Micromorphologie des Sols, 1985, Paris, AFES : 111 – 118.

FAURE (P.) & BENIZRI (C.), 1988 – FORBAN : un logiciel de cartographie thématique développé et portable sur micro – ordinateur compatible PC. Communication à SEMINFOR I, Paris, 1987. Colloques et Séminaires, ORSTOM (Paris) : 299 – 320.

FRITSCH (E.), 1984 – Les transformations d'une couverture ferrallitique en Guyane Française. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris VII, ORSTOM (Paris), 190 p.

GAVAUD (M.), 1977 – Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional. Trav. et Doc ORSTOM (Paris) n° 76, 102 p.

GRANDIN (G.), 1976 – Aplanissements cuirassés et enrichissements des gisements de manganèse dans quelques régions de l'Afrique de l'Ouest. Mém. ORSTOM (Paris) n° 82, 275 p.

KALOGA (B.), 1968 – Etude pédologique de la Haute-Volta. Région centre-sud. ORSTOM, Dakar, 251 p., multigr., carte 1/500 000.

KALOGA (B.), 1987 – Le manteau kaolinitique des plaines du centre-sud de la Haute-Volta. Etudes et Thèses, ORSTOM (Paris), 344 p.

LAPORTE (G.), 1962 – Reconnaissance pédologique le long de la voie ferrée du COMILOG. IRSC, MC 119, Brazzaville, 149 p., multigr.

LEPRUN (J.C.), 1979 – Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse, transformations, dégradation. Mém. Sci. Géol. n° 58, Strasbourg, 224 p.

LEVEQUE (A.), 1969 – Les principaux évènements géomorphologiques et les sols sur le socle granito-gneissique au Togo. *Cah. ORSTOM*, sér. pédol., 7(2) : 203-224.

LEVEQUE (A.), 1979a – Pédogenèse sur le socle granito-gneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. Trav. Doc. ORSTOM (Paris) n° 108, 224 p.

LEVEQUE (A.), 1979b – Carte pédologique du Togo à 1/200 000. Socle granito-gneissique limité à l'ouest et au nord par les Monts Togo. Notice explicative ORSTOM (Paris) n° 82, 77 p., 3 cartes.

MICHEL (P.), 1973 – Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mém. ORSTOM (Paris) n° 63, 752 p.

VOLKOFF (B.), 1976 – Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin. Feuilles Porte-Novo, Abomey à 1/200 000. Notices explicatives n° 66 (1, 2), ORSTOM (Paris), 39 p., 40 p., 2 cartes.

APPROCHE SYSTEMIQUE APPLIQUEE A LA CARTOGRAPHIE MORPHOPEDOLOGIQUE DU PAYSAGE

M. RAUNET
IRAT/CIRAD – BP 5035 – 34032 Montpellier Cédex

RESUME

Cet article fait le point sur l'application de l'approche systémique à la perception, la compréhension et la représentation cartographique des paysages morpho – pédologiques.

Ont été examinées la pertinence et la signification des concepts de la "théorie générale des systèmes", transcrits dans le cadre concret du paysage ; comment celui – ci pouvait être envisagé comme un système spatial dynamique, ouvert sur un environnement changeant qui l'"informe", le structure, le modifie ou le maintient ? Ainsi, les "unités de milieu" sont les éléments de base du système – paysage, définies par des caractéristiques sélectionnées parmi certaines composantes, elles – mêmes retenues en fonction du contexte régional, et qui dépassent le cadre strictement pédologique. La notion dynamique d'évolution a été spécialement envisagée à partir d'exemples concrets.

INTRODUCTION

Les plantes poussent sur un support. Il est donc entièrement légitime de s'intéresser à l'objet "sol", ses contraintes et ses qualités.

Seulement, un terroir ou une région à mettre en valeur ne sont pas réductibles strictement à cet aspect. Ce sont des territoires organisés naturellement, d'où ressortent un ensemble de caractéristiques qui conditionnent leur bonne utilisation. Il y a des formes de reliefs et des matériaux variés, avec une hydrodynamique et une morphodynamique spécifiques dont il faut tenir compte, au même titre que du sol en lui – même, pour l'aménagement, la conservation de l'espace régional, et

l'introduction de systèmes de culture adaptés, compte tenu naturellement du contexte socio-culturel et économique.

Le travail du pédologue-cartographe est donc de caractériser et de différencier spatialement l'ensemble des "phénomènes" dont il faut tenir compte pour la mise en valeur d'un territoire. Or tous ces phénomènes ne sont pas indépendants les uns des autres. Il ne faut donc pas les envisager séparément, mais dans leurs *relations*. C'est l'objectif de l'approche morpho-pédologique initiée par KILIAN (1974) et TRICART (1974).

Nous voudrions préciser ici quelles doivent être les bases conceptuelles d'une telle cartographie "intégrée" du milieu physique, sachant que "intégré" est l'inverse de "juxtaposé".

Pour qu'un modèle cartographique soit le plus adéquat (ou pertinent) possible dans un contexte donné (régional, d'échelle et d'objectif), cela nécessite des choix actifs raisonnés parmi le désordre apparent de la nature, afin d'en faire ressortir "l'ordre" sous-jacent. A cet effet, une simple description du milieu ne suffit pas ; celle-ci doit s'accompagner d'une sélection des faits "pertinents", c'est-à-dire qui ont une signification bien précise dans le contexte spécifique du paysage étudié, et qu'il s'agit d'ordonner et de relier.

Pour la cartographie en effet, il est beaucoup plus économique en temps, énergie et précision du travail, de comprendre les règles d'organisation des phénomènes que d'essayer de les répertorier indépendamment ; d'autre part, c'est beaucoup plus satisfaisant pour l'esprit. On fait l'hypothèse de départ que le hasard n'existe pas dans la mise en place du paysage.

Pour une région et une échelle données, que va-t-on alors représenter, comment tracer les limites, comment structurer la légende ? Telles sont quelques questions simples (mais dont les réponses ne sont pas immédiates) que doit se poser le pédologue quand il aborde une région.

La cartographie du milieu physique n'est pas en réalité une activité "triviale" dont il suffirait de connaître *la* méthode pour l'appliquer mécaniquement. La caricature en est le quadrillage systématique et l'interpolation thématique, tout aussi systématique, avec autant d'interpolations qu'il y aurait de "thèmes".

Elle demande autant, sinon plus, une perception et une expression des *relations entre les faits* qu'une description des faits isolés, davantage un

"balayage comparatif discriminant" qu'une série d'observations ponctuelles séparées les unes des autres. Il est vrai qu'une relation peut sauter aux yeux, comme elle peut rester enfouie si on ne la soupçonne pas et si on n'observe pas là où il faut, en fonction d'hypothèses. Pour une telle perception, analyses et synthèses doivent continuellement s'imbriquer, s'alimenter et s'orienter mutuellement.

Nous montrerons, à partir d'exemples, en quoi le milieu naturel peut être considéré comme un système spatio-temporel et comment on peut définir un tel système.

Trois notions seront constamment présentes à travers tout ce que nous dirons, et qui le relativiseront : les notions de *niveau de perception* (ou "d'échelle" au sens large), de *contexte* et de *pertinence* (ou "signification"), cette dernière étant conditionnée par les deux premières.

I - RELATIVITE DE LA NOTION DE PAYSAGE

Le concept de "paysage" est intégrateur en soi. Le fait qu'il s'impose sans difficulté à l'esprit est une reconnaissance implicite qu'il n'est pas composé d'une juxtaposition de phénomènes indépendants, bien que nous en percevions une multitude, séparables individuellement.

L'observateur "actif" associe mentalement certains de ces éléments entre eux, et en fait "émerger" un paysage qu'il reconnait comme quelque chose de cohérent. La discrimination des éléments "pertinents" est relative à la qualité de l'observateur ; elle est donc subjective. Ainsi un géologue, un botaniste, un agronome, un ethnologue, percevront respectivement des paysages géologiques, végétaux, agraires ou ethniques, possédant leurs structures propres. Chacun "prélèvera" dans le milieu certaines composantes qu'il jugera significatives et en oubliera (ou n'en verra pas) d'autres. Cette structuration de l'espace sera différente pour chacun des "spécialistes" en fonction de l'échelle d'observation qu'il décidera d'adopter.

A partir de là, si l'on considère un niveau intégrateur supérieur à ces "paysages thématiques", en combinant les composantes climatiques, géologiques, géomorphologiques, hydrologiques, pédologiques et biologiques, il s'avère, par suite de l'interdépendance de ces composantes, que l'on peut encore parler de "paysage". De

nouvelles "unités" ("unités de milieu"), plus complexes dans leurs organisations internes, émergent pour structurer encore l'espace.

Suivant que l'on met davantage l'accent sur le milieu physique ou sur le milieu biologique, on parlera soit de paysage morpho-pédologique, soit de paysage écologique. Encore une fois, il est bon de redire que l'échelle d'observation influe sur la nature des éléments considérés et sur leur mode de structuration.

L'énoncé suivant possède les "mots-clés" (en italique) qu'il nous faudra expliciter dans l'approche systémique, appliquée au cas concret particulier de l'analyse morpho-pédologique du paysage :

Un territoire est un système spatio-temporel ouvert. Il possède des *limites* qui le distinguent de son *environnement*. Il est donc composé *d'éléments (unités de milieu)* en *interaction*. Ces éléments sont définis par des *caractéristiques fonctionnelles* (ou significatives) que l'on appelle leurs "propriétés". Les éléments peuvent être regroupés en *"classes-repère"*. Celles-ci sont articulées entre elles selon une certaine logique que l'on nomme *structure*, organisation ou arrangement du système. La structure, fixe à un moment donné, est traversée par des flux de matière qui traduisent le *fonctionnement* du système et les *interactions* entre éléments.

En tant que système ouvert, le territoire participe à des échanges avec l'environnement extérieur par l'intermédiaire de *flux de matière et d'énergie*, qui entretiennent sa structure et son fonctionnement.

II - LES LIMITES DU TERRITOIRE

Dans la délimitation d'un système rentre toujours une certaine part d'arbitraire. Il faut choisir des limites qui facilitent les raisonnements sur les flux entrants et sortants, et qui correspondent le plus possible à des interfaces naturels au travers desquels se font les échanges.

Latéralement le territoire proprement dit est inscrit dans les limites de la région à étudier. Elles sont généralement imposées par le demandeur de l'étude.

Concernant la dimension verticale, dans le cas de l'approche morpho – pédologique, on prend généralement les interfaces "paysage – environnement" suivants :
- l'interface modelé/atmosphère,
- l'interface "bed – rock"/zone d'altération (front d'altération).

Ces deux frontières évoluent avec le temps, quand ce temps dépasse celui de l'observation : la topographie se modifie (morpho – dynamique, tectonique ...), le front d'altération descend.

Tous ce qui est situé en dehors de ces limites est appelé *environnement extérieur* du paysage. Cet environnement possède des caractéristiques extrinsèques au paysage qui peuvent changer avec le temps et qui sont en interactions différentielles avec les caractéristiques intrinsèques des unités du milieu de ce paysage, contribuant à son évolution (voir plus loin).

III – ECHANGES AVEC L'ENVIRONNEMENT EXTERIEUR

Quand on ne considère que les entrées et les sorties, le système est assimilé à une "boîte noire".

Ces échanges sont composés de flux latéraux et de flux verticaux à travers les limites du système, délimitées semi – arbitrairement :

1. A travers les limites latérales (frontières du territoire)

Les entrées et les sorties à composantes horizontales (profondes, hypodermiques ou superficielles) sont composées d'eau, de matières dissoutes (solutés) et colloïdales, et de matières solides. Nous verrons plus loin que les "entrées" participent à l'organisation des unités de milieu, alors que les sorties sont les "déchets" (que l'on peut assimiler à *l'entropie* des unités amont).

- **Les matières dissoutes** résultent des processus d'altération d'ordre géochimique (hydrolyse, dissolution ...), bio – géochimiques (acido – complexolyse ...) ou physico – chimiques (dégradation et appauvrissement latéral ...). Elles suivent généralement les flux hydriques, donc sortent en aval et rentrent en amont.

- **Les matières solides**, transitant le plus souvent en surface, sont issues en grande partie des processus morphodynamiques (ayant pour agents les eaux courantes ou le vent) ou bien volcaniques (retombées et transports latéraux).

  Des processus de pédogenèse sont aussi à l'origine de flux sous la surface : apports latéraux en suspension avec colmatage de milieux d'accueil sableux. En général les matières solides viennent de l'amont, mais il y a des exceptions : le front "d'accumulation remontante" de la montmorillonite, procédant d'aval vers l'amont, peut envahir progressivement le paysage. Il en est de même de la remontée progressive d'un front de colmatage argileux (non montmorillonitique) qui progresse à partir de l'aval, dans un bas-fond en particulier.

- **Les eaux** peuvent transiter à tous les niveaux du substrat, mais, surtout en surface et en sub-surface, sous forme de ruissellements, de cours d'eau ou d'écoulements hypodermiques. Les flux hydriques latéraux accompagnent ou non les flux de matières dissoutes ou solides. Au sein des nappes phréatiques, spécialement dans les épaisses altérites tropicales, il peut aussi y avoir des échanges latéraux non négligeables avec l'extérieur.

Tous ces flux latéraux ne se font pas à la même vitesse. Certains sont lents, à l'échelle de la pédogenèse (lessivage, accumulation, évacuation des produits d'hydrolyse ...), d'autres sont très rapides (quelques heures à quelques jours pour les eaux de ruissellement). Certains sont relativement continus (front d'altération hydrolytique profond au sein d'une nappe phréatique), d'autres sont discontinus (averses, ruissellement, crues, érosion, alluvionnement). Certains flux sont mesurables quantitativement ou semi-quantitativement (lysimètres, limnigraphes, cases d'érosion) et servent à établir des "bilans" à court terme (cycles hydrologique ou saisonnier par exemple). D'autres ne sont évaluables que très empiriquement ; d'autres enfin sont hors de portée de la mesure comme de l'évaluation.

Nous verrons que ces considérations sont importantes pour statuer sur "l'évolution" du paysage, et même pour caractériser les unités de milieu.

2. A travers l'interface modelé/atmosphère

Les échanges sont essentiellement d'ordre climatique et biologique (homme compris), et sont composés de flux d'énergie et de matière (que l'on peut souvent traduire de l'un à l'autre).

. Dans le domaine énergétique :

Au niveau global et macroscopique de la biosphère, deux formes fondamentales d'énergie sont responsables de tout ce qui se passe sur la terre : *l'énergie solaire* (avec ses cycles diurnes et saisonniers) et la *gravité*. Au niveau local d'un écosystème donné, les sources d'énergie dérivées qui arrivent de l'environnement semblent être les suivantes :

- l'énergie du rayonnement incident qui permet et contrôle toute l'activité de la biomasse faisant partie du système. Elle permet donc des échanges gazeux (cycles du carbone, de l'azote et de l'oxygène) et de vapeur d'eau ;
- l'énergie cinétique des pluies, qui en se dissipant au sol, permet les mouvements d'eau modelant la surface avec transferts de matériaux dans et hors du système ;
- l'énergie éolienne, qui peut contribuer aussi au façonnement du modelé ;
- l'énergie "anthropique", qui concerne l'activité humaine sous toutes ses formes, utilisant la nature dans un sens négatif ou positif relativement à sa "dégradation", à sa conservation, ou à son amélioration.

Concernant l'activité anthropique, on peut, suivant les cas, considérer qu'elle fait partie des caractéristiques intrinsèques du système ou bien qu'elle est extérieure à ce système, faisant ainsi partie de son environnement. Il sera fait état plus loin de cet aspect du problème.

. Dans le domaine des flux de matière :

Les échanges paysage/environnement concernent les précipitations, les échanges gazeux (CO_2, NH_3, O_2) et de vapeur d'eau dûs à l'activité biologique, l'évaporation directe des nappes d'eau libre, les apports et retraits dus à l'activité humaine (engrais, herbicides, exportations par les cultures, les résidus végétaux et animaux, l'irrigation, les constructions, etc...).

3. A travers le front d'altération

Les échanges de matière concernent surtout les sorties d'eau et de produits en solution issus de l'altération géochimique ou de l'infiltration à partir de la surface.

A long terme on pourrait considérer qu'il y a échange, isovolumique ou non, entre l'altérite et le bed – rock, la première "entrant", le second "sortant", à travers l'interface d'origine qui devient alors fictif si on considère comme invariante la limite inférieure du système. Il peut aussi y avoir des venues d'eau profonde à partir de la nappe de fissures alimentant les altérites.

Du point de vue énergétique, il est possible aussi de mentionner les apports d'énergie d'origine tectonique (à très long terme) et éventuellement géothermique, cette dernière pouvant être liée à une altération hydrothermale.

IV – PARTITION DU PAYSAGE EN "ELEMENTS" (OU "UNITES DE MILIEU") et "CLASSES D'UNITES"

Un système ne peut être défini, à un moment donné, à une échelle donnée et selon un "point de vue" (thématique ou intégré) donné, avant qu'on en identifie les "éléments" qui sont en interaction.

Dans le cas du paysage, les éléments constitutifs sont les "unités de milieu" (ou "unités morpho – pédologiques") contigües dans l'espace, que l'on perçoit globalement comme des entités.

Répétons, car ceci est très important, que ce découpage du paysage est une possibilité parmi d'autres ; il est conditionné par plusieurs aspects :

– *l'optique et l'objectif de l'observateur* : en morpho – pédologie, cette optique est d'intégrer et de faire ressortir les interdépendances des composantes du milieu, en les regroupant en "unités" cohérentes. Cette optique est différente de celle du thématicien (géologue, géomorphologue, ou pédologue "purs" par exemple).

- *l'échelle d'observation* : il y aura d'autant plus d'éléments au kilomètre carré que le niveau de détail sera grand. Les classes d'unités seront définies (caractéristiques ou propriétés) différemment selon l'échelle considérée.

Le découpage du territoire ne doit pas être artificiel, mais s'imposer de façon naturelle à l'issue d'une démarche spécifique, à la fois empirique, comparative et inductive. A une échelle donnée, la distinction des unités et classes d'unités repose sur la perception de différences significatives et de récurrences (répétitivité) de ces différences, dans le contexte exclusif de la région étudiée. Cette dernière condition est indispensable pour que les différences observées soient pertinentes. Nous verrons que les "caractéristiques" des unités de milieu qui permettent de définir celles-ci ne doivent être référées qu'à des relations (d'équivalence ou de différence) existantes au sein du territoire. Un élément en soi n'est définissable sans ambiguïté que dans le contexte du système étudié et par rapport aux autres éléments. En ce sens, le système doit être autoréféré.

Ainsi, dans l'étude d'un paysage, un des problèmes que doit résoudre le cartographe est l'adéquation entre la partition en unités et l'échelle. Puisque les unités ne peuvent être définies que les unes par rapport aux autres, la "vision d'ensemble" est nécessaire avant de faire le découpage. Ce découpage définitif ne peut donc être réalisé dès le départ ; il se précise ou se corrige au fur et à mesure de la prospection. C'est alors toute la démarche de terrain qui est en cause. La "mise à niveau logique" (raisonnement à la bonne échelle) nécessite une approche de nature dialectique.

V - CARACTERISTIQUES DES ELEMENTS (UNITES DE MILIEU) ET COMPOSANTES DU PAYSAGE

1. Caractéristiques des unités de milieu

Ce qui donne sa "cohérence" à une unité de milieu "émerge" de l'ensemble de ses caractéristiques en interactions (voir plus loin).

Il est fréquent que l'unité de milieu se détache naturellement dans le paysage et saute aux yeux de l'observateur (déjà "informé"

par une expérience préalable), avant qu'il en ait fait une analyse de ses caractéristiques. En fait, il est plus facile de reconnaître la résultante des interactions des composantes (caractéristiques) de l'unité que les composantes séparées. La reconnaissance globale des unités de milieu en est la démonstration ; c'est d'autre part une garantie de l'existence réelle de tels objets, et non de leur "construction" artificielle, ce qui est rassurant.

Il n'empêche que l'identification de l'unité ne suffit pas ; pour la définir, il faut aller voir au sein de ce sous-système comment il fonctionne, quelles sont ses caractéristiques-propriétés et quelles sont les éventuelles interactions qui y agissent.

Une caractéristique peut être seulement qualitative (couleur d'un sol, présence ou absence de gravillons ...) ; elle peut aussi être quantitative ou semi-quantitative (fourchette de valeurs de pourcentage de gravillons, classe de pente, durée d'engorgement ...). A l'échelle humaine, une caractéristique peut être statique (type de modelé, type de sol ...) ou bien dynamique, (forme et intensité de la morphodynamique, régime hydrologique ..., activité humaine si on décide d'en faire une caractéristique intrinsèque du système ...). Comme caractéristiques dynamiques, on considèrera uniquement certains flux et processus (avec leurs effets) : ceux qui marquent fortement le cachet de l'unité en question, ceux qui sont aisés à identifier, ceux encore qui sont rapides à l'échelle de l'observateur (et de l'utilisateur futur de la carte), et enfin ceux qui sont récurrents en fonction d'événements saisonniers. C'est le cas des processus visibles d'érosion, d'alluvionnement et de circulation des eaux (en surface et en profondeur).

Chaque unité d'une classe d'unités de milieu (par exemple *la* butte cuirassée située à tel endroit précis et appartenant à la classe-repère "buttes cuirassées") aura des caractéristiques propres qui sont ses coordonnées spatiales, ses formes extérieures et ses dimensions. Ces caractéristiques spatiales apparaîtront directement sur la carte, dont c'est un des rôles. Les autres "dimensions" de l'unité seront bien sûr communes à toutes les unités appartenant à la même classe-repère ; elles ne seront pas représentées directement sur la carte, mais figureront dans sa légende.

2. Caractéristiques des composantes du paysage

Chaque caractéristique d'une unité de milieu sera choisie au sein d'une "composante" qui, pour le descripteur, pourra être un thème disciplinaire.

Par exemple, les composantes du paysage étudié pourront être :
- la lithologie du substratum,
- les formations superficielles,
- le sol,
- le modelé,
- le régime hydrologique,
- la morphodynamique.

Le nombre et la nature de ces composantes seront spécifiques à la région étudiée. Seules les composantes "utiles", c'est-à-dire significatives et explicatives par leurs modalités, seront retenues. On ne parlera pas de composante climatique si le climat est homogène partout. On ne parlera pas de lithologie et de modelé au sein d'un flat alluvial, puisqu'ils ne sont pas explicatifs des différenciations qu'on peut y observer ; par contre, les composantes "formations superficielles", "sol" et "régime hydrologique" seront, dans ce cas, tout à fait pertinentes.

Une fois les composantes déterminées, les caractéristiques de chaque classe-repère d'unité seront choisies parmi les diverses "modalités" (semi-quantifiées ou non).

Par exemple, si la composante "modelé" est pertinente, les classe-repères d'unités de milieu pourront être caractérisées, vis-à-vis de cette composante, par les modalités suivantes :
- plateau cuirassé (bowal),
- talus de bowal,
- glacis de piémont des collines de roches vertes,
- glacis d'ennoyage,
- croupes surbaissées,
- glacis-versant,
- collines de "roches vertes",
- bas-fond élémentaire,
- bas-fond incisé,
- plaine alluviale, etc...

Naturellement deux classes d'unités de milieu pourront avoir le même modelé. Ce qui compte pour les différencier, c'est que ce modelé soit associé à des sols ou des régimes hydriques différents, et qu'en fin de compte il en résulte des interactions spécifiques d'où émergeont des unités non identiques.

Dans le cas que nous venons de considérer, c'est – à – dire le modelé, les modalités sont des caractéristiques qualitatives. Elles sont cependant comparables entre elles, si on se réfère à leurs positions topographiques. On peut alors les hiérarchiser selon un certain ordre (de l'amont vers l'aval, des positions hautes vers les positions basses ...). On dit alors que ces caractéristiques possèdent des *relations d'ordre* ; ce sera un des critères de définition de la structure du système (voir plus loin). De même, elles possèdent une certaine hiérarchie spatiale : un certain nombre d'entre elles sont reliées par des "lois de répartition". Ce seront les relations topologiques, qui constitueront le deuxième critère de définition de la structure. Ces deux types de relations se retrouveront plus ou moins pour chaque "palette" des autres composantes pertinentes.

En fin de compte, c'est chaque unité de milieu ainsi définie par ses caractéristiques qui pourra être mise *en relation* avec les autres.

Jusqu'à présent, le rôle du temps n'a pas été pris en compte puisque nous raisonnions sur l'état actuel du système. Or la dimension temporelle intervient dès que l'on considère la *genèse* et *l'évolution* du paysage. Il est clair en effet qu'avec le temps les éléments (unités de milieu) se modifient. Il peut y avoir transfert d'éléments d'une classe – repère dans une autre, ou bien disparition de certaines de ces unités de milieu et apparition de nouvelles, le tout s'accompagnant évidemment d'une structure changeante. Des phénomènes d'hystérésis, d'inertie et de résistance différentielle vis – à – vis des fluctuations de l'environnement, font que certaines caractéristiques peuvent subsister, à l'état de reliques, longtemps après que les conditions extérieures aient changé. C'est le cas par exemple des héritages paléo – climatiques ou d'anciens niveaux de bases (sols rouges résiduels, buttes cuirassées, terrasses anciennes ...) ou bien encore d'activité termitique périmée (*"stone line"*...).

De ce fait, les caractéristiques d'une unité de milieu à un moment donné peuvent avoir une histoire. De nouvelles se surimposent ou utilisent continuellement les anciennes. Qu'elles soient héritées, actuelles ou "intermédiaires", toutes, même si elles ne sont pas en équilibre avec leur environnement actuel, possèdent leur pertinence explicative vis-à-vis de l'unité de milieu à laquelle elles appartiennent ; elles participent toutes à la structure actuelle du paysage.

Une caractéristique d'unité de milieu peut donc posséder une double signification :

- elle a un sens vis-à-vis de la définition de l'unité de milieu, et donc de la structure actuelle (synchronique) du paysage ;
- en tant que "trace", elle a un sens vis-à-vis de la genèse et de l'histoire de la région, si on sait identifier sa nature "héritée" et reconstituer les conditions de son environnement passé. Comme lors d'une enquête policière, un indice isolé apporte peu d'informations, mais plusieurs indices, d'ordres différents, correctement articulés, apportent en quelque sorte des "preuves".

VI - INTERACTIONS ENTRE CARACTERISTIQUES AU SEIN DES UNITES DE MILIEU

La plupart du temps les caractéristiques des unités de milieu ne sont pas indépendantes ; par leurs "interactions", elles s'expliquent les unes par les autres. Autrement dit, les "unités de milieu" constituent elles-mêmes des systèmes dont les caractéristiques sont les éléments.

Il y a interactions, ou mieux interdépendances, ou encore "causalités mutuelles" entre les caractéristiques d'une unité de milieu lorsque l'une des caractéristiques ne peut exister sans les autres.

Si l'on se réfère à l'état actuel, le terme "d'interdépendance" est en fait plus satisfaisant que celui "d'interaction". Ce dernier terme semble en effet supposer explicitement l'intervention d'une dynamique de flux (énergie ou matière). Or ce n'est le cas que si on se réfère aux processus de genèse des diverses caractéristiques, les uns permettant, favorisant ou interdisant certains autres. Dans

ce cas on peut vraiment parler d'interactions, c'est – à – dire d'antagonismes ou de synergies entre processus dynamiques ayant permis d'aboutir à l'état actuel. Comme il est toujours difficile d'apprécier dans quel état de stabilité ou d'évolution est l'unité,donc s'il y a effectivement des interactions actuelles de processus, il vaut mieux parler d'interdépendances des caractéristiques.

A quoi sont dues ces interdépendances ? Elles sont les conséquences des "grandes lois" qui régissent la genèse du milieu physique à l'échelle du paysage et que l'on peut appeler les "lois naturalistes" ; avec référence aux processus de tous ordres que l'on trouve dans les *cursus* et que l'on apprend lors des expériences de terrain, en matière de géologie, géomorphologie, pédologie, hydrologie, etc..., c'est à dire relatifs aux grandes composantes dont certaines modalités sont en fait les caractéristiques de l'unité de milieu.

Prenons par exemple le cas d'une unité de milieu en région soudanienne (fig. 1), définie par les 5 caractéristiques suivantes (tableau 1).

Tableau 1 : *Composantes et caractéristiques d'une unité de milieu en zone soudanienne*

Composantes	Caractéristiques de l'unité (interdépendantes)
Lithologie	Schistes "birrimiens" à passées d'amphibolites ("roches vertes")
Modelé	Glacis de piémont de collines de "roches vertes"
Sol	Sols vertiques à pavage de quartz
Régime hydrologique	Engorgement temporaire et ruissellement intense
Morphodynamique	Erosion en nappe et en ravineaux

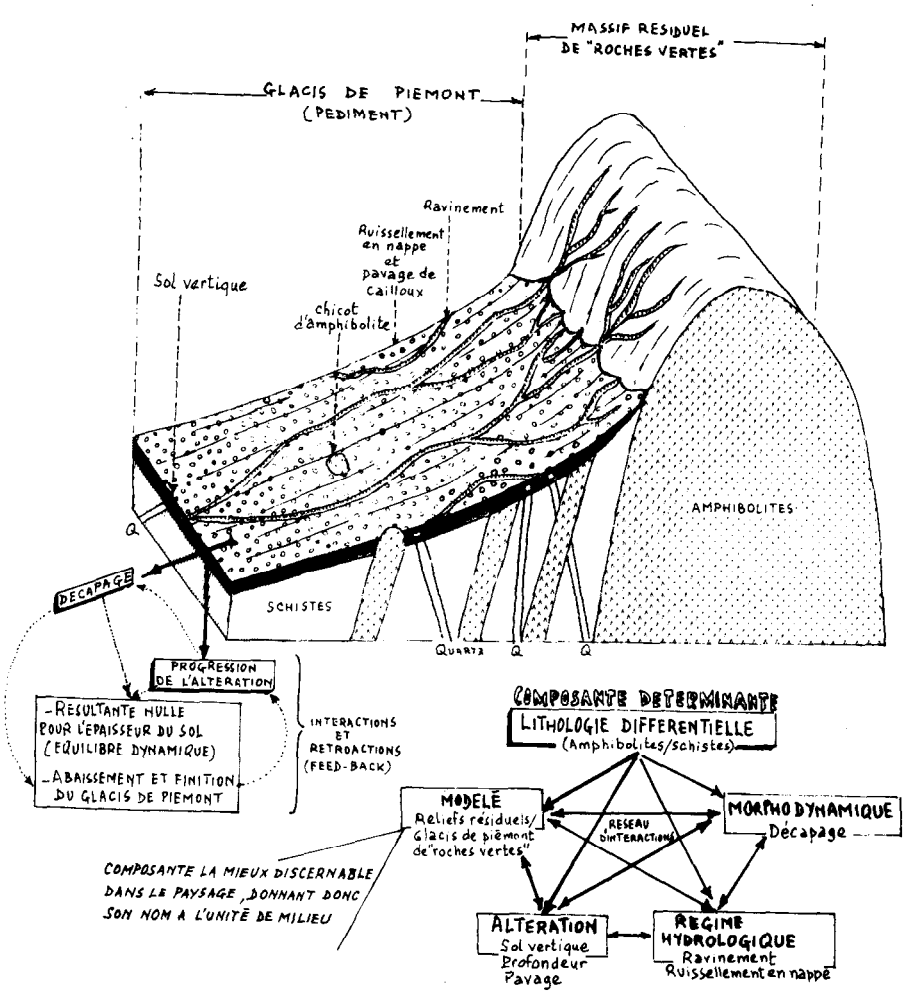


Figure 1 : *Interactions entre composantes et caractéristiques du milieu : Spécification et cohérence de l'unité de milieu "glacis de piémont de roches vertes" à l'échelle du 1/50 000 dans le système géologique birrimien en région soudanienne.*

Les lois naturalistes qui sont susceptibles d'intervenir (il ne s'agit pas en effet d'un hasard, mais de lois, puisque toutes les unités de milieu d'une même classe ont les mêmes caractéristiques) sont de plusieurs ordres :

- "lois" géologiques : dans le contexte des régions soudaniennes où se trouve l'unité en question, les racines des chaînes "birrimiennes" arasées (orogenèse précambrienne) montrent une association, en couches redressées, de roches métamorphiques d'origine volcanique : les schistes à filons de quartz et les amphibolites ("roches vertes" birrimiennes).

- "lois" géomorphologiques : l'arasement du socle birrimien, consécutif aux multiples cycles altération/déblaiement, a mis progressivement en relief les gros bancs d'amphibolite, sous forme d'alignements collinaires. Les schistes, plus rapidement altérables, ont donc été déblayés plus vite. L'évolution géomorphologique "normale" de ces deux ensembles lithologiques conduit à la création de "reliefs résiduels" rocheux et au façonnement en piémont d'une surface régulière bien tendue (appelée surface "fonctionnelle"), qui devient concave et se redresse en amont pour se raccorder aux "roches vertes". Il s'agit d'un glacis de piémont modelé régulièrement par l'énergie cinétique du ruissellement en nappe qui se dissipe progressivement vers l'aval.

  Le déblaiement des altérites sur schistes a progressé de l'aval vers l'amont jusqu'à ce que le front d'érosion butte contre le noyau dur d'amphibolite. A ce stade, le processus a été bloqué, et il s'est créé une surface d'équilibre concave appelée "pédiment" ou glacis de piémont. Il ne pouvait en être autrement par contre, l'inverse n'est pas vrai : un pédiment peut se façonner sur d'autres couples lithologiques, à condition que ce soit une roche dure et une roche plus tendre ; c'est cette association qui est significative). On peut appeler cela une *"loi" d'interaction* entre une structure géologique initiale et des processus de déblaiement et de façonnement différentiels, "orientés" par cette structure. Il y a "interaction" : géologie lithologie/géomorphologie (modelés).

- "lois" pédologiques : la "Science des Sols" nous dit que d'une part sur un tel substrat avec un tel amont (roches basiques) et

d'autre part sous les conditions climatiques existantes (caractéristiques constantes pour tout le système), il ne peut se former que des sols vertiques. On a là encore ce qu'on peut appeler une loi. Il y a "interactions" : géologie/ géomorpho – logie/pédologie.

- "lois" hydrologiques : sur un tel niveau d'argiles gonflantes, le sol vertique est nécessairement engorgé en saison des pluies et ce régime hydrique "renforce" encore la pédogenèse vertique. Les pluies ne peuvent plus s'infiltrer, elles ruissellent donc de façon intense et généralisée.

  Il y a cette fois "interactions" : géologie/géomorphologie/ pédologie/hydrologie.

- "lois" de la morphodynamique : sur un glacis de piémont à pente sensible, avec un ruissellement intense, il y a forcément au plan local concentration des ruissellements. Le sol, très argileux et sans nappe phréatique, de par sa nature vertique et sa très faible porosité, est favorable à une incision linéaire avec parois verticales, donc à la formation de petits ravins ... Entre les ravineaux, la vitesse de la lame d'eau ruissellante entraîne une pellicule boueuse : il y a érosion en nappe.

Cette érosion a deux conséquences : en éliminant la terre fine, elle concentre en surface des cailloux de quartz (issus des nombreux filons) ; il se forme un pavage qui rentre dans les caractéristiques du sol. D'autre part la troncature progressive du sol concourt au façonnement du glacis. On a ainsi bouclé la boucle. Le front d'altération descend en même temps que le décapage progresse. L'épaisseur du sol vertique correspond alors à un *équilibre dynamique* : le départ en surface est compensé par un gain en profondeur. La surface s'abaisse par érosion "naturelle", le glacis de piémont continue à se façonner, tout en maintenant une couverture pédologique. Mais l'équilibre dynamique peut être rompu si l'homme intervient : à la limite, on arrivera au stade *bad lands* sur schistes.

Finalement, en ajoutant l'hydrodynamique, on obtient ainsi l'ensemble des "interactions" entre composantes, qui permet de spécifier l'unité de milieu.

VII - RELATIONS ENTRE UNITES DE MILIEU : STRUCTURE DU PAYSAGE

La structure d'un système est la manière dont ses éléments sont "arrangés". C'est donc une notion *statique*, à un moment donné, à l'opposé des notions d'interactions, de flux, de processus, d'évolution ..., qui sont les aspects *dynamiques* du système et qui "traversent" le cadre structural. Celui-ci peut donc se représenter, à un moment donné, selon un axe horizontal dit "synchronique". L'évolution du système s'imagine sur un axe vertical dit "diachronique" (fig. 2). Une structure n'est pas fixe, mais elle est perceptible et identifiable pour chaque "tranche" de temps. Elle est susceptible de transformations liées à l'évolution du système et, par là même, de chaque classe d'unités en relation, d'une part avec son fonctionnement interne propre, d'autre part avec les fluctuations de son environnement.

Une structure se constate et émerge à l'issue d'une "analyse structurale" ; en revanche, elle s'explique par la considération de la genèse du paysage.

Dans le cadre du paysage, système spatial par excellence, ce qui compte avant tout c'est la perception et la représentation de la structure. C'est l'objectif primordial de la cartographie morpho-pédologique.

A notre échelle temporelle, on peut considérer que les unités de milieu présentent suffisamment de caractéristiques fixes, notamment leurs positions dans l'espace les unes par rapport aux autres (voisinages et imbrications mutuelles), leurs formes et leurs dimensions.

Les unités de milieu, qui remplissent la totalité de l'espace du système (contiguïté des éléments), sont reliées selon une structure spatiale dite *topologique*. Cela signifie qu'elles ne sont pas réparties au hasard entre elles, mais suivent des "lois de répartition" (toposéquences, hydro-séquences ...). Ces relations doivent ressortir sur la carte morpho-pédologique. Les formes des limites d'unités en font partie.

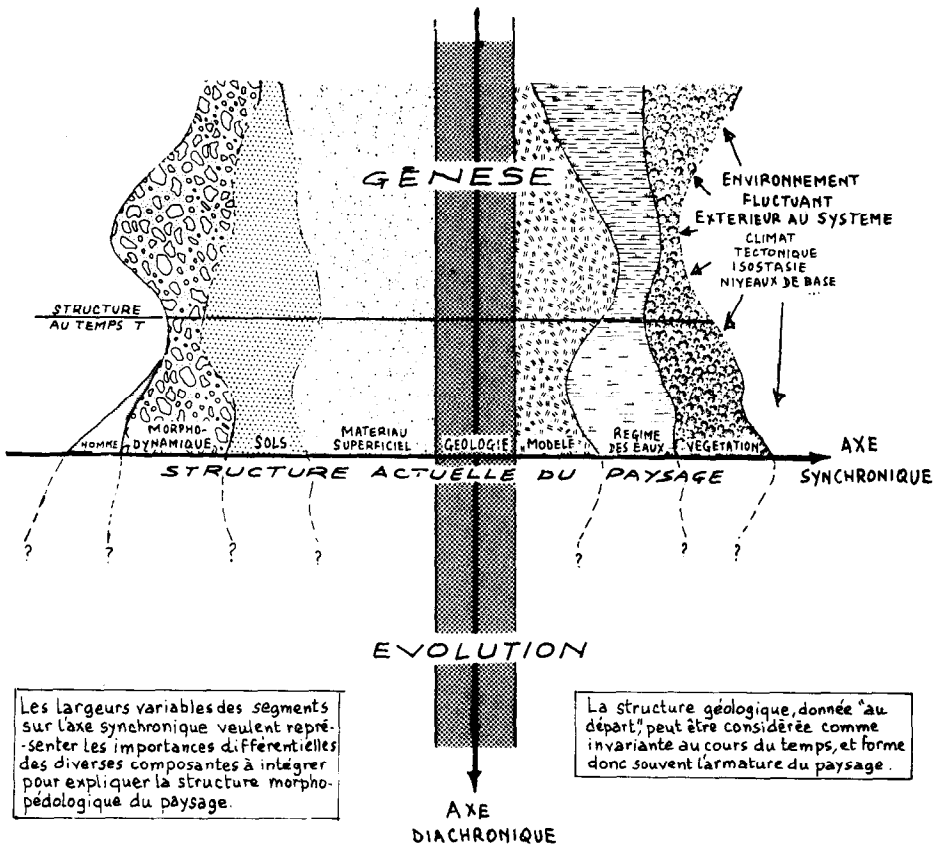


Figure 2 : *Schéma évolution/structure : composantes et déformations de la structure morphopédologique au cours du temps*

En dehors de ces relations dans l'espace, les classes d'unités de milieu présentent aussi des *relations structurelles d'ordre*, qui peuvent exprimer des "hiérarchies" entre les modalités d'une même composante. Ces hiérarchies sont basées sur des "échelles de valeur" des composantes qui peuvent se classer semi – quanti –

tativement (parfois quantitativement). Par exemple, pour certaines classes d'unité, la composante "régime hydrique" peut présenter une hiérarchie des durées d'engorgement. Il faut donc, pour que des relations d'ordre puissent s'établir entre les classes d'unités (ou certaines classes d'unités), qu'il entre dans leurs définitions des prédicats qualitatifs communs, par exemple "imprégnation ferrugineuse" (⟶plinthite meuble, carapace, cuirasse), "engorgement" (⟶ profondeur, durée ...), "profondeur d'une carapace", "gravillons" (⟶ plus ou moins soudés), "compacité" (⟶faible à forte) etc ... Ceux-ci constituent alors les points fixes des comparaisons susceptibles d'un classement par "gammes de valeur". Vis-à-vis de ces composantes, on peut alors ordonner entre elles certaines classes d'unités. Ces relations d'ordre apparaîtront dans la légende de la carte qui, elle, ne sera consacrée qu'à la structure spatiale.

Dans quelques cas particuliers, à très grande échelle en général, des classes d'unités ne sont définies que par les modalités au sein d'une seule composante et ne se différencient donc entre elles que par les "valeurs" classables de cette unique composante : "teneur en argile" par exemple dans des alluvions non différentiables autrement, ou dans les "sols dior" du Sénégal, ou bien dans les "terres de Barre". On retrouve alors le cas de la cartographie thématique.

VIII - L'EVOLUTION DU PAYSAGE - IMPORTANCE DU TEMPS

Le paysage, comme tout système ouvert soumis aux fluctuations de l'environnement, évolue. Il est en continuelle transformation. S'il était isolé de l'extérieur, il évoluerait vers un état d'équilibre thermodynamique irréversible, totalement désordonné et sans structure. Ce sont les échanges avec l'extérieur qui entretiennent sa "vie", son fonctionnement, son organisation, sa complexité et sa diversité.

A notre échelle, qui correspond à une fine tranche temporelle vis-à-vis des temps géologiques et même du quaternaire, on peut considérer que le système est "figé". Ses éléments et sa structure sont définis, caractérisés et représentés dans une optique synchronique. Dans ce cas, les unités de milieu ne changent pas

de place et de nature ; elles ne se déforment pas non plus. Quant aux relations structurelles, elles ne se modifient pas sensiblement.

En réalité, entre deux instants suffisamment éloignés, les unités de milieu du paysage ne sont pas les mêmes en nature, en topologie, en nombre : le modelé, les sols, les matériaux superficiels, les régimes des eaux, les processus morphodynamiques se transforment et se réajustent en liaison avec les changements de conditions extérieures (climat, niveaux de base lointains, isostasie, tectonique ...). Les interactions ne sont plus les mêmes, donc également les unités de milieu et leurs arrangements.

1. Exemples d'évolution du paysage

Avant d'en venir aux exemples concrets, remarquons que le paysage possède en général deux invariants : la litho-structure géologique du substratum et la pesanteur. La géologie peut souvent être considéré comme "point-fixe" intrinsèque au système, alors que la gravité est une constante spatio-temporelle.

En l'absence d'ajustements isostasiques ou de mouvements tectoniques, la tendance du paysage, quelles que soient les fluctuations climatiques, est d'atteindre son plus bas niveau d'énergie potentielle, qui se traduit par un aplanissement général des reliefs.

Un modelé se rapproche d'autant plus vite de cet état que l'action de la gravité est préparée par l'affaiblissement de la cohérence des matériaux (c'est-à-dire leur altération) et aidée par l'énergie cinétique des pluies se dissipant en énergie mécanique, moteur des processus d'érosion (de tous ordres) qui réduisent les dénivellations. On se rapproche de cette situation dans certaines régions intertropicales humides à socle stable (Afrique Centrale, Amazonie ...).

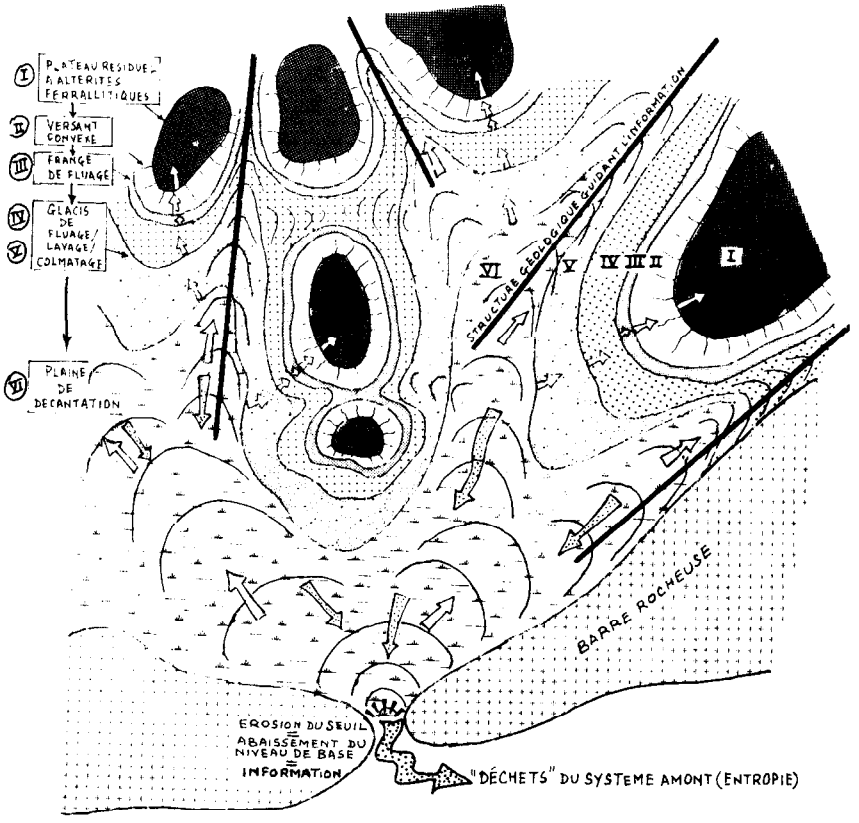
De la même façon, on pourrait parler de la tendance à une diminution de l'énergie chimique du fait de l'altération du substratum, sous un climat et un modelé donnés supposés invariants.

1er exemple : Madagascar (fig. 3 et fig. 4)

En région tropicale humide, comme à Madagascar (RAUNET, 1984 et 1985) ce stade ultime d'altération géochimique serait le manteau d'altération ferrallitisé dont l'épaisseur souvent considérable (50 mètres) ne pourrait cependant pas descendre en dessous du niveau de base aval qui évacue les produits d'hydrolyse par l'intermédiaire des nappes phréatiques imbibant les altérites ; le plancher ne pouvant pas être, topographiquement, en dessous des exutoires. Naturellement l'approfondissement du front d'altération hydrolytique suit la baisse des niveaux de base. Mais les altérites ne peuvent pas toutefois s'approfondir au-delà d'un seuil d'effondrement de l'édifice dont le poids devient trop important, vis-à-vis de sa faible cohésion (d'autant plus qu'il est imprégné par une nappe).

A un moment donné, il y a fluage régressif des altérites noyées et évacuation de celles-ci sous forme de lames boueuses transitant dans les bas-fonds qui, symétriquement, s'élargissent (parfois jusqu'au stade de véritable "surface d'aplanissement").

Dans un tel exemple, on voit qu'il y a concurrence ou synergie (interaction) entre plusieurs processus : géochimique, morpho-dynamique et hydrologique. L'altération transforme la roche, y crée son propre aquifère (drainé par les niveaux de base), qui active encore plus l'altération du fait de l'évacuation rapide des produits d'hydrolyse. Quand la nappe et l'altération se rapprochent de la cote du niveau de base local (bas-fonds par exemple), les sorties de solutés ralentissent, ce qui modifie les équilibres chimiques et inhibe la descente du front d'altération. On atteint un état stationnaire. Il y a donc des phénomènes typiques de *rétroactions*, d'abord positive (accélération de l'altération), puis négative (arrêt de l'altération). L'information "concentration en solutés de la nappe" (induite par le processus d'altération même) rétroagit sur la vitesse de ce processus d'altération, pour l'accélérer d'abord, et pour la stabiliser par la suite.



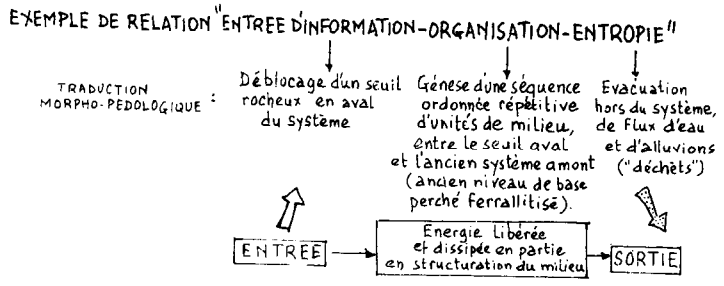


Figure 3 : *Modelé cybernétique d'évolution d'un paysage tropical humide (Madagascar)*

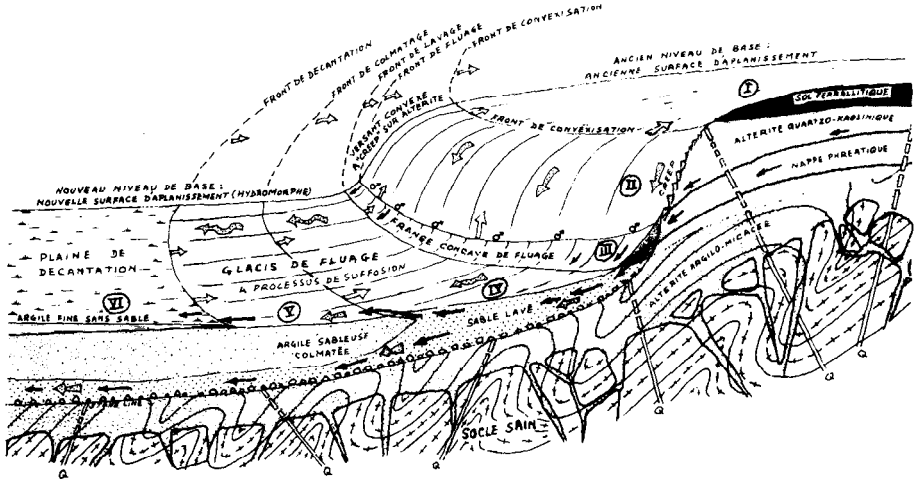
Lorsque le niveau de base extérieur baisse (tectonique, déblocage de seuil ...), le niveau de base phréatique descend, réactivant le drainage des nappes, donc l'altération ; à un moment donné, la couverture pédologique, du fait de son poids et de l'activité mobilisatrice de la nappe circulante à sa base, s'effondre et "flue" (lentement et imperceptiblement) de façon régressive, de l'aval vers l'amont, pour former un nouveau niveau de base local. Celui-ci, suivant l'ampleur de la dynamique de lent fluage (latérale ou généralisée) peut être un nouveau bas-fond emboîté dans l'ancien, ou bien une véritable *surface d'aplanissement*, rabotant les "racines" des altérations situées au coeur des collines préexistantes. On a ainsi "transformation" de collines ou de plateaux (ancienne surface) fortement ferrallitisés, en nouvelle surface d'aplanissement hydromorphe fonctionnelle. C'est un exemple d'évolution du paysage conditionnée par une simple baisse lointaine de niveau de base. L'information "baisse du niveau de base" (ou "augmentation de l'énergie potentielle") demande un certain délai de transmission pour arriver et provoquer une action sur le paysage considéré. Ce décalage spatio-temporel fait que le paysage a une réponse plus ou moins retardée à une sollicitation extérieure, en particulier en fonction de son éloignement. L'information est transmise par un "signal" qui est ici le "front de fluage régressif" dont l'onde (fig. 3), rayonnant en éventail, atteint d'abord les zones aval du paysage avant de remonter vers l'intérieur. Comme pour les signaux électromagnétiques de la "théorie de l'information", le "front de fluage" (ou d'érosion dans le cas de la morphodynamique de surface) trouve, au fur et à mesure qu'il remonte, des obstacles ("bruits") sur son trajet (barres rocheuses, différences de comportement des altérites sur roches différentes ...) ; ceux-ci lui font perdre alors de l'énergie en l'amortissant et l'altérant, le canalisent dans certaines directions ou encore le bloquent tout à fait ; dans ce dernier cas, si en amont l'information n'est pas arrivée, le niveau de base reste fonctionnel et n'est pas de ce fait emboîté par le nouveau.

En poursuivant l'étude de cet exemple, il faut s'intéresser maintenant à ce qui se passe dans la plaine (ou bas-fond) qui constitue en aval le nouveau niveau de base "fonctionnel" (niveau de base non seulement pour les eaux de surface mais également pour les nappes, RAUNET, 1985b).

Au fur et à mesure du recul du "front de fluage", les altérites s'étalent et sont évacuées en aval par des chenaux préférentiels qui parcourent les glacis de fluage. Les nappes d'altérites affleurent à la base des versants convexes, suivant une légère concavité. Elles favorisent ainsi le glissement des altérites des versants qui, de ce fait, reculent. En contrebas, les nappes s'étalent et lavent dans sa partie supérieure la couche de matériaux issus du fluage antérieur. Il se crée donc, en amont du glacis, une couche lavée blanche de sable résiduel. Les argiles évacuées par lavage transitent vers l'aval avec les flux phréatiques hypodermiques et viennent colmater cette même couche sableuse lavée bien antérieurement. L'aval du glacis/plaine est donc argilo-sableux à porosité entièrement colmatée. Il en découle que les eaux phréatiques chargées en constituants argileux qui étaient sub-affleurantes sur les zones lavées, ne pouvant plus traverser la zone colmatée, se disjoignent en deux nappes : d'une part une nappe de surface qui dépose un peu plus en aval ses argiles issues du lavage de l'amont sous forme d'alluvions fines sans sables, d'autre part une nappe profonde s'écoulant sous le niveau colmaté argilo-sableux (1 m d'épaisseur) et qui "lave" cette fois le matériau sous-jacent qui devient à son tour totalement sableux, avant de se colmater en aval et donc de renforcer l'épaisseur de ce matériau.

En définitive, dans ce système, il existe 5 fronts dynamiques sub-parallèles remontant d'aval vers l'amont et délimitant 6 unités de milieu (fig. 4) :

- *le front de décantation* : limite alluvions fines/argile sableuse de colmatage ;
- *le front de "colmatage"* : limite argile sableuse colmatée/sable lavé ;
- *le front de "lavage"* : limite sable lavé/petit glacis concave de fluage argileux ;
- *le front de "fluage"* : limite glacis de fluage/versant convexe à "*creep*" ;
- *le front de convexisation de la surface supérieure* : limite plateau/versant convexe ("demi-orange").



RELATIONS FONCTIONNELLES ET SPATIALES ENTRE UNITÉS DE MILIEU EN TRANSFORMATION.
INTERACTIONS DES PROCESSUS GEOCHIMIQUES, HYDROLOGIQUES, PHYSICO-CHIMIQUES ET MORPHODYNAMIQUES.

FLUX DE MATIÈRE NON DISSOUTE, VERS L'AVAL, AVEC PROCESSUS DE TRANSFORMATION (MODELE DU "TAPIS ROULANT"):
- "Creep" des altérites sur le versant convexe.
- Couche de fluage (en cours de lavage) en transit. Colmatée et stabilisée ultérieurement.
- Evacuation de colloïdes argileux dans la nappe phréatique (soutirage → Finition de l'aplanissement).
- Placage d'une stone-line quartzeuse.
- Décantation argileuse fine.

FLUX D'EAU LIBRE (NAPPES PHREATIQUES), DESTABILISATEURS ET MOBILISATEURS DE MATERIAUX

RECUL VERS L'AMONT DES FRONTS DYNAMIQUES, SUB-PARALLELES ET COORDONNÉS. REMONTEE DE L'INFORMATION "ÉROSION D'UN SEUIL ROCHEUX EN AVAL DU PAYSAGE", DÉCLENCHANTE DE PROCESSUS EN INTERACTIONS QUI GENERENT DE NOUVELLES UNITÉS DE MILIEU.

Figure 4 : *Exemple de structuration et d'évolution du paysage morpho-pédologique en région tropicale humide (Lac Alaotra – Madagascar)*

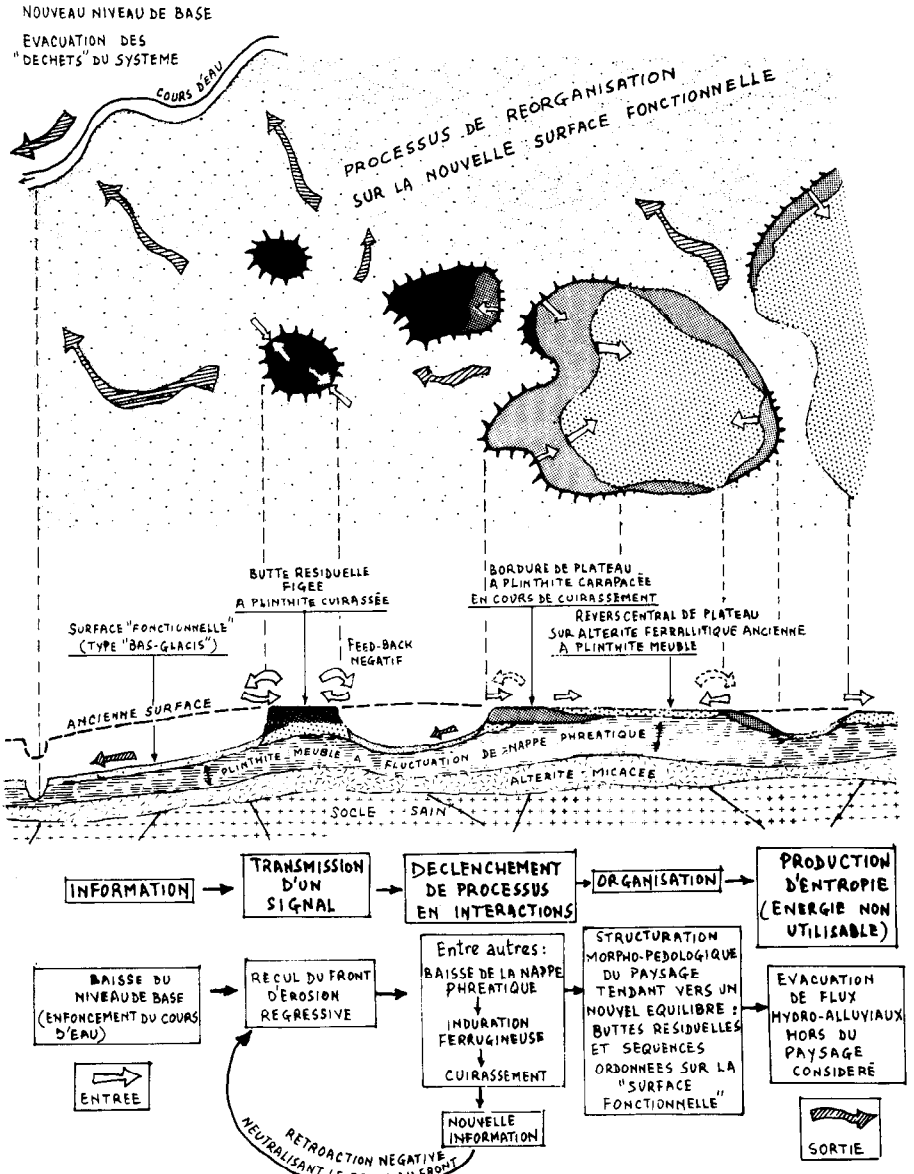


Figure 5 : *Exemple d'évolution d'un système soudanien. Interactions et rétroactions de processus impliqués dans la genèse des buttes cuirassées*

vu, en retour (*feed – back*) joue un rôle sur la poursuite de cette altération. Cette nappe induite subit d'amples fluctuations qui sont à l'origine de la redistribution et de la ségrégation des hydroxydes de fer qui finissent par imprégner fortement les altérites kaoliniques supérieures, les transformant en "plinthite" (zone tachetée à canalicules). Un léger changement climatique (assèchement ou régime pluviométrique plus contrasté) s'accompagnant d'une baisse du niveau de base se traduira sur le milieu (avec décalages spatio – temporels) par un déblaiement remontant de la surface d'origine et l'emboîtement en contrebas d'une nouvelle surface "fonctionnelle" sous la surface "ancienne". En ce qui concerne les nappes phréatiques, cela va se traduire par leur baisse régulière, malgré les fluctuations annuelles qui vont continuer à concentrer le fer pour épaissir encore davantage la plinthite.

Une autre conséquence est que la partie supérieure de cette plinthite, au fur et à mesure de la descente de la nappe, sera à l'abri de ses fluctuations. Les hydroxydes évolueront en sesquioxydes de plus en plus durs, transformant la plinthite meuble d'origine en carapace alvéolaire, puis en cuirasse qui armera de plus en plus la surface ancienne. Sous la cuirasse se maintiendra une plinthite encore meuble au dessus de l'altération hydrolytique noyée par la nappe, en cours de kaolinisation. Ce matériau friable est susceptible de déblaiements aisés. Or, il faut voir que ces processus sont en interactions spatio – temporelles évolutives. Ils se commandent, s'amplifient ou se freinent les uns les autres.

L'information, qui est ici le changement climatique ou la modification du niveau de base, va circuler comme un signal remontant, correspondant à l'onde du front d'érosion, en contrebas et en amont duquel le milieu répondra par de multiples transformations consécutives au déclenchement de nombreux processus. La baisse de la nappe est rapide au début du recul du front d'érosion, sa pente hydraulique est assez forte ; la plinthite n'a pas encore eu le temps de s'épaissir et de s'indurer fortement ; le déblaiement de la première surface se fait aisément. Avec le temps, donc avec l'éloignement du front par rapport à son site d'origine, et ainsi au fur et à mesure de sa pénétration à l'intérieur de la

surface "ancienne", les processus d'induration en amont s'intensifient.

Autrement dit, plus le front recule, plus il atteint des altérites où la nappe fluctue depuis plus longtemps, donc à plinthite d'autant plus fortement imprégnée en fer et, par conséquent, plus le rabattement de la nappe induit par le front, en amont de celui-ci, se répercutera par un fort cuirassement de cette plinthite. Il y a un moment où, par rétroaction négative, l'énergie de recul du front ne pourra plus vaincre la résistance de l'épais chapeau cuirassé que ce recul du front a lui même induit. La dynamique s'arrêtera : subsisteront alors des buttes cuirassées figées dans le paysage, dont le processus de démantèlement est provisoirement stoppé.

La butte peut être considérée comme "stable" du point de vue morphodynamique. Sa topographie représente un héritage du niveau de base antérieur à la perturbation de l'environnement. En revanche, sa cuirasse, qui s'est formée pendant les processus de réajustement, est donc postérieure ; on peut considérer qu'elle est contemporaine de l'environnement actuel et qu'elle n'est donc pas un "héritage".

Ainsi, une unité de milieu est, la plupart du temps, une combinaison de caractéristiques dont certaines sont anciennes, d'autres récentes et d'autres encore issues de l'environnement actuel. Il y a des héritages que les processus fonctionnels actuels peuvent "traverser".

2. Différents types d'évolution

Un paysage morpho-pédologique, ou une unité de milieu particulière, peuvent être plus ou moins en équilibre avec leur environnement. Comme tout système ouvert, le paysage a deux modes d'existence possible : le maintien ou le changement. Le maintien dans son ensemble est rare, car les unités de milieu ne sont généralement pas au même stade (certaines changent, d'autres se maintiennent). Ainsi le milieu peut être :

- en équilibre dynamique (stabilité),
- en déséquilibre potentiel ("pénéstabilité"),
- en déséquilibre manifeste (instabilité).

L'équilibre "dynamique"

Il correspond au maintien dans le temps de la forme, de la cohérence et de la structure du milieu. Pour qu'une telle stabilité soit atteinte, il faut que l'environnement "informe" le milieu depuis suffisamment longtemps sans perturbation significative, de façon à ce que les interactions (rapports de forces entre flux de l'extérieur et processus internes) aient trouvé "l'équilibre". A ce moment là, les flux de matière et d'énergie arrivant dans le milieu assurent simplement le fonctionnement interne nécessaire au maintien de la structure. Cette régulation repose sur un "système" de rétroactions négatives qui évitent "l'emballement" du système, c'est – à – dire sa tendance à la destruction plus ou moins rapide et la convergence vers un autre état de stabilité.

Un exemple de paysage stable en équilibre avec son environ – nement, est le système "collines en demi – oranges/bas – fonds" en région intertropicale humide sur socle stable. Nous avons vu précédemment (Madagascar) en quoi consistait cet équilibre, de quelles interactions et rétroactions il était tributaire.

Naturellement la notion de stabilité est relative à *l'échelle de temps* considérée. A notre échelle, on considérera qu'un milieu est stable si on n'y repère pas de processus de changement à court terme, directement perceptibles, tels que les processus hydrodynamiques et morphodynamiques. Pour nous, une unité dont le sol continue de s'approfondir ou de se lessiver peut être considéré comme stable, alors qu'à l'échelle du quater – naire elle n'a pas atteint son équilibre, le sol s'épaississant et s'acidifiant lentement sans que les processus soient en réalité perceptibles.

La notion de stabilité est également relative à *l'espace*. Une unité de milieu peut être "grignotée" en périphérie par des processus remontants ou centripètes (front d'érosion par exemple), alors que sa partie centrale possède une stabilité "en sursis" pendant un certain temps. On n'est même pas sûr que le front d'érosion détruira un jour l'ensemble de l'unité. Il y aura peut – être des processus de rétroaction négative qui

s'opposeront au recul du front, comme nous l'avons vu précédemment.

En fait, en dehors de cas évidents (remblaiement deltaïque, *bad-lands* ...), il est toujours difficile d'apprécier, au delà de notre échelle temporelle, la stabilité ou l'instabilité d'une unité de milieu :

- Est-ce qu'un sol s'approfondit ?
- Une formation végétale est-elle climacique ou en régression ?
- Une nappe phréatique, au-delà de ses fluctuations visibles, est-elle en phase de descente ?
- Une terrasse alluviale est-elle déjà une terrasse "ancienne" ou est-elle encore susceptible d'être alimentée ?
- Un talus de bowal est-il figé (rétroactions négatives) ou continue-t-il de reculer ?
- La profondeur d'une discontinuité "planique" est-elle fixe pour un milieu donné ?
- Se forme-t-elle *"per descensum"* ou *"sui generis"* ?

Nous avons vu que même en cas d'érosion en nappe, il pouvait y avoir un équilibre dynamique "stabilité d'un système ouvert" si le décapage est, globalement dans l'unité de milieu, compensé par l'approfondissement du front d'altération.

Le déséquilibre

Un milieu stable, agressé par l'environnement et dont la cohérence interne est insuffisante pour y résister, évoluera vers un autre état stable, en passant par des processus de réajustement. La même idée peut être exprimée en disant que les interactions milieu/environnement l'emportent sur les interactions internes du milieu dont la "capacité homéostasique" est dépassée. Un milieu ayant une très faible capacité homéostasique est très fragile. Un petit changement extérieur le modifiera. On dit souvent que dans ce cas, il est "pénéstable".

Par exemple, une colline ferrallitique forestière à bon stock organique est pénéstable. Le défrichement et la mise en culture la "dégraderont" très vite par minéralisation accélérée

de la matière organique, acidification rapide, érosion. Un vertisol résiste mieux et se dégrade moins vite.

Comme la notion de stabilité, celle de déséquilibre est relative au temps. On est sûr de l'instabilité d'un milieu lorsque ses "stocks" (au sens large) et son organisation interne se modifient irréversiblement à un rythme repérable par l'homme.

Un milieu stable ne modifie pas ses "réserves", malgré les flux d'entrée et de sortie. Ainsi un sol ferrallitique déforesté et cultivé (en cours de "dégradation"), perd sans contreparties matière organique, éléments minéraux et matière minérale solide ; sa structure devient massive. Pour essayer de contrecarrer cette dégradation, il faut injecter des "intrants" (fertilisants, amendements calcaires et organiques, plantes fixatrices d'azote, engrais verts ...) et éventuellement une nouvelle structure par gestion adéquate de l'espace (système de cultures, bandes anti-érosives, agroforesterie ...).

Un exemple, à Madagascar, de couples de milieux fortement instables à notre échelle temporelle est constitué par le système associant collines d'altérites éventrées en *lavaka* (ravins géants en spatules)/épandages de *baibohos* (alluvions micacées). Ce système dérive du couple stable à notre échelle (mais en évolution à un pas de temps plus long) associant : "collines en demi-orange"/plaine de "fluage". Au lac Alaotra, les deux systèmes coexistent : le premier dans les zones à rejet tectonique très récent, le second dans les zones non tectonisées. Cet exemple est très intéressant, car il nous montre, presque côte à côte, deux types d'évolution à partir d'états initiaux identiques :

. **l'une lente** : il s'agit d'une instabilité "douce" de genèse continue des modelés, des matériaux et des sols par des processus interactifs géochimiques, hydrologiques et hydro-dynamiques, imperceptibles directement. La perturbation de l'environnement, à l'origine de cette évolution est *l'usure progressive* du seuil rocheux en aval.

. **l'autre très rapide** : il s'agit d'une instabilité "brutale", catastrophique, discontinue. En amont, les collines pourries jusqu'au coeur s'éventrent brusquement et se vident à

chaque évènement d'une quantité énorme d'altérites. Symétriquement, en aval les produits s'étalent en se triant granulométriquement. La dissipation brutale de l'énergie potentielle du milieu amont sert d'énergie mécanique pour organiser tout aussi brusquement le milieu aval. Dans les deux cas l'eau sert d'agent mobilisateur des matériaux. Ici la perturbation de l'environnement à laquelle le paysage répond est un mouvement tectonique soudain et de relative faible durée.

Ces deux types d'évolution, l'un très lent, l'autre très rapide, sont un peu les extrêmes que l'on rencontre dans les paysages naturels. Dans la plupart des cas, les possibilités d'appréhension des processus par l'observateur se situent entre ces deux extrêmes.

CONCLUSION

Nous avons tenté de justifier pourquoi et comment on peut appréhender le paysage morphopédologique comme un système spatio-temporel ouvert soumis à des échanges permanents avec "l'extérieur", lui-même fluctuant. Les éléments du système sont les "unités de milieu", regroupées en classes-repères définies par des "caractéristiques" qui sont des modalités spécifiques des composantes pertinentes du paysage considéré, interdépendantes et toujours associées de la même façon.

Les unités de milieu sont en relations spatiales, leur arrangement définissant la "structure" du paysage. Quant à la genèse, aux transformations et à l'évolution du paysage, elles sont assurées par le fonctionnement du système qui est traversé par de multiples flux de matière et d'énergie, en provenance de l'environnement extérieur (climat, niveaux de base, tectonique, homme ...).

Les unités de paysage sont le siège de nombreux processus en interactions et rétroactions assurant, soit leur maintien, soit leur changement. Ces changements sont des réponses, souvent décalées par rapport à l'espace et au temps, aux variations externes du système, qui l'alimentent en matière, énergie et informations.

Certains concepts issus de la théorie de l'information (SHANNON et WEAVER, 1949) et de la théorie de la cybernétique (initiée par WIENER

en 1948 et ASHBY en 1958) étroitement associés à l'approche systémique, semblent pouvoir s'appliquer avec profit à la compréhension de la dynamique du paysage.

BIBLIOGRAPHIE

ASHBY (W.R.), 1958 – General systems theory as a new discipline. General systems yearbook, 3.

KILIAN (J.), 1974 – Etude du milieu physique en vue de son aménagement – Conceptions de travail – Méthodes cartographiques. *L'Agron. Trop.*, vol 29(2–3) : 141–153.

RAUNET (M.), 1984 – Le milieu physique de la région du lac Alaotra (Madagascar). Système et structure. Doc. IRAT, 226 p. + 2 cartes 1/50 000.

RAUNET (M.), 1985 – Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar – géomorphologie – géochimie – pédologie – hydrologie. *Z. Géomorph.* NF. Supp. Bd., 52 : 25–62.

RAUNET (M.), 1985 – Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. *L'Agron. Trop.*, 40(3) : 181–201.

SHANNON (C.) & WEAVER (W.), 1949 – A mathematical theory of communication. 11e ed., 1967. Urbana, Illinois, University of Illinois Press, 125 p.

TRICART (J.), 1974 – De la géomorphologie à l'étude écographique intégrée. *L'Agron. Trop.*, 29(2–3) : 122–132.

WIENER (N.), 1948 – Cybernetics. Hermann, Paris.

L'ORGANISATION DES SOLS ET LA DYNAMIQUE DES NAPPES PERCHEES SEMI-PERMANENTES : UN LIEN FONCTIONNEL ET UN ATOUT AGRONOMIQUE POUR LES CULTURES DE CONTRE-SAISON

S. WOROU

Institut National des Sols - ORSTOM - BP 375 - Lomé - TOGO

RESUME

Une étude fine de l'organisation des sols sur la station de recherche agronomique d'Ativémé a permis de constater qu'il existe des nappes perchées semi-permanentes associées à certaines couvertures pédologiques. L'étude de la dynamique de ces nappes autorise la culture du maïs de contre-saison.

L'étude toposéquentielle des sols de la station a permis de distinguer trois grands domaines : le domaine amont, le domaine médian et le domaine aval.

Le domaine amont est constitué d'un ensemble très hétérogène où les sols varient latéralement en quelques mètres. Un des éléments qui varie le plus fortement est la texture du sol : des sols sableux sont juxtaposés à des sols argileux et il est courant que la texture des horizons de surface passe de 10 à 30 % d'argile sur moins de 10 m de distance. Le domaine médian se caractérise essentiellement par un horizon sableux épais homogène. Cette épaisseur passe par un maximum de 150 cm en rupture de pente. C'est dans cet horizon sableux reposant sur des matériaux compacts que se constitue une accumulation d'eau utilisable pour les cultures en contre-saison. Le domaine aval se distingue par l'amincissement des horizons sableux et une remontée vers la surface des horizons d'altération qui contiennent du sodium, élément toxique pour certains végétaux et qui provoque une prise en masse des sols.

L'étude de la dynamique de la nappe a été abordée par des mesures piézométriques et par l'établissement d'un certain nombre de documents (carte topographique, carte de profondeur d'apparition de la nappe, etc...).

L'expérimentation de la culture du maïs de contre-saison a été entreprise au mois de novembre en pleine grande saison sèche. En dehors des 25 mm de pluie enregistrée trois jours avant le semis, qui a sans doute favorisé la levée, il n'est plus tombé une goutte d'eau durant tout le cycle végétatif du maïs. Les observations phénologiques effectuées sur le maïs ont permis de subdiviser la surface cultivée en 3 parcelles correspondant à des niveaux de rendement différents. Dans la première parcelle les plants enroulaient leurs feuilles au milieu de la journée pendant la floraison. Dans la 2ème parcelle, les plants ont moins souffert du stress hydrique et dans la 3ème parcelle l'alimentation en eau a été satisfaisante.

L'influence du stress hydrique a été apprécié en superposant la carte de profondeur de nappe à la carte de la surface cultivée avec ses trois parcelles de maïs. Nous avons alors constaté que dans la première parcelle où le maïs a été affecté par le stress hydrique, la nappe se situait à 70 cm de profondeur deux semaines après le semis. Le rendement obtenu n'est que de 2,4 q/ha. Dans la deuxième parcelle la nappe était à 60 cm et le rendement est passé à 8,7 q/ha. La troisième parcelle, où le maïs n'a pas du tout souffert, correspond au rendement maximum : 17,8 q/ha. Toutes les parcelles ayant reçu la même fertilisation et les mêmes traitements, nous pouvons conclure qu'il existe bien une relation entre la profondeur de la nappe et le rendement du maïs.

INTRODUCTION

Une étude de la dynamique des nappes perchées semi-permanentes, suivie d'une expérimentation de culture de maïs de contre-saison a été réalisée au Togo méridional, sur la station de recherche agronomique d'Ativémé. Cette station est située à une cinquantaine de kilomètres au nord-ouest de Lomé, à l'est de la plaine alluviale du Zio, le plus grand fleuve de la région. Elle couvre une superficie de 40 hectares et son altitude moyenne est de 100 m (fig. 1).

Le Togo méridional jouit d'un climat équatorial de type soudano-guinéen caractérisé par quatre saisons (2 saisons pluvieuses et 2 saisons sèches de durées inégales). La pluviosité moyenne annuelle oscille entre 1 000 et 1 100 mm. La grande saison des pluies, qui s'étale de mi-mars à mi-juillet, ne pose pas trop de problèmes pour l'agriculture, car la pluviosité est généralement suffisante (450 à 500 mm). Par contre la petite saison pluvieuse, qui apparaît vers le début de septembre et se termine vers la

mi – novembre, est très aléatoire avec des quantités d'eau (250 à 300 mm) inférieures aux besoins du maïs (estimés à 350 mm). Cette culture, très largement pratiquée dans le sud Togo, ne fournit des rendements acceptables qu'une année sur cinq pendant la petite saison pluvieuse.

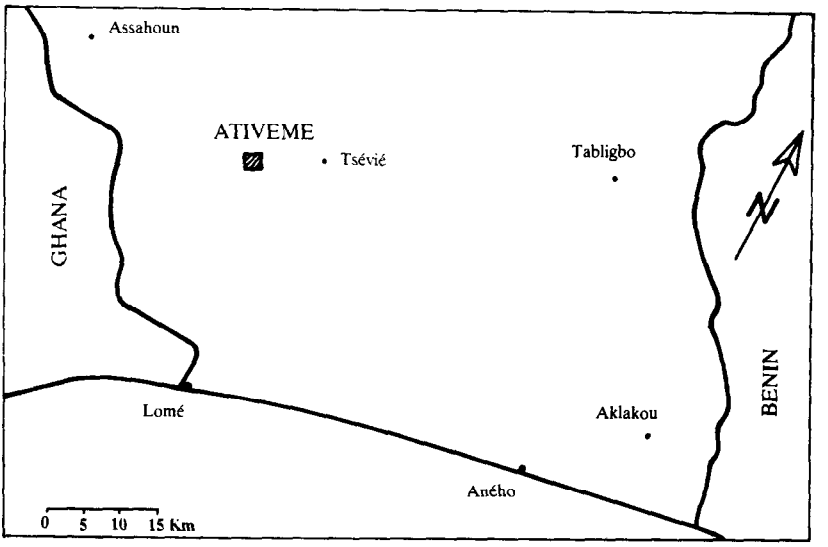


Figure 1 : *Situation de la station d'ATIVEME*

Sur le plan géologique, la station est située à la limite méridionale d'un socle granito – gneissique couvrant environ la moitié de la superficie du pays (LEVEQUE, 1975 et 1979). Ce socle appartient dans sa presque totalité à des formations très anciennes (séries précambriennes) constituées de gneiss et de micaschistes de compositions diverses. Il est constitué dans la zone d'étude d'un gneiss riche en ferromagnésiens donnant fréquemment naissance à des altérites à caractères vertiques plus ou moins marqués (POSS, 1984). L'alternance des phases sèches et des phases humides est favorable à une pédogenèse de type ferrugineux caractérisée par une individualisation et une redistribution du fer et de l'argile à l'intérieur des horizons et des profils. L'apparition dans le paysage des oxydes de fer sous forme de nodules ou de carapace est courante.

I – ORGANISATION GENERALE DES SOLS

Les sols dérivent d'un gneiss hétérogène formé de bancs redressés d'orientation approximative S.W. – N.E. de largeur métrique à pluridécamétrique (SYLVAIN *et al.*, 1986). Des différences dans la composition minéralogique des bancs déterminent une grande variabilité latérale des sols. L'étude toposéquentielle très détaillée des sols de la station a permis de distinguer trois grands domaines (fig. 2) :

- le domaine amont,
- le domaine médian,
- le domaine aval.

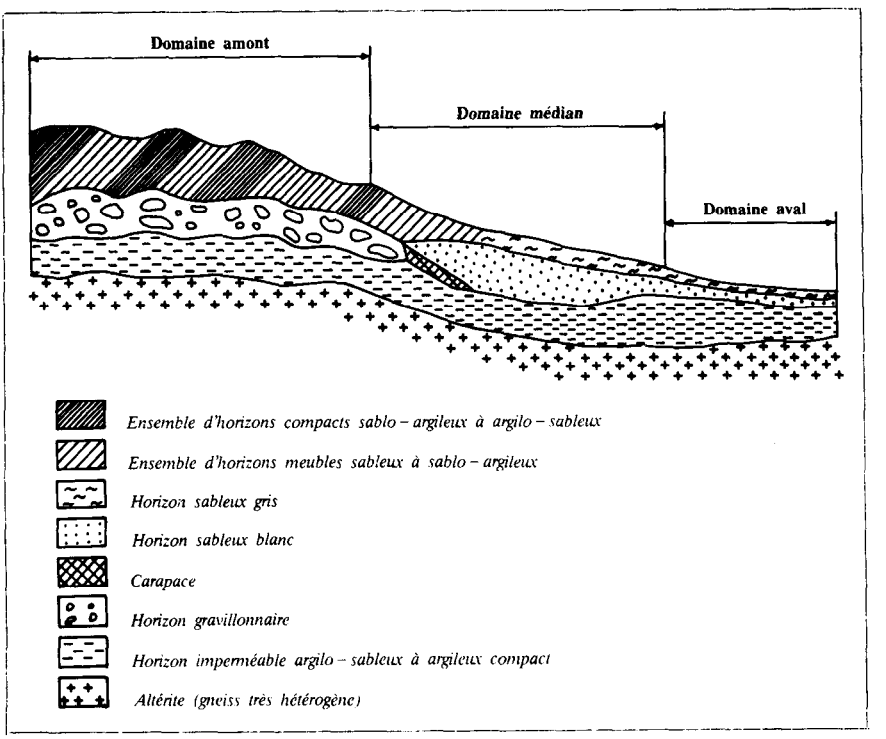


Figure 2 : *Coupe schématique de la toposéquence étudiée*

1. Le domaine amont

Il est constitué d'un ensemble très hétérogène où les sols varient latéralement en quelques mètres. Un des facteurs qui varie le plus fortement est la texture du sol : des sols sableux sont juxtaposés à des sols argileux et il est courant que la texture des horizons de surface passe de 10 à 30 % d'argile sur moins de 10 m de distance. Cette hétérogénéité du domaine amont se retrouve également dans la couleur du matériau et les taches d'hydromorphie. On retrouve dans les profils des éléments grossiers constitués de concrétions ferrugineuses, de graviers et de cailloux plus ou moins roulés. Ces cailloux sont la seule trace de l'ancienne phase alluviale qui est à l'origine du modelé : en effet la texture des horizons supérieurs semble en étroite liaison avec la nature de l'altérite et non pas liée à des dépôts.

2. Le domaine médian

On retrouve à l'amont du domaine médian la même hétérogénéité que dans le domaine amont. Mais cette hétérogénéité s'estompe vers l'aval au profit d'un horizon sableux homogène dont l'épaisseur passe par un maximum de 150 cm en rupture de pente. C'est là que se constitue une accumulation d'eau utilisable pour des cultures de contre-saison. L'horizon sableux repose sur un support imperméable (carapace ferrugineuse colmatée par l'argile illuviale à l'amont, puis un horizon argilo-sableux ou argileux compact plus à l'aval).

3. Le domaine aval

Il se caractérise par l'amincissement des horizons sableux et une remontée vers la surface des horizons d'altération. Les sols de ce domaine présentent une forte contrainte pour l'agriculture. Ils sont submergés pendant une partie de la saison des pluies et se dessèchent rapidement dès le début de la saison sèche. De plus, les horizons d'altération contiennent du sodium, élément toxique pour certains végétaux et qui provoque une prise en masse des sols.

L'horizon sableux des domaines médian et aval du versant correspond à un horizon éluvié souvent décrit en Afrique soudanienne depuis les travaux de BOULET (1974), et constitue

souvent la composante la plus active des systèmes pédologiques. Les résultats obtenus sur le site d'Ativémé concernant la dynamique et l'utilisation de cet horizon sont donc susceptibles d'une large extrapolation.

II – DYNAMIQUE DES NAPPES PERCHEES SEMI – PERMANENTES

L'hétérogénéité du domaine amont se retrouve dans le régime hydrique des sols : une nappe se crée dès le début de la saison pluvieuse dans les zones de sols sableux, plus tardivement là où les horizons de surface sont sablo – argileux ou argilo – sableux. Dans ce dernier cas, on constate sous cultures un ruissellement assez important au moment des averses. Le ruissellement s'accentue sur le versant où il se manifeste d'abord par des traces d'érosion en nappe et en rigoles, puis par des dépôts sableux en aval de la rupture de pente. L'horizon sableux du domaine médian reçoit ainsi un important apport d'eau et de particules en suspension venant de l'amont par ruissellement. Dans cet horizon sableux, qui repose sur un support imperméable, une nappe se forme dès les premières pluies et se maintient longtemps pendant la saison sèche, parfois jusqu'à la saison des pluies suivante. Il est également possible qu'une partie des eaux infiltrées à l'amont rejoigne cette nappe du domaine médian du versant.

Le domaine aval, avec sa pente faible et son horizon sableux peu épais, présente un régime hydrique saisonnier très contrasté : apparition de la nappe au milieu de la saison pluvieuse, submersion, puis dessèchement poussé en saison sèche.

Le domaine aval apparaît donc difficilement utilisable sans contrôle du plan d'eau (position basse, réservoir limité, contraste saisonnier). Le domaine amont est hétérogène et la nappe phréatique y est fugace. Par contre le domaine médian ménage un réservoir d'eau important et assez proche de la surface, qui se maintient durablement après la grande saison des pluies. Ce domaine apparaît donc intéressant pour les cultures de contre – saison. C'est pourquoi une étude de la dynamique des nappes et un essai agronomique de maïs de contre – saison ont été réalisés.

III – ETUDE DETAILLEE DES NAPPES PERCHEES SEMI-PERMANENTES DU MILIEU DE VERSANT

Pour comprendre la dynamique des nappes perchées semi-permanentes du domaine médian, nous avons réalisé un certain nombre de cartes à très grande échelle (1/1 000e) dans une partie des domaines médian et aval du versant (fig. 3) :

- une carte des nappes,
- une carte topographique,
- une carte de profondeur des nappes.

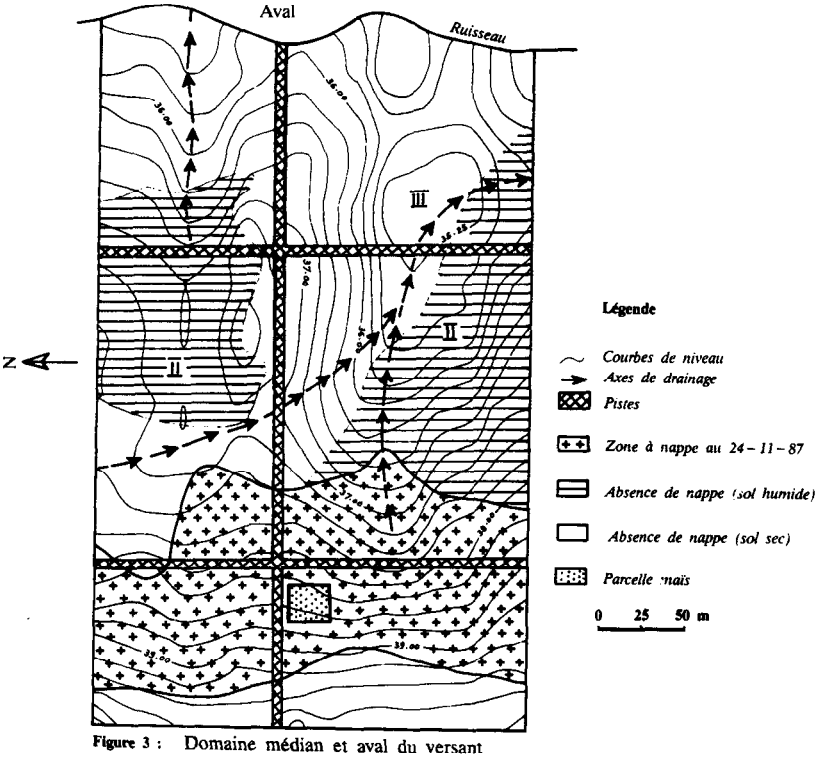


Figure 3 : Domaine médian et aval du versant
Carte topographique et localisation des nappes au 24-11-87

Figure 3 : *Domaine médian et aval du versant*

La carte des nappes avait pour objectif la délimitation des zones couvertes par les nappes au coeur de la grande saison sèche (novembre 1987). Deux zones ont été reconnues :

- une zone où les nappes sont encore présentes (sables épais du milieu de versant) ;
- une zone où les nappes sont absentes. Dans cette deuxième zone, on peut distinguer deux sous-zones :
  . une sous-zone humide qui traduit un retrait récent des nappes et qui correspond aux sables moyennement épais (60-80 cm) et aux axes de drainage ;
  . une sous-zone complètement asséchée. C'est le domaine des sables peu épais (< 50 cm).

La carte topographique a été réalisée au clisimètre avec une équidistance des courbes de 25 cm. Elle a permis d'étudier les écoulements superficiels et de mettre en évidence les différents axes de drainage des domaines médian et aval du versant. Nous observons sur le document trois axes de drainage. Les deux premiers, qui prennent naissance à des endroits différents, se rejoignent à l'aval au sud-est de la station pour constituer une zone marécageuse. Le troisième axe apparaît au nord-est de la station dans le domaine aval. Il draine directement les eaux vers le ruisseau qui limite la zone à l'est.

La carte de la profondeur des nappes a été obtenue en mesurant la profondeur de l'eau par rapport à la surface du sol et en joignant les points d'égale profondeur. Le document obtenu a pour but d'établir la relation entre la croissance du maïs et la profondeur d'apparition de la nappe.

Il apparaît à l'issue de cette étude détaillée de la dynamique des nappes que ces dernières sont en liaison étroite avec la couverture pédologique et la position topographique.

Dans le domaine amont du versant, les nappes apparaissent plus rapidement dans les sols à horizons sableux en surface parce qu'une grande partie des eaux qui tombent s'infiltre dans le sol et demeure bloquée par les horizons imperméables à moyenne profondeur. Dans les horizons plus argileux, la faible perméabilité du matériau entraîne un ruissellement très important. La nappe s'installe plus tardivement, c'est-à-dire au milieu de la saison des pluies.

Sur le versant, la nappe se crée d'une part par apport d'eau par ruissellement en provenance de l'amont, d'autre part par les eaux d'infiltration. Son maintien est lié à la présence, sous les horizons sableux de surface servant de réservoir, d'un plancher argileux ou d'une carapace à faible pente.

Si ces horizons sableux sont épais, la nappe se maintient presque toute la saison sèche. En aval du versant les horizons sableux sont peu épais (30 – 50 cm), ce qui se traduit par un réservoir faible. Les nappes disparaissent très rapidement après la saison des pluies, alors que le domaine médian, avec un horizon sableux épais (100 – 150 cm), offre un réservoir important. C'est cette partie qui permet des cultures de contre – saison. Cette zone couvre 4 ha et représente un dixième de la superficie de la station.

IV – EXPERIMENTATION MAIS DE CONTRE – SAISON

L'essai de culture de maïs de contre – saison a été installé dans le domaine médian du versant (zone à nappes perchées semi – permanentes). Le semis a été effectué à plat le 10 novembre 1987 en pleine saison sèche avec la variété IKENNE 81 – 49 – SR (cycle de 100 jours), à une densité de 42 000 pieds à l'hectare, sur une superficie de 500 m^2 et avec une fumure de 110 N – 40P – 40K à l'hectare.

Deux jours avant le semis, nous avons enregistré une pluie de 25 mm qui a certainement favorisé la bonne levée du maïs. Durant le reste du cycle végétatif il n'est pas tombé une goutte d'eau. Le maïs a donc été alimenté par environ 300 mm d'eau provenant des nappes.

Les observations phénologiques effectuées en cours de végétation ont permis de constater qu'au 10ème jour après le semis une différence dans la croissance des plants apparaît. Dans les positions topographiques légèrement plus hautes (différence de niveau de quelques centimètres seulement), les plants sont plus vigoureux et plus verts. Dans les endroits légèrement plus bas (taches d'hydromorphie visibles dès la surface), les plants sont moins vigoureux, moins verts et moins hauts. La différence s'est estompée après un complément azoté un mois après le semis.

Environ 40 jours après le semis, certains plants présentent un enroulement de leurs feuilles tous les jours au milieu de la matinée. Il s'agit d'une réaction de la plante au stress hydrique. Ce phénomène est d'autant plus important pour la physiologie de la plante qu'il survient au début de la floraison. La floraison et l'épiaison se sont déroulées normalement dans les endroits où le régime hydrique n'a pas été déficient. En revanche, dans les zones affectées par le stress hydrique, les plants ont fleuri mais l'épiaison n'a pas suivi.

Les différentes observations phénologiques ont permis de subdiviser la surface cultivée en trois parcelles correspondant à des niveaux de rendement différents (fig. 4) :

- parcelle I : maïs très affecté par le stress hydrique : rendement 2,4 q/ha ;
- parcelle II : maïs moyennement affecté par le stress hydrique : rendement 8,7 q/ha ;
- parcelle III : maïs bien alimenté en eau : rendement 17,4 q/ha.

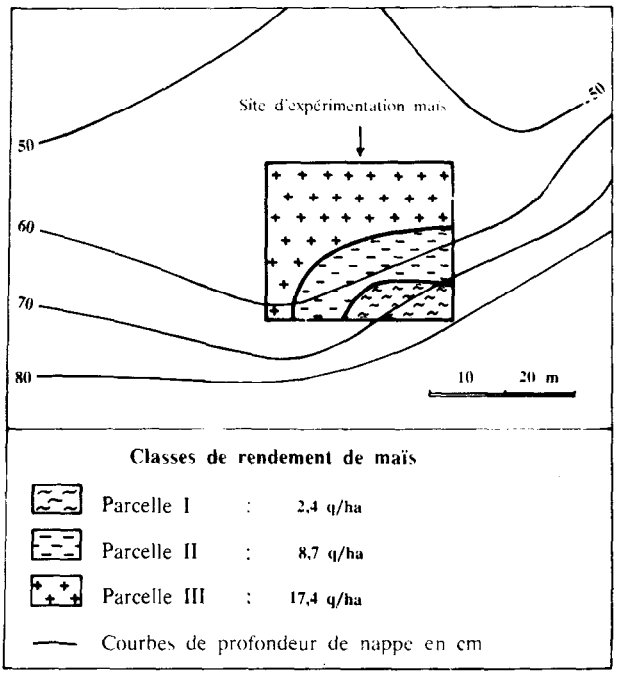


Figure 4 : *Rendements et profondeur de la nappe en cm*

Le travail de cartographie détaillée ayant montré la grande homogénéité latérale des horizons sableux, et toutes les parcelles ayant reçu la même fertilisation et les mêmes traitements agronomiques, les différences de rendement sont principalement liés aux stress hydriques survenus en cours de végétation.

L'influence de la profondeur de la nappe sur les stress hydriques, et donc sur le rendement, a alors été étudiée en superposant le plan des parcelles de maïs et ses différents rendements à la carte de la profondeur de la nappe.

Nous constatons que la parcelle où le rendement a été le plus faible (parcelle I) correspond à une zone où la nappe se situait à 70 cm de profondeur deux semaines après le semis. A ce stade, les racines du maïs ne dépassent guère 20 cm. Les remontées capillaires étant faibles dans ces sols à sables grossiers, il devenait de plus en plus difficile à la plante d'extraire l'eau du sol à mesure qu'elle se développait. Le sol se desséchait en surface et les racines n'étaient pas parvenues à la frange capillaire. Le maïs a réagi à cette situation en enroulant ses feuilles dans la journée au début du stress. Lorsque le phénomène s'est aggravé de nombreux plants ont fini par périr. Le rendement obtenu n'est que de 2,4 q/ha.

Dans la zone intermédiaire (parcelle II), la nappe se trouvait à 60 cm de profondeur deux semaines après le semis. Le maïs a été affecté par le stress hydrique, mais dans une moindre mesure. Le rendement obtenu est de 8,7 q/ha.

Une différence de 10 cm d'eau deux semaines après le semis a donc suffi pour multiplier le rendement par trois (2,4 à 8,7 q/ha).

La dernière parcelle (parcelle III) n'a pas du tout souffert du manque d'eau. La nappe était à 50 – 60 cm de la surface deux semaines après le semis. Cette parcelle correspond au rendement maximum (17,4 q/ha).

CONCLUSION

L'organisation de la couverture pédologique de la station de recherche agronomique d'Ativémé comprend des horizons où s'établit une nappe

phréatique perchée semi – permanente qui autorise des cultures de contre – saison, mais la pratique de ces cultures reste un exercice assez délicat. En effet, sa réalisation est subordonnée à la présence d'eau dans le sol en dehors des saisons normales de culture ; or cette eau est elle – même fonction de la pluviosité en grande et petite saisons pluvieuses. De plus, de très légères variations au niveau de la profondeur de la nappe (dix centimètres à peine) peuvent entraîner des variations de rendement de plus de 200 %. L'étude fine de la dynamique pluriannuelle de la nappe est donc indispensable pour le choix et l'installation des parcelles de cultures.

Après deux années d'expérimentation en station, les travaux s'orientent actuellement vers des essais en milieu paysan. Une expérimentation similaire à celle d'Ativémé sera entreprise dans le nord du pays à régime pluviométrique monomodal. Si les résultats sont concluants, il sera alors envisagé de passer à la dernière étape, qui est la cartographie des zones à nappes perchées semi – permanentes qui présentent un intérêt économique évident.

BIBLIOGRAPHIE

BOULET (R.), 1974 – Toposéquences des sols tropicaux en Haute – Volta. Equilibres, dynamiques et bioclimatiques. Mém. ORSTOM (Paris) n° 85, 272 p.

LEVEQUE (A), 1975 – Pédogenèse sur le socle granitogneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. ORSTOM Paris, 301 p.

LEVEQUE (A), 1979 – Carte pédologique du Togo au 1/200 000. Socle granitogneissique limité à l'ouest et au nord par les Monts Togo. Note Expl. n° 82, ORSTOM (Paris), 77 p.

POSS (R.), 1984 – Quelques observations sur les sols de la station agronomique d'Ativémé. Rapp. ORSTOM (Lomé), 11 p. multigr.

SYLVAIN (J.P.), AREGBA (A.), ASSIH – EDEOU (P.), CASTAING (C.), CHEVREMONT (Ph.), COLLART (T.), MONCIADINI (C.), MARTEAU (P.), OUASANE I.) & TCHOTA (K.), 1986 – Carte géologique du Togo au 1/200 000. Feuille de Lomé 1ère édition. BRGM – DGMG.

LES SOLS DE LA VALLEE DU MOYEN NIGER : ORGANISATION - TENDANCE EVOLUTIVE ACTUELLE

Y. GUERO
Faculté d'Agronomie - BP 10960 - Niamey - NIGER

RESUME

Par une démarche toposéquentielle, les tendances évolutives des sols développés dans des résidus de vieilles altérations sous climat tropical sec sont dégagées à travers des analyses morphologiques, minéralogiques et géochimiques. L'étude des formes de 3 éléments (Fe, Ca, Na), depuis le moins mobile (Fe) jusqu'au plus mobile (Na), montre une tendance à l'accumulation du calcium et du sodium en bas des toposéquences.

INTRODUCTION

Afin de trouver les processus évolutifs de la couverture pédologique de la vallée du Moyen Niger, les relations qui unissent la géomorphologie et la pédologie doivent être recherchées.

A cet effet, il faut procéder à l'étude des matériaux pédologiques dans les différentes unités paysagiques. A l'aide d'une démarche toposéquentielle, nous nous efforcerons de dégager les sols ayant les caractéristiques morphologiques les plus tranchées. Sur ces sols, certains indices géochimiques seront étudiés pour mieux interpréter les observations morphologiques.

Les toposéquences étudiées sont localisées dans la vallée du Moyen Niger (fig. 1), en plein coeur du Sahel (500 mm de pluie par an, fig. 2).

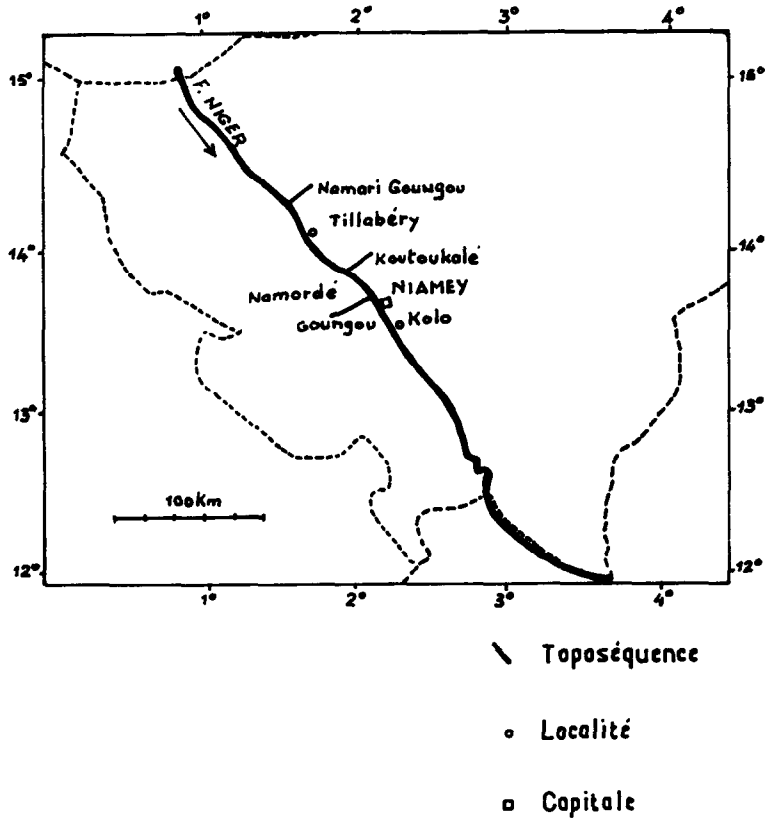


Fig. 1: Localisation des trois toposéquences

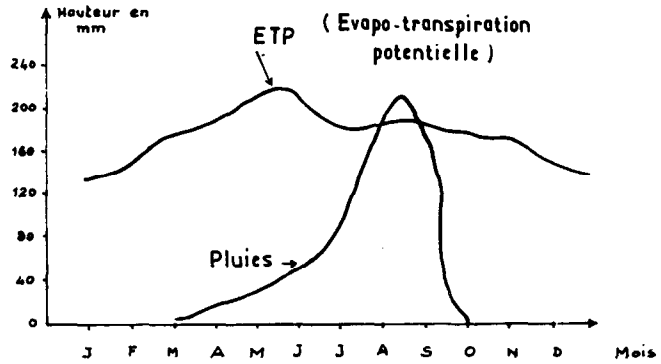


Fig. 2 : Courbes de pluies et d'évapotranspiration mensuelles à Tillabéry

I - LES MATERIAUX PEDOLOGIQUES

La localisation des matériaux pédologiques constitutifs de la couverture pédologique est représentée dans la figure 3.

A la lecture de la figure ci-dessus, il apparaît que le matériau originel de la zone d'étude est un résidu de vieilles altérations constitué d'éléments squelettiques (sables quartzeux, cailloutis et conglomérats).

II - LES SOLS

1. Méthodologie

1.1. Démarche de terrain

Le choix des toposéquences a été guidé par les deux considérations suivantes :

- l'aménagement des bordures du fleuve Niger illustre la problématique posée par la mise en valeur des sols du Niger. La partie amont des toposéquences est occupée par les cordons dunaires souvent exploités en cultures pluviales (mil, niébé), et la partie aval est occupée par une culture irriguée, essentiellement la riziculture. Aussi bien à l'amont qu'à l'aval le principal problème consiste à mieux valoriser le stock hydrique ; dans le premier cas il s'agit d'un manque d'eau accentué par une faible réserve utile, dans le deuxième il peut s'agir d'hydromorphie aggravée par l'apparition d'une salinisation ou d'une alcalinisation dans les alluvions aménagées ;

- l'autre concerne la stratégie à adopter pour étudier les sols du Niger : l'immense étendue du Niger rend toute investigation pédologique systématique et à grande échelle coûteuse et fastidieuse, donc seule l'analyse de toposé-quences sur des sites bien choisis peut aider à mieux approcher l'organisation et le fonctionnement des sols.

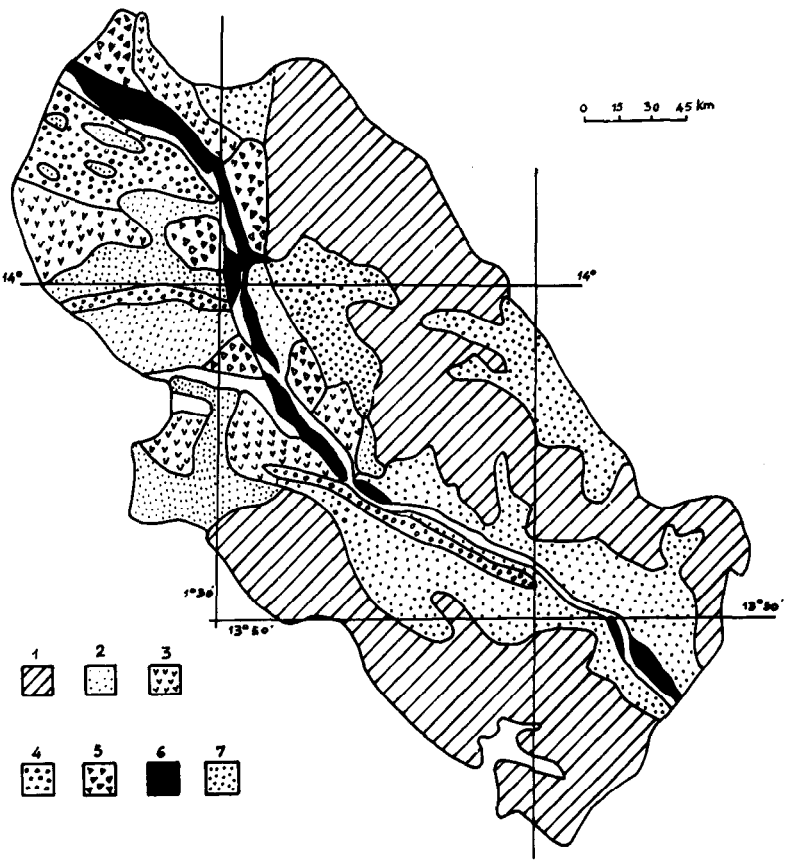


Fig. 3 : Matériaux constitutifs de la couverture pédologique de la zone d'étude

1 : sables ferrugineux sur cuirasses ferrugineuses : 2 : sol ferrugineux sur erg ancien : 3 : colluvions sur schistes : 4 : sables gris de l'erg récent : 5 : sols de glacis : 6 : sols hydromorphes des alluvions du fleuve Niger : 7 : sables des vallées du Moyen Niger

L'étude morphologique des sols est largement inspirée de la démarche par toposéquences développée récemment par BOULET (1975) où le sol, en tant que système, est un milieu organisé et structuré. Cette organisation témoigne de son passé, de sa genèse et elle est l'expression et le vecteur de son fonctionnement actuel (RUELLAN, 1983).

Pour notre part, la toposéquence est définie comme une ligne de fosses d'observation orientée selon la ligne de plus grande pente qui joint le plateau au fleuve.

Dans ce travail, nous avons étudié un nombre restreint de profils représentatifs des principaux types de sols de la couverture pédologique, sélectionnés de la manière suivante :

- Dans la première toposéquence, nous avons caractérisé la morphologie de 11 profils pédologiques et effectué 7 sondages à la tarière. Nous avons ramené ce nombre à 3 fosses pédologiques, qui présentent les différences structurales et texturales les plus nettes. Ces fosses ont été appelées P1, P2 et P3.

- Au niveau de la toposéquence n° 2, nous avons appliqué le même raisonnement, mais en comparant également les fosses de la toposéquence n° 2 aux trois fosses choisies sur la toposéquence n° 1. Dans la toposéquence n° 2, nous avons ouvert 11 profils pédologiques et effectué 7 reconnaissances à la tarière. Ces points ont également été comparés à la toposéquence n° 1. Les fosses retenues sur la toposéquence n° 2 seront appelées P4 et P5.

- Pour la toposéquence n° 3, nous avons adopté le même raisonnement que dans la toposéquence n° 2. Dans cette toposéquence, nous avons ouvert 9 fosses et effectué 9 sondages à la tarière. Nous avons gardé une fosse sur 9 et nous la désignerons P6.

Autrement dit, les fosses n° 7, 8 et 11 de la toposéquence n° 2 sont comparables, par leur traits pédologiques, à la fosse P1 de la toposéquence n° 1.

Le résultat de cette itération est illustré par la figure 4.

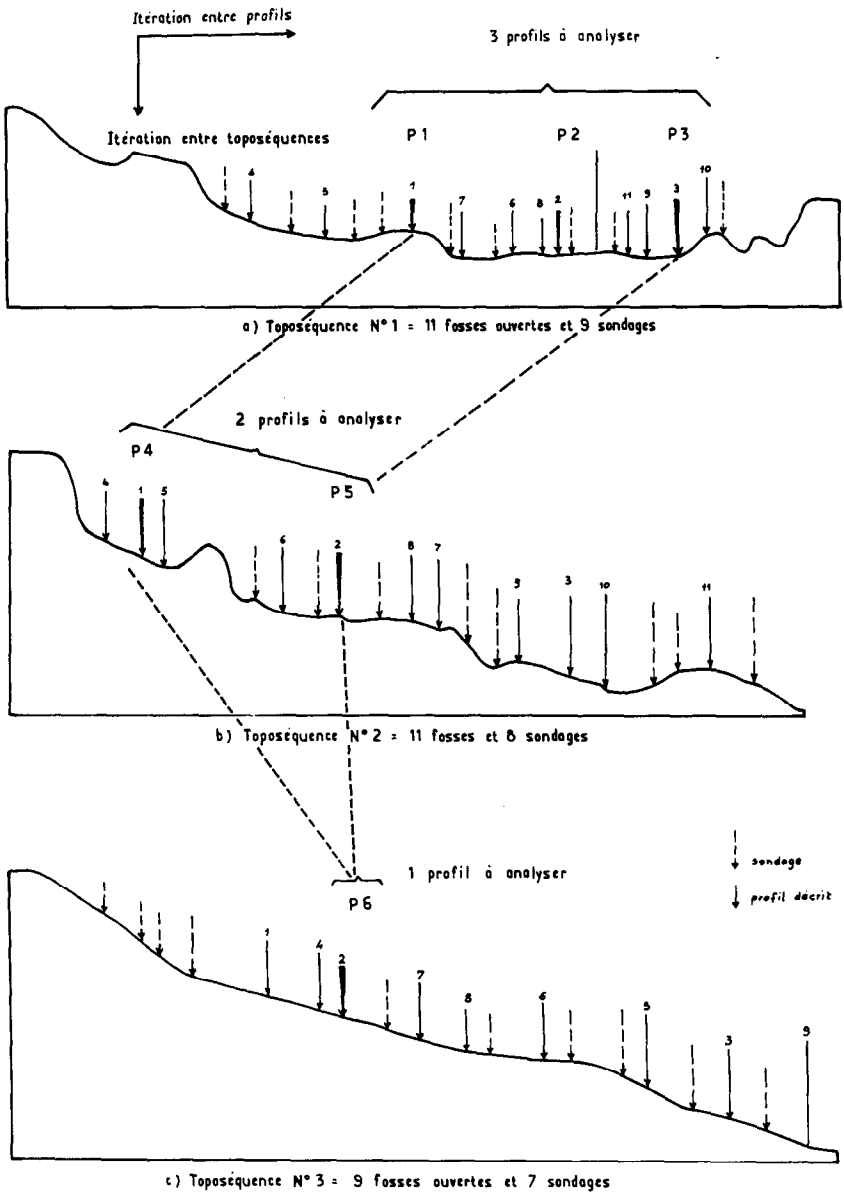


Figure 4 : Résultat de l'itération pour le choix des fosses objet de la caractérisation analytiques

1.2. Méthodes analytiques

Le complexe d'échange

L'extraction des bases est faite à l'acétate d'ammonium. Le calcium et le magnésium sont dosés par complexométrie à l'EDTA, le potassium et le sodium sont déterminés au spectrophotomètre de flamme.

Extraction du fer libre

Les formes amorphes et complexées du fer et de l'aluminium, ainsi que les silico-aluminates amorphes, sont dissous au réactif de Tamm.

Le fer et l'aluminium présents sous forme d'oxydes cristallisés sont extraits au réactif de Mehra-Jackson.

Le calcaire total a été déterminé en comparant le volume de dioxyde de carbone dégagé sous l'action de HCl sur un poids donné de terre, à celui obtenu dans les mêmes conditions avec du carbonate de calcium pur.

Nature des argiles

La nature des argiles a été déterminée par diffraction des rayons X.

2. Résultats - Discussions

2.1. Caractérisation morphologique des sols (fig. 5)

P1 : Sol brun-rouge normalement drainé, uniformément sableux (sables ocres) et à structure massive fragile. Sur ce matériau sableux remanié, il est difficile de distinguer le caractère faiblement rubéfié ou ferrugineux.

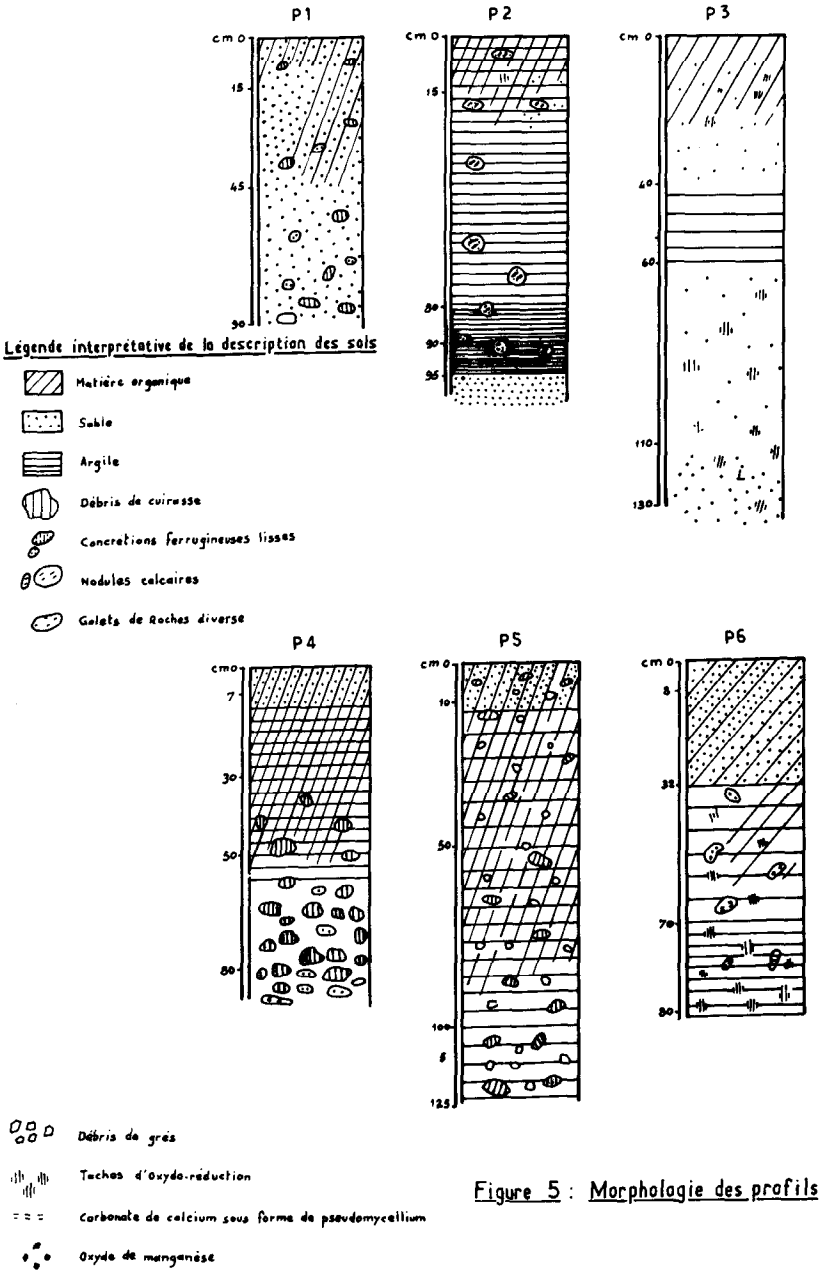


Figure 5 : Morphologie des profils

P2 : Sol hydromorphe vertique à texture franchement argileuse, sous – tendu par une nappe phréatique en charge.

La structure en plaquettes présente en profondeur est probablement un héritage des sédiments qui se trouvent à la base du profil.

P3 : Sol hydromorphe à efflorescences salines blanches et noires en surface. La texture est sablo – limoneuse à limono – argileuse et la structure est massive. Le caractère principal de ce profil est l'apparition d'une salinolyse principale et d'une réduction secondaire du fer et du manganèse.

P4 : Sol peu évolué d'érosion sableux en surface et sablo – argileux en profondeur. La structure est massive, avec une tendance polyédrique en profondeur.

P5 : Sol brun – rouge normalement drainé, sur colluvions de texture sablo – argileuse. La structure est massive à éclats polyédriques.

P6 : Sol halomorphe à efflorescences salines blanches et noires (matière organique solubilisée en milieu alcalin) et nodules calcaires. La texture est sablo – limoneuse à argilo – limoneuse et la structure est massive. La marmorisation traduit un mauvais drainage interne du sol.

2.2. Constitution granulométrique et minéraux argileux

Nous avons procédé à des examens minéralogiques à l'aide de la diffraction des rayons X, horizon par horizon, ce qui permet de suivre la répartition verticale des argiles dans chaque profil.

Le profil P1 est caractérisé par une granulométrie essentiellement sableuse, avec une teneur en argile qui ne dépasse guère 5 %. Cette fraction argileuse est exclusivement de nature kaolinitique.

Le profil P2, formé dans la cuvette alluvionnaire, a une granulométrie plus variable. La teneur en argile passe de 36 % en surface à 46 % en profondeur. Dans ces matériaux, la montmorillonite est dominante en surface et diminue en profondeur au profit de la kaolinite. L'illite est sous forme de traces. On note aussi la présence de matériaux fins constitués de feldspaths.

Le profil P3 est également développé dans les alluvions du lit du fleuve, mais il présente une faible teneur en argile (5 % en moyenne). Les argiles sont principalement de la kaolinite. Les smectites sont sous forme de traces, sauf dans le niveau 40 – 60 cm où elles atteignent des teneurs notables (20 %). L'illite est présente et sa proportion tend à augmenter avec la profondeur, sans jamais toutefois dépasser la valeur de 15 %. On constate l'existence de feldspaths, dont la proportion varie de 10 % en surface à 15 % en profondeur.

Le profil P4 a une teneur en argile variable avec la profondeur (3 % à 20 %). La fraction argileuse est dominée, tout au long du profil, par la montmorillonite, avec un taux moyen de 60 %. Viennent ensuite la kaolonite, avec une proportion de 35 %, puis l'illite, en très faible proportion (5 %). Les feldspaths sont sous forme de traces dans ce profil.

Au niveau du profil P5, dont la teneur en argile augmente avec la profondeur, on note également la prédominance de la montmorillonite (60 %). La kaolinite présente un taux moyen de 35 %, alors que l'illite n'existe que sous forme de traces.

Le profil P6 a une texture sableuse en surface et limoneuse à limono – argileuse en profondeur. Sa minéralogie est dominée en surface par la kaolinite, qui diminue de haut en bas au profit de la montmorillonite. L'illite, qui représente environ 20 % des minéraux en surface, décroît fortement en profondeur (5 %). Les feldspaths sont en proportion élevée dans ce profil (15 %).

L'investigation au moyen des rayons X a permis de montrer que la kaolinite est le minéral argileux dominant dans les sols de la vallée du moyen Niger. Vient ensuite la montmorillonite,

dont le taux dépasse dans certains cas celui de la kaolinite. L'illite présente une faible teneur dans tous les sols. Des feldspaths existent en quantité relativement élevée, notamment dans les profils P3 et P6, où nous avons observé des signes d'alcalinisation ou de salinisation en surface.

Compte tenu de notre niveau d'investigation, la composition minéralogique (kaolinite, montmorillonite et illite) semble relever de l'héritage de matériaux parentaux sédimentaires.

Toutefois des conditions particulières peuvent engendrer des cas de néoformation des smectites. Il a en effet été signalé que la néoformation en zone tropicale à l'aval de séquence de sols est un phénomène fréquent, en particulier en Afrique de l'Ouest (BOULET, 1975).

2.3. Le fer

Le fer est un des constituants essentiels des sols, surtout lorsqu'il s'agit de pédogenèse ferrallitique ou ferrugineuse. De part sa qualité, il détermine, avec la matière organique, la couleur des sols.

Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 6, dont l'examen permet de formuler les observations suivantes :

Dans le profil P1, constitué de matériaux sableux ferrugineux, le taux de fer total est faible : de 0,43 % en surface, il progresse légèrement en profondeur pour atteindre la valeur de 1 %.

Le rapport fer libre/fer total, généralement faible, indique une dynamique du fer très peu active dans les sables, où les processus pédogenétiques sont très réduits. Le fer amorphe étant en très faible proportion, le fer libre est constitué principalement de fer cristallisé.

Au niveau du profil P2 développé dans les alluvions fines du fleuve, le taux de fer total est de l'ordre de 2,1 % en surface. Il augmente régulièrement avec la profondeur pour atteindre 2,5 % à la base du profil.

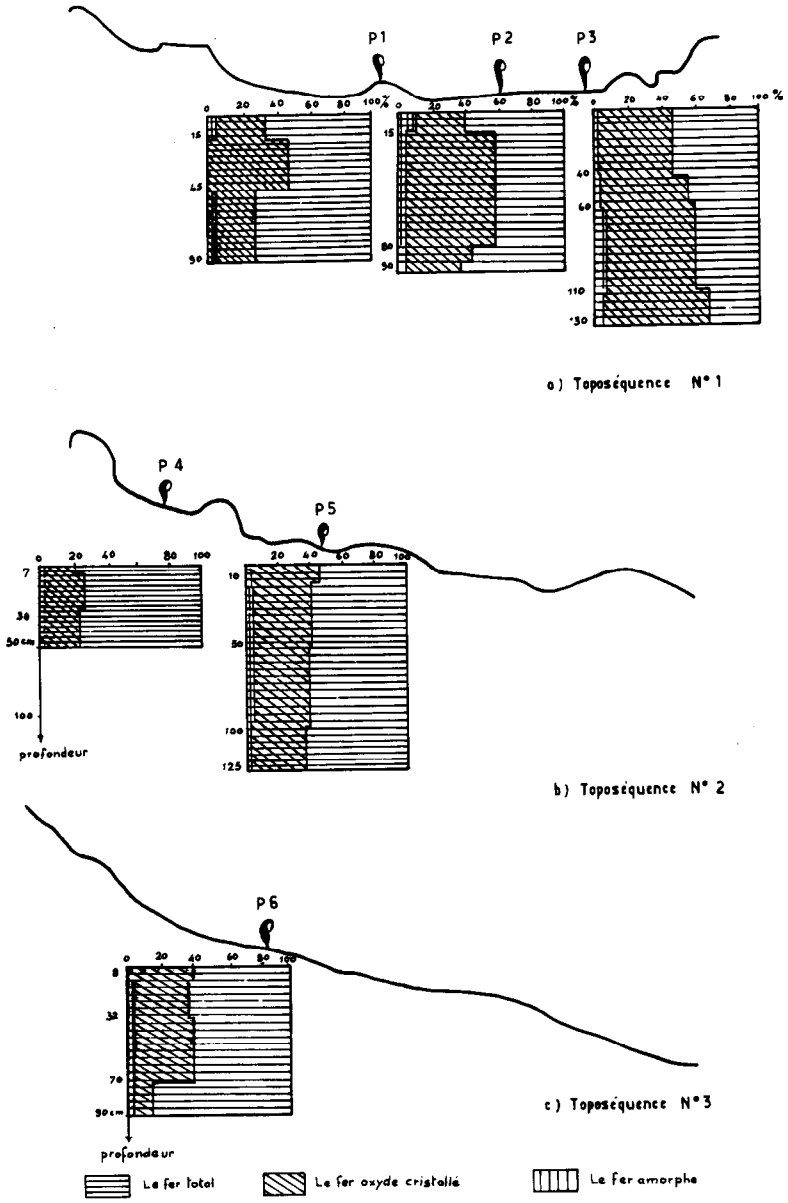


Fig. 6 : Les différentes formes du fer dans les profils

Dans le profil P3, situé dans la cuvette alluvionnaire, les teneurs en fer total les plus élevées sont enregistrées dans les niveaux intermédiaires (2,30 %). L'horizon supérieur et l'horizon inférieur présentent un taux identique de 1,2 %.

Le taux de fer libre croît régulièrement de la surface vers la profondeur, pour atteindre une valeur de 58 %. La teneur en fer amorphe, nettement inférieure à celle du fer cristallisé, augmente le long du profil.

Dans le cas du profil P4, situé sur un glacis érodé, la teneur en fer évolue légèrement de haut en bas (1 à 1,7 %). La phase cristalline et la phase amorphe sont pratiquement constantes tout au long du profil. Le rapport fer libre/fer total est bas (25 % en moyenne). Il témoigne de la faible évolution de ce profil.

Les matériaux ferrugineux du profil P5 présentent une teneur en fer total qui augmente de la surface vers la profondeur (1 à 1,8 %). Le rapport fer libre/fer total est de 45 % en surface. Il diminue légèrement en profondeur (37 %). Le fer libre est essentiellement sous forme cristallisée.

Le profil P6, développé sur des colluvions, présente une teneur en fer total croissant de la surface vers la profondeur (1,3 à 4 %). La proportion de fer libre varie peu tout au long du profil et a une valeur moyenne de 40 %.

De cette étude des différentes formes du fer nous retiendrons que :

- les sols développés dans les argiles de décantation ont les teneurs les plus élevées en fer total, mais ces valeurs sont inférieures à celles des sols ferrugineux tropicaux ;

- le rapport fer libre/fer total, faible ou moyen, traduit une faible évolution des matériaux pédologiques. On note que ce rapport atteint les plus fortes valeurs dans les horizons intermédiaires, ce qui présage de l'existence d'une zone d'altération ;

- le fer libre est essentiellement sous forme d'oxydes cristallisés.

A travers l'étude des indices d'altération définis par les différentes formes du fer, il apparaît que les matériaux pédologiques de la vallée du Moyen Niger ont peu évolué depuis leur mise en place, ce qui nous amène à dire que ces matériaux ont probablement toujours subi un climat à longue saison sèche semblable à l'actuel, très peu favorable à une altération chimique, en dehors des zones d'épandage et de concentration des eaux.

2.4 Les concentrations calcaires

2.4.1. Distribution du carbonate de calcium

Le carbonate de calcium se présente soit en distribution irrégulière, soit en distribution régulière.

La distribution irrégulière a été observée dans les sols peu évolués de glacis, les sols bruns à nodules calcaires et les sols présentant des manifestations salines. Il s'agit de la forme pseudomycellienne, à laquelle s'ajoutent les concrétions calcaires de dimension centimétrique au sein du granite très décomposé.

La distribution régulière se manifeste par la présence de nodules calcaires grisâtres de forme allongée ou sphérique (1 à 5 cm). L'abondance des nodules diminue de la surface vers la profondeur dans les sols P2 et P6.

2.4.2. Variations des teneurs en carbonate de calcium

L'analyse des taux de carbonate de calcium dans les profils, illustrée par la figure 7, montre que dans les matériaux sableux des profils P1 et P5, les teneurs sont nulles. Par contre, au niveau des profils P2 et P3, les teneurs sont notables et décroissent avec la profondeur, mais sans dépasser 2 %, contrairement au profil P4, où elles atteignent 4 %.

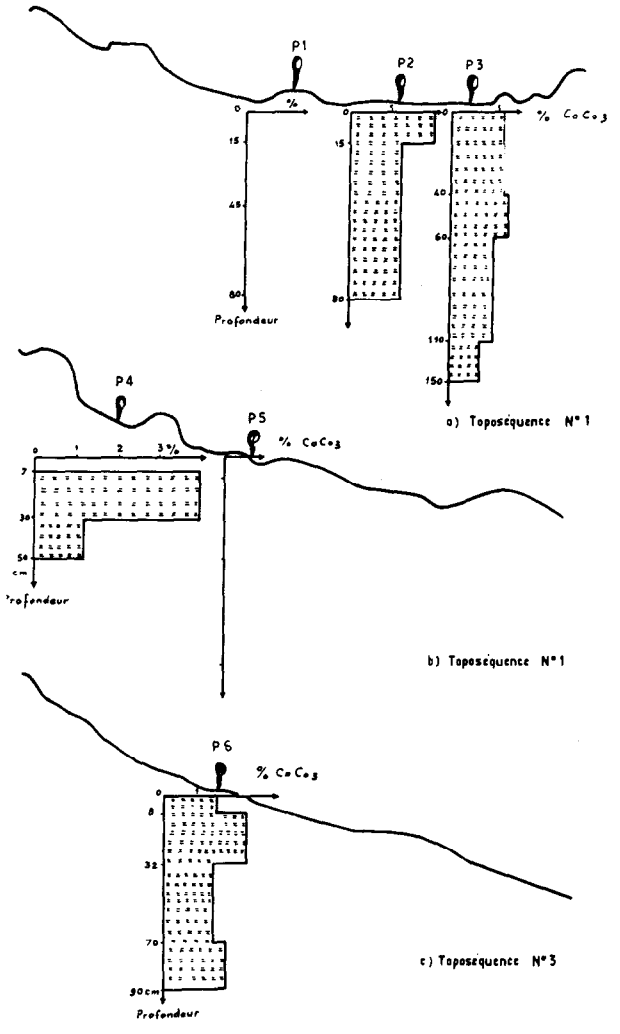


Fig. 7 : Variations des teneurs en $CaCo_3$ total des sols

2.4.3. Interprétation de ces concentrations

Aujourd'hui plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer la mise en place des concentrations calcaires dans les sols. Nous retenons, pour notre part, l'hypothèse *per ascensum* qui attribue à la remontée par capillarité de la solution un rôle majeur. Cette

hypothèse correspond parfaitement au contexte sahélien à déficit hydrique marqué : l'évaporation intense concentre le milieu et le carbonate de calcium est déposé dans les structures d'accueil où son produit de solubilité est atteint. La présence de ces précipitations à proximité de la surface assure une dessication saisonnière favorable à la formation des éléments individualisés en nodules. Dans le cas des poupées calcaires au sein des altérites, il peut s'agir d'épigénie calcaire comme l'a signalé BOULET (1975) dans les sols sur roche – mère granitique de la frange sahélienne du Burkina Faso.

Plus mobile que le fer, le calcium présente donc une dynamique plus active dans la vallée du Moyen Niger. Cette dynamique se traduit par l'accumulation de carbonate de calcium.

2.5. Le complexe d'échange

Les résultats analytiques relatifs au complexe d'échange sont consignés dans le tableau ci – dessous.

De ce tableau on peut tirer les conclusions suivantes :

- les sols représentés par les profils P1, P2, P4 et P5 ont une garniture ionique dominée par le calcium et le magnésium et leur pH est légèrement acide ou neutre,

- par contre, dans les formations pédologiques représentées par les profils P3 et P6, on observe de fortes valeurs en sodium et une réaction fortement basique, synonymes d'une alcalinisation de sol.

Tableau n° 1 – *Bases échangeables dans les sols (mé/100 g)*

Profil	Horizon	Ca	Mg	K	Na
P1	0 – 15	0,69	0,47	0,2	0,05
	15 – 45	1,62	0,43	0,3	0,05
	45 – 90	1,62	0,37	0,2	0,05
P2	0 – 15	4,56	3,0	0,15	0,8
	15 – 80	6,68	3,62	0,32	1,85
	80 – 90	5,56	2,75	0,25	2,02
	90 – 95	1,81	1,06	1,10	1,70
P3	0 – 40	3,00	0,34	5,15	8,30
	40 – 60	1,68	0,37	5,70	11,73
	60 – 110	3,43	1,18	4,81	8,70
	110 – 130	0,40	0	1,05	2,70
P4	0 – 7	2,12	0,50	0,67	0,50
	7 – 30	8,73	0,81	0,48	0,50
	30 – 50	15,37	2,75	0,55	0,1
P5	0 – 10	1,08	0,81	0,42	0,07
	10 – 50	4,56	1,94	0,50	0,12
	50 – 100	4,75	1,60	0,40	0,15
	100 – 125	3,24	1,56	0,40	0,18
P6	0 – 8	1,18	0,38	0,23	6,28
	8 – 32	1,18	0,50	0,20	3,82
	32 – 70	1,50	1,10	0,17	6,53
	70 – 90	2,18	2,37	0,30	6,37

CONCLUSION

La démarche employée nous permet de présenter, dans un schéma synthétique, l'organisation des sols de la vallée du Moyen Niger (fig. 8).

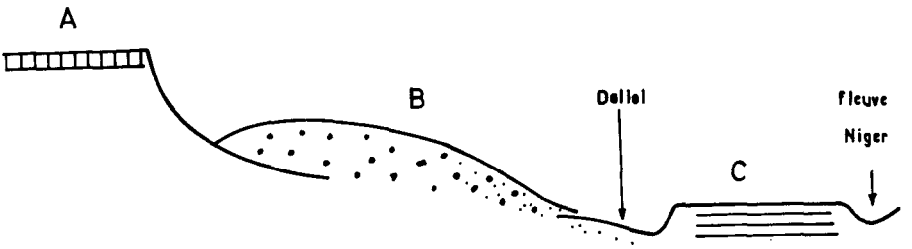


Fig. 8 : Toposéquence synthétique de la vallée du moyen Niger

La partie A correspond au plateau cuirassé, soit continu, soit démantelé. Il s'agit surtout de lithosols où les traces de pédogenèse actuelle ne se manifestent que par les phénomènes de fragmentation et de désagrégation. Les cuirasses, par leur position topographique, sont soumises à un pédoclimat très sec et à une température très élevée. Elles ne semblent guère évoluer, et elles constituent les témoins d'une pédogenèse ancienne très active qui a abouti à la formation d'horizons oxiques. Ces horizons ont été mis à nu par suite de l'érosion, et le climat actuel ne fait qu'accentuer leur durcissement.

La partie B est constituée par des matériaux sableux peu ferrugineux dont l'organisation est très variable. Elle passe des arénosols non différenciés, où aucun trait pédologique n'est visible, aux sols ferrugineux différenciés, où la pédogenèse actuelle est marqué par des traits pédologiques tels que la rubéfaction ou l'individualisation d'accumulations de carbonate de calcium.

La partie C correspond aux sols situés dans les vallées anciennes ou actuelles. Ils sont caractérisés par une texture fine, souvent à base de smectites, et par une hydromorphie ancienne ou actuelle souvent associée à l'apparition de manifestations salines, le plus souvent en milieu alcalin.

Les indicateurs utilisés pour caractériser la pédogenèse actuelle font apparaître les phénomènes suivants :

- le fer, sous forme amorphe ou cristallisée, ne montre par une dynamique particulière, hormis les zones affectées aujourd'hui par l'hydromorphie ;

- les minéraux argileux, à base de kaolinite dans les matériaux ferrugineux, de montmorillonite dans les bas fonds et secondairement d'illite, ne laissent pas présager, compte tenu des moyens d'investigation, des conditions favorables à la néoformation ;
- c'est au niveau des sels que l'empreinte de la pédogénèse actuelle se fait le plus sentir. En effet, c'est au niveau de la distribution des sels de calcium et de sodium que nous avons pu distinguer une dynamique dans les profils.

BIBLIOGRAPHIE

BOULET (R), 1975 – Toposéquence des sols tropicaux en Haute Volta : équilibres dynamiques et bioclimatiques. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., 13(2) : 1 300 – 1 306.

RUELLAN (A), 1983 – Organisation morphologique et fertilité des sols, ORSTOM Paris.

DISCUSSIONS ET SYNTHESE SUR LE THEME DES ASPECTS ACTUELS DE LA CONNAISSANCE DES SOLS A DIFFERENTES ECHELLES

Président : **K.L. ALLAGLO**
Vice – Président : **N. SOURABIE**
Rapporteur : **M. RAUNET**

EXPOSE DE P. FAURE

P. FAURE nous a montré, d'abord en salle, puis sur le terrain, comment l'analyse structurale de toposéquences comportant 3 ensembles fondamentaux d'horizons (ou "niveaux"), nous permet de comprendre la genèse et l'évolution actuelle des paysages pédologiques de la région de Kara au Togo. Ainsi, les facteurs explicatifs de cette combinaison sont essentiellement d'une part la lithologie et d'autre part la position où l'on se trouve entre le niveau de base local et les chapeaux cuirassés reliques de la "surface" précédente (fini – tertiaire ?).

D'amont en aval d'une telle séquence, la troncature par la morphogenèse traverse d'abord le manteau kaolinique, puis le matériau altéritique sous-jacent. On trouve d'abord une couverture kaolinique meuble rouge surmontant un niveau gravillonnaire issu du démantèlement de la cuirasse sommitale, surmontant lui-même une altérite colorée, sur gneiss folié à structure conservée, le tout possédant un drainage vertical rapide.

Puis, en descendant le glacis-versant, s'observe une différenciation pédologique et hydrique : le niveau meuble supérieur jaunit, le niveau de gravillons allochtones disparaît et des gravillons formés au sein même de la couverture kaolinique apparaissent à la place. Cette couverture est marquée par l'hydromorphie d'une nappe perchée à circulation latérale.

Encore plus en aval, on voit à l'affleurement le niveau gravillonnaire, parfois induré.

Puis, on rentre dans le matériau d'altération à micas résiduels, au sein duquel se forme un niveau gravillonnaire, où s'accentuent les processus de soutirage latéral. Le matériau meuble supérieur est alors beige avec lavage local, le substratum étant à tendance vertique.

Enfin, tout en aval, le *bed – rock* finit par affleurer.

Les questions suscitées par l'exposé de P. FAURE ont porté surtout sur les relations possibles entre l'analyse structurale combinatoire des "3 niveaux" et le concept de "système – sol" de P. BRABANT.

On a posé la question de l'extension spatiale en Afrique de l'Ouest de ces modèles combinatoires avec ces 3 niveaux.

EXPOSE DE S. WOROU

S. WOROU nous propose l'exemple d'une étude détaillée, sur une toposéquence sur socle granito – gneissique dans le sud Togo, lieu d'implantation d'une station de recherche agronomique.

L'un des objectifs de sa communication est de montrer que les caractéristiques strictement pédologiques, au seul examen morphologique, ne sont pas toujours suffisantes pour rendre compte ou prévoir l'adaptation du végétal, mais que l'aspect dynamique, en particulier le régime hydrique, doit aussi être envisagé et, si possible, quantifié.

L'exemple pris est ici l'alimentation hydrique du maïs en contre – saison, en bas de versant, du fait de la présence d'une nappe perchée temporaire qui, alimentée par les pluies en amont, disparaît progressivement en saison sèche. La localisation fine de cette nappe, verticalement (profondeur) et latéralement, ainsi que son calendrier d'occurrence, conditionne la réussite du maïs.

S. WOROU nous a bien montré comment une analyse structurale fine, mettant en évidence les transformations latérales des horizons en fonction de l'intensité et de la direction des flux hydriques hypodermiques, permettait de localiser spatialement les positions des réservoirs perchés, et donc

de positionner avec le maximum de fiabilité les zones aptes au maïs de contre – saison.

Les questions consécutives à l'intervention de S. WOROU émanent plutôt des agronomes, qui s'interrogent sur la pertinence agronomique des caractères recensés par les pédologues, sur la variabilité spatiale et sur la quantification des paramètres dynamiques tels que la fluctuation d'une nappe perchée.

Certains demandent comment on peut passer de l'analyse structurale de toposéquence à la cartographie fine et comment, par une telle analyse, on peut estimer la variabilité spatiale.

EXPOSE DE Y. GUERO

Y. GUERO nous a exposé, toujours suivant une démarche toposéquentielle, comment, en milieu semi – aride, s'opérait la dynamique de redistribution de certains éléments minéraux, en particulier le calcium et le sodium. Le sodium, qui se concentre dans les vieilles altérites ou les alluvions, est le plus inquiétant.

Il s'agit encore d'un exemple où la dynamique des processus actuels (ici géochimique), peut se comprendre et se spatialiser à partir d'une bonne analyse de toposéquence.

Ce type d'alcalisation se retrouve dans de nombreux périmètres irrigués en zone semi – aride.

Les questions ont porté :
- sur la comparaison entre les problèmes d'alcalisation observés au Niger et au Mali ;
- sur l'opportunité de faire intervenir des géomorphologues "quaterna – ristes" dans de telles problématiques ;
- sur les modalités d'apparition de nodules calcaires dans des matériaux divers ;
- sur les difficultés de prévoir les phénomènes d'alcalisation des périmètres irrigués en zone semi – aride, et les difficultés pour y remédier.

CARACTERISATION DES SOLS SOUS CULTURE

DEMARCHE ET PERSPECTIVES EN PEDOLOGIE POUR UNE UTILISATION AGRICOLE RATIONNELLE DES SOLS

R. MOREAU
ORSTOM Montpellier

RESUME

On sait que la réussite des opérations de développement agricole est largement conditionnée par la maîtrise de la fertilité des sols cultivés et la capacité de concevoir des systèmes d'exploitation viables. Mais la contribution apportée par les pédologues dans ce domaine, au niveau des connaissances sur les sols et de leur comportement cultural, apparaît généralement très insuffisante ; cette situation doit être corrigée en recherchant une meilleure articulation des activités entre pédologues, agronomes et développeurs.

En ce qui concerne la Science des Sols, il convient que soient mieux pris en compte les problèmes relatifs à la connaissance, à l'amélioration et à la conduite de la fertilité des sols. Un effort d'analyse, de clarification et d'innovation sur les objectifs et les méthodes de recherche doit en particulier être réalisé, afin que cette discipline assume la responsabilité qui lui revient en matière d'utilisation agricole rationnelle des sols.

En se plaçant dans le cas général d'une mise en valeur agricole régionale, le pédologue peut répondre aux questions des développeurs en intégrant dans sa démarche les acquis de la Science des Sols actuelle, notamment la conception de l'organisation des sols dans les trois dimensions de l'espace. Les recherches actuelles doivent être conçues en fonction de besoins d'information bien identifiés à différentes échelles, et constituer une suite ordonnée d'actions dont les résultats concernent directement les préoccupations des utilisateurs.

Sur le plan de la programmation, ces recherches se rattachent à deux types d'interventions selon le caractère pédologique ou agropédologique des thèmes traités.

Les recherches pédologiques portent sur la connaissance des sols dans leur spécificité et leur variabilité à l'échelle régionale et locale. Le pédologue apporte à ce niveau la connaissance de l'objet – sol, avec sa variabilité spatiale et temporelle. Cette connaissance sert de base pour assurer le développement rationnel des activités de recherche agropédologiques et agronomiques, ainsi que pour la mise en valeur.

Les recherches agropédologiques, définies de concert avec l'agronome, concernent les interventions en rapport avec l'utilisation agricole des sols et leur capacité de production. Elles doivent aborder plusieurs thèmes, en particulier celui de l'aptitude culturale des sols et celui des techniques culturales aptes à créer et à maintenir une fertilité garante d'une stabilité à long terme de la productivité agricole.

INTRODUCTION

L'extension des surfaces cultivées et les efforts d'intensification agricole dans les pays en développement répondent à la nécessité d'accroître la production agricole, du fait de l'augmentation des populations et de leur aspiration à une élévation de leur niveau de vie. Mais on constate, trop souvent, que les opérations de mise en valeur et de développement agricole n'atteignent pas les résultats escomptés, notamment en raison de contraintes édaphiques insuffisamment maîtrisées, s'accompagnant d'une dégradation parfois irrémédiable des sols.

En s'interrogeant sur les causes de ces échecs, on est naturellement conduit à considérer les implications de la pédologie, en tant que science de l'étude des sols. On peut, en particulier, se demander si l'insuffisance des connaissances en vue d'une utilisation agricole satisfaisante des sols est le fait des propres limitations de cette discipline, ou bien d'une mise à contribution insuffisante de ses capacités. Il faudrait, enfin, savoir si la pédologie peut offrir des possibilités d'action et des perspectives nouvelles pour l'acquisition des bases scientifiques nécessaires à la gestion rationnelle des sols, permettant d'assurer à la fois le maintien du potentiel de production et la reproductibilité des systèmes d'exploitation dans le temps.

Pour aborder de façon plus concrète ces questions, nous évoquerons le cas du projet de développement de la Crête Zaïre – Nil (CZN), qui représente une situation typique de mise en valeur confrontée à des contraintes édaphiques majeures. L'analyse de cette situation a montré la nécessité d'assurer un développement coordonné des recherches portant sur les sols et la maîtrise de la fertilité, afin de disposer des données indispensables en vue de la mise en valeur agricole régionale. Le cas de la CZN a donc surtout ici une valeur d'exemple pour expliciter une démarche générale concernant l'étude des sols et leur utilisation ; démarche qui pourrait également s'appliquer à beaucoup d'autres situations de mise en valeur et d'intensification agricole.

En raison d'une pression démographique élevée dans les zones de moyenne altitude, le Rwanda développe une politique de colonisation des hautes terres pratiquement exemptes de peuplement permanent. Le projet CZN concerne une zone à topographie fortement différenciée, située au Sud Ouest du pays entre 1900 et 2500 m d'altitude, avec un climat tropical d'altitude (température moyenne annuelle : 12 – 15 °C ; pluviométrie : 1400 – 1700 mm/an avec deux maxima saisonniers).

Le projet s'est accompagné, depuis 1983, de la mise en place d'une infrastructure de développement importante (ouverture de routes, création de villages...), avec attribution d'un lot de deux hectares de terre pour chaque famille installée.

Afin de pallier rapidement l'inexistence de références agronomiques locales et les défauts de fertilité des sols qui avaient été identifiés, un programme d'amélioration et de conservation des sols a été mis en place dès le démarrage du projet, avec l'appui de la Coopération Technique Française. Les recherches se sont surtout intéressées à la correction de l'acidité et à l'amélioration de la fertilité, avec l'apport de travertin d'origine locale et différents modes de fertilisation (engrais N P K et fumier), sur la station de Gakuta (crée en 1983) et en différents points d'appui hors station.

Après quatre années d'expérimentation, les résultats obtenus s'avèrent peu ou non significatifs et difficilement vulgarisables : en particulier l'application de travertin se montre incapable de corriger efficacement l'acidité du sol. Devant cette situation, une évaluation du volet Recherche – Développement

du projet a été ordonnée, et le problème des sols et de leur fertilité a représenté un thème important de l'évaluation (MOREAU, 1988)[1].

L'évidence de l'insuffisance de données concernant les composantes du milieu physique (sol, climat et végétation) s'est imposée rapidement. Encore le cas des sols apparaissait – il relativement privilégié, avec l'existence d'une esquisse morphopédologique à 1/50 000 (GUILLOBEZ, 1984). S'agissant de développer une exploitation agricole d'occupation permanente et viable des sols, deux séries de préoccupations ont été considérées : la connaissance des sols et de leur variabilité spatiale d'une part, l'amélioration et l'évolution des sols d'autre part.

I – LA CONNAISSANCE DES SOLS ET DE LEUR VARIABILITE

Les essais multilocaux réalisés dans le cadre du projet CNZ sont établis sur des sites pour lesquels n'existe aucune référence pédologique précise[2], et les agronomes considèrent la variabilité "du sol" comme une cause principale de leurs difficultés (coefficients de variation des résultats expérimentaux souvent supérieurs à 25 %). Dans ces conditions, il serait illusoire d'espérer développer une recherche agronomique plus performante sans de meilleures connaissances de base en pédologie, notamment en ce qui concerne la différenciation et l'organisation spatiale, puis la caractérisation et le fonctionnement des sols.

1.1. Différenciation et organisation spatiale des sols

L'esquisse morphopédologique à 1/50 000 donne des indications générales sur le modelé, les pentes et les grandes catégories de sols (classes et sous – classes) existant dans chacune des

[1] Seul ce thème est considéré ici. Les thèmes plus strictement agronomiques (agroclimat, activités humaines, systèmes de culture et d'élevage) ont également fait l'objet d'un rapport distinct (ANGE, 1988) dans le cadre de l'évaluation.

[2] Les possibilités d'exploitation des résultats d'analyse sur quelque 300 échantillons de terre de la zone du projet (Anonyme, 1987), qui ne peuvent être rapportés à aucun type de sol bien défini, se trouvent aussi de ce fait limitées.

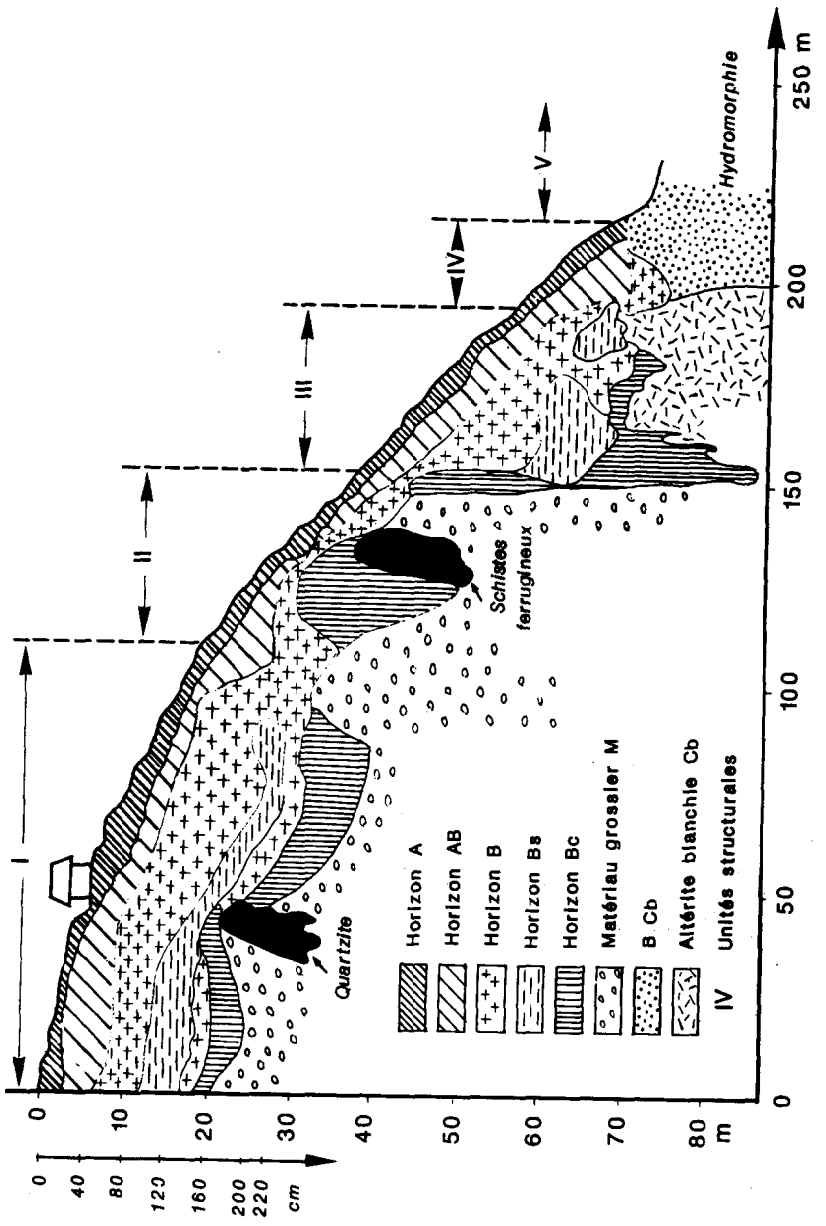


Figure 1 : *Toposéquence I (versant N.E. Station Gakuta)*

14 unités morphopédologiques de la région, où les "ferrisols humifères" se trouvent de loin les plus répandus (GUILLOBEZ, 1984) ; mais elle ne peut pas représenter la variabilité spatiale des versants se manifestant à des échelles d'ordre décamétrique ou hectométrique, comme nous l'avons constaté à la station agronomique de Gakuta (fig. 1).

Les agents du développement et les agronomes ne disposent pas, actuellement, des informations nécessaires pour apprécier la représentativité d'un site par rapport à la diversité des situations pédologiques de la Crête, soit pour le choix d'un site expérimental significatif d'une situation souhaitée, soit pour valoriser les résultats acquis, par extrapolation à des situations comparables.

La recherche agronomique a donc besoin de disposer d'un référentiel des principales catégories de sols existants sur la CZN, avec un minimum de critères de reconnaissance pour faciliter la caractérisation pédologique précise des situations de terrain.

1.2. Caractérisation et fonctionnement des sols

La mise en évidence des entités pédologiques et de leur répartition géographique ne peut naturellement pas faire abstraction de l'étude du contenu, c'est-à-dire de l'ensemble des connaissances nécessaires pour établir de façon précise la "carte d'identité" des principales unités de sol. Ces connaissances sont également indispensables comme bases de développement des recherches agropédologiques dont il sera question plus loin. Elles portent en effet sur des caractéristiques qui représentent le fondement même des propriétés agronomiques du sol :

- connaissance des constituants (minéralogiques et organiques) et de leurs propriétés (aspects quantitatifs et qualitatifs) ;
- connaissance de leur organisation, jusqu'aux échelles les plus fines : modes de répartition et liaison des constituants en relation avec l'état physique ;
- connaissance du fonctionnement : mise en évidence de processus essentiels d'évolution (physiques, chimiques, biologiques) et de régulation des équilibres dynamiques de la couverture pédologique ; approche des phénomènes naturels de transformation des états du sol (mobilisation, transfert,

redistribution de matière) dans différentes situations pédologiques.

1.3. Les nécessités de recherches en pédologie

Dans une perspective de mise en valeur et d'utilisation agricole des sols, il est nécessaire d'aboutir, à l'intérieur d'une couverture pédologique, à l'identification d'unités spatiales élémentaires. Chacune doit être suffisamment homogène pour être considérée comme représentative d'un type de sol défini (différenciation du profil), avec des propriétés et un comportement cultural comparables et passible partout, de ce fait, du même traitement cultural.

Faut-il donc entreprendre, dans le cas de la CZN, une cartographie régionale à grande échelle (au 1/5 000, par exemple, pour se trouver à l'échelle des variations de versant) ? Cela n'est guère concevable sur une étendue aussi grande que celle du projet. Mais il serait plus judicieux de procéder à une analyse méthodique de l'organisation pédologique, pour mettre en évidence les principales entités de sol existant dans la région (types de sol et systèmes de sol), ainsi que les règles de leur répartition et les critères de reconnaissance sur le terrain.

Un système de sols donné se composant partout, de façon implicite, des mêmes types de sol selon la même règle de distribution, il suffirait, sur le plan régional, de posséder une carte des différents systèmes de sols, selon une échelle qui s'imposera d'elle-même en fonction des réalités de terrain. Bien sûr, pour caractériser de façon précise une portion de terrain (par exemple un champ d'expérimentation existant ou à rechercher), des observations complémentaires seront toujours nécessaires. Mais l'intervention sera alors facilitée par la connaissance des règles d'association et des caractères d'identification des différents types de sol au sein des systèmes pédologiques.

Sur le plan pratique, le travail de pédologie concernera d'abord l'étude approfondie de quelques secteurs parmi les plus représentatifs et les plus intéressants pour la recherche agronomique. Assez rapidement, ensuite, devront être choisis quelques sites où seront développées des recherches sur

l'amélioration de la fertilité (ce seront, à plus long terme, des sites de référence et des observatoires du comportement cultural du sol).

II - AMELIORATION ET MAINTIEN DE LA FERTILITE

2.1. Les données sur les sols et leur évolution

Les sols de la CZN sont profonds et bien structurés, mais toutes les données disponibles font ressortir l'acidité importante de la plupart des sols (pH de 4 à 4,5), avec des valeurs d'aluminium échangeable fréquemment élevées (1 à 4 mé/100 g) et une pauvreté chimique chronique affectant la plupart des éléments nutritifs à l'exception du potassium (Anonyme, 1987 ; GUILLOBEZ, 1984).

Leur situation d'altitude confère à ces sols des caractéristiques spécifiques, telles que la richesse en matière organique (5 - 7 % de carbone total), avec des horizons humifères épais et le développement d'horizons "sombriques" en profondeur, la variation importante de la C.E.C. en fonction du pH (moins de 5 mé/100 g au pH du sol, jusqu'à 30 mé/100 g à pH 7) et l'abondance de muscovite jusqu'aux horizons supérieurs, ce qui explique la richesse relative en potassium par rapport aux autres bases échangeables.

Avec la mise en culture, on assiste à une diminution rapide des éléments assimilables et certainement de certaines formes de réserve par lixiviation, exportation, appauvrissement et érosion, aboutissant à des niveaux de production très faibles ou même nuls (après trois ans à Gakuta). Par ailleurs, bien que la culture soit manuelle, les risques de dégradation structurale en culture continue ne sont pas à écarter, et les risques d'érosion sont latents dans une zone aussi accidentée.

Ces phénomènes évolutifs sont très importants à considérer dans la perspective d'une exploitation permanente, et il est nécessaire d'en suivre les manifestations et d'en étudier les processus si l'on souhaite maîtriser l'évolution des sols et de la fertilité à long terme.

2.2. Les causes de l'insuffisance des résultats de la recherche agronomique

La variabilité spatiale non contrôlée

La variabilité spatiale peut être d'origine pédologique (échelle décamétrique et au-delà), biologique et anthropique (échelles métrique et décamétrique). Quelle qu'en soit l'origine, son contrôle n'est possible que si elle se trouve bien définie dans ses principales caractéristiques : nature, extension, échelle ou maille de manifestation. C'est ensuite à l'expérimentateur de définir le dispositif expérimental le mieux adapté à ses objectifs et aux réalités de terrain (ce qui n'a manifestement pas été le cas sur la CZN). Mais deux remarques s'imposent à ce sujet :

- La différenciation spatiale de la couverture pédologique ne suit qu'exceptionnellement une ligne droite : les unités de sol existant dans la nature présentent généralement des contours curvilignes irréguliers. L'expérimentation agronomique, au contraire, donne lieu à des dispositifs de terrain caractérisés par une géométrie rectiligne quadrangulaire. La superposition de systèmes géométriques aussi différents peut présenter des difficultés, mais c'est toujours à l'expérimentateur de s'adapter aux possibilités offertes par la nature ;

- La possibilité, ou non, d'intégrer la variabilité des caractères du sol dépend du rapport entre l'échelle de manifestation de celle-ci et les dimensions des parcelles expérimentales. Sur les sols ferrallitiques de basse Côte d'Ivoire, par exemple, quelques dizaines à quelques centaines de mètres carrés permettent généralement d'intégrer la variabilité résultant de l'action des êtres vivants ; mais il faut plusieurs milliers de mètres carrés pour intégrer la variabilité texturale d'origine pédologique (MOREAU, 1986).

De toute façon, l'intégration de l'hétérogénéité spatiale, dans une parcelle unitaire de surface appropriée, n'est tolérable (particulièrement dans le cas des études de comportement du sol) que si cette hétérogénéité ne porte que sur des variations mineures, n'impliquant pas de processus de fonctionnement fondamentalement différents les uns des autres ; faute de quoi les résultats moyens obtenus sur la parcelle correspondraient à des

situations dissemblables, voire peut-être opposées, et n'auraient de valeur explicative pour aucune d'elles.

Le mode d'échantillonnage

Il conditionne la représentativité de l'échantillon prélevé et la précision des résultats ; il doit faire, avec le dispositif expérimental, l'objet d'une mise au point préliminaire, en tenant compte de l'hétérogénéité du terrain et des contraintes expérimentales. Bien souvent, par manque de temps, le contrôle préliminaire est négligé, et ce facteur n'est certainement pas sans influence sur la variabilité des résultats obtenus à Gakuta.

L'absence de contrôle des facteurs de conjoncture

Ce sont les variables non expérimentales ne faisant pas l'objet de l'expérimentation mais affectant les paramètres mesurés au niveau de la culture ou du sol. Pour le sol, ce sont surtout les phénomènes d'érosion et de lixiviation qui ont entraîné des pertes non estimées d'éléments constitutifs du sol ou qui ont apporté ces éléments dans les essais. A la station de Gakuta, l'érosion a sévi de façon spectaculaire, aboutissant au façonnement de terrasses bien marquées au bout de 3 ans (mise à l'affleurement des horizons B à l'amont des parcelles), avec des conséquences certainement très importantes sur la variabilité des échantillons et des résultats analytiques au cours du temps.

2.3. Quelles recherches en agropédologie ?

Les problèmes de fertilité à résoudre sont d'abord liés à des phénomènes de carence, toxicité et déséquilibres minéraux, c'est-à-dire à des difficultés concernant à la fois la chimie des sols et le comportement des végétaux. S'agissant de pallier l'insuffisance de références locales en matière d'agrologie pour la mise en exploitation permanente de sols acides s'épuisant rapidement, et de maîtriser leur évolution sous l'effet des contraintes culturales, les recherches sont à conduire dans deux domaines :

- amélioration de la fertilité ;
- contrôle de l'évolution des sols.

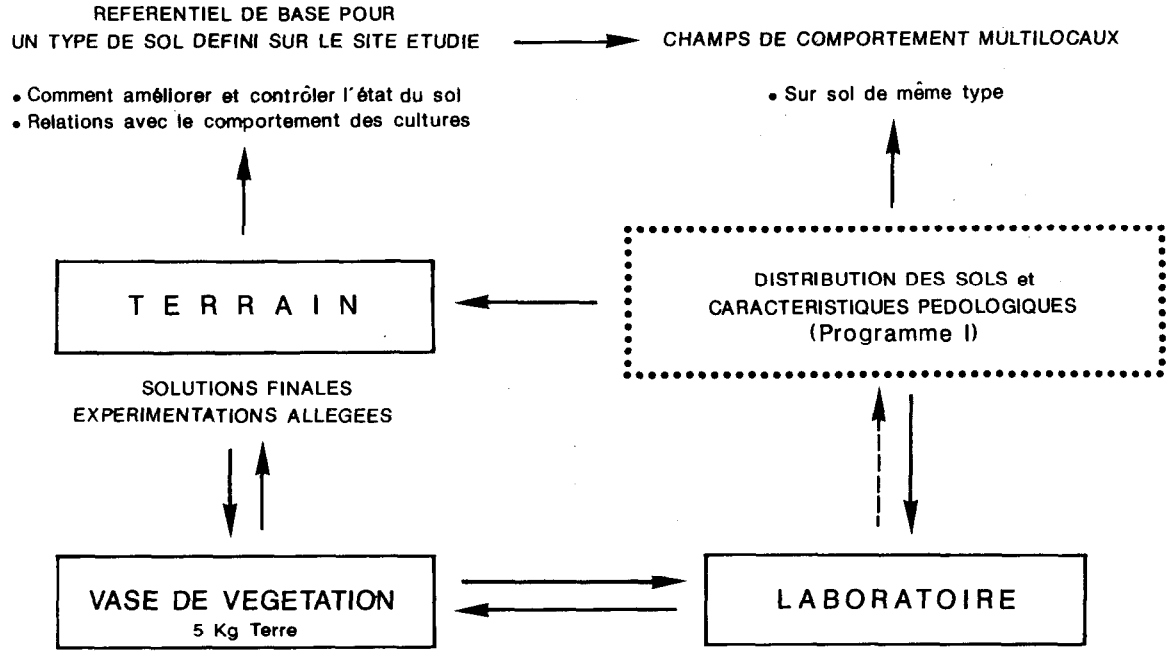
Amélioration de la fertilité

Les sols de la station de Gakuta ont subi un tel état de transformation qu'ils ne peuvent plus avoir conservé les capacités de réponse et de comportement réactionnel aux traitements culturaux représentatives des sols de même type non perturbés. De ce fait, les études de terrain pour l'amélioration des sols sont à réaliser hors station (à l'exception de certains thèmes particuliers comme la réhabilitation).

Sur le plan méthodologique, les voies classiques pour traiter les problèmes de fertilité sont difficilement utilisables dans une région récemment ouverte à l'occupation permanente. Du fait de la faiblesse numérique des situations établies et stabilisées, il est difficile avec l'approche par voie d'enquête d'acquérir des informations non biaisées. L'approche expérimentale par réseaux d'essais pluriannuels, quant à elle, nécessiterait des moyens considérables et des délais relativement longs en raison de la diversité du milieu et du nombre de problèmes à traiter.

Il faut donc envisager une autre alternative qui, sans rien sacrifier à la rigueur scientifique, permette l'élaboration d'un référentiel agronomique précis, tout en restant dans des limites de coûts et de temps raisonnables. De façon à alléger les expérimentations de terrain, une telle méthodologie (actuellement appliquée en Nouvelle Calédonie : BONZON *et al.*, 1983) s'appuie sur un travail préparatoire en serre et en laboratoire (fig. 2). L'utilisation de vases de végétation de grand volume permet d'aller au-delà de la simple mise en évidence des carences ou des réserves minérales, pour arriver jusqu'à l'étude des réponses du sol et de la plante à différentes doses et formes de fertilisation, dans des conditions aussi proches que possible de celles du champ. Il est ainsi possible d'assurer le développement d'une plante sans distorsion notable par rapport aux conditions de terrain,, au moins sur une partie notable de son cycle (28 jours, avec 5 kg de terre, pour le maïs en Nouvelle Calédonie).

La coordination entre les études menées au laboratoire, en serre et sur le terrain, où sont nécessairement élaborées et affinées les solutions finales, doit bien sûr être parfaite.


REFERENTIEL DE BASE POUR
UN TYPE DE SOL DEFINI SUR LE SITE ETUDIE
CHAMPS DE COMPORTEMENT MULTILOCAUX
• Comment améliorer et contrôler l'état du sol
• Relations avec le comportement des cultures
• Sur sol de même type
TERRAIN
DISTRIBUTION DES SOLS et
CARACTERISTIQUES PEDOLOGIQUES
(Programme I)
SOLUTIONS FINALES
EXPERIMENTATIONS ALLEGEES
VASE DE VEGETATION
5 Kg Terre
LABORATOIRE
IDENTIFICATION DES PROBLEMES
ET RECHERCHE DES SOLUTIONS
RECHERCHES APPROFONDIES
SUR THEMES PRECIS
• Mise en évidence des carences et déséquilibres
• Réponses du sol et de la plante à des mesures correctives (fumures)
• Etude du fonctionnement, dynamique d'éléments minéraux dans un systeme Sol-Plante
• Nature des constituants du sol
• Leur organisation et propriétés
• Formes et disponibilité des nutriments

La mise en oeuvre d'une telle méthodologie requiert naturellement une connaissance précise des sols et de leur répartition, et les techniques de culture en pot de gros volume (volume de terre, plante test, alimentation hydrique...) doivent être bien maîtrisées. Enfin, il faut admettre que l'aboutissement des recherches ne sera pas immédiat (au moins 6 ans en Nouvelle Calédonie, sans aucune référence agronomique au départ) et qu'un effort soutenu est nécessaire pendant ce temps (bien que des résultats partiels utilisables par la recherche agronomique puissent être obtenus plus rapidement).

Par rapport à la situation antérieure de la CZN, ces recherches bénéficieraient des données pédologiques de base et des études approfondies réalisées au laboratoire concernant des caractéristiques ou des processus fondamentaux. Sur le terrain, les modalités d'action et le devenir des amendements et engrais apportés au sol doivent faire l'objet d'une analyse suivie, en même temps que l'étude des comportements du sol et des cultures, de façon à disposer de bases plus larges et plus sûres d'interprétation des résultats.

Dans le cas de l'application du travertin à Gakuta, par exemple, l'absence de résultats probants peut avoir plusieurs causes, qu'il faut mieux cerner au niveau de la nature de l'amendement (composition, granulométrie, solubilité) et de son devenir (pertes par érosion ou lixiviation, formes chimiques nouvelles), en relation avec les propriétés du sol (contacts sol – solution – amendement, capacité d'échange, pouvoir tampon...). C'est donc à une meilleure connaissance des points de blocage de l'action de l'amendement qu'il convient d'arriver, de façon à mieux raisonner ensuite la conduite des recherches. Le même schéma d'intervention doit d'ailleurs être appliqué à tout autre type de traitement concernant l'action des engrais ou des amendements.

Contrôle de l'évolution des sols

Cet aspect des recherches en agropédologie se trouve malheureusement souvent négligé en raison de considérations trop strictement immédiates conduisant, avec la dégradation des sols sous culture, bon nombre d'opérations de développement à l'échec, à plus au moins longue échéance. Sur la CZN, où les risques de dégradation sont évidents, la recherche agronomique

n'a fait qu'effleurer la question. Les recherches doivent y être développées de façon plus méthodique, avec des objectifs précis, en fonction de la diversité des situations locales.

Il s'agit, d'abord, de prévenir la dégradation des sols en décelant à temps les tendances évolutives défavorables et de prendre éventuellement les mesures correctives nécessaires, puis de fournir les données de bases relatives au comportement des sols, pour l'élaboration de systèmes techniques d'exploitation durables. Il est alors préférable de développer des études comparatives, élargissant les possibilités d'analyse du comportement des sols en fonction des conditions de milieu et de culture.

On s'efforcera de caractériser et d'analyser le comportement réactionnel du sol vis-à-vis des contraintes d'exploitation, en suivant les modifications de son état et de son fonctionnement au cours du temps. Trois principaux aspects thématiques sont à considérer, chacun pouvant faire l'objet de recherches plus ou moins approfondies en fonction des cas de situation considérés :

- l'évolution de l'état physique des sols et ses liaisons avec l'hydrodynamique et l'érosion : modifications du profil cultural en relation avec l'organisation de la structure et la transformation des constituants organiques et minéraux du sol ;

- l'évolution des statuts organiques et minéraux du sol en relation avec la transformation quantitative et qualitative des constituants, de leur organisation et des propriétés qui leur sont subordonnées : propriétés d'échange, pouvoirs tampon et fixateur.... ; aspects dynamiques en relation avec les processus biologiques, de lixiviation, d'érosion ;

- l'étude de l'érosion, actuellement limitée à une série de cases d'érosion sans références pédologiques et climatiques précises, pour une meilleure connaissance des phénomènes érosifs, de leurs causes et de leurs conséquences, en relation avec l'état des sols et les conditions de milieu et de culture.

*
* *

Ces deux programmes d'agropédologie sont tout à fait complémentaires et ne peuvent être conduits qu'en parfaite coordination avec les activités de la recherche agronomique. Sur la CZN, la priorité revient à l'amélioration de la fertilité. Mais le programme sur l'évolution des sols doit aussi être développé sans tarder, au moins pour des aspects évolutifs déjà bien identifiés et dont certains éléments de connaissance pourraient être rapidement mis à profit pour l'amélioration de la fertilité. Ainsi, les processus d'anthropisation ancienne et leurs conséquences sur l'état du sol, considérées comme favorables dans la région, devraient faire l'objet de recherches immédiates ; en particulier dans le domaine de la matière organique dont la transformation peut avoir d'importantes répercussions sur les propriétés générales du sol (capacité d'échange et pouvoir tampon par exemple).

III – PEDOLOGIE ET UTILISATION AGRICOLE DES SOLS

3.1 Un plan d'action cohérent pour la connaissance et l'utilisation des sols

L'analyse de situation de la CZN montre, comme c'est souvent le cas dans les opérations de développement, qu'en voulant aller vite, on s'est efforcé de manipuler un milieu que l'on connaissait mal, en particulier au niveau des sols qui constituent pourtant le support essentiel de l'activité agricole. Si des contraintes majeures telles que l'excès d'acidité et certaines de ses séquelles ont bien été identifiées dès le départ, les difficultés pour les corriger ont été sous-estimées et les moyens de recherches engagés n'ont pas été, non plus, à la mesure de ces difficultés.

Pour répondre aux besoins d'information en matière de connaissances sur les sols, il est nécessaire de développer un plan d'action en trois programmes de recherches coordonnées :
- connaissance et répartition des sols (pédologie) ;
- amélioration de la fertilité (agropédologie) ;
- évolution des sols (agropédologie).

Il existe entre ces trois programmes un ordre de dépendance découlant de l'ordre logique d'acquisition des connaissances.

Mais il n'est pas nécessaire que chacun de ces programmes arrive à échéance pour que le suivant soit initié. D'ailleurs, l'obligation de travailler en conformité avec la diversité des situations pédologiques conduit à traiter séparément chaque type de sol et de système de sols.

3.2. Les relations entre pédologues et utilisateurs des résultats de la recherche

Les opérations de mise en valeur ou d'intensification agricole sont encore trop souvent conduites sans connaissance suffisante des sols, ou sans tenir suffisamment compte de cette connaissance si elle existe. Mais les reproches fréquemment adressés aux pédologues par les utilisateurs potentiels de leurs travaux ne sont pas non plus sans fondement ; qu'il s'agisse des difficultés de compréhension et d'utilisation des documents cartographiques ou, de façon plus générale, des difficultés d'extraire des travaux réalisés les informations nécessaires à la solution de problèmes concrets auxquels ces utilisateurs sont confrontés.

Cette situation résulte, semble-t-il, d'un défaut de communication entre pédologues et responsables du développement et de la recherche agronomique, conduisant à une connaissance ou considération insuffisante des besoins et des possibilités des uns et des autres. On constate, en considérant la position du pédologue dans le cadre des structures et processus concourant à la production agricole (fig. 3), que l'intercommunication se trouve notamment insuffisante au niveau du "système d'information", dans le sens descendant et le sens remontant, par rapport aux demandes des utilisateurs du "système de décision". C'est pourtant à ce niveau qu'il est souvent nécessaire d'opérer une transposition de problématique, faisant intervenir des modifications d'échelle avec des considérations thématiques nouvelles, afin d'assurer au mieux la pertinence des recherches à réaliser et en réponse aux besoins d'information. Il apparaît souhaitable, pour remédier à cette situation, que la sphère de préoccupation du pédologue puisse s'étendre plus largement en direction des utilisateurs, dont on pourrait attendre, en retour, un mouvement dans le sens inverse.

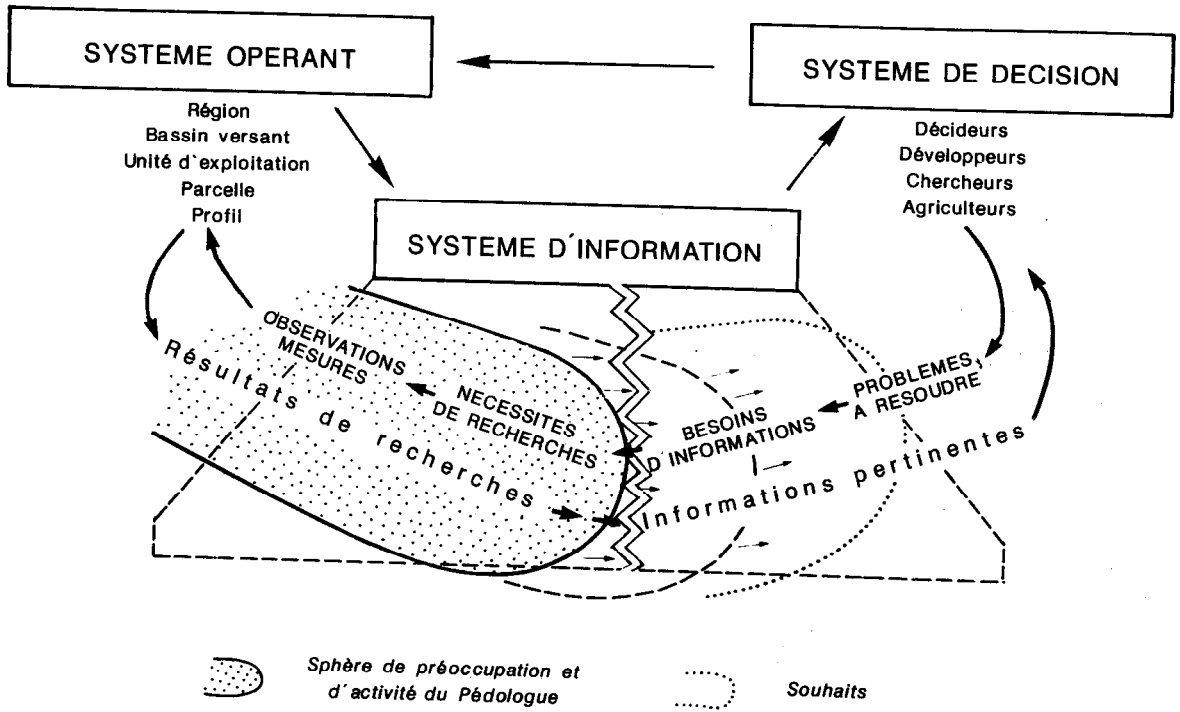


Figure 3 : *Position du pédologue dans le contexte des structures et processus concourant à la production agricole*

4.3. Les recherches sur la fertilité des sols : deux approches complémentaires

En ce qui concerne la conduite des recherches sur la fertilité des sols en rapport avec les pratiques culturales et le comportement des cultures, il y a lieu de distinguer deux approches, d'inspiration agronomique ou pédologique (fig. 4).

L'approche agronomique

Elle privilégie, au niveau du sol, l'étude des caractéristiques ou paramètres de fertilité intervenant dans la satisfaction des besoins de la plante : eau et éléments nutritifs absorbés, ou déterminant un environnement favorable ou non pour le fonctionnement racinaire : caractéristiques physiques et physico-chimiques.

L'échelle de travail privilégiée est celle de la parcelle ou du champ de culture. Les recherches visent à l'analyse des liaisons entre les traitements culturaux, les caractéristiques de fertilité du sol et les rendements des cultures ; elles cherchent également à établir des bilans ou des modèles, lorsque l'on se préoccupe de fonctionnement et d'évolution du sol.

Les données obtenues correspondent principalement à des déterminations quantitatives exprimées en terme de moyenne représentative d'une étendue de terrain (en général l'hectare). Cette approche peut être qualifiée de globalisante, considérant le sol à un niveau d'échelle qui est classiquement celui des interventions agronomiques. Elle s'intéresse en priorité à un groupe de caractéristiques apparaissant comme causes directes de la capacité de production, mais qui ne se situent, en général, qu'au second rang dans la chaîne des causalités de la fertilité édaphique.

L'approche pédologique

Cette approche, qui doit compléter la précédente, apparaît plus spécifique de la démarche pédologique. Elle se développe en concordance avec la conception "structuraliste" appliquée à la couverture pédologique et au système sol-plante. Elle vise à une connaissance approfondie de l'état des sols, de leur

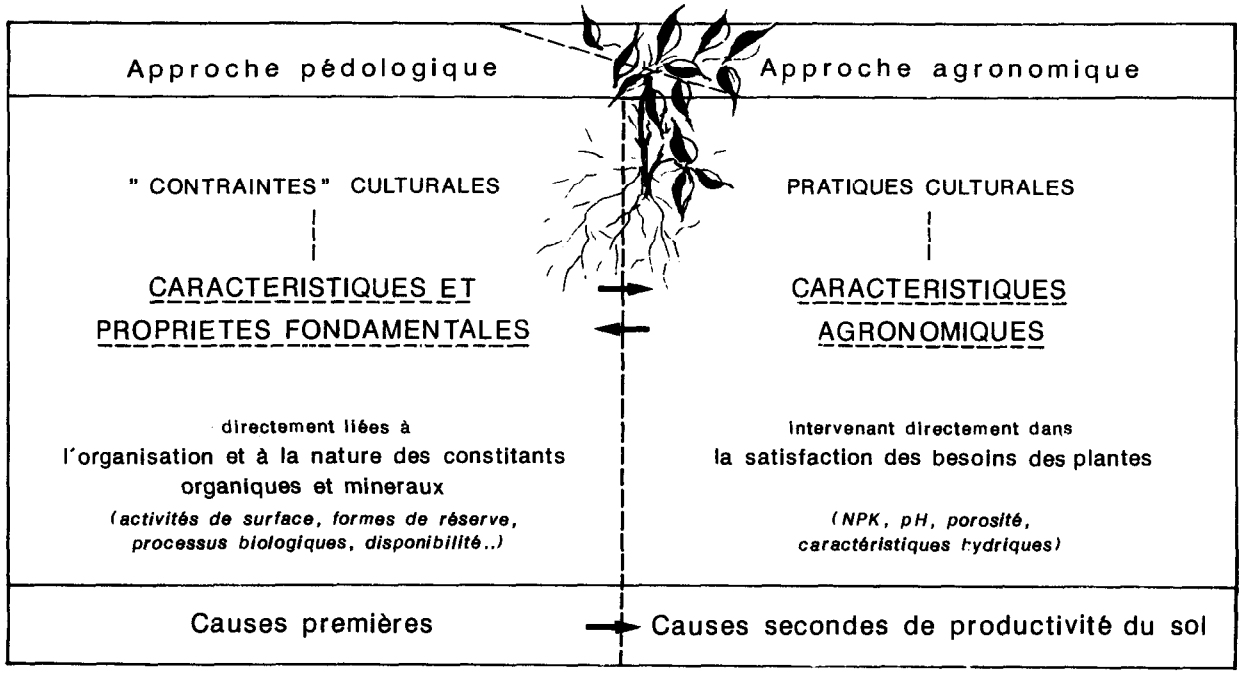


Figure 4 : *Deux approches complémentaires pour l'étude de la fertilité et de l'évolution des sols cultivés*

fonctionnement et de leur évolution en relation avec les contraintes culturales et le comportement des cultures.

L'approche pédologique s'efforce de lier les propriétés et le comportement cultural des sols et leurs manifestations agronomiques à leurs causes, jusqu'au niveau le plus fondamental où les recherches touchent à la nature et à l'organisation des constituants du sol et à leur modification sous les effets combinatoires et cumulatifs des pratiques culturales. En s'intéressant aux caractéristiques assurant le fondement des paramètres de fertilité classiques, on va donc plus loin, ici, dans la connaissance des causes premières de la capacité de production des sols et de leur devenir, qui détermine à terme l'évolution du potentiel de production.

Il existe une double nécessité en vue d'améliorer la gestion des sols : mieux comprendre les causes et les processus de transformation de l'état d'un sol d'une part, et améliorer la connaissance des relations internes entre l'état du sol et le développement des plantes d'autre part. On est amené, dans les deux cas, à considérer l'importance de la solution du sol, soit comme agent de transformation, soit comme terme central des relations sol – plante ; c'est un thème de recherche à développer, en associant les considérations physiques et chimiques, surtout lorsqu'on s'intéresse à la fonction de production pour laquelle il est nécessaire d'étudier la solution du sol en intégrant les aspects quantitatifs et qualitatifs, en relation avec l'alimentation hydrique et minérale des plantes.

D'un point de vue opérationnel, l'étude des propriétés et des phénomènes évolutifs est liée à celle des entités structurales, et l'emboîtement des échelles constitue un facteur déterminant de l'approche méthodologique. Niveau d'organisation majeur du système sol – plante, le profil cultural apparaît comme un niveau d'approche privilégié pour la compréhension des relations entre la plante et le sol, pour l'analyse de l'impact des pratiques culturales (en particulier des travaux aratoires) et comme point d'articulation entre les études conduites à l'échelle de la parcelle et au – delà, et celles réalisées aux échelles plus fines : horizons, volumes structuraux homogènes, éléments structuraux (agrégats).

CONCLUSION

D'une façon générale, le domaine de compétence des pédologues apparaît encore trop souvent limité à l'étude de la pédogenèse et à la cartographie. Cette perception restrictive de la Science des Sols nuit à son développement dans d'autres domaines de recherche où elle n'intervient encore que de façon insuffisante, en particulier dans celui de la fertilité et de la culture des sols. Il s'avère indispensable, pour l'avenir, d'assurer le développement de la discipline sur des bases plus larges et de renforcer sa position parmi les sciences apportant une contribution majeure au développement agricole. Plusieurs éléments de conjoncture actuelle font ressortir la nécessité d'agir dans ce sens.

Ainsi, certains secteurs de recherche scientifique et technique, qui connaissent un essor relativement nouveau et rapide (biotechnologies, génie génétique...) laissant espérer des possibilités de développement jusqu'alors inconnues, retiennent actuellement plus facilement l'intérêt des responsables politiques et financiers et concentrent à leur profit une part croissante des moyens de recherches, au détriment des secteurs plus traditionnels. Parmi ces derniers, la Science des Sols risque de manquer des moyens nécessaires à son développement satisfaisant, si elle ne s'attire une considération plus grande.

La prise de conscience grandissante, dans les milieux du développement et de la recherche agricole, du fait que la viabilité des systèmes de culture et le succès des opérations de développement nécessitent une maîtrise meilleure de la fertilité des sols et de leur évolution, est aussi à considérer avec le plus grand intérêt. Ce courant d'idée doit, en effet, porter les pédologues à mieux définir la position de leur discipline et à revendiquer une responsabilité plus grande dans le domaine des recherches concernant l'utilisation agricole des sols, de concert avec les agronomes. Nos possibilités dans ce domaine sont loin d'être partout reconnues, et il est nécessaire que les capacités actuelles de la discipline et ses potentialités pour le futur puissent être perçues de façon plus évidente.

La pédologie dispose déjà d'acquis importants devant lui permettre d'affirmer véritablement sa vocation de science de l'étude des sols, par un effort d'analyse, de clarification et, si besoin, de renouvellement de ses concepts, de ses finalités et de ses modalités d'actions. Il s'agit d'assurer un développement cohérent des recherches sur l'ensemble du champ thématique de la discipline, touchant aussi bien à la connaissance des sols,

avec leur spécificité et leur variabilité spatiale et temporelle, qu'aux possibilités de les améliorer et de les cultiver sans diminution de leur productivité à long terme. Dans ce domaine de l'étude des sols en rapport avec l'activité agricole, la Science des Sols doit notamment intégrer dans sa démarche l'analyse des relations entre les sols et le comportement des cultures, la recherche des fondements pédologiques des propriétés des sols et de leurs manifestations agronomiques, enfin leur comportement réactionnel aux sollicitations ou contraintes culturales en relation avec l'évolution de la capacité de production.

La conduite de ces recherches implique de travailler dans la logique de l'approche pédologique, basée sur une conception structuraliste du sol, et en faisant valoir, dans le domaine de l'agropédologie, le principe que les propriétés et le fonctionnement d'un sol se trouvent subordonnés à la nature et à l'organisation de ses constituants minéraux et organiques. Et c'est effectivement au contact avec d'autres disciplines, telles qu'agronomie, bioclimatologie, hydrologie..., que la Science des Sols doit pouvoir le mieux affirmer sa spécificité et renforcer son identité, en montrant la cohérence de ses concepts et de sa démarche pour l'ensemble des situations où le sol constitue un objet d'étude essentiel.

BIBLIOGRAPHIE

ANGE (A.), 1988 – La Recherche Agronomique pour le projet Crête Zaire – Nil. Résultats et propositions de programme pour la 2è phase du projet. Mission de Coopération Française – CIRAD/IRAT (Montpellier), 54 p., multigr.

Anonyme, 1987 – Synthèse des analyses de sol réalisées par le Projet C.Z.N. Doc. trav. n° 4, Recherche – Développement, Projet C.Z.N., 12 p., multigr.

BONZON (B.), DEVINCK (F.), MAZARD (P.) & SEVERIAN (P.), 1983 – Effets de différentes croûtes calcaires sur sol sodique acide. Résultats des études expérimentales conduites en 1982. Rapp. ORSTOM (Nouméa) – CREA Nassadiou, 38 p., multigr.

GUILLOBEZ (S.), 1984 – Projet Crête Zaïre – Nil. Etudes du milieu naturel ; morphologie régionale, défense des sols contre l'érosion hydrique, étude de la station expérimentale de Gakuta, amélioration de la fertilité des sols. République rwandaise. Mission de Coopération Française – IFARC, 64 p., multigr.

MOREAU (R.), 1986 – Variations spatiales d'une couverture pédologique relativement homogène et expérimentation agronomique en Basse Côte d'Ivoire. IBSRAM Proccedings, n° 4 : 163 – 172.

MOREAU (R.), 1988 – Sols et fertilité dans le cadre du projet Crête Zaire – Nil. Rapport d'évaluation au Rwanda. Mission de Coopération française – ORSTOM (Montpellier), 38 p., multigr.

LES ETATS DE SURFACE DES SAVANES DE L'OUEST AFRICAIN : RELATIONS AVEC LES SOLS ET INCIDENCES SUR L'ECONOMIE EN EAU

C. VALENTIN
ORSTOM Bondy

RESUME

L'instabilité structurale varie le long des versants en fonction des caractères directement hérités de la pédogenèse, comme la granulométrie ou la teneur en fer, et du passé cultural, comme le taux et la nature de la matière organique. Toutefois, cette dégradation potentielle ne se manifeste généralement qu'à la faveur d'une diminution du couvert végétal et de l'activité faunique. Cette baisse de productivité biologique résulte le plus souvent d'une exploitation inadaptée du milieu – la surface du sol subit alors des réorganisations généralement brutales – ou de variations climatiques. Ainsi, l'intensité de l'encroûtement augmente graduellement depuis les savanes humides jusqu'au Sahel.

Une typologie des principales croûtes de savane a été établie sur des bases morphologiques, génétiques et hydrodynamiques. Elle permet une évaluation satisfaisante des paramètres du ruissellement, tant en milieu naturel que cultivé.

INTRODUCTION

Les réorganisations superficielles des sols limitent considérablement l'infiltration, favorisent le ruissellement et l'érosion, entraînent des manques à la levée des semences. Pour les régions arides, elles représentent parfois la seule forme d'évolution actuelle de sols. Pourtant hydrologues, agronomes ou pédologues se trouvent le plus souvent désarmés pour caractériser les processus d'encroûtement, les comprendre et les maîtriser. Il n'est pas question, dans ce court exposé, d'aborder le problème dans son ensemble, mais plutôt d'évoquer quelques pistes d'étude.

I – L'INSTABILITE STRUCTURALE

A la suite des travaux de YODER (1936) et de HENIN (1938), un indice d'instabilité structurale est proposé au Congrès de Paris, en 1956, par HENIN et MONNIER. Il connaît dès lors un vif succès, non démenti plus de trente ans après. A ce jour, il reste l'outil privilégié d'analyse des facteurs intrinsèques de désagrégation. Avant d'évoquer ses limites, nous allons montrer, à l'aide d'exemples, l'intérêt de cette approche.

1. Variabilité dans l'espace : influence de la pédogenèse

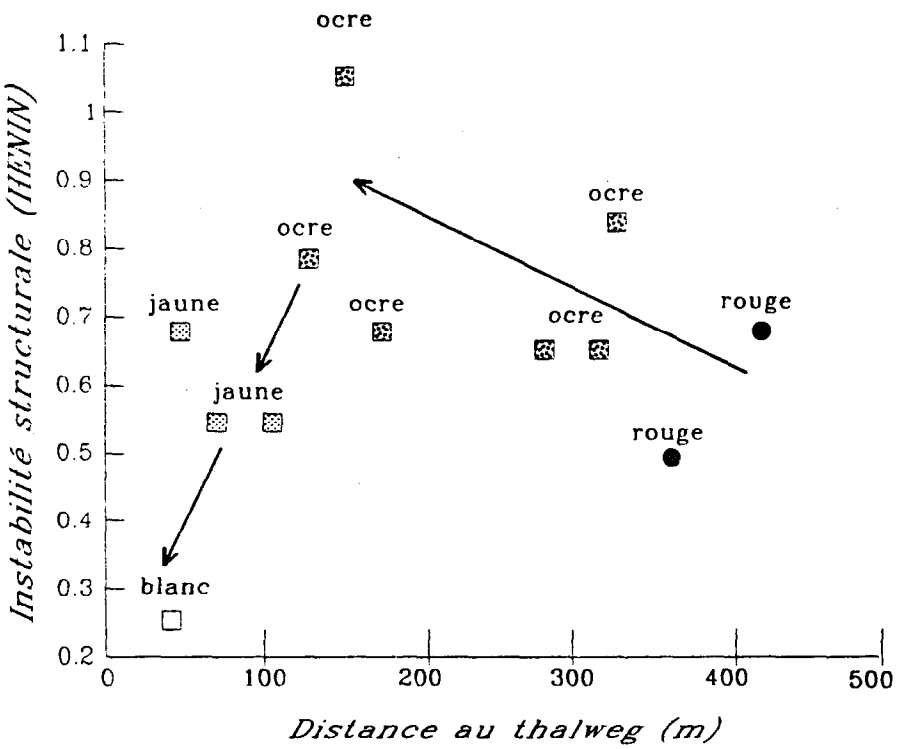


Figure 1 : *Variation de l'instabilité structurale le long d'une toposéquence de savane humide. A noter : la couleur, reflet des transformations minéralogiques, fournit des indications intéressantes quant aux propriétés physiques.*

Tout d'abord, cet indice a permis la mise en évidence du rôle de la pédogenèse sur la sensibilité à la désagrégation. Elle découle, en effet, de la granulométrie, de la minéralogie des argiles et de leur garniture cationique. Prenons l'exemple d'une toposéquence sur granito-gneiss de savane humide en Côte d'Ivoire. Les processus pédogénétiques ont conduit à la transformation d'une couverture pédologique argileuse, rouge, bien structurée en amont, en sols très éluviés, massifs, sableux et blancs à l'aval (FRITSCH *et al.*, 1987). Cette évolution se traduit par une instabilité structurale maximale à la mi-versant, à mi-chemin entre le pôle argileux et le pôle sableux (fig. 1).

2. Variabilité dans le temps : influence de l'utilisation des sols

Le deuxième enseignement fourni par l'utilisation de l'indice de HENIN a trait à l'évolution dans le temps. Intimement liée au taux et à la nature de la matière organique, l'instabilité structurale subit, en effet, des variations :

- *saisonnières* : en saison sèche, l'hydrophobie de la matière organique augmente, limitant ainsi les risques de dégradation (COMBEAU et QUANTIN, 1963) ;
- *à plus long terme* : le mode d'utilisation des terres influence directement leur instabilité structurale (fig. 2). Sur des sols ferrallitiques de savane humide, une dizaine d'années de jachère semble nécessaire à la restauration de l'état antérieur à la mise en culture.

La diminution du taux de matière organique, la néoformation d'argiles gonflantes, l'augmentation sensible des taux de sodium échangeable et des teneurs en sels solubles concourent à ce que l'instabilité structurale augmente depuis les régions côtières jusqu'aux confins sahariens. Toutefois, en réduisant le stock organique, la mise en culture des sols entraîne un certain décalage zonal, voire une azonalité : ainsi, près de Lomé, les terres de Barre cultivées sans restitution organique ni période de jachère (PLEUVRET, 1988), présentent une forme d'encroûtement analogue à celui des sols des régions sahéliennes.

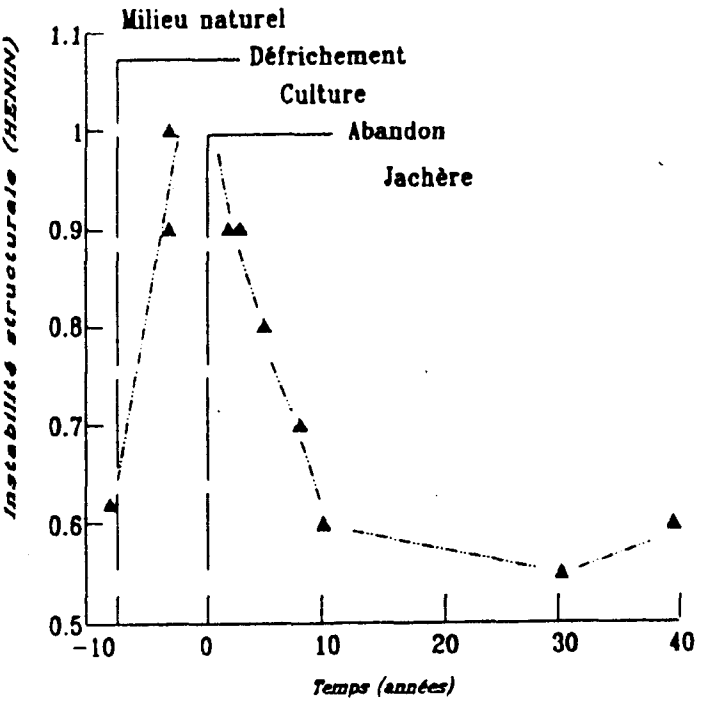


Figure 2 : *Variation de l'instabilité structurale en savane humide (Côte d'Ivoire) après mise en culture manuelle et au cours de la jachère.*

3. Considérations sur l'instabilité structurale

Depuis quelque temps, des critiques s'élèvent à l'encontre de la méthode de HENIN. En humectant brutalement des agrégats secs, elle tend à privilégier le mécanisme d'éclatement aux dépens de la désagrégation sous l'impact des gouttes de pluie (LE BISSONNAIS, 1988). Il s'ensuit :

- une différenciation des échantillons moins nette que pour des agrégats déjà humides ;
- un classement qui diffère selon l'état hydrique initial (fig. 3).

En d'autres termes, pour une même valeur d'instabilité structurale, deux sols peuvent présenter *in situ* des sensibilités à l'encroûtement fort différentes selon que l'un sera le plus souvent sec et l'autre humide.

Pertinentes pour les climats des latitudes moyennes, où la surface des sols reste humide une bonne partie de l'année, ces critiques doivent être nuancées pour les zones tropicales : l'horizon superficiel se dessèche plus rapidement entre chaque averse. Voilà, sans doute, pourquoi parmi 14 tests l'indice de HENIN s'avère le meilleur indicateur de l'érodibilité des sols tropicaux (DE VLEESCHAUWER *et al.*, 1978). Pour des conditions initiales très humides, la limite de liquidité d'ATTERBERG, reflet de la

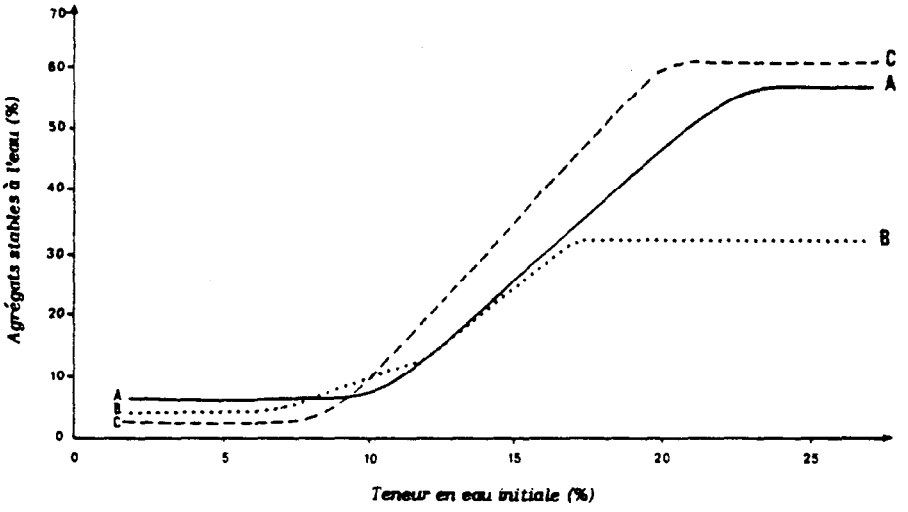


Figure 3 : *Influence de l'état hydrique initial des agrégats sur la stabilité structurale. Adapté de LE BISSONNAIS (1988).*

consistance sous un certain nombre de chocs, peut fournir des indications intéressantes quant au risque d'encroûtement (VALENTIN et JANEAU, à paraître).

II - LES CROUTES SUPERFICIELLES

1. Dynamique de formation

Aux facteurs intrinsèques d'instabilité structurale s'ajoutent les facteurs contingents de la désagrégation, souvent déterminants, tels l'état structural initial et le couvert du sol. Seules les observations

in situ permettent la prise en compte de l'ensemble des facteurs. Une des méthodes proposées pour caractériser la dynamique de formation des croûtes (BOIFFIN, 1984) consiste à suivre l'évolution du diamètre du plus petit agrégat non encore inclus dans la croûte (fig. 4). Ce diamètre augmente généralement de façon linéaire, en fonction de la somme des pluies (ou des énergies cinétiques reçues) ; la pente de la droite de régression sert à caractériser la vitesse à laquelle la structure d'un sol se délite.

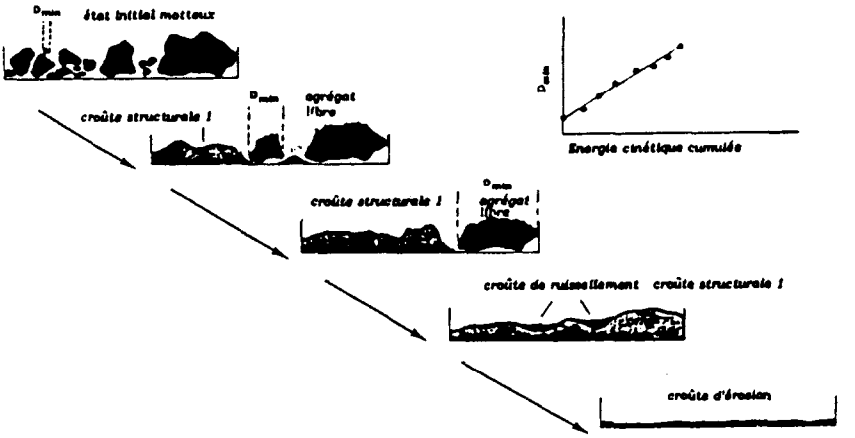


Figure 4 : *Evolution d'un lit de semence sur un sol à texture moyenne. Evolution du diamètre Dmin en fonction de l'énergie cinétique cumulée des pluies.*

2. Caractéristiques morphologiques et comportement hydrique

Une désagrégation rapide de la structure ne correspond pas systématiquement à la constitution d'une croûte particulièrement dure et imperméable. Les propriétés de la croûte formée dépendent davantage du nombre et du type de microhorizons constitutifs. Ce sont ces critères qui ont fourni la base d'une typologie morpho – génétique des croûtes des zones arides ouest – africaines (CASENAVE et VALENTIN, 1988). Pour les sols cultivés, 7 grands types de croûtes ont été identifiés :

- *Croûte de dessiccation* : il s'agit d'une forme très mineure de réorganisation ; lors du dessèchement, les sables superficiels se trouvent légèrement pris en masse .
- *Croûtes structurales* :
  . *à un microhorizon* (fig. 4) : elle inclut des reliques d'agrégats fondus, ce qui lui confère une certaine rugosité,
  . *à deux microhorizons* : un microhorizon sableux se forme au-dessus d'une pellicule plasmique,

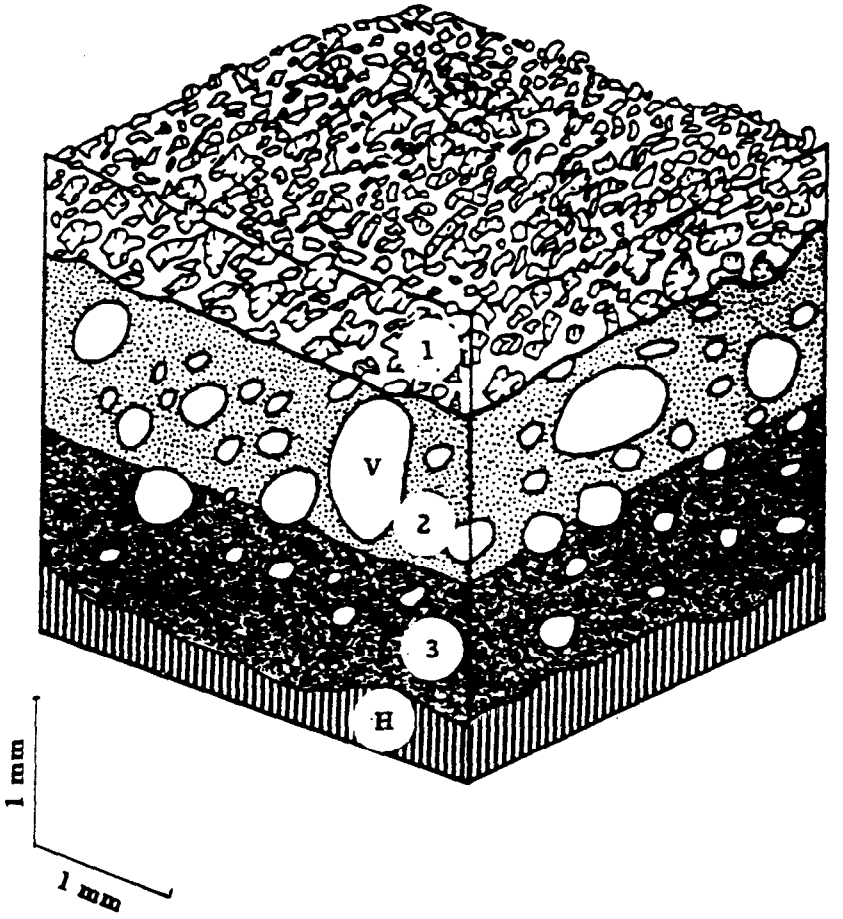


Figure 5 : *Croûte structurale à trois microhorizons. (1) sable grossier délié, (2) sable fin pris en masse et (3) pellicule plasmique. (V) désigne les vésicules et (H) l'horizon perturbé ni par la pluie, ni par le vent.*

. *à trois microhorizons* (fig. 5) : des sables grossiers déliés, puis des sables fins pris en masse recouvrent une pellicule plasmique ; souvent des vésicules apparaissent dans les deux derniers microhorizons. Les pellicules structurales se forment dès le début des pluies.

- *croûte d'érosion* : le vent et l'eau décapent les microhorizons sableux ; seule subsiste la pellicule plasmique ;
- *croûte de ruissellement* : des microhorizons sableux alternent avec des pellicules plasmiques ;
- *croûte de décantation* (fig. 6) : conforme à l'ordre de sédimentation dans un liquide au repos, la distribution verticale des microhorizons est l'inverse de celle de la croûte structurale à trois microhorizons (fig. 5).

Pour prévoir convenablement les principaux paramètres de l'hydrodynamique superficielle, il est nécessaire de prendre en compte, en plus du type de croûte, un certain nombre de facteurs tels que l'activité faunique, le couvert, le taux de gravillons et la rugosité. A partir de ces critères, onze grands types d'états de surface ont été définis, ainsi qu'un certain nombre de variantes. Cette approche, conçue initialement pour les zones arides, semble pouvoir être adoptée dans des régions plus humides, notamment pour les sols cultivés.

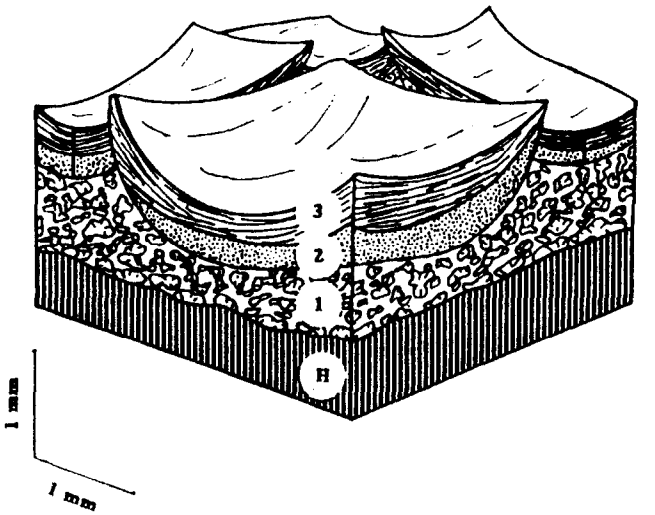


Figure 6 : *Croûte de décantation. (1) sable grossier délié, (2) sable fin pris en masse qui adhère à la plaquette plasmique rebroussée (3).*

CONCLUSION

Problème important de l'agriculture ouest – africaine, en tant qu'obstacle à l'infiltration et à la levée des semences, l'encroûtement superficiel requiert des méthodes d'étude adaptées aux échelles fines :
- de temps : une croûte peut se former en quelques minutes ;
- dans l'espace : épaisses de quelques millimètres, les réorganisations superficielles présentent des variations latérales parfois centimétriques.

Symptômes précoces de la dégradation des sols, les croûtes superficielles fournissent un élément essentiel du diagnostic de l'état du milieu. La connaissance de leurs séquences génétiques permet, en outre, d'émettre des pronostics sur les évolutions futures selon les modes de gestion des sols.

BIBLIOGRAPHIE

BOIFFIN (J.), 1984 – La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Docteur Ingénieur, INAPG, Paris, 320 p.

CASENAVE (A.) & VALENTIN C., 1988 – Les états de surface de la zone sahélienne. ORSTOM, Paris, 202 p.

COMBEAU (A.) & QUANTIN (P.), 1963 – Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols, en région tropicale. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., 3(1) : 17 – 26.

FRITSCH (E), PLANCHON (O) & BOA (D.), 1987 – Les transformations d'un paysage cuirassé au nord – ouest de la Côte d'Ivoire sur formations gneisso – migmatitiques. Séminaire régional de Yaoundé sur les latérites. Colloques et Séminaires de l'ORSTOM, 12 p.

HENIN (S.), 1938 – Etude physico – chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse, Imprim. Nat., Paris, 70 p.

HENIN (S.) & MONNIER (G.), 1956 – Evaluation de la stabilité de la structure du sol. Cong. Int. Science du Sol, VI, Paris, Vol B : 49 – 52.

LE BISSONNAIS (Y.), 1988 – Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse, Université d'Orléans, 195 p.

PLEUVRET (C.), 1988 – Infiltration et réorganisations superficielles sous pluies simulées. Cas des sols ferrallitiques du Sud Togo. D.E.A. de Pédologie, ORSTOM, Paris, 79 p.

VALENTIN (C.) & JANEAU (J.L.), à paraître – Les risques de dégradation structurale superficielle en savane humide. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol.

DE VLEESCHAUWER (D.), LAL (R.), DE BOODT (M.), 1978 – Comparison of detachability indices in relation to soil erodibility for some important Nigerian soils. *Pédologie*, 28(1) : 5 – 20.

YODER (R.E.), 1936 – A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.*, 28 : 337 – 351.

DISCUSSIONS ET SYNTHESE SUR LE THEME DE LA CARACTERISATION DES SOLS SOUS CULTURE

Président : **M. KHOUMA**
Vice – Président : **A. MAPANGUI**
Rapporteur : **M. LATHAM**

I – DEMARCHE ET PERSPECTIVES EN PEDOLOGIE POUR UNE UTILISATION RATIONNELLE DES SOLS (R. MOREAU)

L'auteur, en utilisant l'exemple d'une recherche agronomique menée dans la région de la crête Zaïre – Nil, analyse les difficultés rencontrées dans un milieu difficile et mal connu. Ces difficultés sont liées, dans le cas cité, à la nature très acide des terrains, à sa variabilité spatiale, ainsi qu'au contrôle de l'évolution des sols, et plus particulièrement de l'érosion et de l'évolution de la matière organique.

L'auteur propose un plan de travail articulé autour de 3 centres de préoccupation complémentaires :
- la connaissance des sols et de leur variabilité ;
- l'amélioration de la fertilité ;
- l'évolution sous culture.

S'agissant des études de fertilité et de son évolution, l'auteur distingue :
- une approche agronomique, qui permet de globaliser et de quantifier à l'échelle de la parcelle les performances agronomiques des sols ;
- une approche pédologique, qui est à même d'appréhender la variabilité pédologique par une analyse structurale fine, et qui permet d'en suivre les caractéristiques par l'étude des profils culturaux et des entités structurales qui les composent (organisation et nature des constituants organiques et minéraux, et de leurs propriétés).

La discussion relative aux thèmes soulevés par cette présentation a porté sur :

- la nécessité d'une analyse fine du site expérimental et des zones avoisinantes, afin d'en apprécier la variabilité, de dessiner les expérimentations en conséquence et de pouvoir transférer les résultats, est à souligner. Toutefois, parmi les problèmes qui se posent, il faut noter la question de la pertinence, pour les essais agronomiques, des critères retenus pour l'analyse géométrique (structurale) de la couverture pédologique et les risques de modification de la couverture pédologique par l'utilisation agricole ;

- l'origine de l'acidité et les moyens de la combattre ont aussi été évoqués. Il a été mentionné que dans ce cas toutes les conditions étaient réunies pour favoriser cette acidité – roche mère acide, couverture forestière ombrophile, forte pluviométrie, faible température – et qu'une évolution podzolisante avait lieu. Les essais par apport de travertin ou par incorporation de matière organique semblent pour l'instant peu concluants. Il faut cependant noter que les quelques paysans qui vivent dans la région ont obtenu des résultats encourageants par incorporation des déchets de ferme. Ceci pose bien évidemment le problème d'une enquête auprès des fermiers avant de se lancer dans l'expérimentation agronomique ;

- l'approche agronomique par bloc dispersé ou par utilisation de grands vases de végétation avant expérimentation au champ a aussi été évoquée.

Par ailleurs, le danger de la formation de terrasse d'érosion à la suite de l'installation de bandes enherbées a été mentionné.

Enfin, les difficultés rencontrées soulignent une fois encore les dangers des essais de transfert systématique des connaissances sans caractérisation préalable du milieu et adaptation des techniques.

II – LES ETATS DE SURFACE DES SAVANES DE L'OUEST AFRICAIN : RELATIONS AVEC LES SOLS ET INCIDENCES SUR L'ECONOMIE EN EAU (C. VALENTIN)

Cette présentation en deux parties a envisagé les tests de laboratoire destinés à analyser l'instabilité structurale des sols et les observations et cartographie de terrain des divers types de croûte et d'état de surface

observés. Concernant les analyses de laboratoire, l'auteur souligne la pertinence des tests de HENIN pour évaluer l'instabilité structurale, mais aussi ses limites, en particulier en zone perhumide. L'approche de terrain, grâce à des outils simples, permet pour sa part d'obtenir des résultats très importants sur la dynamique des états de surface et donc des paysages. Une analyse de l'évolution de la formation des croûtes et de leur dégradation a des conséquences très importantes au niveau pédologique, hydrologique et agronomique. L'auteur présente une typologie des croûtes et des essais de cartographie des états de surface dans de petits bassins versants.

Devant l'aspect multidisciplinaire de l'étude des croûtes, l'auteur conclut en insistant sur le rôle indispensable du pédologue dans ce domaine.

La discussion très animée qui a suivi l'exposé a porté sur les points suivants :

- la constitution et la nature des croûtes ainsi que les facteurs les favorisant – sécheresse, érosion superficielle, micro – illuviation, dispersion des argiles du fait de leur nature ou des cations auxquels elles sont liées – ont été ainsi successivement évoqués. Matière organique et oxydes de fer apparaissent en revanche comme des facteurs agrégeants ;

- la discussion s'est alors centrée sur le dilemme, combattre les croûtes ou les favoriser. Les combattre par les méthodes chimiques, physiques et biologiques apparaît coûteux et souvent impraticable. Ne vaut – il donc pas mieux les favoriser, pour encourager le ruissellement et l'accumulation d'eau dans des impluviums ? Cette solution, séduisante en théorie, apparaît toutefois comme un constat d'échec, par lequel on admet la dégradation irréversible des sols encroûtés et leur élimination de l'ensemble de la production agricole, ce qui réduirait encore les surfaces cultivées ;

- l'utilisation des croûtes en tant qu'indice de désertification et les possibilités de cartographie par l'imagerie satellite ont été évoquées par la suite. De nombreux travaux sont actuellement en cours sur ce sujet. Ils devraient aboutir à une meilleure appréciation du processus de désertification ;

- l'analogie entre la formation des croûtes et la destruction des structures après défrichement de la forêt humide est ensuite envisagée, donnant une nouvelle dimension aux programmes d'étude des états de surface.

Enfin, à la question : la recherche sur les croûtes n'est elle pas trop importante pour être confiée à des pédologues ? Il a été répondu : il faut bien voir que les états de surface sont intimement associés au reste de la couverture pédologique, et que les phénomènes de prise en masse observés au niveau des croûtes peuvent atteindre des dimensions beaucoup plus grandes dans la couverture pédologique elle – même.

FONCTIONNEMENT DES SOLS ET ALIMENTATION DES PLANTES

HYDRODYNAMIQUE INTERNE ET DYNAMIQUE DES ELEMENTS MINERAUX DANS LES SOLS TROPICAUX EXONDES. CONCEPTS ACTUELS ET CONSEQUENCES AGRONOMIQUES.

R. POSS
ORSTOM - BP 375 - Lomé - TOGO

RESUME

L'étude de l'hydrodynamique interne de versants représentatifs d'Afrique intertropicale montre que les mouvements de l'eau présentent généralement une composante latérale marquée. Celle-ci est due à la présence, dans les profils, d'horizons peu perméables, au-dessus desquels se crée une nappe perchée temporaire. Le battement de cette nappe est le moteur principal de l'évolution actuelle des sols et il constitue une contrainte souvent sévère pour l'agriculture. Si, qualitativement, les phénomènes sont maintenant bien connus, la mesure des flux à l'échelle de la parcelle reste délicate, en raison de la variabilité latérale des sols et de la précision limitée des méthodes d'étude. Pour appréhender ces flux, la méthodologie la mieux adaptée semble une caractérisation tridimensionnelle fine des sols suivie de mesures des paramètres hydrodynamiques dans chaque unité, les résultats étant interprétés à l'aide de méthodes statistiques.

Sur le plan agronomique, la connaissance du régime hydrique, et en particulier de l'évapotranspiration réelle, est la clé de la compréhension de la variabilité interannuelle des rendements. La modélisation du bilan hydrique, qui permet de tester des stratégies agricoles sur plusieurs décennies, constitue une méthode d'avenir pour mieux adapter les variétés et les cycles culturaux aux conditions pédoclimatiques.

Si les pertes d'éléments minéraux à la base des profils par lixiviation ont pu être évaluées dans certains cas, les relations entre la solution du sol et le

complexe d'échange, et entre le développement du système racinaire et la composition de la solution du sol, restent très mal connues, en raison principalement de problèmes méthodologiques. Les recherches dans ce domaine devraient contribuer à améliorer la productivité de l'agriculture africaine, tout en maintenant un faible niveau d'intrants, grâce à une meilleure prise en compte des conditions stationnelles.

INTRODUCTION

Dans la zone intertropicale, les sols forment des corps organisés en toposéquences le long des versants. Dans tous les cas l'eau est le principal agent de la dynamique des sols. Elle circule dans pratiquement tous les horizons, et elle est responsable de la plus grande partie des mouvements des éléments minéraux en solution. Elle transforme également les matériaux par transport de matière en suspension, par hydrolyse des minéraux en place et par formation de minéraux argileux (néoformation).

Sur le plan biologique, toute vie sur terre est liée à l'absorption d'eau. Les plantes la trouvent dans le sol, qui tamponne l'irrégularité des pluies. Dans ce domaine, l'agriculture africaine se trouve généralement confrontée à des conditions extrêmes : dans les zones à forte pluviosité le système racinaire souffre d'excès d'eau, alors que dans les zones arides les plantes subissent des périodes sèches pendant une partie de leur cycle végétatif. Comme le drainage et l'irrigation ne sont pas envisageables actuellement, les études sur l'alimentation en eau revêtent en Afrique une grande importance pour mieux adapter les stratégies paysannes au climat.

Afin de quantifier les disponibilités en eau pour les plantes, il est nécessaire de connaître l'hydrodynamique des sols sur lesquels les parcelles sont implantées, avec tous les problèmes méthodologiques que ces études comportent. Nous allons exposer ici les principaux acquis des études actuelles sur l'hydrodynamique interne et la dynamique des éléments minéraux en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale, en nous limitant au cas des sols exondés, qui représentent la plus grande partie des terres agricoles de cette région.

I – LA DYNAMIQUE DE L'EAU

Il sera traité successivement de la dynamique à l'échelle du profil, de la prise en compte de la variabilité spatiale et de l'alimentation hydrique des plantes.

1. Dynamique à l'échelle du profil

Les premières études concernant l'hydrodynamique des sols tropicaux ont porté sur des sols ferrallitiques (HUMBEL, 1976). Elles ont démontré que dans ces sols le mouvement de l'eau était généralement vertical et profond.

La pénétration de l'eau dans les sols ferrallitiques est difficile à étudier, car les macropores jouent souvent un rôle important. Il s'agit d'un phénomène qui avait été souligné par plusieurs auteurs dans les zones tempérées (*Cf.* l'article de synthèse de BEVEN et GERMANN, 1982), et qui a été récemment démontré à plusieurs reprises dans les sols ferrallitiques : COLLINET, en 1981, observe sous pluies simulées des circulations importantes dans les pores résultant de la décomposition de racines en forêt ivoirienne (comm. orale) ; JOHNSON *et al.* (1983) visualisent à l'aide de rhodamine des voies de circulation préférentielles dans les sols du sud – ouest de l'Australie ; enfin, les mesures d'humidité du sol à l'humidimètre à neutrons montrent, au Togo méridional, une humectation de profondeur qui précède celle des niveaux intermédiaires (fig. 1).

Ces circulations rendent inapplicables les équations habituelles d'infiltration et de circulation dans les sols (RICHARDS, 1931 ; PHILIP, 1957). Le modèle qui prendra en compte ce phénomène reste à élaborer.

Dans ce type de sol, une part de la porosité reste toujours occupée par l'air au cours des pluies, même pendant les plus fortes averses (fig. 1). Il s'agit donc de sols qui ne sont jamais engorgés, ce qui maintient des conditions d'oxydo – réduction favorables au développement du système racinaire des végétaux. A la fin des averses, ces sols se ressuient rapidement (FRETEAUD *et al.*, 1987 ; AMADOU et YAO, 1988 ...) : la décroissance de l'humidité en fonction du temps devient faible après un jour ou deux (fig. 2).

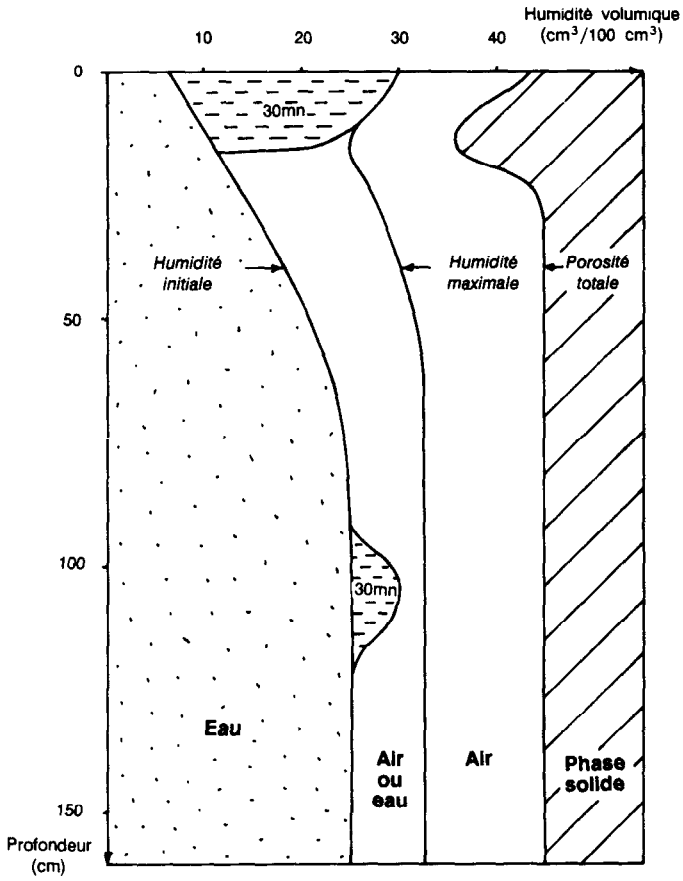


Figure 1 : *Schéma de l'évolution de l'humidité au cours de pluies simulées (terres de Barre)*

La notion de "capacité au champ", bien qu'elle ne repose sur aucune base physique et que sa détermination pratique soit variable selon les auteurs, peut être appliquée, car l'humidité varie peu quelques jours après les pluies. Cette notion est généralement utilisée dans les études agronomiques, car elle donne la valeur de la quantité d'eau que le sol est censé retenir après humectation. La différence entre l'humidité à la "capacité du champ" et l'humidité à pF 4,2 constitue la "réserve utile", quantité d'eau maximale utilisable par les plantes cultivées.

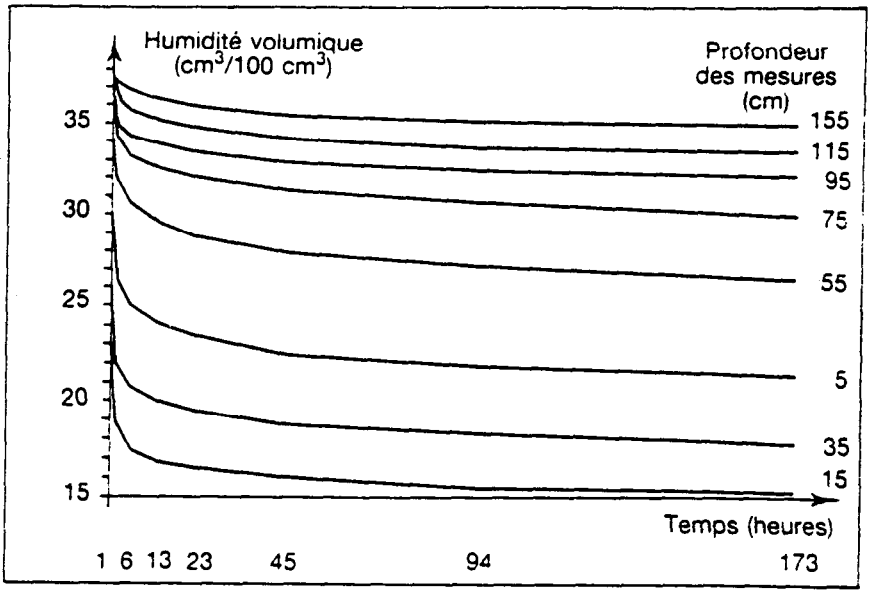


Figure 2 : *Evolution de l'humidité après un apport d'eau (terres de Barre)*

Il s'agit d'une quantité maximale avant le dessèchement définitif du végétal, car les plantes subissent des *stress* hydriques pour des pF beaucoup plus faibles (à partir de pF 2,5 environ pour le maïs au Togo méridional).

Si les sols ferrallitiques à drainage vertical et profond sont largement représentés dans les zones les plus pluvieuses, ils ne constituent cependant qu'une faible proportion des sols des régions plus sèches. Dans ces régions, les études actuelles montrent que les sols sont généralement engorgés une partie de l'année, en raison de la présence d'un horizon peu perméable à moins de deux mètres de profondeur (dans la plus grande partie des cas, cet horizon provient de l'altération de la roche en argiles smectitiques). Le fonctionnement hydrique de ces sols peut être schématisé par la figure 3.

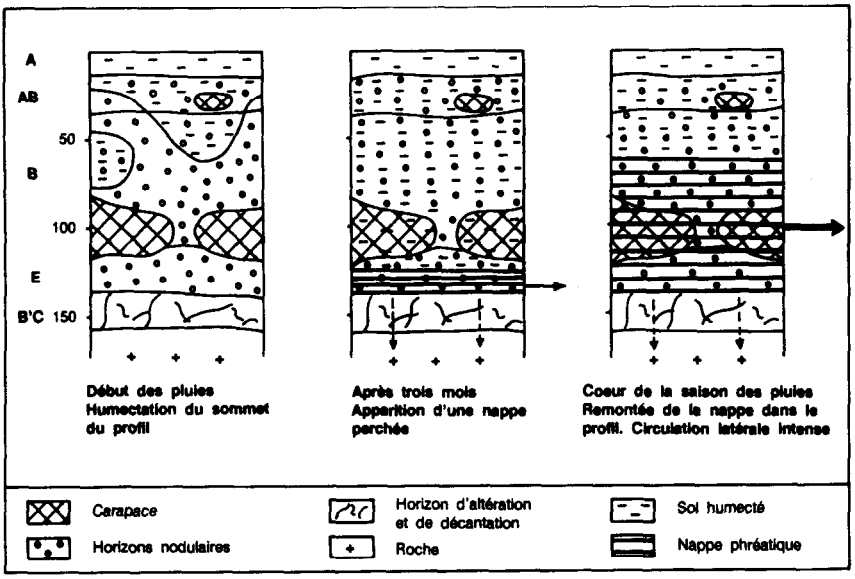


Figure 3 : *Fonctionnement hydrique des sols à nappe perchée temporaire*

En début de saison des pluies, le front d'humectation progresse à partir de la surface (les macropores peuvent également intervenir ici) jusqu'au niveau peu perméable. Une nappe se crée alors au-dessus de ce niveau. En fonction de la pluviosité de l'année, la nappe remonte plus ou moins haut dans le profil, créant une contrainte pour l'enracinement des végétaux. Comme le plancher de la nappe n'est pas horizontal, des circulations latérales apparaissent. Elles sont responsables d'un important entraînement de matières en suspension, prouvé par la couleur laiteuse des eaux qui s'écoulent de la nappe lorsqu'elle vient à l'affleurement, et par l'appauvrissement intense de l'horizon qui surmonte le plancher de la nappe (horizon E). Ce mouvement s'accompagne généralement d'une illuviation au sein de l'horizon qui en constitue le plancher (horizon B'). Mais la circulation de l'eau ne s'effectue pas dans la masse de l'horizon E : elle emprunte des voies de circulation préférentielles, qui constituent des poches plus appauvries, souvent boulantes lorsque le sol est sec. Le nord du Togo constitue un cas extrême car, sur shales silteux, les grains du squelette (de la taille de limons) peuvent eux-mêmes être transportés. La vitesse de circulation de la nappe peut atteindre 50 $cm.h^{-1}$ (marquage au

chlorure de sodium), avec une charge en suspension de l'ordre de 0,2 $g.l^{-1}$. Dans les horizons vidés, le taux de nodules ferrugineux dépasse alors 80 % de la masse de l'horizon (POSS et ROSSI, 1987).

A l'échelle de l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, il apparaît donc que de nombreux sols sont engorgés une partie de l'année. Les profils bien drainés sont relativement rares, et surtout développés dans les zones les plus humides.

2. Prise en compte de la variabilité spatiale

2.1. Variabilité à l'échelle du versant

Au début des années 70, BOCQUIER (1973) puis BOULET (1978) donnent un nouvel élan à l'étude des couvertures pédologiques tropicales, en montrant les liens génétiques qui existent entre les différents horizons le long d'un versant. Toute leur interprétation repose sur les mouvements latéraux de l'eau, qu'eux-mêmes n'ont pas pu quantifier. Mais leur nouvelle vision de l'organisation et du fonctionnement des sols fut féconde : elle a été à l'origine de nombreux travaux qui cherchent à relier la morphologie des sols et leur fonctionnement hydrique. Des résultats ont déjà été publiés sur la Guyane (HUMBEL, 1978 ; GUEHL, 1984 ...), sur le Tchad (VIZIER, 1983) et sur la Côte d'Ivoire (POSS et VALENTIN, 1983). D'autres sont en cours dans divers pays d'Afrique et d'Amérique du Sud.

La figure 4 représente un exemple de fonctionnement répandu dans la zone soudanienne.

Dans ce cas, le modelé du paysage résulte de l'entaille par érosion régressive, à partir de l'axe de drainage, d'une ancienne surface ferrallitique. Les témoins de cette surface sont les cuirasses sommitales et les altérites ferrallitiques profondes qui s'étendent du sommet de versant jusqu'à mi-versant. Plus en aval, ces altérites ont été entièrement déblayées, et la roche peu altérée apparaît à moins de deux mètres de profondeur, surmontée d'horizons riches en argiles smectitiques. L'hydrodynamique actuelle des versants résulte de

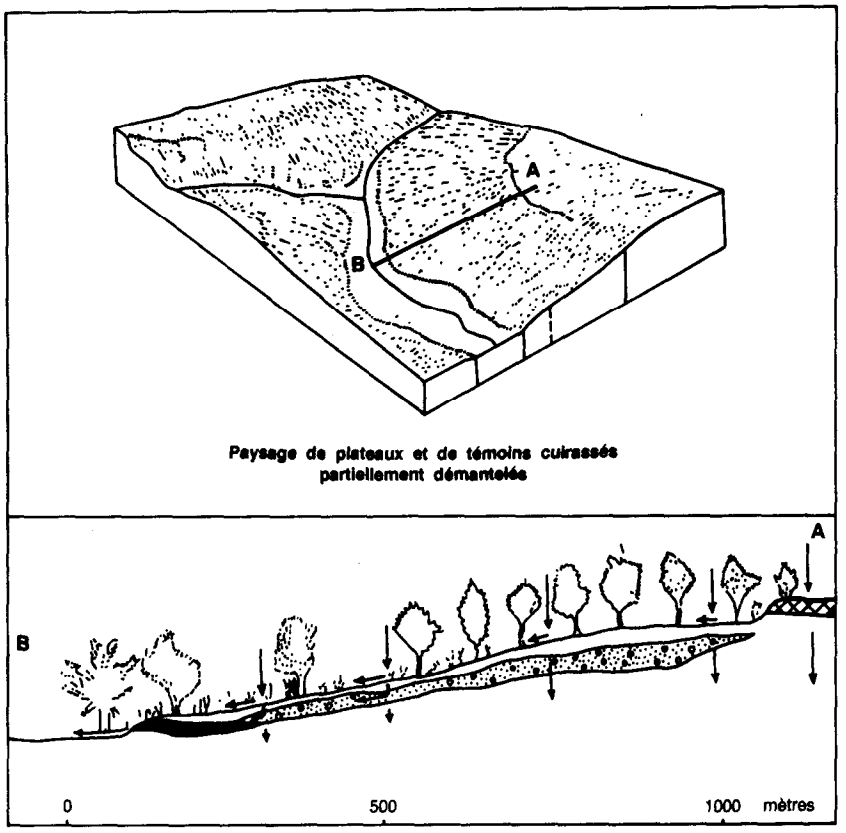


Figure 4 : *Schéma de l'organisation des sols et du fonctionnement hydrique d'un paysage de zone soudanienne*

cette organisation : en sommet de versant, toute l'eau qui ne ruisselle pas en surface (*Cf.* la communication de C. VALENTIN) peut traverser verticalement plusieurs mètres de sol pour rejoindre les nappes (LENOIR, 1978). A l'aval, les horizons smectitiques bloquent le drainage vertical, et une nappe perchée temporaire envahit le bas du versant au cours de la saison des pluies, souvent pendant plusieurs mois consécutifs.

Les études de fonctionnement de versants représentatifs constituent la clé de la compréhension de la dynamique actuelle des paysages. Elles nécessitent un important travail de

caractérisation morphologique et de suivi hydrodynamique. L'étude des sols engorgés pose en particulier de nombreux problèmes méthodologiques encore mal résolus. Tout d'abord le matériau constitutif des horizons se prête souvent mal aux caractérisations hydrodynamiques : il s'agit fréquemment de matériaux fortement gravillonnaires dans les horizons appauvris, et de matériaux à argiles gonflantes à la base des nappes. D'autre part, si la quantification des mouvements d'eau dans les sols non saturés est déjà délicate (lysimètres, sondes à neutrons...), elle ne peut être abordée qu'indirectement dans le cas des sols engorgés (piézomètres, marquages, débits à l'exutoire). Il reste donc beaucoup à faire pour mieux caractériser le fonctionnement de ces sols largement répandus dans les zones soudaniennes et soudano – sahéliennes.

2.2. Variabilité à l'échelle de la parcelle

Dans une parcelle apparemment homogène, les variations latérales des propriétés hydrodynamiques sont importantes. Si la dynamique reste qualitativement la même, il existe quantitativement des différences considérables d'un point à un autre.

Pour résoudre ce problème, une approche naturaliste peut être utilisée. La démarche consiste à faire une analyse tridimensionnelle détaillée du sol, qui permet de définir les différents types de matériaux présents dans la zone étudiée. Ces matériaux font ensuite l'objet d'une caractérisation hydrodynamique. C'est l'approche utilisée par l'équipe de Guyane ; elle a également fourni des résultats intéressants au Togo (*Cf.* communication de WOROU).

L'autre approche est celle des physiciens du sol. Elle ne part pas d'une structure spatiale mise en évidence par des observations morphologiques, mais elle cherche à caractériser la structure spatiale en analysant les résultats de mesures hydrodynamiques réparties sur toute la parcelle. Les premières études de ce type ont été réalisées par IMBERNON au Sénégal (VACHAUD *et al.*, 1982). Elles ont permis de conclure que, dans le cas d'un sol très homogène latéralement, les principaux paramètres qui déterminent la circulation de l'eau dans le sol suivent une loi lognormale. Elles ont prouvé

par ailleurs que des mesures effectuées à faible distance ne sont pas indépendantes, mais sont auto – corrélées jusqu'à une distance appelée distance d'autocorrélation. Une des conséquences de ces résultats est, qu'en toute rigueur, la moyenne des valeurs mesurées au champ n'est pas représentative du comportement moyen d'une unité de sol. A partir de ces constatations, plusieurs études faisant intervenir la distribution spatiale des paramètres ont été réalisées à l'aide des techniques de la géostatistique (en particulier par CISSE au Sénégal et l'équipe HYPERBAV en Côte d'Ivoire). Cependant, ce type d'étude nécessite une expérimentation lourde : il est nécessaire de disposer d'au moins 40 mesures du même paramètre (VAUCLIN, comm. orale). Les résultats actuellement publiés montrent qu'il s'agit là d'une voie de recherche prometteuse, mais non encore opérationnelle en termes de développement. Les résultats des expérimentations en cours devraient permettre de dégager des protocoles allégés et de préciser l'intérêt et les limitations de ces méthodes.

Les deux approches sont en réalité complémentaires. La meilleure démarche serait de réaliser une compartimentation du volume pédologique à l'aide des méthodes d'analyse tridimensionnelles, afin d'identifier les différents matériaux présents dans la zone étudiée. Les méthodes d'analyse statistique pourraient être ensuite appliquées à chacun de ces matériaux.

3. Application à l'alimentation hydrique du système racinaire

3.1. Etudes stationnelles

En fonction de la quantité d'eau disponible pour les racines des plantes, qui dépend de la pluviométrie et de la "réserve utile" dans la zone explorée par les racines, les besoins de la plante sont plus ou moins satisfaits. Or la transpiration est souvent directement proportionnelle à la production de biomasse (RITCHIE, 1986). Il est donc intéressant de rechercher les plantes et les stratégies agricoles qui permettent d'obtenir une transpiration maximale pour un climat donné.

Pour connaître la consommation en eau d'un couvert végétal (que nous confondrons avec l'évapotranspiration réelle ETR),

l'équation de conservation de la masse est généralement appliquée à de petites parcelles :

ETR = P − R − D − *var.* S
P : précipitation
R : ruissellement
D : drainage
var. S : variation du stock d'eau du sol

L'ETR est donc estimée par différence entre différents paramètres. Le drainage et la variation de stock sont deux paramètres difficiles à évaluer à l'aide des lysimètres ou en utilisant la méthode tensio – neutronique, et ils conditionnent la précision du résultat sur l'ETR. Il est donc difficile de connaître l'ETR au champ avec une bonne précision.

La consommation en eau des plantes est liée à plusieurs facteurs. Elle dépend tout d'abord de la variété cultivée, de son stade de développement et de la demande climatique caractérisée par l'évaporation potentielle ETP (évaporation d'un gazon bien alimenté en eau). DANCETTE (1976a, 1976b et 1983) a précisé ces facteurs pour différentes plantes dans le cas du Sénégal ; la figure 5 montre les variations de la demande climatique à l'échelle d'un pays, la demande la plus forte correspondant d'ailleurs à la zone la plus aride.

L'influence du stade de développement sur les besoins en eau de la plante est caractérisé par les coefficients culturaux (rapports entre l'évapotranspiration maximale ETM du couvert végétal et la demande climatique pour chacun des stades physiologiques) : selon les variétés, les besoins peuvent largement différer (fig. 6).

Pour définir les stratégies agricoles, il faut tenir compte en premier lieu de l'évapotranspiration réelle de la plante, mais d'autres facteurs doivent également être pris en considération : présence de pluies au moment du semis, satisfaction des besoins en eau au moment de la floraison ou, pour les régions les plus humides, absence de précipitations trop abondantes au cours de la saison de culture. Etant donné la variabilité interannuelle des précipitations, ce calage sur les facteurs

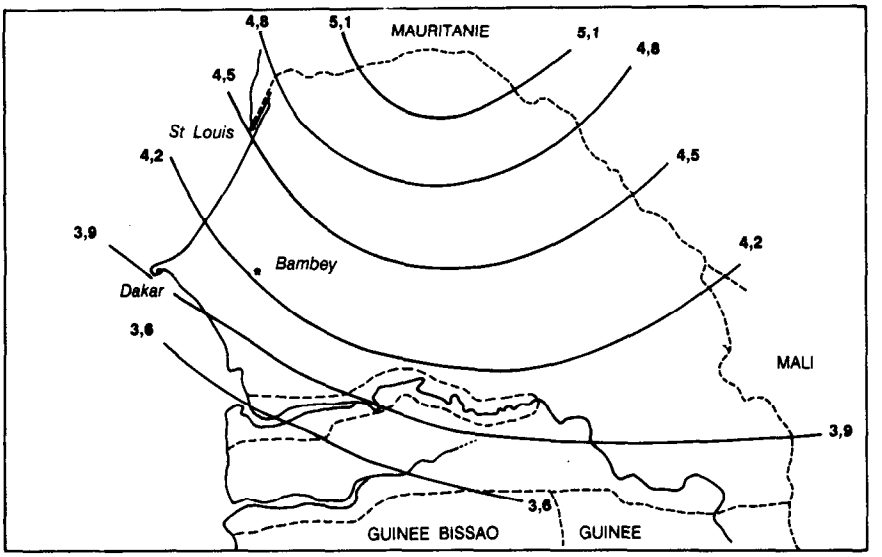


Figure 5 : *Evapotranspiration moyenne d'hivernage (mm.j^{-1}) au Sénégal (d'après DANCETTE, 1976b)*

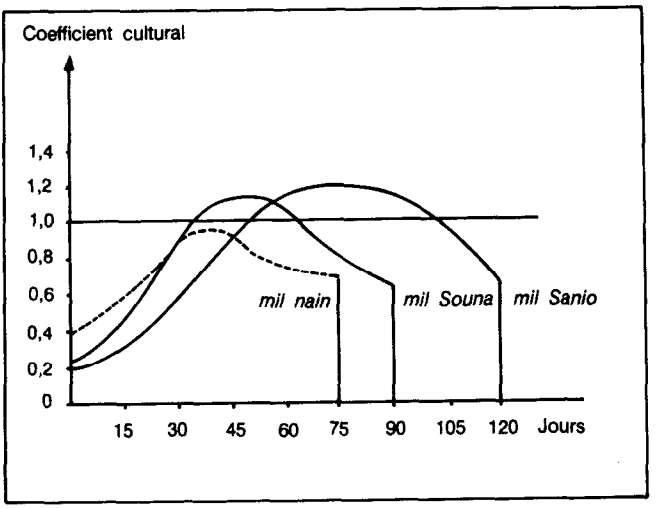


Figure 6 : *Evolution des coefficients culturaux au cours du cycle cultural de 3 variétés de mil (d'après DANCETTE, 1976a)*

climatiques est facilité par l'utilisation de modèles de simulation du bilan hydrique. Il existe actuellement un grand nombre de modèles disponibles, conceptuels (NIMAH et HANKS, 1973 ; ROWSE *et al.*, 1978 ; de JONG et CAMERON, 1979 ; FEDERER, 1979 ; BELMANS *et al.*, 1983 ...) ou empiriques. Les deux modèles les plus utilisés en Afrique sont les modèles de la FAO (1978) et surtout celui développé par l'IRAT (FRANQUIN et FOREST, 1977), qui a déjà été testé avec succès dans plusieurs pays et qui est maintenant largement utilisé en Amérique du Sud. Ces modèles permettent de prendre en compte la variabilité climatique pour tester différentes stratégies, en termes de rendement et de risque pour l'agriculteur. Au Togo méridional, cette démarche a permis de montrer que, dans le cas de la culture du maïs, le rendement moyen était lié à l'ETR sur l'ensemble du cycle, mais que la satisfaction des besoins en eau au moment de la floraison constituait un facteur de risque (POSS *et al.*, 1988). La simulation du bilan hydrique permet également d'apporter des éléments de réponse à des problèmes aussi différents que le choix des variétés, le calage des dates de semis, l'évaluation du drainage ou le zonage agro – pédo – climatique. Il est certain que les études de bilan hydrique au champ s'orienteront de plus en plus vers la détermination de paramètres permettant le calage des modèles de simulation.

3.2. Influence de la variabilité latérale des sols

Le problème de l'influence de la variabilité latérale des sols sur l'alimentation hydrique du système racinaire est un problème mal résolu. En effet, les mesures ponctuelles de consommation en eau réalisées à l'aide de lysimètres ou de la méthodologie tensio – neutronique ne permettent pas une extrapolation précise au niveau de la parcelle. Elles se prêtent mal aux répétitions, sont elles – même peu précises, et la variabilité latérale des sols est difficile à prendre en compte. De grands progrès restent à faire dans ce domaine, et il est possible que la solution au problème de l'évaluation précise de l'évapotranspiration réelle des couverts végétaux provienne des techniques agroclimatiques ou radiométriques.

Cependant, l'observation de parcelles situées sur un versant révèle clairement qu'en Afrique les variations à l'intérieur d'une parcelle dans une unité morpho – pédologique donnée sont en général bien plus faibles que les variations entre des parcelles situées sur des unités morpho – pédologiques différentes. Pour pouvoir extrapoler des résultats concernant les relations eau – sol – plante à l'échelle régionale, il convient donc d'implanter des blocs dans chacune des unités le long d'un versant, perpendiculairement à l'axe de différenciation des sols. Comme nous venons de le voir, les mesures dans chaque bloc ne sont pas très précises, mais des différences significatives de comportement selon la position sur le versant peuvent être mises en évidence.

Un exemple de l'influence des variations pédologiques à grande échelle sur le comportement des cultures est fourni par le travail de WOROU (1988). Dans le cas de nappes perchées temporaires (fig. 7), la profondeur de la nappe détermine le niveau de rendement d'une culture de maïs de contre – saison. Dans ce cas, c'est donc la caractérisation des sols, et des nappes phréatiques qui y sont liées, qui permet d'implanter les parcelles de culture.

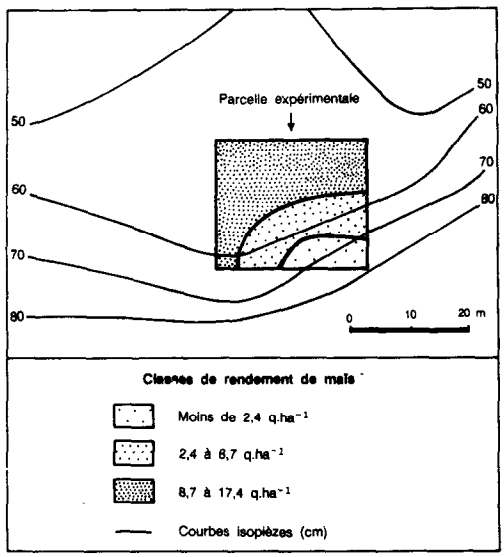


Figure 7 : *Influence de la profondeur de la nappe sur le rendement d'une culture de maïs de contre – saison (d'après WOROU, 1988)*

II - LA DYNAMIQUE DES ELEMENTS MINERAUX

1. Relations entre la phase solide et la concentration de la solution du sol

La connaissance de la composition de la solution du sol est de première importance pour comprendre la croissance des végétaux. En effet, l'absorption des éléments minéraux par les racines s'effectue à partir du film d'eau qui les entoure, à l'exception du potassium, qui semble pouvoir être prélevé directement sur le complexe d'échange (CALLOT *et al.*, 1982). En Afrique, les études sur la solution du sol ont surtout cherché à quantifier les pertes par lixiviation en dessous de la zone colonisée par les racines, que ce soit à l'aide de dispositifs de type lysimétrique (ROOSE, 1981 ; CHABALIER, 1984) ou en utilisant des capteurs de solution du sol (PIERI, 1979 ; SARAGONI et POSS, 1988). L'ambiance physico-chimique de la zone d'exploration racinaire, ainsi que les relations entre la concentration de la solution du sol et la dynamique du complexe d'échange sont très mal connues. Il semble qu'en zone tempérée les cations en solution ne représentent qu'une faible fraction ($1/10^e$ à $1/100^e$) des cations adsorbés sur le complexe d'échange (FRIED et BROESHART, 1967). Le phénomène se retrouve en zone intertropicale : dans les terres de Barre du Togo méridional, les cations fixés sur le complexe d'échange (environ 3 mé/100g) représentent effectivement 70 fois plus que les cations en solution (estimés à l'aide de capteurs de solution en céramique à 1,8 m de profondeur). Comme le soulignent CALLOT *et al.* (1982), le complexe d'échange constitue une réserve d'éléments nutritifs qui passent progressivement en solution, lorsque les ions sont absorbés par les racines ou entraînés par lixiviation.

La vitesse de circulation de l'eau dans le sol intervient sur la cinétique des éléments minéraux à deux niveaux. Tout d'abord elle conditionne le temps de contact entre la solution du sol et le complexe d'échange, donc la concentration. D'autre part, elle détermine la quantité lixiviée à un niveau donné.

La concentration de la solution du sol et le flux de drainage interviennent conjointement pour déterminer les pertes annuelles, ainsi qu'il apparaît dans le tableau 1.

Pour un drainage constant en 1985, les pertes en éléments minéraux sous le système maïs – légumineuse sont plus importantes que sous le système maïs – maïs en raison de la concentration de la solution du sol. Sous le système maïs – légumineuse, les pertes sont plus importantes en 1986 qu'en 1985, malgré une concentration de la solution plus faible, en raison d'un drainage plus élevé.

Tableau 1 : *Concentration en nitrates de la solution prélevée à 180 cm et pertes par lixiviation sous deux systèmes de culture (Davié, 1985 et 1986)*

	1985 (211 mm de drainage)		1986 (382 mm de drainage)	
Type de rotation	Concentration (mé/l)	Pertes annuelles (kg/ha)	Concentration (mé/l)	Pertes annuelles (kg/ha)
maïs – maïs	1,1	35	0,9	65
maïs – légumineuse	2,1	62	1,0	88

2. Transfert des solutés dans le sol à l'échelle du profil

Dans le domaine des mécanismes de transfert des solutés à travers les sols, aucune étude n'a été réalisée en Afrique. Un rappel des mécanismes généraux permettra de situer les problèmes concernant le prélèvement de la solution du sol.

Les études sur les transferts de soluté ont montré qu'en milieu saturé le déplacement des solutés s'effectuait sous l'effet de trois mécanismes :

- la convection, qui entraîne les éléments dans le mouvement général du liquide ;
- la diffusion, qui agit lorsqu'il existe des gradients de concentration ;
- la dispersion mécanique, qui résulte du freinage des fluides le long des pores et de vitesses d'écoulement différentes selon le diamètre et la tortuosité des pores.

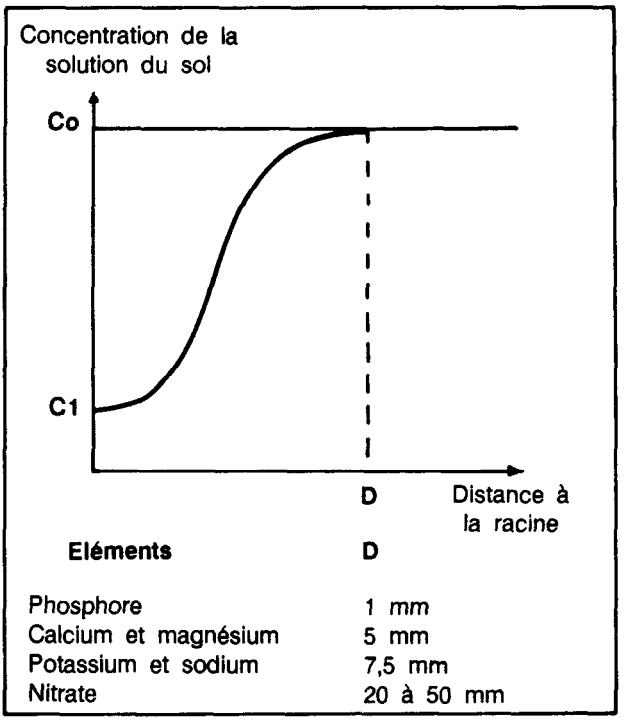
Dans les milieux non saturés, les processus sont encore plus complexes, car une partie de l'eau est immobilisée dans les pores les plus fins, mais reste active au niveau des échanges de soluté, par diffusion avec l'eau mobile. Par ailleurs les mouvements sont ralentis, car l'eau circule sous forme de films à la surface des particules, et la géométrie des films varie en fonction de l'état d'humectation du sol.

Les problèmes méthodologiques concernant le prélèvement d'échantillons de solution du sol représentatifs résultent de la complexité des mécanismes en jeu. A la base des lysimètres, l'eau ne s'écoule que si sa tension matricielle est nulle : la circulation de l'eau est donc perturbée par rapport aux mouvements en conditions naturelles, et il n'est pas possible de connaître la composition de l'eau qui circule en conditions non saturantes. L'utilisation de lysimètres à tension, dans lesquels une succion est appliquée à la base pour recréer un mouvement de l'eau et des solutés plus proche de celui du sol en place, est une nette amélioration. Lorsque des bougies en céramique poreuse sont utilisées pour recueillir la solution du sol en effectuant une dépression, d'autres problèmes apparaissent. Tout d'abord il faudrait, pour connaître la composition de l'eau qui circule réellement, effectuer une dépression égale à la tension matricielle du sol au niveau où se trouve le capteur. Cette méthode conduirait à ne prélever que des quantités de solution insuffisantes pour l'analyse. Des dépressions plus élevées, de l'ordre de 600 à 700 hPa, sont généralement appliquées, ce qui crée des mouvements à partir de pores qui n'interviennent pas dans la circulation de l'eau, et dans lesquels les concentrations sont inconnues. De plus, certains éléments minéraux sont adsorbés sur les parois en céramique, ce qui introduit des biais encore mal évalués.

L'étude du mouvement des solutés dans les sols tropicaux se poursuit actuellement à l'aide soit de lysimètres, soit de capteurs de solution, en toute connaissance des problèmes méthodologiques existants, et faute de disposer de méthodes mieux adaptées ...

3. Alimentation minérale du système racinaire

Dans le sol, les mouvements de soluté par convection sont insuffisants pour assurer l'alimentation minérale des racines. On estime (JAILLARD, comm. orale) que seulement 5 % de l'alimentation minérale s'effectue par convection, 95 % provenant de la diffusion. La figure 8 représente l'allure des courbes de concentration à proximité des racines, avec les distances de diffusion citées par CALLOT *et al.* (1982).



Eléments	D
Phosphore	1 mm
Calcium et magnésium	5 mm
Potassium et sodium	7,5 mm
Nitrate	20 à 50 mm

Figure 8 : *Courbes de concentration à proximité des racines (distances de diffusion d'après CALLOT et al., 1982)*

Les distances de diffusion (D) indiquées sont réduites lorsque le sol s'assèche ou que les concentrations dans la solution du sol sont faibles. A l'exception des nitrates, les éléments minéraux ne peuvent donc diffuser vers les racines que sur des distances très courtes.

L'importance de la colonisation racinaire pour exploiter les réserves d'éléments minéraux disponibles apparaît clairement. Cette colonisation peut s'exprimer par la distance entre les racines. Des données sont disponibles en Afrique, à la suite des travaux d'ANGE (1984) sur le cotonnier, et surtout de ceux de CHOPART (1983) sur le mil. Un mois après le semis, la distance moyenne entre deux racines de mil est de l'ordre de 15 cm (fig. 9) à 40 cm de profondeur, alors qu'elle tombe à 3 cm sur plus d'un mètre de profondeur après deux mois.

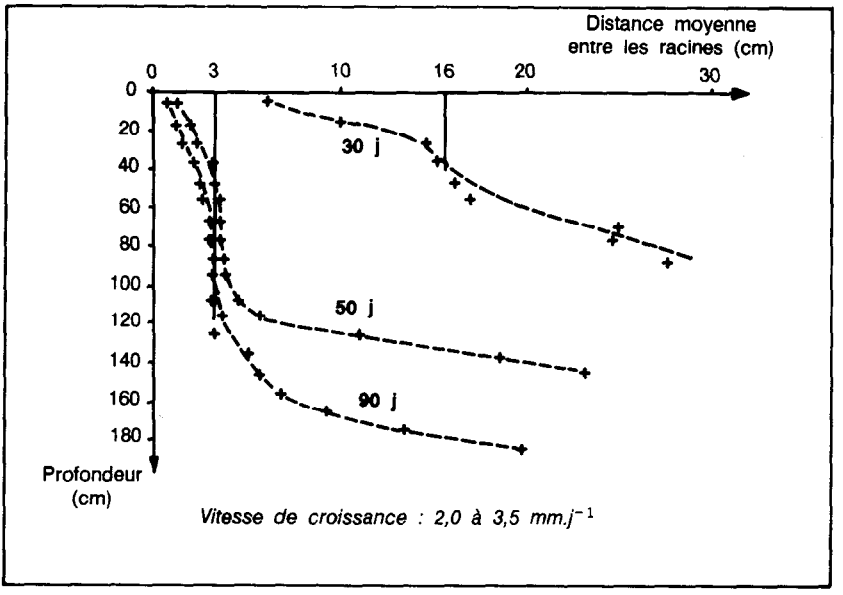


Figure 9 : *Evolution de la distance moyenne entre les racines en fonction de la profondeur sous une culture de mil en sol sableux labouré (d'après CHOPART, 1983)*

La vitesse de progression du front racinaire joue également un rôle important, car c'est elle qui conditionne l'accès à de nouvelles réserves. Les vitesses mesurées sur mil sont de 2,0 à 3,5 $mm.j^{-1}$ dans un sol sableux au Sénégal (CHOPART, 1983), et de l'ordre de 2 $mm.j^{-1}$ sur maïs sur les terres de Barre argileuses du sud Togo (FRETEAUD *et al.*, 1987).

Il est souhaitable de parvenir rapidement à une meilleure connaissance du développement et du fonctionnement physiologique du système racinaire des plantes cultivées. Les études doivent intégrer l'organisation du sol, et en particulier celle du profil cultural, qui joue un rôle de premier plan dans la dynamique de l'enracinement. Il s'agit là d'une voie de recherche qui doit permettre, à terme, d'améliorer l'efficacité des apports d'engrais et de mieux gérer le stock d'eau du sol à des fins agronomiques.

CONCLUSION

L'étude de la dynamique de l'eau au niveau de versants représentatifs en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale montre qu'il existe généralement une composante latérale plus ou mois marquée des mouvements de l'eau dans les sols. Cette dynamique, qui conditionne l'évolution actuelle des sols et, pour une large part, leur aptitude agronomique, est sous la dépendance de l'organisation des profils pédologiques sur le versant. Elle est liée en particulier à la présence de niveaux faiblement perméables à proximité de la surface.

Pour caractériser le fonctionnement des sols, un suivi pendant quelques années est nécessaire. Mais les résultats obtenus dépendent beaucoup de la pluviosité de la période de mesure. Pour tenir compte de la variabilité temporelle du climat, il est de plus en plus fait appel à des modèles de simulation du bilan hydrique, et les expérimentations de terrain devront permettre de collecter des données utilisables par ces modèles.

L'étude de la dynamique de l'eau permet d'avancer dans la connaissance des phénomènes de lixiviation dans les sols tropicaux, car ils sont essentiellement sous la dépendance de phénomènes de convection. L'alimentation minérale des racines, qui est surtout liée à des phénomènes de diffusion et qui fait intervenir des processus encore peu étudiés de colonisation racinaire, est beaucoup moins bien connue.

La dynamique de l'eau et des éléments minéraux constitue donc un domaine qui intéresse aussi bien la dynamique actuelle des sols que la croissance des plantes. Ce domaine est amené à se développer dans les années à venir ; on peut en attendre de nouvelles données sur les processus d'évolution des sols et une contribution à l'augmentation de la productivité agricole africaine. Ce type d'études permet en effet une

meilleure adaptation des cycles culturaux aux conditions pédoclimatiques, tout en fournissant des bases scientifiques pour parvenir à une fertilisation minérale raisonnée prenant en compte les conditions pédologiques locales.

BIBLIOGRAPHIE

AMADOU (O.) & YAO (N.R.), 1988. – Détermination *in situ* de la capacité au champ d'un sol ferrallitique au moyen de la sonde à neutrons. *Milieux poreux et transferts hydriques*, 23 : 11 – 24.

ANGE (A.), 1984. – Les contraintes de la culture cotonnière dans le système agraire de haute Casamance au Sénégal. I. Analyse des difficultés du projet de développement. Diagnostic des contraintes par les réseaux d'essais agronomiques. Th. INA – PG, 458 p.

BELMANS (C.), WESSELING (J.) & FEDDES (R.A.), 1983. – Simulation model of the water balance of a cropped soil : SWATRE. *J. Hydro.*, 63 : 271 – 286.

BEVEN (K.) & GERMANN (P.), 1982 – Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.*, 1 815 : 1 311 – 1 325.

BOCQUIER (G.), 1973. – Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Mém. ORSTOM (Paris) n° 62, 350 p.

BOULET (R.), 1978. – Toposéquences de sols tropicaux en Haute Volta : équilibres dynamiques et bioclimats. Mém. ORSTOM (Paris) n° 85, 272 p.

CALLOT (G.), CHAMAYOU (H.), MAERTENS (C.) & SALSAC (L.), 1982. – Mieux comprendre les interactions sol – racine. Incidence sur la nutrition minérale. INRA (Paris), 325 p.

CHABALIER (P.F.), 1984. – Comparaison de deux méthodes de mesure de la lixiviation en sol ferrallitique. *L'Agron. Trop.*, 39(1) : 22 – 30.

CHOPART (J.L.), 1983. – Etude du système racinaire du mil *(Pennisetum typhoides)* dans un sol sableux du Sénégal. *L'Agron. Trop.*, 38(1) : 37 – 51.

DANCETTE (C.), 1976a. – Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Orientation des travaux portant sur les besoins en eau des cultures. *L'Agron. Trop.*, 31(4) : 321 – 338.

DANCETTE (C.), 1976b. – Besoins en eau du mil au Sénégal. Adaptation en zone semi – aride tropicale. *L'Agron. Trop.*, 38(4) : 267 – 280.

DANCETTE (C.), 1983. – Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone Soudano – Sahélienne. *L'Agron. Trop.*, 38(4) : 281 – 294.

DE JONG (R.) & CAMERON (D.R.), 1979. – Computer simulation model for predicting soil water content profiles. *Soil Sci.*, 128 : 41 – 48.

FAO, 1978. – Report on the Agro – Ecological Zones Project. Vol. 1. Methodology and results for Africa. Rapp. FAO (Rome), 158 p.

FEDERER (C.A.), 1979. – A soil – plant – atmosphere model for transpiration and availability of soil water. *Water Resour. Res.*, 15(3) : 555 – 562.

FRANQUIN (P.) & FOREST (F.), 1977. – Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.*, 32(1) : 7 – 11.

FRETEAUD (J.P.), POSS (R.) & SARAGONI (H.), 1987. – Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio – neutroniques *in situ* (culture de maïs au Togo méridional). *L'Agron. Trop.*, 42(2) : 94 – 102.

FRIED (M.) & BROESHART (H.), 1967. – The soil plant system. Acad. Press.

GUEHL (J.M.), 1984. – Dynamique de l'eau dans le sol en forêt tropicale humide guyanaise. Influence de la couverture pédologique. *Ann. Sci. For.*, 41(2) : 195 – 236.

HUMBEL (F.X.), 1976. – L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun. Trav. Doc. ORSTOM (Paris) n° 54, 310 p.

HUMBEL (F.X.), 1978. – Caractérisation par des mesures physiques, hydriques et d'enracinement, de sol de Guyane Française à dynamique de l'eau superficielle. *Sci. du Sol*, 2 : 83 – 94.

JOHNSON (C.D.), HURLE (D.H.), HUDSON (D.R.) & HEIGHT (M.I.), 1983 – Water movement through proferred paths in lateritic profiles of the Darling Plateau, Western Australia. Groundwater Research Technical Paper, CSIRO, 1 : 34 p.

LENOIR (F.), 1978. – Relations entre la dynamique et la composition chimique d'une nappe d'arène en Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM (Paris)*, Sér. Géol., 10(2) : 209 – 236.

NIMAH (M.N.) & HANKS (R.J.), 1973. – Model for estimating soil water, plant and atmosphere interrelations. I. Description and sensivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37 : 522 – 527.

PHILIP (J.R.), 1957. – The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.*, 83 : 345 – 357.

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. *L'Agron. Trop.*, 34(1) : 9 – 22.

POSS (R.) & ROSSI (G.), 1987. – Systèmes de versants et évolution morphopédologique au Nord Togo. *Z. Geomorph. N.F.*, 31(1) : 21 – 43.

POSS (R.) & VALENTIN (C.), 1983. – Etude des relations eau – sol – végétation sur une toposéquence ferrallitique de savane (Katiola, Côte d'Ivoire). *Cah. ORSTOM (Paris)*, Sér. Pédol., 20(4) : 341 – 360.

POSS (R.), SARAGONI (H.) & IMBERNON (J.), 1988. – Bilan hydrique simulé du maïs au Togo méridional. Réponse à l'eau, dates de semis et zonage agro – pédo – climatique. *L'Agron. Trop.*, 43(1) : 18 – 29.

RICHARDS (L.A.), 1931. – Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, 1 : 318 – 333.

RITCHIE (J.T.), 1986. – Soil water and plant productivity. Com. XIII congrès ISSS (Hambourg), vol. 2, pp. 13 – 28.

ROOSE (E.), 1981. – Dynamique actuelle de sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Trav. Doc. ORSTOM (Paris) n° 130, 569 p.

ROWSE (H.R.), STONE (D.A.) & GERWITZ (A.), 1978. – Simulation of the water distribution in soil. II. The model for cropped soil and its comparison with experiment. *Plant Soil*, 49 : 533 – 550.

SARAGONI (H.) & POSS (R.), 1988. – Etude de la composition de la solution du sol des terres de Barre du Sud – Togo à l'aide de capteurs en céramique poreuse. Com. ATP Dyn. cations (Montpellier, 13 – 14 décembre).

VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), IMBERNON (J.), PIERI (C.), DANCETTE (C.) & DIATTA (S.), 1982. – Etude des pertes en eau et en matières minérales sous culture considérant la variabilité spatiale du sol. Com. XII[e] congrès ISSS (New – Delhi), 13 p.

VIZIER (J.F.), 1983. – Etude des phénomènes d'hydromorphie dans les sols des régions tropicales à saisons contrastées. Dynamique du fer et différenciation de profils. Trav. Doc. ORSTOM (Paris) n° 165, 294 p.

WOROU (S.), 1988. – Les nappes perchées semi – permanentes : bien les connaître pour mieux les utiliser. Com. 9è réunion Com. Ouest et Centre Afrique Conserv. des Sols (Cotonou 14 – 23 nov.), 9 p.

DE LA CONNAISSANCE DES TERRES ET DES CLIMATS A LA RECOMMANDATION AGRONOMIQUE

P. SIBAND
IRAT/CIRAD – BP 5035 – 34032 Montpellier

RESUME

Les indicateurs servant à comprendre d'une part la distribution des sols, et de l'autre leurs aptitudes culturales, sont distincts, car ils répondent à des objectifs différents.

De plus, un même sol peut porter des productions très différentes selon la façon dont il est utilisé. Une recommandation devra ainsi prendre en compte la connaissance des systèmes techniques possibles dans les situations agricoles concernées.

Un autre élément déterminant le résultat d'une culture est la façon dont elle va gérer sa relation avec le milieu, en particulier ses exigences et sa sensibilité à certaines contraintes, la façon dont elle répartit sa demande trophique dans l'espace (cinétique d'enracinement) et dans le temps (cinétique de croissance).

Enfin, les caractères résultant de l'observation ou même de l'analyse du sol ne permettent pas nécessairement de prévoir ses aptitudes. C'est notamment le cas si celles – ci mettent en jeu des processus qui se déroulent dans le temps.

Ces différents aspects rendent indispensable l'expérimentation, qui en outre permet une évaluation quantitative du comportement de la culture.

Il reste qu'un résultat expérimental, pour être utilisé, devra être extrapolé dans l'espace, dont il faudra prendre en compte l'organisation, et dans le temps. Ceci implique que ce résultat soit relativisé aux conditions agroclimatiques de l'année, et que l'effet espéré d'une technique quelconque soit évalué à l'aide d'études fréquentielles.

En définitive, la recommandation sera nourrie à quatre sources différentes d'informations :

- *la compréhension du milieu physique,*
- *la connaissance des systèmes techniques possibles,*
- *l'expérimentation de l'impact des techniques,*
- *la disposition de séries de données climatiques.*

La nécessaire complémentarité de ces types d'informations doit contribuer à la définition de chaque démarche d'acquisition.

INTRODUCTION

La démarche qui conduit à la connaissance du milieu physique vise principalement à en comprendre l'organisation et le fonctionnement d'ensemble. Elle procède par comparaison entre situations à un moment donné, et s'attache à un certain nombre d'indicateurs permettant d'induire les processus dominants expliquant ce milieu.

Ses objectifs sont *a priori* distincts de la démarche visant à définir l'utilisation du milieu, et les informations recherchées ne sont pas nécessairement les mêmes. Ainsi, pour prendre l'exemple des analyses demandées au laboratoire par le pédologue et l'agronome, si bien des analyses sont communes, les éléments totaux, les types d'argile, les formes du fer et la nature de l'humus retiendront davantage l'attention du premier. Au contraire, le second s'attachera plutôt aux formes assimilables des principaux éléments nutritifs, à la présence d'éléments toxiques, aux réserves facilement libérables, aux fractions de l'azote ... Ce schéma simpliste ne présume en rien des liens entre les deux démarches.

Même lorsque l'approche garde, au-delà de la compréhension, l'objectif de l'utilisation du milieu (KILIAN, 1974), l'information à laquelle elle aboutit ne permet pas à elle seule de prévoir les résultats agronomiques qui seront obtenus. En effet, si elle peut indiquer des tendances, il ne lui est pas possible de quantifier les conséquences de ces tendances, ce qui est essentiel pour des choix d'application. Pour prendre un exemple trivial, on aura plus d'eau en bas d'une toposéquence qu'en haut, mais y en aura-t-il trop en bas, pas assez en haut, quelles incidences économiques auront un dispositif de rétention, ou de drainage ? Autant de questions qui n'ont pas ici de réponses. Il lui est difficile de prévoir avec précision des processus essentiels qui se déroulent dans le temps à l'échelle d'un cycle, comme la dynamique des éléments nutritifs. Les conséquences d'un certain nombre de caractères du milieu vont de plus dépendre des cultures

retenues et des choix techniques possibles. Les résultats des systèmes de culture mis en oeuvre, enfin, seront très variables au fil des années. Il est donc nécessaire d'associer à la connaissance du milieu un certain nombre de sources d'informations qui font l'objet de démarches complémentaires.

Nous souhaiterions nous arrêter un instant sur ces différents aspects pour situer la connaissance du milieu dans l'ensemble des données qu'il faut conjuguer pour approcher une recommandation agronomique. Nous laisserons délibérément de côté les aspects de conservation du milieu, qui sont un autre thème majeur à prendre en compte pour raisonner son utilisation.

I - NECESSITE D'EXPERIMENTATION

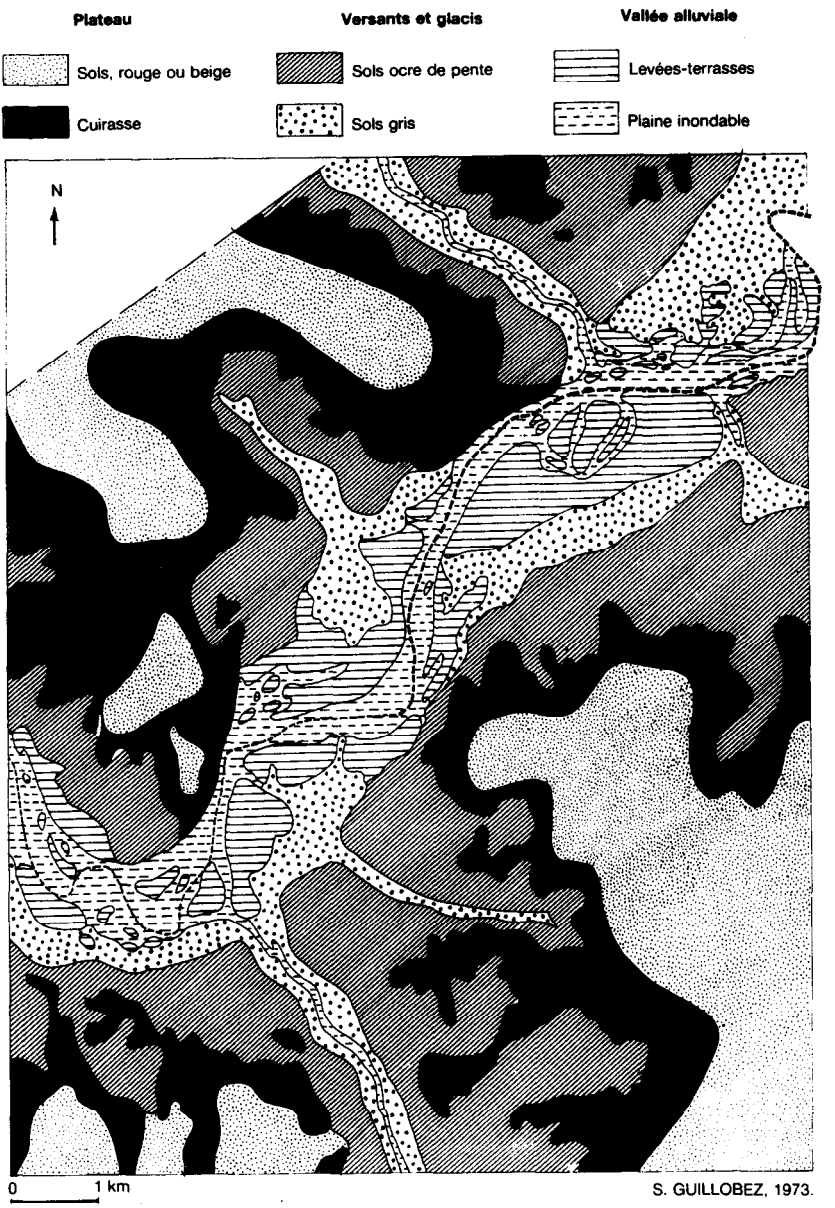
1.1 Caractères du sol et comportement sous culture

La Casamance continentale présente un modelé de plateaux compartimenté par les cours d'eau (fig. 1). On peut distinguer sur la toposéquence (fig. 2) :

- les sols de plateau, rouge ou beige selon leur drainage externe, et de comportement assez voisin sous culture, bien que généralement mis dans des classes de sols différentes ;
- éventuellement un affleurement de cuirasse ;
- des sols beiges ou ocres de pente, au bas desquels les villages sont implantés, et qui sont de ce fait les plus anciennement exploités ;
- des sols gris hydromorphes ;
- une levée bordant la plaine alluviale.

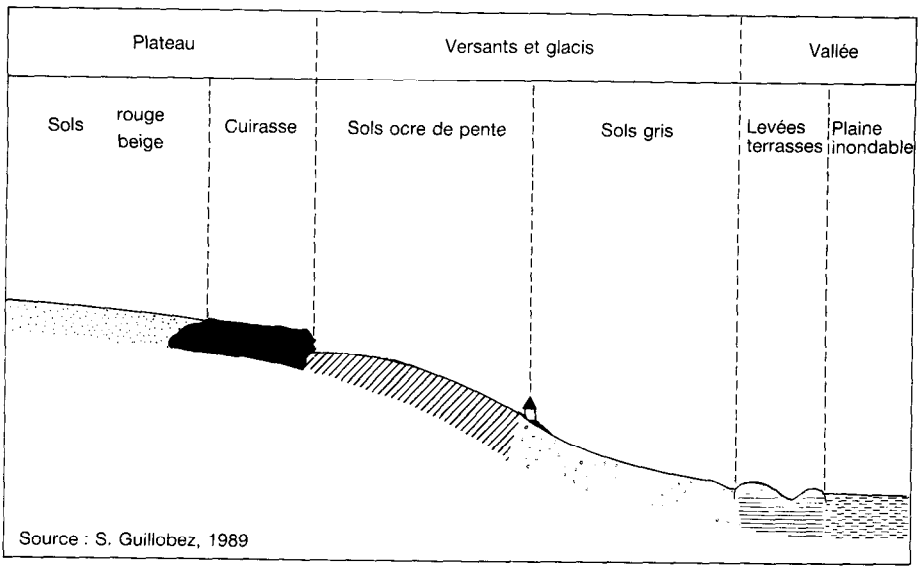
1.1.1. Premier exemple : les sols gris

Les sols gris, de texture extrêmement variable, mais fréquemment très sableux, présentent des caractéristiques physiques (structure notamment) et chimiques particulièrement défavorables (BERTRAND *et al.*, 1978) :



Esquisse morphopédologique

Figure 1.



Séquence théorique

Figure 2.

Tableau 1 : *Caractéristiques analytiques moyennes des sols gris*

Densité apparente	1,4 à 1,5
Argile	1 à 15 % (jusqu'à 26 %)
CEC	0,5 à 2 mé/100 g (jusqu'à 10 mé/100 g)
pH	4,5 à 6
C	0,3 à 1 %
N	0,03 à 0,11 % (jusqu'à 0,16 %)

Ces sols, d'occupation traditionnelle très extensive, ont longtemps été considérés comme impropres à la culture par les pédologues et les agronomes.

Cependant, les tests de culture de riz pluvial conduits par SEGUY à partir de 1968 ont révélé des potentialités remarquables qui ont suscité un certain nombre d'études (GANRY, 1979 ; GUILLOBEZ, 1973 ; SIBAND, 1976). Les conclusions de ces travaux peuvent se résumer par les quelques points suivants :

- les rendements obtenus sans engrais, comme la réponse à une fertilisation, sont très élevés (tableau 2) ;

Tableau 2 : *Résultats obtenus en sols gris comparés à ceux des sols rouges de plateau (en t.ha^{-1})*

	Azote		Phosphore		Potassium	
	Témoin	37,5 N	Témoin	30P2O5	Témoin	30K2O
Sol gris	3,0	4,62	3,6	4,65	4,09	4,5
Sol rouge	0,84	1,72	1,09	2,29	2,22	2,3

- les potentialités agricoles de ces sols sont largement tributaires d'une nappe phréatique circulant à proximité de la surface ;
- un des rôles de cette nappe est bien entendu d'assurer une satisfaction constante de la demande en eau du riz. Mais, en fait, elle modifie complètement le comportement du sol en culture ;
- le pH du sol en culture se trouverait relevé, éliminant les effets habituellement observés dans les conditions d'acidité mesurée sur échantillon (pH allant jusqu'à 4,3, sans effet sur les rendements) ;
- les conditions sont favorables, malgré l'absence de structure, à un très fort développement racinaire qui contribue à compenser la pauvreté du sol par le volume exploré ;
- cet enracinement offre également un volume rhizosphérique particulièrement important qui expliquerait, conjointement avec les conditions hydriques favorables, la fixation libre d'azote notable mesurée dans ces sols ;
- la circulation d'eau permet un renouvellement minéral important, notamment en azote, qui alimente les cultures malgré la pauvreté du sol ;
- elle éliminerait les facteurs défavorables qui déprime très rapidement le rendement du riz en monoculture, ainsi qu'il est observé en champs de culture pluviale, et même en sols hydromorphes (tableau 3).

Tableau 3 : *Rendements obtenus en culture répétée de riz ($t.ha^{-1}$) en sols gris, comparé à ceux d'autres sols hydromorphes (BIRIE HABAS, 1986).*

Année	1	2	3	4
Sans azote	2,07	2,64	2,43	2,36
Avec azote	3,89	–	3,93	4,05
Sols Cameroun	1,93	1,09	1,04	1,45

Les aptitudes culturales de ces sols s'expliquent ainsi essentiellement par leur position dans le paysage, et le caractère circulant de la nappe. Ceci rend compte de leur capacité à produire de hauts rendements, même lorsque le profil présente des sables presque purs. Ces conditions, qui évoquent dans certaines situations la culture hydroponique, entraînent un certain nombre de conséquences :

- elles peuvent autoriser des durées de cycle sensiblement différentes de celles limitées par la pluviométrie du lieu ;
- la culture répétée de riz est possible ;
- les sols les plus argileux ne sont pas très favorables à la culture, s'ils limitent la circulation de l'eau ;
- une fumure azotée *starter* de quelques kilos devient essentielle dans des sols où la minéralisation de début de saison des pluies est très faible, et où la nappe ne remonte qu'en cours de cycle. Elle favorise l'enracinement et la fixation d'azote ;
- le fractionnement de l'azote apporté à des doses plus élevées devient impératif pour éviter les déperditions, et entraîne effectivement des surcroîts de rendement importants ;
- en absence de nappe, même les sols de texture moyenne sont stériles.

Dans cet exemple, le comportement du sol en culture s'explique donc moins par ses caractères analytiques que par des aspects dynamiques. Seul le test de culture, puis l'analyse des faits observés par la voie expérimentale, a permis d'en comprendre les aptitudes culturales.

Une fois la clé d'interprétation établie (dynamique de la nappe), on peut évidemment l'utiliser pour choisir des sites de culture. Toutefois, l'incidence de cette dynamique sur les résultats agronomiques et sur l'optimisation de l'utilisation de ces sites ne peut se déduire que d'un suivi dans le temps, et de résultats expérimentaux.

1.1.2. Deuxième exemple : les sols rouges

Le tableau 4 résume les données d'une expérimentation réalisée en milieu paysan (SIBAND, 1974), comparant trois champs de défrichement plus ou moins récent, sur la même formation pédologique, et assez proches l'un de l'autre, de sorte que les conditions pluviométriques étaient semblables. On a extrait ici les paramètres principaux du sol et les rendements de deux traitements :

- le témoin (N0F0), qui a reçu une fumure phosphopotassique ;
- un traitement sur lequel sont appliqués en plus azote et fumier (N1F1).

Tableau 4 : *Caractères du sol et rendements obtenus*

Age de défriche	MO (%)	N (%)	CEC (mé/ 100 g)	Rdt grain (t/ha)		Rdt biologique (t/ha)	
				N0F0	N1F1	N0F0	N1F1
3 ans	2,49	0,79	4,2	1	2	2,2	4,8
15 ans	2,02	0,68	3,2	1,3	2,6	2,8	5,6
46 ans	1,14	0,43	2,0	0,3	1,2	1,0	3,4

F1 = 10 t MS.ha^{-1}
N1 = 50 unités d'azote.ha^{-1}

Les données analytiques des 10 premiers centimètres font apparaître des différences de teneurs en matière organique, de teneurs en azote et de capacité d'échange traduisant un appauvrissement progressif au cours des années de culture. Ces différences sont analogues pour les autres caractères

analysés, et se reproduisent sur tout le profil étudié (– 60 cm). Le pH ne montre pas d'évolution.

Par contre, si les rendements sont toujours plus bas sur le champ le plus ancien, ils sont, en grain comme en matière sèche totale, de 30 % plus élevés sur le champ d'âge intermédiaire que sur le champ de défriche récente. De plus, l'apport organo – azoté marque d'autant plus que le rendement du témoin est plus élevé.

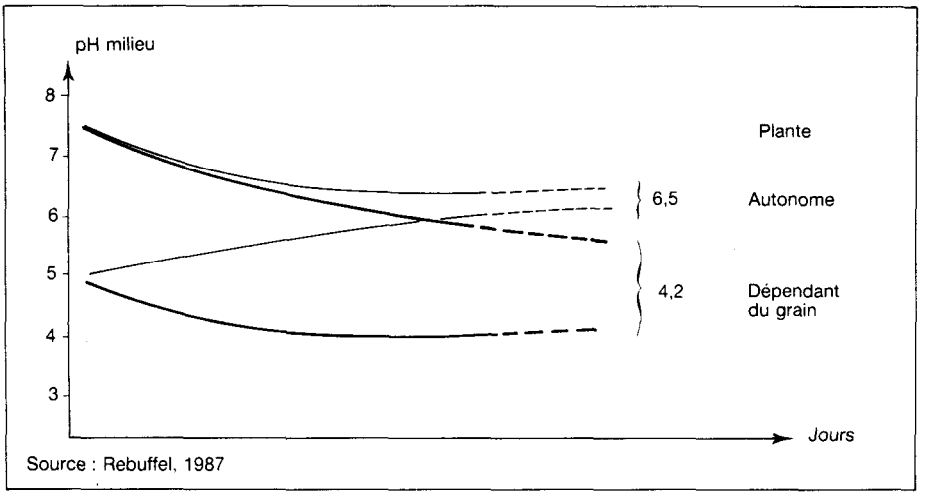
Ainsi, la production obtenue ne se classe pas comme les caractéristiques analytiques du sol. Ce fait, confirmé par des enquêtes en milieu paysan, peut trouver diverses explications qui ont été examinées dans la publication citée. Ce que nous voulons souligner ici, c'est que ni l'observation, ni l'analyse du sol ne permettaient de prévoir le comportement de la culture. De la même façon, l'effet d'un enrichissement organominéral n'est pas fonction du degré de pauvreté du sol, mais de sa fertilité : cette réponse, qui relève du fonctionnement du sol, n'est donc pas non plus déductible de caractères observables directement.

1.2. La "lecture" du milieu par la culture

1.2.1. Réaction du sol

On sait que le pH du sol contrôle fortement la solubilité de l'aluminium et le risque d'intoxication de la plante. Or la plante joue un rôle important dans la détermination de la réaction du sol à proximité des racines, pouvant accroître ou limiter le risque.

Si l'on suit le pH d'une solution nutritive sur laquelle on cultive de jeunes plantes de riz (fig. 3), on constate que, quel que soit le pH initial imposé, il tend vers un équilibre. Cet équilibre n'est pas le même pour des plantes encore dépendantes du grain (pH vers 4,2) que pour des plantes un peu plus âgées et totalement autotrophes (pH vers 6,5).



Evolution du pH du milieu racinaire de jeunes plantes de riz

Figure 3.

L'analyse précise de ces évolutions est complexe et les valeurs obtenues ne permettent pas de présumer de l'importance de celles que l'on observerait dans la rhizosphère d'une culture au champ. Elle identifie cependant quelques phénomènes simples :

- on sait que la modification du pH de la rhizosphère d'une plante est sous la dépendance de l'équilibre de son alimentation en cations et anions. Une plus grande absorption de cations nécessite une libération de protons, qui rétablissent la neutralité électrique, mais qui tendent à acidifier le milieu. A l'inverse, un excès d'absorption d'anions libère des ions hydroxyles alcalinisants. Les éléments qui vont déterminer l'équilibre des charges seront essentiellement les ions nitrate et potassium ;
- la jeune plante de riz, non sevrée des réserves minérales du grain, ne puisera dans son milieu que ce que les réserves ne lui fourniront pas. Or le grain contient essentiellement de l'azote, et pratiquement pas de potassium. Le complément demandé au milieu sera donc

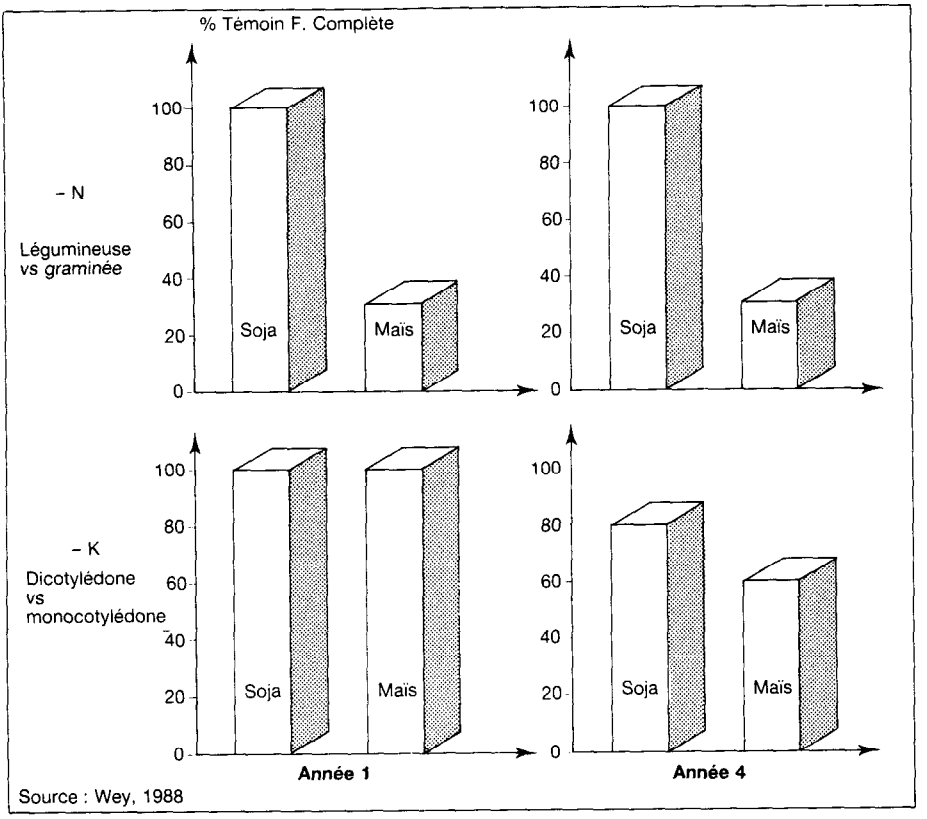
principalement cationique, et acidifiant. Avec le sevrage, la part des anions prélevés dans le milieu croit, le pH remonte.

Ces différents points appellent plusieurs remarques :

- la modification de la réaction rhizosphérique dépend du type de réserves offertes à la jeune plante. Sous cet angle, on peut généraliser le résultat, en disant que comme les graines contiennent beaucoup plus d'azote que de potassium, alors que les parties végétatives sont beaucoup plus riches en potassium (en particulier les tiges), les cultures semées seront, au moment de l'installation, plus sensibles aux conditions d'acidité que les cultures bouturées ;
- le contrôle du pH par la plante évolue dans le temps, et la phase d'installation d'une plante issue de graine est particulièrement sensible à l'acidité. La réussite d'une culture va donc dépendre en particulier du pH au moment de son installation ;
- on peut prévoir le sens de la modification du pH de la rhizosphère par la racine, mais on ne peut pas présumer de son importance. En effet, le changement de pH rhizosphérique dépend aussi bien de la capacité du sol à rétablir son propre équilibre que de l'intensité des flux imposés par la racine. Celle-ci est fonction du rapport entre la demande minérale instantanée de la plante et le volume racinaire sur lequel elle se répartit. Ces aspects dépendant des interactions plante-sol, le résultat ne peut en fin de compte être connu que par expérimentation.

1.2.2. Demande spécifique en facteurs trophiques

La figure 4 résume les résultats d'un essai soustractif testant les éléments minéraux majeurs sur une rotation maïs-soja, conduite à Boumango (Gabon) durant 5 cycles de culture (WEY, 1988). On compare l'évolution des rendements des deux cultures, relativement à celle du témoin en fumure complète, sur les traitements sans azote et sans potassium.



Réponse de la culture à une déficience minérale du sol

Figure 4.

En absence d'azote, alors que le maïs est d'emblée à 30 % du témoin, le soja, dont le rhizobium associé fixe cet élément, est à peu près insensible. C'est le contraste connu légumineuse – non légumineuse. Il est certain cependant que l'écart des maïs avec et sans azote dépendra du niveau de rendement visé, et donc de l'importance de la demande de la culture.

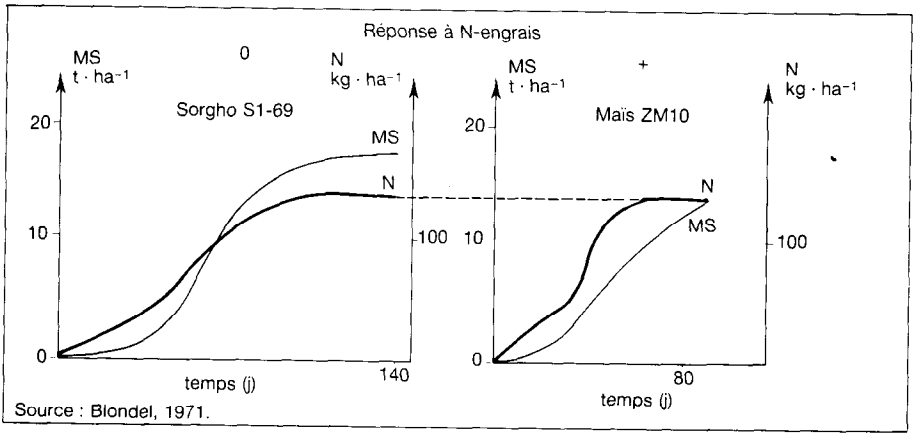
En absence de potassium, la courbe représentative du soja marque une évolution nettement plus lente que celle du maïs. Après 4 ans, par exemple, le soja est à 80 % du témoin, alors que la maïs est à 60 %. Ceci traduit la demande généralement plus élevée en potassium des

monocotylédones (et notamment des graminées) entraînant leur sensibilité plus grande à une déficience.

Au-delà de contrastes bien connus entre espèces et groupes d'espèces, on sait qu'il existe des différences très sensibles entre variétés des espèces cultivées dans l'aptitude à utiliser un milieu pauvre en tel ou tel élément, et à répondre à un enrichissement du milieu.

1.2.3. Répartition de la demande

BLONDEL (1971) compare un sorgho et un maïs dont seul le dernier répond à une fumure azotée (fig. 5). La mobilisation totale en azote des deux cultures est très voisine (environ 140 $kg.ha^{-1}$), mais la durée sur laquelle s'étale la demande est deux fois plus grande pour le sorgho. De ce fait, le débit nécessaire est faible, et le sorgho se satisfait du flux assuré par le sol : un apport supplémentaire n'a pas d'effet.



Consommation minérale et répartition de la demande

Figure 5.

Ainsi, le comportement de la culture sur un même sol sera très différent selon la façon dont elle va répartir sa demande au milieu dans le temps (étalement du cycle). On peut ainsi expliquer en partie que des sols restent suffisamment fertiles pour une culture de manioc, alors que le maïs ne peut plus y être cultivé. En contrepartie, le

manioc sera capable d'épuiser le sol beaucoup plus loin qu'une culture plus exigente.

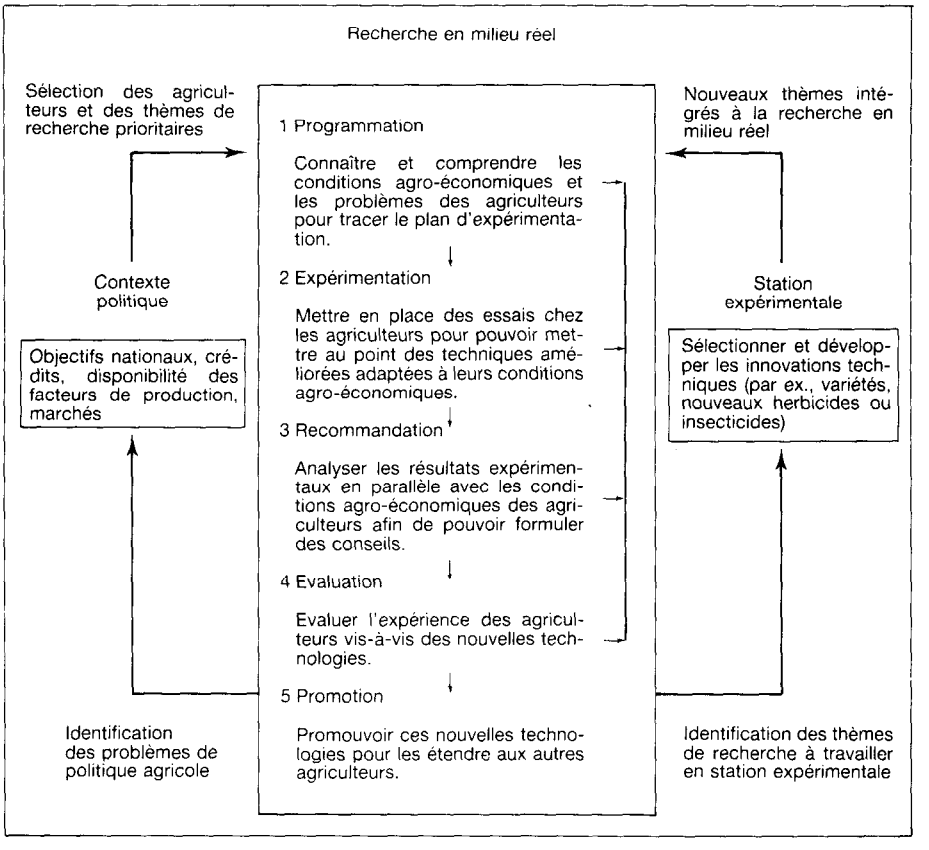
Il en est de même de la répartition de cette demande dans l'espace (cinétique d'exploration racinaire). On peut en particulier évoquer les résultats de REYNIERS *et al.* (1987), qui montrent qu'en conditions climatiques pourtant satisfaisantes le riz peut se trouver fréquemment déficitaire en eau du fait d'un défaut d'enracinement.

II. - CHOIX DES THEMES A TESTER : PRODUCTION ET SYSTEME TECHNIQUE

Il est évident que les productions que peut porter un sol sont très fortement dépendantes de la nature des techniques disponibles. Il suffit pour s'en convaincre de constater qu'au sein d'une même expérimentation les différents traitements appliqués aboutissent à des rendements très différents.

Cependant, tous les traitements n'autorisent pas des améliorations techniquement réalisables, économiquement viables, ou plus généralement adoptables par l'agriculteur. Ainsi, dans les exemples évoqués plus haut, on a pu utiliser l'application de 10 $t.ha^{-1}$ de matière sèche de fumier pour mettre en évidence le comportement d'un sol sous culture (tableau 4). Mais, au-delà du test qui a apporté un élément de connaissance, une telle amélioration n'est pas envisageable dans le paysannat où elle a été étudiée, ne serait-ce que pour des raisons de disponibilité de matière première, des problèmes d'association de l'élevage ou de transport que cela entraîne.

La mise au point de solutions techniques suppose donc que les possibilités d'acceptation d'un thème par l'agriculteur soient connues. Le CIMMYT (1983), notamment, a mis au point une démarche destinée à définir une recommandation technique (fig. 6), dont la première étape consiste à analyser les différentes contraintes et possibilités d'un milieu (fig. 7), afin de définir des zones de même problématique (domaines de recommandation), et les thèmes techniques qui y seront testés. Cette analyse prend bien entendu en compte les éléments du milieu physique et biologique, mais aussi les

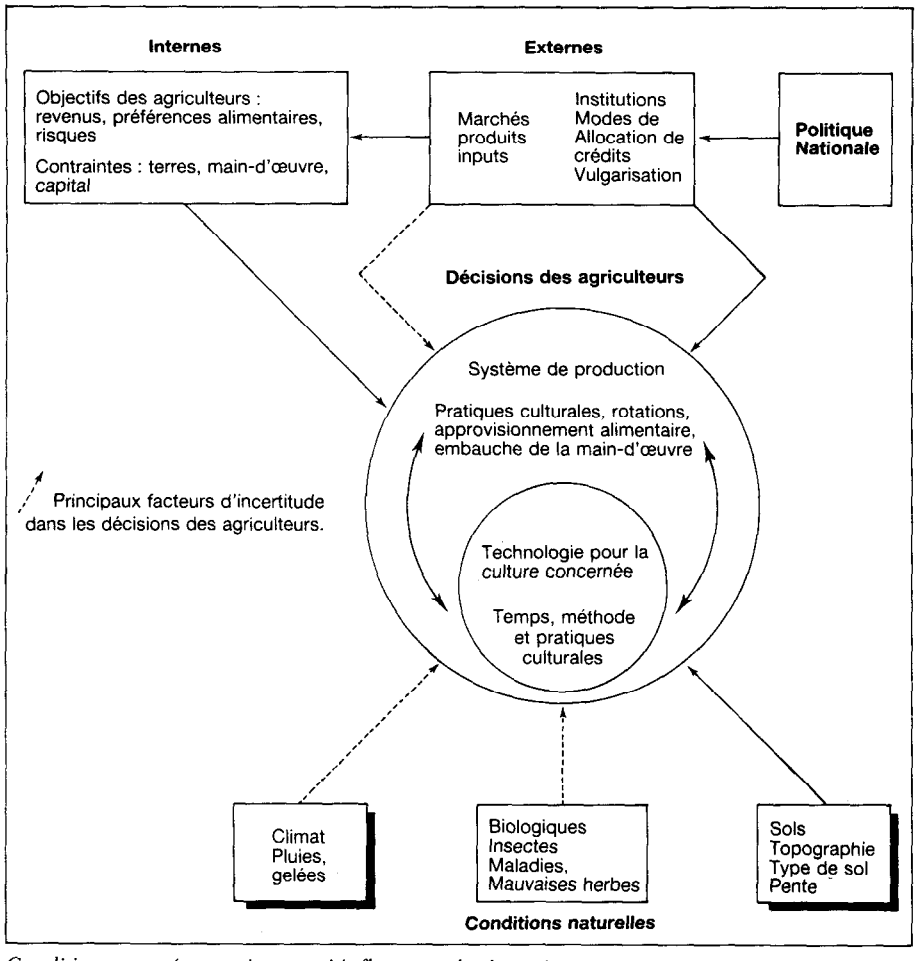


Vue générale d'un programme intégré de recherche

Figure 6.

paramètres propres à l'agriculteur et à son exploitation (conditions agroéconomiques internes) et ceux de son environnement économique et institutionnel (conditions externes), allant jusqu'aux dispositions politiques pouvant avoir un effet sur cet environnement.

Cette démarche suppose tout un ensemble d'enquêtes et une procédure d'exploitation des données recueillies. Les domaines de recommandation définis dépendent également des capacités d'intervention tant de la recherche que de la vulgarisation. Cette procédure a été adaptée au Rwanda, dans le cadre de l'opération maïs des Birunga, donnant un zonage de la région, et la hiérarchisation des thèmes prioritaires (CASTANIE *et al.*, 1988).



Conditions agro-économiques qui influent sur le choix de nouvelles technologies.

Figure 7.

III – EXTRAPOLATION : LA VARIABILITE INTERANNUELLE

La figure 8 retrace l'évolution des rendements de cultures continues de sorgho conduites à différents niveaux d'intensification (apports minéraux et organiques) pendant 20 années consécutives, à Saria (Burkina Faso ; FOREST et LIDON, 1984). Le rendement du traitement le plus extensif (fm) s'effondre dès la deuxième année.

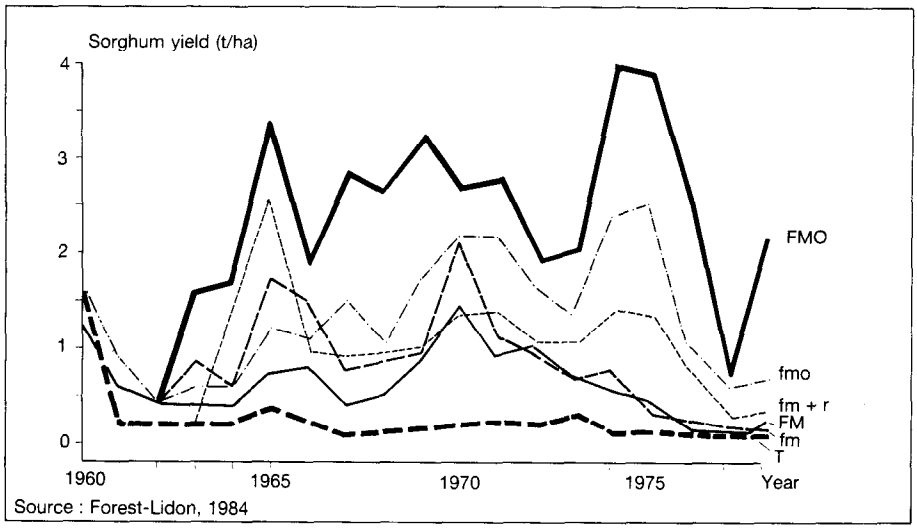
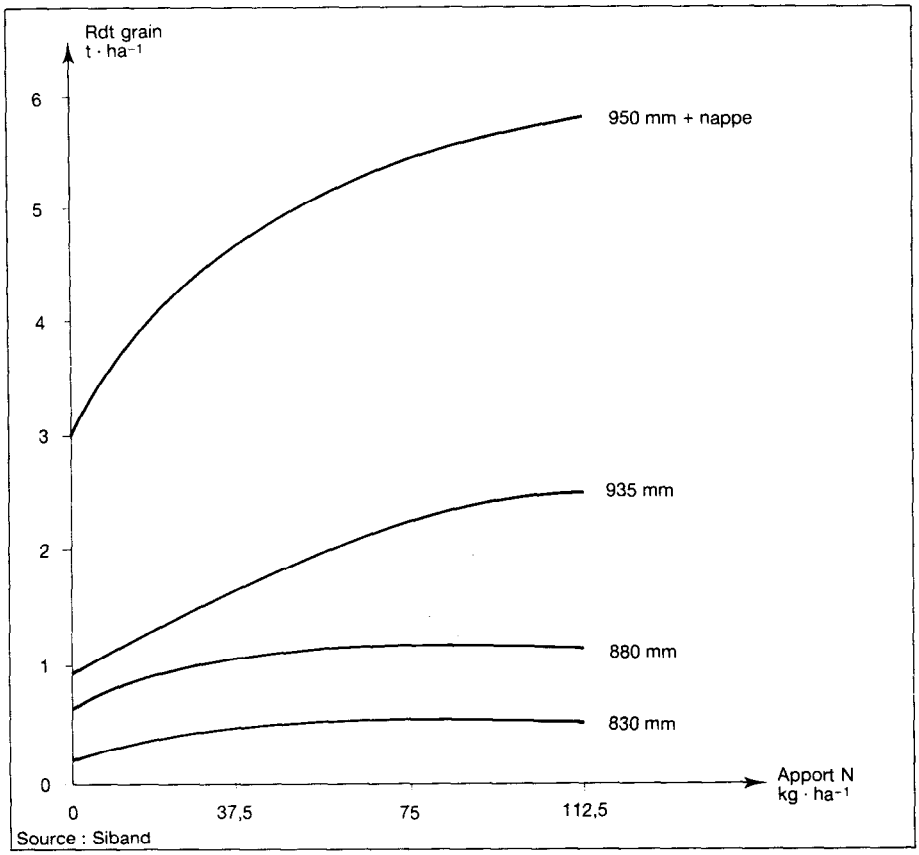


Figure 8 : *Rendements en sorgho grain ($t.ha^{-1}$) pour différents niveaux de fertilisation dans l'essai de maintien de la fertilité de la station de Saria (Burkina Faso)*

Par contre, celui des autres niveaux de fertilisation fluctue très fortement d'une année sur l'autre sans montrer de tendance à long terme caractérisée.

Si tous évoluent grossièrement dans le même sens d'une année sur l'autre, l'écart est cependant très différent selon les conditions de l'année. Cet exemple illustre à la fois la variabilité interannuelle des résultats d'un itinéraire technique, et celle de l'effet d'une amélioration possible.

Cette variabilité est largement tributaire des conditions climatiques qui sont, en conditions tropicales, principalement liées à la pluviosité de l'année et du lieu. La réponse du riz à l'azote, par exemple (fig. 9), comme le rendement du témoin, est d'autant plus marquée que ces conditions sont meilleures. Les rendements possibles, et la rentabilité d'une amélioration, sont ainsi très fluctuants d'une année sur l'autre et il est important de pouvoir en estimer le niveau probable sur une série d'années afin d'évaluer correctement son intérêt.



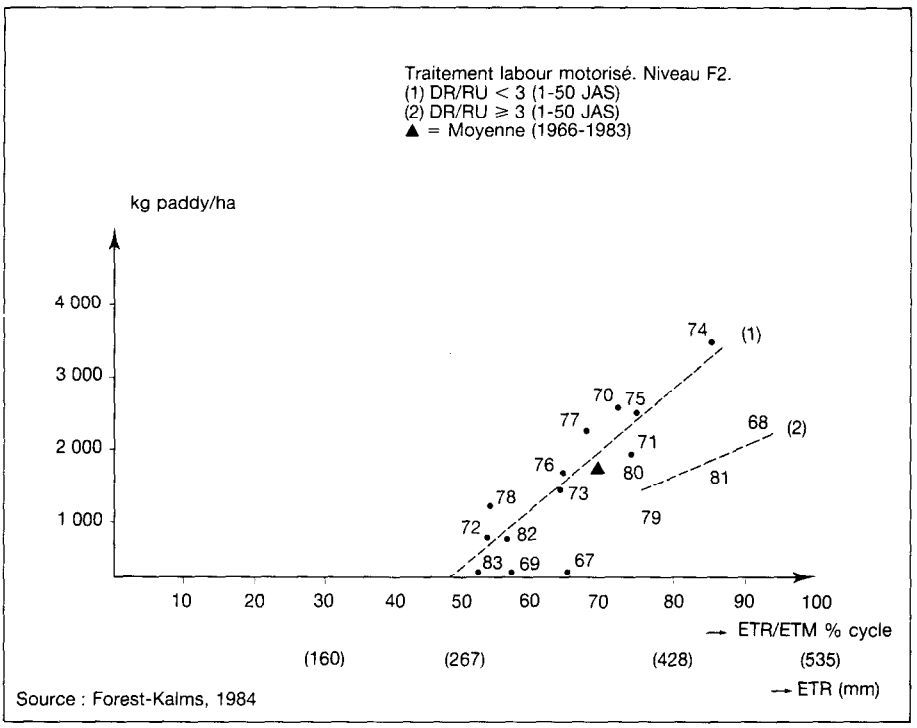
Conditions hydriques et effet d'une technique

Figure 9.

En réalité, une même pluviométrie assurera très différemment la satisfaction de la demande en eau d'une culture suivant sa distribution, la demande climatique, les caractéristiques d'infiltrabilité et de rétention du sol pour l'eau, l'importance du couvert végétal et son accès à l'eau du sol. Cette satisfaction peut être appréhendée par le calcul du bilan hydrique, qui permet de comparer la consommation réelle d'eau (ETR) à la consommation optimale (ETM). FOREST et KALMS (1984), simulant ce bilan par le modèle de FRANQUIN et FOREST (1977), arrivent ainsi à expliquer assez bien les variations du rendement du riz pluvial à Bouaké sur quelques années par le rapport ETR/ETM. De plus, ils

constatent que le rendement est plus bas lorsque le drainage calculé dans les premières semaines devient important, traduisant des conditions d'excès d'eau (fig. 10).

Appliquant le même modèle aux résultats du traitement le plus intensif de Saria, évoqué ci-dessus, FOREST et LIDON (1984) expliquent presque toute la variation de rendement du sorgho par une régression multiple prenant en compte la satisfaction du besoin en eau et les excès d'eau éventuels (fig. 11). CHOPART et NICOU (1989) arrivent à une conclusion similaire sur une série de résultats au Sénégal, tout en identifiant également la tendance d'évolution de la fertilité du sol, que nous n'évoquerons par ici.



Courbes de réponse à l'eau du riz pluvial (135 jours). Essai G11, IRAT-IDESSA Bouaké.

Figure 10.

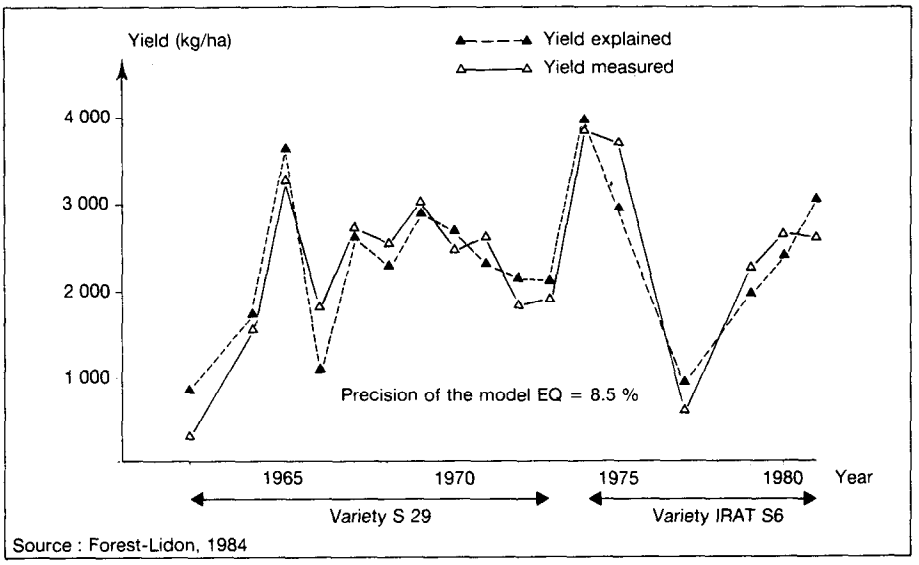


Figure 11 : *Rendement du sorgho en monoculture expliqué par un modèle de simulation du bilan hydrique (Saria, Burkina Faso, 1962 – 1981)*

Bien entendu, les conditions hydriques pour une culture au cours d'une année ne sont pas prévisibles *a priori*, et seules peuvent être connues les probabilités qui y sont attachées en un lieu donné, si l'on dispose de séries de données climatiques suffisamment longues. On peut alors envisager de calculer, dans un domaine de recommandation, l'espérance de production associée à un choix technique, et ainsi extrapoler des résultats ponctuels dans le temps. POSS *et al.* (1988) peuvent ainsi raisonner sur la potentialité de la culture du maïs au sud Togo, en fonction de la variété, de la saison de culture (premier ou second cycle), et du niveau de fertilité.

CONCLUSION

La connaissance du milieu physique nous renseigne sur son organisation et son fonctionnement. On peut en tirer un enseignement quant à ses

principales contraintes et aptitudes, et une première partition des grands types de problématiques. Seule l'expérimentation peut quantifier les implications des caractéristiques du milieu sur l'efficacité d'un choix technique. Elle peut de plus les compléter, en particulier en ce qui concerne les phénomènes qui se déroulent dans le temps. Cependant les thèmes techniques que l'on peut espérer voir adoptés par l'agriculteur doivent également être compatibles avec les conditions agroéconomiques de l'exploitation, qui sont donc une troisième source d'information. Enfin, les résultats donnés par des thèmes "appropriables" dépendent fortement des conditions climatiques dans lesquelles ils ont été obtenus. Il est donc nécessaire, pour extrapoler ces résultats et évaluer l'espérance de leur effet, de prendre en compte les séries de données climatiques.

En fin de compte, l'approche du résultat agronomique va demander des informations recueillies à quatre sources distinctes qui se complètent, et doivent donc être compatibles entre elles. Cette nécessité est susceptible d'infléchir les modes d'acquisition de chacune des sources.

Si l'on prend l'exemple de l'expérimentation, le choix des sites devra satisfaire à la représentativité, celui des thèmes à l'acceptabilité, et celui des indicateurs de suivi de l'expérimentation devra ménager la possibilité de relativiser chaque résultat aux caractères particuliers du site où il sera établi (localisation topographique par exemple) et aux conditions climatiques de la campagne (c'est – à – dire que l'on devra disposer bien sûr des conditions climatiques particulières dans lesquelles un résultat est obtenu, mais aussi des données du site et de la culture permettant d'évaluer les termes du bilan hydrique).

BIBLIOGRAPHIE

BERTRAND (R.), SIBAND (P.), GANRY (F.) & GUILLOBEZ (S.), 1978 – Rice cultivation under hydromorphic conditions on the sandy grey soils of the lower slopes in Senegal. *In* Rice in Africa. IW BUDDENHAGEN, GJ PERSLEY. Academic Press.

BIRIE HABAS (J.), 1986 – Fatigue des sols hydromorphes de la plaine des M'bos au Cameroun et déclin du riz pluvial. Rapp. IRAT, 21 p.

BLONDEL (D.), 1971 – Contribution à l'étude de la croissance – matière sèche et de l'alimentation azotée des céréales de culture sèche au Sénégal. *L'Agron. Trop.* : 707.

CASTANIE (O.), DINTINGER (J.) & KARANGUA (C.), NSABIMANAS (N.S.), 1988 – Problématique de l'intensification et axes de recherche à venir au projet maïs des Birunga. *Bull. Agricole du Rwanda* : 118 – 127.

CHOPART (J.L.) & NICOU (R.), 1989 – Vingt ans de culture continue avec et sans labour au Sénégal. *L'Agron. Trop.*, à paraître.

CIMMYT, 1983 – Mise au point de technologies adaptées aux contraintes et atouts de l'agriculteur. Concepts et méthodes. Manuel, 78 p.

FOREST (F.) & LIDON (B.), 1984 – Influence of the rainfall pattern on fluctuations in an intensified sorghum crop yield. ICRISAT. Agrometeorology of sorghum and millet in the semi – arid tropics : proceedings of the international symposium, 15 – 20 novembre 1982 : 261 – 273.

FOREST (F.) & KALMS (J.M.), 1984 – Influence du régime d'alimentation en eau sur la production du riz pluvial. Simulation du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.* : 42 – 49.

FRANQUIN (P.) & FOREST (F.), 1977 – Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.* : 7 – 11.

GANRY (F.), 1979 – Etude de la nutrition azotée du riz pluvial cultivé sur les sols hydromorphes "gris" de Casamance. Rapport CNRA Bambey (Sénégal), 17 p., multigr.

GUILLOBEZ (S.), 1973 – Compte – rendu de l'étude des "sols gris" de Casamance (Sénégal). Campagne 1972 – 1973. IRAT/Sénégal.

KILIAN (J.) 1974 – Etude du milieu physique en vue de son aménagement. Conceptions de travail. Méthodes cartographiques. *L'Agron. Trop.* : 141 – 154.

POSS (R.), SARAGONI (H.) & IMBERNON (J.), 1988 – Bilan hydrique simulé du maïs au Togo méridional. *L'Agron. Trop.* : 18 – 28.

REBUFFEL (F.), 1987 – Evolution de l'équilibre d'absortion d'une jeune plante de riz pendant les premiers jours de végétation. Mémoire de DEA. USTL., 36 p.

REYNIERS (F.), STEIMETZ (S.) & FOREST (F.), 1983 – Impact de l'enracinement et de la réserve en eau utile sur la production du riz pluvial au Brésil. Mémoires et Travaux de l'IRAT n° 13. Intensification de l'agriculture pluviale : relation entre la plante, le sol et l'eau : 64 – 74.

SIBAND (P.), 1974 – Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance. *L'Agron. Trop.* : 1 228 – 1 247.

SIBAND (P.), 1976 – Quelques réflexions sur les potentialités et les problèmes des sols gris de Casamance (Sénégal Méridional). *L'Agron. Trop.* : 105 – 113.

WEY (J.), 1988 – Rapport analytique sur les travaux effectués à la SIEAB (Gabon) par la cellule de recherche. Rapport IRAT, 230 p., multigr.

LES SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX LESSIVES A CONCRETIONS DU BURKINA FASO : CARACTERISTIQUES ET CONTRAINTES POUR L'UTILISATION AGRICOLE

F.J.P. PALLO & L. THIOMBIANO
BUNASOLS - BP 7142 - Ouagadougou - BURKINA FASO

RESUME

Les sols ferrugineux tropicaux lessivés constituent 85 % des sols du Burkina Faso. Ils sont surtout représentés par les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions.

L'étude de ce sous-groupe dans 8 régions différentes du pays montre qu'en général ce sont des sols pauvres en matière organique, azote, phosphore et potassium, et comportant de nombreuses autres contraintes telles que :
- *taux de gravillonnement parfois élevé (60 à 80 %),*
- *réserve en eau utile faible,*
- *structure peu favorable à la pénétration racinaire au-delà de l'horizon supérieur,*
- *encroûtement en surface (pellicule de battance) qui favorise le ruissellement des eaux pluviales,*
- *faible capacité d'échange cationique et somme des bases échangeables,*
- *valeurs de pH souvent inadéquates pour les cultures.*

Aussi les rendements obtenus pour les différentes spéculations (mil, sorgho, arachide, niébé) selon les méthodes traditionnelles de culture, sont-ils faibles à moyens.

Les propositions avancées pour l'amélioration de leurs qualités agronomiques sont :
- *sous-solage,*

- *apport de matière organique (compost),*
- *apport d'engrais chimique en fonction du pouvoir d'absorption du complexe argilo – humique,*
- *irrigation par gravité ou par aspersion si possible.*

INTRODUCTION

Le Burkina Faso est situé en plein coeur de l'Afrique occidentale et est souvent qualifié de pays agricole arriéré. De nombreuses actions y sont entreprises pour atteindre l'autosuffisance alimentaire. Ces différentes actions, pour être efficaces, ont besoin de données de base sur le milieu physique.

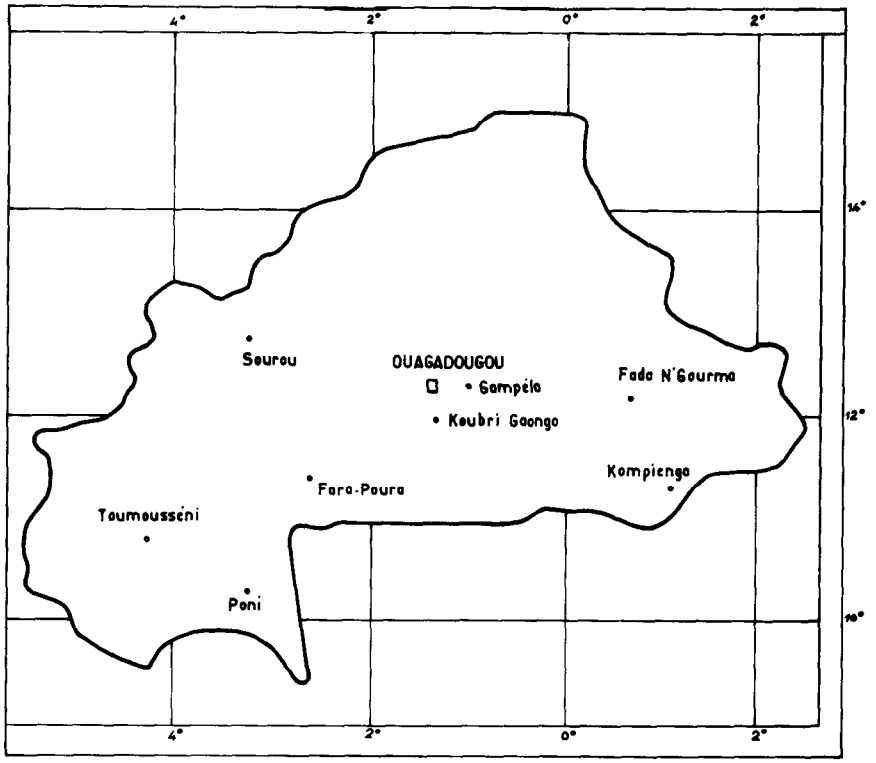
Dans ce cadre, les données pédologiques revêtent une importance toute particulière. Malheureusement, malgré cette utilité évidente, seulement 137 études ayant abouti à l'établissement d'une carte (pédologique, morpho – pédologique ou d'aptitude culturale) ont été dressées entre 1955 et 1987 (BUNASOLS, 1987a). Cependant, il est à noter que le pays est entièrement couvert à l'échelle 1/500 000 depuis 1969, grâce aux travaux de différents chercheurs de l'ORSTOM (*Cf.* liste bibliographique).

En outre, des travaux de recherche portant sur la pédogenèse, sur l'évolution de quelques types de sols sous différentes formes d'utilisation (SOURABIE, 1979 ; PALLO, 1982a ; THIOMBIANO, 1984) ou sur la caractérisation de sols spécifiques (ZOMBRE, 1984) ont permis de mieux appréhender certains aspects et comportements des sols du Burkina. L'ensemble de ces études montre que la majorité des sols appartient au groupe des sols ferrugineux tropicaux lessivés ; ils représentent 85 % des sols du pays (FAO, 1980), d'où il résulte la nécessité de leur accorder une attention toute particulière. A cause de leur forte proportion au sein du groupe, les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions ont été retenus. Cette communication s'articule ainsi autour de trois points principaux :

- présentation générale des sites comportant les sols étudiés et les méthodes de détermination des différents paramètres ;
- résultats et discussions portant sur les caractéristiques et les contraintes liées à l'utilisation des sols concernés ;
- propositions et recommandations pour la mise en culture de ces sols.

I – PRESENTATION GENERALE DES SITES ETUDIES

Les sites choisis pour cette étude se trouvent dans différentes zones agroécologiques du Burkina (ICRISAT, 1987) ; (voir carte de situation et tableau 1)



Carte de situation des sites

Echelle
0 50 100 Km

Tableau 1 : *Données générales sur les sites étudiés*

Sites Etudiés	Zones Climatiques	Pluviométrie moyenne annuelle (mm)	Température moyenne (°C) minima et max.	Unités géomorphologiques	Roche mère	Végétation
FADA N'GOURMA	Soudanienne Centre - Nord	860	21,3 et 34,5	Plateaux, Buttes Glacis moyen	Syénite	Savane arbustive
KOUBRI GAONGO	Soudanienne Centre - Nord	800	21,8 et 35,5	Bourrelets de berge	–	Savane buissonnante
GAMPELA	Soudanienne Centre - Nord	800	21,8 et 35,5	Glacis	–	Savane arbustive à arborée
KOMPIENGA	Sud Soudanienne	900	21,8 et 33,0	Versants de raccordements polygénique	Granite	Savane arbustive à arborée
TOUMOUSSENI	Soudanienne	1 145	20,0 et 30,4	Plateaux, versants	Granito - gneiss et granito diorite	Savane arbustive à arborée
FARA - POURA	Soudanienne	1 100	21,7 et 34,5	Versants	–	Savane arborée
PONI	Sud soudanienne	1 130	21.0 et 33,3	Plateaux, versants	Diorite et microdiorite	Savane arborée
SOUROU	Soudanienne Centre Nord	980	21,9 et 34,5	Plateaux	Colluvions	Savane arbustive à arborée

A partir des données ci-dessus, il est utile de noter les aspects suivants :

1 - Les sols étudiés se retrouvent au niveau d'unités géomorpholo-giques variées (buttes, plateaux, versants, glacis, bourrelets de berges). Dans l'ensemble, ce sont des unités en positions "exondées" au niveau des toposéquences des sites étudiés.

2 - Sur le plan pédogénétique, le complexe d'altération kaolinitique provient de roches variées, mais appartenant pour l'essentiel à la famille des roches granitiques : granite, granito-diorite, granito-gneiss ...

3 - Au plan climatique, l'ensemble des sites est sous un climat de type tropical caractérisé par deux saisons : une saison pluvieuse de mai-juin à octobre et une saison sèche s'étendant sur le reste de l'année.

Cette alternance saison sèche - saison humide joue un rôle important au niveau des processus d'oxydo-réduction du fer et du manganèse qui caractérisent ces sols.

4 - La végétation est en général de type savane arborée ou arbustive claire à dominance d'espèces ubiquistes telles *Vitellaria paradoxa, Parkia clappertoniana, Combretum glutinosum, Bombax costatum* ... Le tapis herbacé est en général assez dense (*Schizachyrium exile, Andropogon gayanus* ...) dans les zones de jachère ou non défrichées. La litière est souvent absente du fait de la minéralisation de la matière organique due au régime climatique de type tropical, mais aussi à cause des fréquents feux de brousse et des méthodes traditionnelles de cultures sur brûlis.

5 - Dans les différents sites, les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions ont une importance variable, liée entre autres à l'échelle d'observation et à la nature des unités géomorpholo-giques.

II - METHODES DE DETERMINATION DES DIFFERENTS PARAMETRES

Les caractéristiques physico-chimiques des sols ont été étudiées à partir :

- des directives FAO pour la description des sols,
- du Code Munsell pour la détermination des couleurs,
- des "Méthodes d'analyse physique et chimique des sols, eaux et plantes" (BUNASOLS, 1987b).

Cependant, d'autres paramètres concernant les différentes fractions de la matière organique totale ont été obtenus par des méthodes décrites par DABIN (1979). Ces analyses, effectuées aux Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM, portent sur des échantillons de sols identiques à ceux étudiés, mais localisés dans d'autres sites.

III - RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Caractéristiques des sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions

1.1. Caractéristiques morphologiques

Les profils types de sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions (FLC) sont profonds (> 120 cm) et présentent en général des horizons bien différenciés de type ABC. L'horizon C peut être atteint à des profondeurs de l'ordre de 6 m.

1.1.1. Les horizons de surface de type A

Ils sont de couleur grise (10 YR 5/1) à brun grisâtre (10 YR 5/2) ou brune (10 YR 5/3) à brun jaunâtre voire brun jaunâtre clair (10 YR 6/6 à 10 YR 6/4) à l'état sec ; à l'état humide, les couleurs de ces horizons varient du brun sombre (10 YR 3/1) au brun grisâtre sombre (10 YR 4/2) ou brun jaunâtre sombre (10 YR 3/4) ; 10 YR 4/4). Ces horizons contiennent

en général moins de 5 % de graviers et ont une épaisseur de 10 à 30 cm. Leur structure est massive (phénomène de prise en masse en périodes de dessèchement) ou faiblement développée en éléments très grossiers, grossiers ou fins de forme polyédrique subangulaire. La porosité, bien que développée du fait de la présence d'un espace poral assez important lié à l'activité biologique et à la présence de racines de graminées, est peu visible en surface : elle constitue en ce sens une "sous-porosité", vu qu'elle se trouve sous une croûte ininterrompue, souvent appelée croûte de battance, créée par l'effet "*splash*" des gouttes d'eau des précipitations torrentielles. Cette croûte, absente dans les zones cultivées, est faiblement présente dans les zones à tapis herbacé dense ; dans les zones dénudées et érodées, elle constitue une couche de couleur noir violacée qui, selon des études récentes réalisées au Mali, serait due entre autres à l'activité de champignons microscopiques. Les taches d'hydromorphie sont rarement présentes dans ces horizons. L'activité biologique est moyenne à bien développée et les racines sont souvent nombreuses, fines, très fines et moyennes ou grosses selon le type de végétation.

1.1.2. Les horizons sous jacents d'accumulation

Ils sont de couleur jaune rougeâtre (7,5 YR 6/6 ; 6/8 ; 7/6 ; 7/8) ou brun (7,5 YR 5/6 ; 5/8) et quelquefois rouge jaunâtre (5 YR 5/6 ; 5/8 ; 4/6). Ce sont des horizons très marqués par les processus de ferruginisation qui leur confèrent leur coloration rouge. L'évolution rapide du fer vers la forme cristalline est caractéristique, et aboutit à sa libération sous forme d'hématite. Il en découle la présence de concrétions ferrugineuses et ferro-manganifères à des taux variant de 5 à 30 %, voire 40 à 60 %. L'évolution du fer dans ces horizons influe sur leur structure, qui dans l'ensemble est relativement plus développée que celle des horizons de surface. Elle est faiblement à moyennement développée, en éléments grossiers moyens ou fins polyédriques subangulaires. Les pores sont nombreux fins, moyens, très fins ou larges. L'activité

biologique est moyennement à bien développée et les racines sont assez nombreuses à nombreuses fines, très fines et moyennes en liaison avec le type de formation végétale.

Très souvent, de nombreuses taches d'oxydo – réduction sont présentes à des taux variant de 10 à 30 %, ce qui entraîne par ailleurs des difficultés de classification et leur caractérisation comme sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions.

1.1.3. Les différentes études menées ont rarement permis d'atteindre l'horizon C. Cependant, au niveau d'une toposéquence à Gampela, cet horizon a été atteint à une profondeur de l'ordre de 6,5 m (THIOMBIANO, travaux en cours).

1.2. Propriétés physico – chimiques (voir tableau 2)

1.2.1. La texture

La texture est dans 80 à 90 % des cas limono sableuse dans le premier horizon. Le taux d'argile est < 8 %. Dans les horizons sous – jacents ce taux augmente avec la profondeur, avoisinant parfois 30 %. Très souvent, il existe une relative discontinuité texturale. Celle – ci peut être masquée par une séquence texturale du genre LS, LAS puis LA et enfin AL ou A. La texture argileuse présente en profondeur une certaine résistance à la pénétration racinaire, surtout lorsque la structure est faiblement développée ou massive.

Tableau 2 : *Données physico – chimiques sur les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétion des sites étudiés*

Sites étudiés	Profondeur des sols (cm)	Texture	Charge gravelleuse	pH	CEC mé/100g de terre séchée	Teneur en Ca2+ K+ mé/100g		S mé/100g de terre séchée	Taux de matière organique	N. total	P assimilable ppm P
FADA N'GOURMA	> 130	LS à LAS	5 % à 60 %	–	–	–	–	–	–	–	–
KOUBRI GAONGO	> 125	LS à LA	8 % à 40 %	6,5 à 5,8	5,40 à 9,01	2,20 à 0 7,66	0,08 à 0,18	3,12 à 5,36	0,33 à 1,66	0,08	0,2 à 1
GAMPELA	> 133	LS à LA, A	5 % à 35 %	7,0 à 5,5	3 à 12,5	1,3 à 8,41	0,019 à 0,063	2 à 10	0,14 à 2,6	0,01 à 0,06	⩽0,01
KOMPIENGA	> 130	LS à LAS	5 % à 45 %	7,3 à 5,5	4,32 à 19,3	2,12 à 14,0	0,07 à 0,36	3,6 à 18	0,2 à 2,6	0,016 à 0,125	0,01 à 2,3
TOUMOUSSENI	> 180	LS à LA	⩽15 %	6,8 à 5,5	1,1 à 4,03	0,33 à 2,4	0,03 à 0,18	1,1 à 4,03	24 à 1,5	0,05	2,3
FARA – POURA	> 130	LS à LA	5 % à 20 %	6,8 à 5,8	1,75 à 6,75	0,73 à 5,7	0,09	0,89 à 5,2	0,25 à 2,63	0,032 à 0,084	–
PONI	> 180	Lf à LA	5 % à 30 %	6,2 à 5,7	1 à 4	0,84 à 1,92	0,07 à 0,19	1 à 2,3	0,41 à 1,1	0,011 à 0,042	–
SOUROU	> 130	LS à LAS, A	20 % 40 %	6,9 à 4,7	3,20 12,7	1,30 à 6,1	0,04 0,29	3,2 à 9,06	0,25 à 1,5	0,03 à 0,06	⩽ 0,01 à 6,5

LS = Limon sableux
LA = Limon argileux
LAS = Limon argilo – sableux
Lf = Limon fin
A = Argileux

1.2.2. La capacité de rétention en eau du sol

Le calcul de la réserve en eau utile sur 50 cm d'épaisseur a été réalisée à partir des constantes hydriques pF 2,5, pF 3 et pF 4,2, sur la base de l'équation

$$Ru = \frac{(pF2,5 - pF4,2) \text{ ou } (pF3,0 - pF4,2) \text{ X Da X } 50cm}{100}$$

ici Da $\approx$ 1,7

Elle a permis d'obtenir les données suivantes

Profondeur	Réserve utile
0 – 50 cm	50 mm
50 – 100 cm	70 mm

La capacité de rétention en eau du sol croît avec la profondeur et est en corrélation positive avec le taux d'argile dans le sol.

1.2.3. Le pH

La réaction des sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions est de type acide (pH eau 5,5) à légèrement acide (pH eau 6,5) et quelquefois neutre (pH eau 7,0). Les horizons supérieurs sont en général plus acides que les horizons sous-jacents.

1.2.4. La capacité totale d'échange cationique (CEC)

La capacité totale de fixation des cations échangeables par le complexe absorbant de ces sols varie de 1 à 12,5 mé/100g de terre séchée. Elle est par conséquent faible à très faible, lorsque l'on se réfère aux normes d'interprétation des analyses chimiques. Les horizons de surface ont une CEC nettement plus faible que ceux de profondeur. Cela peut être lié au faible taux d'argile dans ces horizons.

1.2.5. La somme des bases échangeables

La teneur en bases échangeables (Ca, Mg, Na et K) est en général faible (elle varie entre 2 et 9,2 mé/100 g de terre séchée). Ce taux est plus élevé dans les horizons supérieurs, hormis les cas de sols cultivés où l'exportation de la matière organique lors des récoltes contribue à l'abaisser (ARRIVETS 1976 *in* SEDOGO 1978). Très souvent, les rapports Mg/K soulignent une carence en potassium échangeable ($K < 0,2$ mé/100 g de terre séchée). Cependant, dans environ 10 % des cas, la teneur en K^+ échangeable est moyenne : 0,2 mé/100 g de terre séchée. La teneur en calcium échangeable est nettement plus élevée que celle en potassium et varie en moyenne entre 1,3 et 7,1 mé/100 g de terre séchée. La teneur en magnésium est en général inférieure à celle du calcium et supérieure à celle du potassium.

1.2.6. Le phosphore disponible

Selon BEAR et KALOGA *in* FAO (1980), le phosphore devient de plus en plus fortement lié au fer et à l'aluminium libérés par l'altération des silicates au fur et à mesure que l'altération se poursuit et que l'acidité se développe, car l'altération conduit à une libération du fer. La teneur en fer libre et en fer total est forte dans les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions (PALLO, 1982a) ; aussi, dans ces sols, le taux de phosphore disponible est-il faible : 0,02 à 2,9 ppm P.

1.3. La matière organique des sols FLC et ses caractéristiques

1.3.1. La matière organique totale

La teneur des sols FLC en matière organique est faible (< 2 % dans 70 % des cas) ou moyenne (comprise entre 2 et 5 % dans 30 % des cas de nos études), selon les normes FAO (1980). Cette teneur baisse avec la profondeur, où elle devient très faible

(< 1 %) dans la presque totalité des cas. En général, les sols cultivés dans le cadre du système traditionnel sont nettement plus pauvres en matière organique.

1.3.2. L'azote total

Les sols ferrugineux tropicaux lessivés sont très pauvres en azote total. Dans 70 % des cas, cette teneur est inférieure à 0,06 % et dans tous les cas elle est inférieure à 1 %. Les rapports C/N obtenus soulignent un degré de décomposition très variable de la matière organique dans les sols étudiés ; cette décomposition est rapide à lente (C/N variant entre 4,0 à 25) selon les conditions stationnelles et la nature de la matière organique.

1.3.3. Caractéristiques de la matière organique

Différents travaux (SOURABIE 1979, PALLO 1982a, ZOMBRE 1984, THIOMBIANO 1984) ont permis la caractérisation de la matière organique des sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions. Ces travaux soulignent que la biodégradation de la matière végétale aboutit à la formation dominante :

- de la fraction humine totale (plus de 70 %) sur les matières humifiées totales (extractibles par les réactifs pyrophosphate de sodium et soude). Cette humine totale présente un faible degré de décomposition et est constituée à près de 60 % d'humine héritée ;
- des acides humiques sur les acides fulviques. En outre, ces acides humiques sont très polymérisés (plus de 60 % d'acides humiques gris), cette polymérisation étant liée à l'alternance saison sèche – saison humide caractéristique des zones à climats tropicaux.

2. Corrélation avec la légende FAO

Selon la légende FAO (1988), les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions étudiés peuvent appartenir à deux unités

majeures : les Luvisols et les Lixisols selon la CEC et le taux de saturation.

3. Contraintes à l'utilisation agricole des sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions

Au regard des caractéristiques de ces sols, il ressort que leurs contraintes à l'utilisation agricole sont multiples, portant sur les qualités telles que celles définies par la FAO (1976 ; 1983) :

- base d'enracinement,
- disponibilité en eau,
- disponibilité en éléments nutritifs,
- conditions de germination,
- résistance à l'érosion.

3.1. Base d'enracinement

Des nombreux paramètres qui interviennent dans la détermination de cette qualité, la structure et le taux de gravillons constituent les facteurs limitants majeurs. Ainsi les sols étudiés ont :

- soit un horizon B qui, du fait de sa structure et de sa consistance ferme à l'état humide, constitue un obstacle à la pénétration racinaire et ralentit la vitesse d'infiltration de l'eau, provoquant alors sa stagnation en surface ou son ruissellement selon les conditions topographiques ;
- soit un horizon B fortement concrétionné ne permettant pas le développement des racines dans cette partie du profil.

Dans ces deux cas, la base d'enracinement se limite aux vingt premiers centimètres de sol, la croissance des racines s'effectuant latéralement dans l'horizon supérieur. Pour pallier cette contrainte, les paysans, dans le cadre du système traditionnel de culture, effectuent un labour par buttage qui permet d'augmenter l'épaisseur de l'enracinement.

3.2. Disponibilité en eau

Au – delà des conditions pluviométriques, qui déterminent avec l'évapotranspiration potentielle les périodes de croissance des végétaux dans les diverses zones agro – écologiques du Burkina, il est à noter que la disponibilité en eau dépend également de la capacité de rétention en eau du sol. Les paramètres impliqués sont la texture, la teneur en matière organique et l'épaisseur des différents horizons. Sur les sols étudiés, le déficit hydrique est fréquent, dû à leur faible teneur en matière organique d'une part et à la texture moyenne ou grossière de l'horizon de surface d'autre part. Au – delà, la réserve d'eau utile (RU) croît, favorisée par la texture limono – argilo – sableuse ou limono – argileuse des horizons B lorsqu'ils ne sont pas fortement concrétionnés. Les données disponibles indiquent que la RU a une valeur moyenne de 1 à 1,45 mm/cm de sol, ce qui dans l'ensemble est faible, devenant alarmant dans les zones semi – arides. Une telle valeur impose en outre une fréquence d'irrigation inférieure à 7 jours lorsque l'irrigation est possible. Cette contrainte est souvent jugulée grâce aux microcuvettes créées par les buttes, qui favorisent la rétention des eaux pluviales et leur infiltration dans le sol.

3.3. Disponibilité en éléments nutritifs

Comme mentionné plus haut, ce sont des sols pauvres en matière organique, en azote, en phosphore et en potassium. Par conséquent, ce qui importe c'est, d'une part, la forme sous laquelle les éléments nutritifs sont présents dans ces sols et, d'autre part, lorsque l'on envisage des apports d'engrais chimiques, leur capacité de rétention des nutriments. Apparemment, la réaction (pH) des sols étudiés n'indique pas de contraintes particulières.

Toutefois, ils sont caractérisés par une faible capacité de rétention des éléments nutritifs, ce qui impose d'accroître au préalable les valeurs de la capacité d'échange cationique par des amendements organiques appropriés afin de rendre encore plus bénéfiques les effets des engrais chimiques.

Au total, la fertilité chimique médiocre de ce sous-groupe de sols résulte de la faible quantité d'éléments nutritifs, de la forme non assimilable par les plantes de certains de ces éléments tels que le phosphore et de leur faible capacité de rétention des nutriments.

3.4. Conditions de germination

L'aptitude à la germination est souvent omise lorsque l'aptitude des sols à l'utilisation agricole est appréhendée uniquement à travers les conditions pluviométriques. Cependant divers caractères liés au sol ont des effets défavorables sur la germination des plantes. Pour les sols étudiés, il s'agit soit d'un taux d'éléments grossiers élevé dès la surface, soit de l'encroûtement des premiers centimètres de sol provoqué par une longue saison sèche et favorisé par la faible teneur en matière organique et la texture limono-sableuse de l'horizon supérieur. Ce dernier facteur entraîne une imperméabilisation du sol, ce qui a pour conséquence d'accroître le ruissellement des eaux des premières pluies. La germination devient alors aléatoire lorsque des travaux de préparation du sol (labour) ne précèdent pas les semis, ce qui est souvent le cas en système traditionnel de culture.

3.5. Résistance à l'érosion

Peu de travaux ont été effectués pour appréhender la résistance à l'érosion des sols concernés.

Par contre, des études menées par ROOSE *et al.* (1979) sur des sols du même groupe (sous groupe induré) indiquent une faible résistance à l'érosion hydrique. Cette fragilité est imputable au type de formation végétale qui n'assure pas une couverture parfaite de la surface du sol. Du reste, ces sols sont plus ou moins dénudés à la fin de la saison sèche, suite aux feux de brousse, et encroûtés en surface. Les premières pluies sont par conséquent très érosives, entraînant des pertes de terre considérables. Cette faible résistance à l'érosion hydrique se reflète également à travers les quelques données disponibles portant sur l'indice d'instabilité structurale (Is) de

HENIN. Les valeurs sont généralement supérieures à 1, dues aux faibles teneurs en matière organique et en argile, et augmentent en fonction de la profondeur. Elles avoisinent 4 dans les horizons B non fortement concrétionnés, traduisant ainsi une plus grande instabilité structurale et une plus faible résistance à l'érosion.

Outre les contraintes énumérées ci-dessus, qui se réfèrent aux caractéristiques des sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions dans les conditions naturelles, la mise en culture de ces sols s'accompagne toujours de processus de dégradation physique et chimique. Une attention toute particulière doit être accordée à l'évolution de la fertilité chimique, celle-ci étant la cause des transformations des caractères physiques observées.

3.6. Evolution de quelques propriétés chimiques des sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions sous cultures

En système de culture pluviale ou irriguée, sans aucun amendement, les modifications des caractères chimiques des sols étudiés portent sur :

- la diminution de la teneur en éléments nutritifs (P et K),
- l'acidification,
- l'augmentation du taux de saturation lié surtout à une diminution de la capacité d'échange cationique, sous défriche récente.

Des transformations des diverses fractions de la matière organique totale se produisent également. Elle se traduisent par une accumulation des produits non ou peu décomposés et par une accentuation des phénomènes d'oxydation des produits évolués, tout en favorisant la décomposition des fractions organiques fines. Ainsi, sur des sols identiques sous culture traditionnelle de mil, il a été observé (PALLO 1982b) un fort pourcentage d'acides humiques bruns qu'accompagnent d'une part un accroissement du taux d'acides humiques intermédiaires et d'autre part une diminution de celui des acides humiques gris. On y note aussi une augmentation de l'humine totale, plus spécifiquement de sa fraction liée au fer. Il s'ensuit que la mise en culture, même pour une période

assez courte (moins de 3 ans), entraîne des modifications dans la composition de la matière organique liées à la faible stabilité du complexe argilo – humique. Au total, les sols étudiés présentent de nombreuses contraintes dues à leurs caractères morphologiques et physico – chimiques. Elles s'accentuent avec leur mise en culture, rendant ainsi impossible le maintien d'une production agricole constante et élevée dans le cadre d'une agriculture traditionnelle sans aucun amendement. Par conséquent, il est indispensable d'envisager un type d'utilisation de ces sols qui prenne en considération les propositions et recommandations ci – après.

IV – PROPOSITIONS ET RECOMMANDATIONS

- La disponibilité en eau étant une des contraintes majeures, notamment en début d'hivernage, il est indispensable, pour favoriser la germination des plantes, d'effectuer des labours permettant la rétention et l'infiltration des eaux pluviales. Cependant, à cause de la faible stabilité structurale des horizons B, ces labours doivent être précédés d'aménagements anti – érosifs appropriés afin de limiter les pertes de terre qui en découleraient. Des sous – solages périodiques s'avèrent également indispensables pour accroître la base d'enracinement des plantes et éviter toute stagnation des eaux dans l'horizon supérieur et par conséquent l'émergence d'une nouvelle contrainte, celle de la disponibilité en oxygène.

- La faible fertilité chimique de ces sols impose des apports d'engrais chimiques pour le maintien d'une production agricole constante et élevée. Il est néanmoins indispensable, pour respecter les qualités biologiques des sols, de déterminer avec précision les doses à utiliser sur la base d'essais probants, l'objectif au niveau du paysan étant l'obtention d'une production agricole optimale et non maximale.

- Des amendements organiques sont nécessaires pour accroître la capacité de rétention des éléments nutritifs, la disponibilité en eau et améliorer la structure des sols étudiés. A cet effet, un compostage des éléments forestiers et des résidus de récolte est à encourager. Ici également, il s'agira d'obtenir des rendements

optimums en évitant l'emploi de quantités trop élevées de compost afin de maintenir tant soit peu le fragile équilibre de l'écosystème en place. Par conséquent, la méthode traditionnelle du "zaï" qui consiste à enfouir du compost directement dans les trous de semis préalablement préparés, s'avère très adaptée car tout en minimisant les quantités de compost, elle permet la récupération de sols peu fertiles (OUEDRAOGO, 1989).

CONCLUSION

Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions représentent une forte proportion des sols du Burkina ; ils sont rencontrés dans différentes zones agroclimatiques et au niveau d'unités morphologiques variables (buttes résiduelles, glacis, levées alluviales ...) ; ils ne sont pas caractérisés par une formation végétale précise et leur influence au niveau de la végétation semble se situer au niveau de sa composition spécifique.

Ce sont des sols profonds (> 1,2 m) comportant un taux d'éléments grossiers variable (5 à 40 – 60 % de concrétions) suivant la profondeur ; ils ont en général une structure massive à faiblement développée et une texture limono – sableuse à limono – argilo – sableuse en surface et argilo – limoneuse à argileuse en profondeur.

Ils sont pauvres en matière organique, en azote, en phosphore, en potassium et ont une capacité totale d'échange faible. La somme des bases échangeables y est faible et la réaction du sol est légèrement acide à acide. Leur réserve en eau utile est faible.

Pour leur mise en valeur agricole optimale, il est utile :
- d'effectuer un labour approprié afin d'améliorer la structure ;
- d'apporter de la matière organique (compost, fumier) afin d'améliorer la capacité d'échange cationique et de relever la richesse minérale ;
- d'apporter des engrais chimiques (de type NPK notamment) ;
- de mettre en place un dispositif anti – érosif compte tenu de leur faible stabilité structurale.

BIBLIOGRAPHIE

BOULET (R), 1968 – Etude pédologique de la Haute Volta – Région Centre – Nord. Rapp. ORSTOM (Dakar – Hann), multigr.

BOULET (R) & LEPRUN (J.C.), 1969 – Etude pédologique de la Haute – Volta – Région Est. Rapp. ORSTOM (Dakar – Hann), multigr.

BOULET (R.), 1976 – Notice des Cartes de ressources en sols de la Haute – Volta. Echelle 1/500 000. ORSTOM Paris.

BUNASOLS, 1978 – Etude pédologique du Périmètre de Koala (Fada). Rapport technique n° 12. BUNASOLS. Ouagadougou.

BUNASOLS, 1983a – Etude pédologique des blocs AVV de Koubri Est et Gaongo Nord. Echelle 1/20 000. Rapport technique n° 33, BUNASOLS, Ouagadougou.

BUNASOLS, 1983b – Etude pédologique de la zone de marnage autour du futur barrage hydroélectrique de la Kompienga. Echelle 1/20 000. Rapport technique n° 41, BUNASOLS, Ouagadougou.

BUNASOLS, 1984 – Etude pédologique de la forêt classée de Toumousseni. Echelle 1/20 000. Rapport technique n° 42, BUNASOLS, Ouagadougou.

BUNASOLS, 1985 – Etude morpho – pédologique de la zone AVV de Farapoura V. Echelle 1/20 000. Rapport technique n° 44, BUNASOLS, Ouagadougou.

BUNASOLS, 1986 – Etudes morpho – pédologiques de la Vallée du Poni. Echelle 1/100 000 et 1/20 000. Rapport technique n° 50, BUNASOLS, Ouagadougou.

BUNASOLS, 1987a – Répertoire des études pédologiques. Doc. technique, BUNASOLS, Ouagadougou.

BUNASOLS, 1987b – Méthode d'analyse physique et chimique des sols, eaux et plantes. Doc technique, BUNASOLS, Ouagadougou.

BUNASOLS, 1988a – Etude pédologique de la zone d'aménagement de la Vallée du Sourou. Echelle 1/20 000. Rapport technique n° 58, BUNASOLS, Ouagadougou.

BUNASOLS, 1988b – Etude pédologique de la station expérimentale de Gampela. Echelle 1/5 000. Rapport technique n° 59, BUNASOLS, Ouagadougou.

DABIN (B), 1979 – Extraction et dosage de la matière humique dans les sols. ORSTOM (Doc. Serv. Centraux) Bondy.

FAO, 1976 – Framework for land evaluation. FAO Soils, Bulletin n° 32, FAO Rome.

FAO, 1980 – Création d'un service national des sols en Haute – Volta. Etat des connaissances des sols. Rapport technique 1. AG.DP/UPV/74/007. Rome.

FAO, 1983 – Guidelines : Land evaluation for rainfed agriculture. FAO Soils Bulletin n° 52. FAO Rome.

FAO, 1988 – Legende de la carte mondiale des sols. Echelle 1/5 000 000. FAO, Rome.

ICRISAT, 1987 – Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : le Burkina Faso. Bulletin d'Information n° 23.

KALOGA (B.), 1968 – Etude pédologique de la Haute – Volta – Région Centre Sud. Rapp. ORSTOM (Dakar – Hann), multigr.

LEPRUN (J.C.) & MOREAU (R.), 1969 – Etude pédologique de la Haute – Volta – Région Ouest – Nord. Rapp. ORSTOM (Dakar – Hann), multigr.

OUEDRAOGO (A.), 1989 – Technique traditionnelle du Zaï. Ministère Action Coopérative Paysanne. Ouagadougou.

PALLO (F.), 1982a – Comparaison des caractères physico – chimiques et de la matière organique de trois pedons cultivés et vierges situés entre Fada N'Gourma et Piéga (Haute – Volta). Thèse de Doctorat 3ème cycle. Univ. Aix – Marseille III.

PALLO (F.), 1982b – Influence de la culture de mil sur trois pedons situés entre Fada N'Gourma et Piéga (Haute – Volta). Ecologia Mediterranea Tome VIII (Fasc. 4) 1982.

ROOSE (E.J.) *et al.*, 1979 – Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés sous sorgho et sous végétation soudano – sahélienne. Saria (Haute – Volta) ; Synthèse de campagne 1971 – 1974. ORSTOM Paris.

RIEFFEL (J.M.) & MOREAU (R.), 1968 – Etude pédologique de la Haute – Volta – Région Ouest – Sud. Rapp. ORSTOM (Dakar – Hann), multigr..

SEDOGO (J.P.), *et al.*, 1978 – Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques. *L'Agron. Trop.*, 36 – 2.

SOURABIE (N.), 1979 – Influence de la culture de canne à sucre sur les sols de Beregadougou (Haute – Volta) ; cas particulier des facteurs de fertilité liés à la matière organique. Thèse de Doctorat 3ème cycle. Univ. Aix – Marseille III.

THIOMBANO (L.) 1984 – Première approche de l'influence du reboise – ment en eucalyptus camaldulensis sur des sols de Gonsé (Haute – Volta). Thèse de Doctorat 3ème cycle. Univ. Aix – Marseille III.

ZOMBRE (N.), 1984 – Les sols développés sur roches à complexe d'altération montmorillonitique et kaolinitique dans le centre sud de la Haute – Volta (caractères de fertilité). Thèse de Doctorat 3ème cycle. Univ. Aix – Marseille III.

DISCUSSIONS ET SYNTHESE SUR LE THEME DU FONCTIONNEMENT DES SOLS ET L'ALIMENTATION DES PLANTES

Président	**: A. ASSA**
Vice – Président	**: A. MAPANGUI**
Rapporteur	**: C. CHEVERRY**

La discussion qui a suivi les exposés de R. POSS, P. SIBAND et J.P. PALLO a porté sur deux thèmes principaux :
- le comportement de l'eau dans les sols et l'alimentation hydrique des plantes ;
- le rôle de la pédologie dans la gestion agronomique (contraintes pour l'utilisation agricole ; problèmes d'expérimentation agronomique).

Les exposés de R. POSS, P. SIBAND et J.P. PALLO avaient déjà démontré le rôle important des caractères d'organisation des sols sur le fonctionnement hydrique des sols, qu'il s'agisse de problèmes de rétention ou bien de transfert de l'eau.

La question de l'accessibilité réelle de l'eau aux horizons pédologiques susceptibles de la stocker s'est ainsi révélée fonction :
- des organisations pelliculaires de surface, qui empêchent l'eau de s'infiltrer (J.P. PALLO, sols du Burkina Faso) ;
- de l'existence de voies de circulation préférentielles, qui permettent, lors des pluies, à certains horizons profonds de stocker l'eau avant que les horizons immédiatement sus – jacents soient eux – mêmes réhumidifiés (R. POSS) ;
- de l'existence de discontinuités structurales conduisant à la formation de nappes d'eau temporaires perchées (P. SIBAND).

La discussion elle – même a complété ces présentations, en révélant la diversité des facteurs susceptibles de perturber la circulation de l'eau dans les sols. Le rôle de l'activité biologique des sols (M. KILASARA), des

pratiques culturales superficielles (A. CASENAVE), des variations de température (R. RABESON), de textures particulières (sols très sableux : M. GAVAUD), fut ainsi évoqué. Cette discussion permit par ailleurs d'ouvrir le débat vers des perspectives de modélisation (empirique ou basée sur des lois physiques), et de géochimie des eaux (rôle de la vitesse de circulation des eaux au sein des sols sur les caractéristiques chimiques de ces eaux).

La deuxième partie de la discussion a montré le grand intérêt, mais aussi les limites, des réponses que le pédologue est susceptible de fournir aux questions des agronomes.

Le grand intérêt d'abord, qui a été illustré par des exemples d'ordre divers. C'est ainsi qu'une étude pédologique de niveau 2 (selon la terminologie de P. BRABANT) se révèle un outil précieux pour l'implantation d'un essai agronomique ; le comportement racinaire (profil racinaire, état des racines) dépend beaucoup du mode de superposition d'horizons différents (gravillonnaires, indurés ...) (R. MOREAU, A. M. IGUE). Mais, plus généralement, l'étude pédologique fournit des indications précieuses quant au devenir des engrais apportés au sol et quant aux raisons (souvent d'ordre physique) pour lesquelles une fertilisation, pourtant théoriquement bien conçue, donne des résultats agronomiques parfois décevants (P. MONDJALIS, P. DOUTI).

Mais la discussion a également permis de rappeler les limites de l'intervention du pédologue dans les problèmes agronomiques, soit parce que l'échelle des cartes pédologiques disponibles ne convient pas au problème posé (T. TCHEMI), soit pour des raisons plus fondamentales, déjà évoquées dans l'exposé de P. SIBAND lui-même. Le comportement de l'agriculteur, notamment, joue un grand rôle et, dans cet esprit, M. RAUNET a rappelé le grand intérêt d'interroger ces agriculteurs sur la manière dont ils ressentent les contraintes que leur imposent leurs sols, à travers des problèmes du type de celui posé par la germination (P. DOUTI), ou de celui de l'efficacité d'opérations telles que le sous-solage (C. MATHIEU), ou le billonnage (M. LATHAM).

La conclusion de ce second thème de la discussion fut donnée par P. SIBAND : la collaboration entre pédologues et agronomes sera d'autant plus efficace qu'elle se déroulera sur le terrain même, dans un climat de confiance et de lucidité.

EVALUATION DES TERRES POUR LA MISE EN VALEUR

EVALUATION DES TERRES
QUELQUES REGLES DE BASE

P. BRABANT
ORSTOM Bondy

Sans entrer dans le détail de la procédure d'évaluation des terres, nous voulons simplement présenter quelques règles de base pour faire cette évaluation.

1 – Quelle est la différence entre un sol et une terre ?

Le concept de "terre" est plus large que celui de "sol", car il englobe aussi le climat, la végétation et les activités humaines. Cependant, le sol reste, en général, un des éléments principaux de l'évaluation des terres.

2 – Une évaluation des terres prend en compte non seulement la nature du sol, mais aussi son *extension dans l'espace*. D'où l'intérêt des cartes de sols.

3 – Le type d'évaluation *dépend de l'échelle* des cartes de sols. Elle n'est pas la même quand on utilise une carte d'inventaire à 1/500 000^{e} ou une carte très détaillée à 1/5 000^{e}.

4 – Il existe une *équivalence* entre, d'une part les *unités de sols* résultant du découpage d'une couverture pédologique par le cartographe, d'autre part les *unités spatiales* servant à l'évaluation des terres (terroir et types de terres), et enfin entre les unités de terrain impliquées par l'aménagement (système d'aménagement et unités d'aménagement).

5 – La procédure d'évaluation comporte trois phases principales :

1ère phase : Détermination de *l'aptitude* ou de *l'inaptitude*
On compare les conditions requises par un type d'utilisation déterminé avec les propriétés de la terre, pour savoir si cette terre est apte ou inapte pour un type d'utilisation.

2ème phase : détermination du *degré d'aptitude*
Cette opération est effectuée en analysant la nature et l'importance des facteurs limitants pour le type d'utilisation concerné.

3ème phase : *classement* des terres
Les terres sont classées par ordre croissant ou décroissant d'aptitude.

6 – Où s'arrête le rôle du pédologue dans l'évaluation des terres ?

En général, il se limite à une évaluation du milieu bio – physique. L'évaluation socio – économique est une autre activité complémentaire, où interviennent des économistes, des agronomes, des socio – économistes ; le pédologue peut cependant y participer.

TEST D'ADAPTABILITE DES METHODES PARAMETRIQUES DANS LE CHAMP VOLCANIQUE DE TSHIBINDA - TSHIBATI (SUD - KIVU - ZAIRE)

B. FOURNIER, B. MAMBANI & P. MONDJALIS
INERA - BP 2015 - Kisangani - ZAIRE

RESUME

Plusieurs méthodes d'évaluation agronomique des terres et des sols existent, mais aucune d'entre elles n'a été spécialement conçue pour les sols volcaniques. Un essai d'adaptation locale de ces méthodes est faite au niveau du champ volcanique de Tshibinda - Tshibati, au Sud - Kivu.

Les auteurs proposent des modifications profondes aux méthodes paramétriques de FRANKART et BOTIMA (1969) et de SYS et FRANKART (1971), au vu des contraintes édaphiques chimiques et physiques qui prévalent dans le champ volcanique précité. Pour le modèle "FRANKART et BOTIMA", des modifications sont apportées au niveau du développement de la structure, tant pour l'horizon diagnostique de surface que pour celui de profondeur. Pour le modèle "SYS et FRANKART", elles interviennent au niveau du développement de la structure de l'horizon B diagnostique, de la classe texturale et de la saturation en bases de l'horizon superficiel.

Les versions corrigées par les auteurs donnent des indices plus élevés que ceux obtenus par les méthodes d'origine. Ils se rapprochent un peu plus de la réalité, en partant du principe que ces indices expriment la productivité par rapport au sol le plus productif dans un milieu écologique donné.

Ces méthodes paramétriques ne peuvent cependant être utilisées que dans les sites où il y a vieillissement des formes et du sol et là où la lithologie n'a plus d'influence sur la pédogénèse.

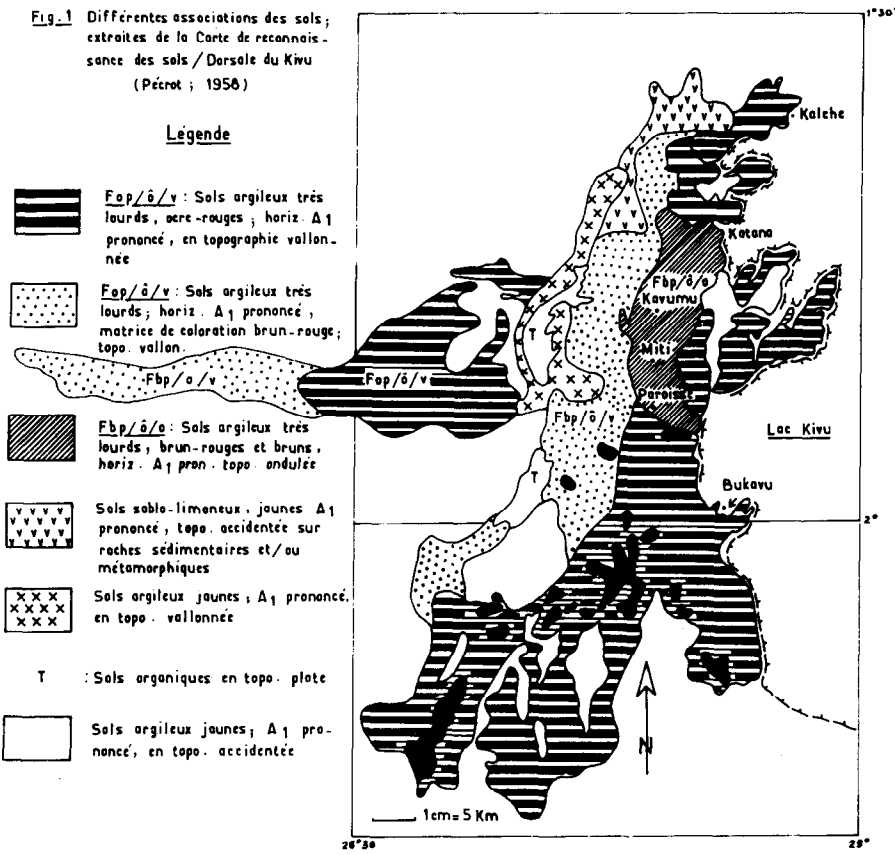


Figure 1 : *Différentes associations des sols, extraites de la carte de reconnaissance des sols de la dorsale du Kivu (Pécrot, 1958)*

INTRODUCTION ET OBJECTIF POURSUIVI

Dans le cadre des travaux d'étude sur les sols du champ volcanique de Tshibinda – Tshibati, il a été possible de mettre en évidence l'impact du climat, de l'âge des matériaux parentaux et des différentes situations topographiques sur l'évolution des sols.

Pour exploiter les données acquises sur la variabilité spatiale des unités pédologiques et dans l'objectif de leur mise en valeur agronomique, il

s'avérait indispensable de faire un choix judicieux parmi les méthodes d'évaluation agronomique disponibles. Il existe des méthodes paramétriques et des méthodes limitatives. Mais dans un premier temps, nous n'allons étudier que les méthodes paramétriques ; les méthodes limitatives feront l'objet d'un autre article.

Les méthodes paramétriques ont été élaborées et testées dans des conditions climatiques, topographiques et édaphiques différentes de celles qui prévalent dans les régions volcaniques de l'Est du Zaïre. Pour éviter un choix empirique de l'une d'entre elles, un test d'adaptabilité locale s'impose, pour voir laquelle ou lesquelles peuvent être utilisées dans le cadre du champ volcanique de Tshibinda – Tshibati.

I – CADRE DE L'ETUDE

Le champ volcanique de Tshibinda – Tshibati, dont la superficie est de l'ordre de 500 km^2, est localisé dans la dorsale du Kivu. Il est délimité à l'est par le lac Kivu et les formations du socle schisto – quartzeux et les méridiens 28° 42' Est et 28° 51' Est ; au nord par la latitude 2° 10' Sud et au sud par la latitude 2° 25' Sud. La position géographique de ce champ est donnée dans la figure 1.

1.1. Justification du choix du site

Sur une superficie de 500 km^2 à peine, on rencontre dans cette zone des problèmes de gestion du patrimoine – sol très variés. A cause de la variabilité spatiale et de la superposition de matériaux parentaux d'âges différents et de composition pétrographique différente, la couverture pédologique est d'une extrême complexité. Cette complexité de la couverture pédologique est en partie tributaire de la configuration générale du terrain, qui est une des plus tourmentées du pays.

La densité de la population et surtout la densité rurale sont parmi les plus élevées du pays.

Une étude approfondie du manteau pédologique et de toutes les autres composantes de l'écosystème s'impose avant d'asseoir une politique rationnelle de gestion du manteau pédologique.

II – MATERIELS ET METHODES

2.1. Revue de la littérature sur les méthodes paramétriques

Les différents modèles mathématiques proposés par nos prédécesseurs pour l'évaluation agronomique des terres et des sols sont les suivants :

2.1.1. L'indice de Storie, 1954

C'est une des plus anciennes méthodes paramétriques et elle est formulée de la manière suivante :

I_s = A.B.C.D. où

I_s = Productivité (exprimée en %) par rapport au sol le plus productif, enregistrée en Californie,

A = Coefficient caractérisant le développement du profil,

B = Coefficient exprimant la texture du sol (exprimé en %),

C = Pente du terrain (exprimée en %),

D = Différentes variables dépendant de la nature du terrain (exprimées en %).

2.1.2 L'indice de Champroux, 1967

CHAMPROUX a exprimé la productivité comme étant le produit des facteurs tels que la nature des argiles, la texture et la structure, le degré de saturation en base, le drainage, la profondeur du sol et l'épaisseur de l'horizon superficiel.

L'indice de CHAMPROUX est formulé de la manière suivante :

Productivité (%) = A. S. T. V. D. P. $p/10^{12}$ où

A = nature des argiles, évaluée en % (pour l'horizon B),

S = structure du sol, évaluée en % (pour l'horizon B),

T = texture du sol, évaluée en % (pour l'horizon B),

D = drainage, exprimé en % (pour l'horizon B),

P = profondeur du sol,

p = épaisseur de l'horizon superficiel.

Cet indice fut expérimenté à Mayaga – Bugeresa au Rwanda. Ces deux premiers indices ne sont présentés que

pour donner une idée de l'évolution de la science dans ce domaine, mais nous ne les avons pas utilisés, puisqu'ils présentent dès le départ une omission considérable. En effet, certains facteurs intrinsèques du sol qui se rapportent à l'horizon superficiel ne sont pas pris en compte. Cet indice ne peut, pour ainsi dire, être valable que pour l'évaluation de la productivité et des potentialités du patrimoine sol, abstraction faite de l'horizon superficiel, horizon dont les valeurs intrinsèques diminuent en cas de gestion irrationnelle ou par suite d'érosion.

Les indices qui ont été testés sur les unités pédologiques du champ volcanique "Tshibinda – Tshibati" sont les suivants :

2.1.3. Indice de R. FRANKART et B. BOTIMA, 1969

Cet indice n'est, en somme, qu'une modification profonde de l'indice précédent. Dans cette nouvelle approche, FRANKART et BOTIMA mettent l'accent sur les mêmes paramètres, mais ils tiennent compte de l'horizon superficiel.

Cet indice se présente de la manière suivante :
Productivité (%) = (A.S.T.V.D.P. + a.s.t.v.d.p.)/2.10^{10}
où :
A = nature des argiles de l'horizon B, exprimée sous forme de la C.E.C./100 g d'argile,
S = développement de la structure de l'horizon B, en %,
T = texture de l'horizon B,
V = saturation en bases de l'horizon B,
D = drainage interne de l'horizon B,
P = profondeur du sol.

Les lettres minuscules désignent les mêmes paramètres, mais se rapportant à l'horizon superficiel.

2.1.4. Indice de C. SYS et R. FRANKART, 1971

Ces auteurs ont présenté un autre indice, comparable à celui présenté par CHAMPROUX en 1967. Dans cette nouvelle approche de l'indice de CHAMPROUX, SYS et

FRANKART parlent non plus de productivité des sols mais d'indice pédo – agronomique. En tenant compte de cet indice pédo – agronomique, ils ont établi une échelle d'évaluation des sols qui permet de répartir ces derniers en classes d'aptitude.

L'indice pédo – agronomique (Cs), est formulé de la manière suivante :

Cs (%) = A.B.C.D.E.F. où

A = coefficient caractérisant le développement du profil, exprimé en %,

B = coefficient caractérisant le matériel originel, exprimé en %,

C = coefficient caractérisant la profondeur du sol, exprimé en %,

D = coefficient caractérisant la couleur et le drainage, exprimé en %,

E = coefficient caractérisant le développement de l'horizon humifère, exprimé en % (saturation en bases de l'horizon humifère),

F = coefficient ayant rapport au pH et à la saturation en bases, exprimé en % également.

Tableau 1 : *Classification des sols en classes d'aptitude : cotation suivant les valeurs des indices pédo – agronomiques – Source : C. SYS et R. FRANKART, 1971*

Classes	Symbole	Cultures exigeantes	Cultures d'exigence modérée	Cultures peu exigeantes
. Excellente aptitude	E.A.	> 90	85	75
. Très apte	T.A.	70 – 90	65 – 85	50 – 75
. Apte	A	50 – 70	45 – 65	35 – 50
. Modérément apte	M.A.	35 – 50	30 – 45	25 – 35
. Faiblement apte	F.A.	30	15	10
. Inapte	I	30	15	10

L'échelle d'évaluation des sols est présentée dans le tableau 1.

Cette échelle nous servira comme base opérationnelle pour l'évaluation et la répartition des terres en classes d'aptitude.

2.1.5. Indice de RIQUIER et al., 1970

Ces auteurs ont proposé un modèle mathématique qui fait intervenir 9 paramètres pour exprimer la productivité. Ce modèle est formulé de la façon suivante :

Productivité (%) = H.D.P.T. (N ou S) O.A.M. où

H = humidité du sol,
D = drainage,
P = profondeur effective (ou utile) du sol,
T = structure et texture de la zone d'enracinement (horizon de surface probablement),
N = saturation en bases de l'horizon de surface,
S = concentration en sels solubles,
O = pourcentage de matière organique dans l'horizon de surface,
A = capacité d'échange cationique d'argile et nature de cette dernière dans l'horizon B,
M = réserves en bases dans l'horizon B.

RIQUIER *et al.* définissent cet indice comme étant la productivité actuelle, qu'ils opposent à la potentialité. Cette dernière est considérée comme la productivité potentielle à attendre d'un sol si le ou les facteurs limitants sont éliminés par suite d'aménagements appropriés. Le rapport entre la potentialité et la productivité donne ce qu'ils ont appelé l'indice d'amélioration (Im).

Toutes ces méthodes ne sont cependant que des hypothèses de travail :

- elles sont susceptibles d'être corrigées sans cesse en fonction des exigences du milieu et de l'échelle du travail ;
- elles n'ont pas été spécialement conçues pour les sols volcaniques ni pour ceux localisés dans les sites à topographie très tourmentée.

L'objet de ce travail est de dégager celles qui peuvent s'adapter dans les conditions édaphiques du champ volcanique de Tshibinda – Tshibati.

RIQUIER *et al.* ont également présenté une échelle d'évaluation des sols, fondée sur la productivité et la potentialité de ces derniers. Cette échelle est illustrée dans le tableau ci – dessous.

Tableau 2 : *Echelle d'évaluation des différentes classes de productivité et de potentialité – J. RIQUIER et al., 1970*

Classes	Valeurs (%)	Productivité	Potentialité
Excellente	65 – 100	1	I
Bonne	35 – 64	2	II
Moyenne	20 – 34	3	III
Pauvre	8 – 19	4	IV
Très pauvre	0 – 7	5	V

Tableau 3 : *Autres méthodes paramétriques (échelle d'évaluation)*

Classes	Valeurs (%)	Productivité	Potentialité
Excellente	90	A	A
Très bonne	65 – 90	B	B
Bonne	50 – 65	C	C
Moyenne	35 – 50	D	D
Faible	20 – 35	E	E
Très faible	10 – 20	F	F
Nulle	0 – 10	–	–

2.2. Modification de certaines méthodes paramétriques

2.2.1. Méthode FRANKART et BOTIMA modifiée

Pour ce modèle mathématique, les modifications sont à apporter au niveau du développement de la structure du sol (horizon superficiel et diagnostique de profondeur).

Développement de structure	Cotations
1) Structure grumeleuse très bien développée ; dimension : fine à très grossière ; friable à meuble ; enracinement dense à très dense ; feutrage de racines et radicelles ; compacité (kg/cm^2) = 0,5 à 1,5.	100
2) Structure grumeleuse, moyennement développée, à tendance polyédrique subangulaire moyennement développée ; enracinement moyen à dense ; friable ; compacité(kg/cm^2) = 1,5 à 2.	95
3) Structure polyédrique subangulaire, moyennement développée ; présence de cutanes d'argile recouvrant les faces des unités structurales (25 %) ; ferme en place ; enracinement moyen ; compacité (kg/cm^2) = 2,5 à 3.	90
4) Structure polyédrique subangulaire bien développée ; présence de cutanes d'argile recouvrant 25 à 50 % des faces des unités structurales ; ferme à très ferme en place ; enracinement faible ; compacité (kg/cm^2) : 3 à 3,5.	85

5) Structure polyédrique subangulaire très bien développée ; présence de cutanes d'argile recouvrant 75 à 100 % des unités structurales ; très ferme en place ; enracinement faible à nulle ; compacité (kg/cm^2) de l'ordre de 3,5 à 4.	80
6) Structure polyédrique subangulaire à angulaire ; cutanes d'argile épaisses et continues, recouvrant la totalité des faces des unités structurales ; compacité (kg/cm^2) : 4,5.	75

L'évaluation du développement de la structure, telle qu'elle a été proposée par FRANKART et BOTIMA, ne peut être appliquée aux sols d'origine volcanique, puisqu'ils présentent un développement de structure totalement différent de ce qui existe dans la zone écologique où ce modèle a été expérimenté.

Dans sa forme initiale, ce modèle tient compte de l'horizon superficiel, mais n'en donne pas les différentes variantes ni les cotations correspondantes. C'est ce qui nous a obligés à introduire quelques modifications.

2.2.2. Méthode SYS et FRANKART modifiée

La méthode proposée par SYS et FRANKART a nécessité certaines modifications.

Si l'on se base sur le facteur A (= développement de la structure de l'horizon B diagnostique) par exemple, on peut constater que ce modèle n'est utilisable que pour les sols de l'ordre des Oxisols (USDA, Soil Taxonomy, 1975).

Quant au facteur B (= teneur en argile du matériau parental), il n'est valable que pour les sols dont la teneur en argile est inférieur à 40 %. Pour les valeurs supérieures à 40 %, il faut d'autres critères d'évaluation.

Des modifications doivent également intervenir au niveau du facteur E (= saturation en bases), pour des valeurs supérieures à 35.

Les modifications proposées pour les variables précitées sont :

- Type de structure (= facteur A du modèle SYS et FRANKART, 1971)
  Ici également nous proposons les modifications présentées au point 2.2.1. Mais pour introduire dans ce modèle les valeurs numériques des différentes classes texturales, il faudra les multiplier par le coefficient 10^{-2}.

Tableau 4 : *Classes texturales et cotations correspondantes*

Teneur en argile (%)	Cotations	
	Modèle FRANKART & BOTIMA	Modèle SYS & FRANKART modifié
60	100	1
50	90	0,9
40	80	0,8
30	70	0,7
20	60	0,6
10	50	0,5
0	40	0,4
60	100	1
70	90	0,9
80	80	0,8
90	70	0,7
100	60	

- Classes texturales (= facteur B du modèle SYS et FRANKART, 1971)
  Les classes texturales les plus intéressantes et pouvant s'adapter à divers matériaux parentaux sont également celles proposées par FRANKART et BOTIMA dans leur modèle.

Ici également, pour introduire les cotations des différentes classes texturales dans le modèle SYS et FRANKART, il faut les multiplier par le coefficient 10^{-2}.

- Classes des valeurs E (= saturation en bases)
  Ici également, des modifications s'imposent. Dans le modèle initial de SYS et FRANKART, deux classes seulement ont été proposées. Pour les valeurs de saturation inférieures à 15 % et supérieures à 35 %, aucun indice de cotation n'a été prévu. D'où, en lieu et place de ces deux classes, nous suggérons d'avoir recours également aux classes proposées par FRANKART et BOTIMA dans leur modèle, puisqu'il est plus complet sur ce point précis (voir tableau 5).

Tableau 5 : *Classes des valeurs de la saturation en bases*

Cotations			
Modèle SYS et FRANKART Valeurs initiales		Modèle SYS et FRANKART Nouvelle version	
V %	Cotations	V %	Cotations
⩽ 15	0,6	⩽ 10	0,10
15 – 35	0,75	10 – 30	0,50
		30 – 50	0,80
		50 – 90	1

2.3. Méthode d'analyse de la couverture pédologique

La variabilité spatiale des différentes unités paysagiques du champ volcanique "Tshibinda – Tshibati" a été mise en évidence en adoptant la technique d'analyse de la couverture pédologique par approche paysagique (ESCHENBRENNER et BADARELLO, 1978).

Plusieurs unités paysagiques ont ainsi été identifiées (planèzes de haute et basse altitude, versant ouest et la zone d'apport alluvio – colluvial). Les matériaux parentaux de ces unités

paysagiques ont été mis en place, à des dates géologiques différentes et, de surcroît, la composition pétrographique de ces matériaux (coulées de laves) varie énormément. Les unités pédologiques prédominantes se retrouvent au stade intermédiaire d'altération. Dans l'échelle d'évolution des sols, elles appartiennent à l'ordre des inceptisols, mais elles possèdent une matrice aux caractères oxiques très prononcés.

III - RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le tableau 6 nous montre que rares sont les cas où une même unité pédologique est placée dans la même classe d'aptitude des sols, en utilisant plusieurs méthodes paramétriques.

Ceci résulte de la variabilité intrinsèque de ces formules, du fait qu'elles ne font pas toujours appel aux mêmes variables indépendantes et que de surcroît, les critères d'évaluation de ces variables ne sont pas les mêmes.

Les différentes méthodes d'évaluation agronomique des unités pédologiques ont été élaborées dans des milieux écologiques totalement différents les uns des autres.

Le tableau 7 nous montre que les valeurs I_E (= productivité en %, obtenue par le modèle RIQUIER *et al.*, 1970) sont trop faibles si l'on se base sur le fait que la productivité en % est évaluée en fonction de la productivité du sol le plus productif, dans un milieu donné. Ces faibles valeurs résultent assurément de l'inadaptation de cette formule dans le cas qui nous concerne puisque, dès le départ, beaucoup de données manquent. Ceci ne veut absolument pas dire que les valeurs I_E sont toujours inférieures aux valeurs I_B et I_Y.

Dans les discussions qui vont suivre, à cause de cette inadéquation de la méthode RIQUIER *et al.*, nous nous pencherons sur les approches FRANKART - BOTIMA et SYS - FRANKART, puisque les valeurs des indices I_B et I_Y obtenues se rapprochent un peu plus de la réalité.

Le fait important à signaler, à la lumière des résultats obtenus, est que là où la lithologie n'a plus d'influence sur la pédogénèse, où le modelé se caractérise par un vieillissement des formes et du sol, les

Tableau 6 – *Répartition des sols en classes d'aptitude*

Unité paysagique	Cultures exigeantes			Cultures moyennement exigeantes			Cultures peu exigeantes		
	I_E	I_B	I_Y	I_E	I_B	I_Y	I_E	I_B	I_Y
Planèzes de haute altitude									
P. 33	P.	I	MA	P.	FA	MA	P.	MA	A
P. 6	P.	I	FA	A.	FA	MA	A.	MA	MA
Planèzes de basse altitude									
P. 9	P.	I	FA	P.	FA	MA	P.	MA	MA
P. 40	M.	MA	MA	M.	MA	A	M.	A	A
P. 39	P.	A	MA	P.	A	MA	P.	TA	A
P. 28	M.	I	MA	M.	FA	A	M.	FA	A
Versant Ouest									
. Surfaces planes non chaotiques									
P. 15	P.	MA	A	P.	MA	A	P.	A	TA
P. 21	P.	A	MA	P.	TA	A	P.	TA	A
. Surfaces planes chaotiques									
P. 26	P.	I	MA	P.	FA	MA	P.	FA	A
Zones d'apport alluvio – colluvial									
P. 7	EP.	A	MA	EP	A	MA	EP.	TA	TA
P. 41	P.	MA	MA	P.	MA	A	P.	A	A

Tableau 7 – *Répartition des sols en classes d'aptitude suivant les valeurs des indices pédo – agronomiques*

Unité paysagique (Profil : en chiffre)	Age géologique	Influence de la lithologie sur la morphologie et la pédogénèse	Classification (USDA Soil Taxonomy, 1975)	Valeurs d'indices pédoagronomiques I_E[2]	I_B	I_Y
Planèzes de haute altitude						
P.[2]33	40 à 90 M.A.	Absente	Ustoxic Dystropep	12	20.48	35.44
P. 6	Remarquable	Lithic vertic Eutropept		17	22.80	31.00
Planèzes de basse altitude						
P. 9	6 à 8 M.A.	Absente	Ustoxic Humitropept	13	23.37	34.00
P. 40	"	"	Vertic Eutropept	21	41.54	47.25
P. 39	"	Remarquable	Ustoxic Eutropept	13	60.84	37.20
P. 28	Précambrien	Absente	Typic Dystropept et/ou Typic Tropustults	22	24.94	47.25
Versant Ouest						
. surfaces planes non chaotiques						
P. 15	6 à 8 M.A.	Absente	Ustoxic Dystropept	13	40.04	57.38
P. 21	2 millions d'années pleistocène	Remarquable	Ustoxic Eutropept	19	65.25	47.25
. Surfaces planes chaotiques						
P. 26	pleistocène (2 millions d'années)	Influence très marquée de la lithologie sur la pédogénèse	Vertic Oxic Eutropept	15	22	38
Zones d'apport alluvio – colluvial						
P. 7	Mio – pliocène (6 à 8 millions d'années)	Influence très marquée de la lithologie sur la pédogénèse	Fluventic Oxic Dystropept	8	53.69	42.53
P. 41	"	Influence faible	Fluventic Oxic Eutropept	12	41.54	47.25

Légende : I_E = indice de productivité (%) d'après RIQUIER *et al.*, 1970
I_B = indice de productivité (%) d'après FRANKART ET BOTIMA, 1969
I_Y = indice de productivité (%) d'après SYS et FRANKART, 1971
P. = profils

valeurs I_Y sont supérieures aux valeurs I_B. Tandis que sur des plages où la lithologie a une influence sur la pédogénèse, les valeurs I_Y sont inférieures aux valeurs I_B.

Le tableau 8 nous donne la comparaison entre les valeurs originelles $I_B^{(1)}$ et $I_Y^{(1)}$ et les valeurs estimées après réajustement de certains paramètres intervenant dans ces formules. Ce tableau nous montre que les valeurs I_B' sont supérieures aux valeurs I_B et I_Y' supérieures à I_Y. Pour apprécier cette augmentation des indices pédo-agronomiques par réajustement des paramètres, il faut avoir recours aux deux dernières colonnes du tableau, qui donnent leurs différences en valeur absolue.

La fourchette de variation est de 5 à 16 pour les valeurs calculées de l'indice FRANKART - BOTIMA et de 7 à 75 pour celles de SYS - FRANKART.

Tableau 8 - *Comparaison entre les valeurs originaux I_B et I_Y et les valeurs estimées I_B' et I_Y' après réajustement de certains paramètres*

Unités paysagiques	Indices pédo-agronomiques				Différences en valeur absolue	
	I_B	I_B'	I_Y	I_Y'	(B'-B)	(Y'-Y)
Planèzes de haute altitude						
P. 33	20.48	24.71	35.44	51.64	4.23	16.20
P. 6	22.88	29.97	31.00	49.88	7.09	18.88
Planèzes de basse altitude						
P. 9	23.37	32.50	34.00	68.00	9.13	34.00
P. 40	41.54	53.48	47.25	56.95	11.94	9.70
P. 39	60.84	72.14	37.80	45.90	11.30	8.10
P. 28	24.94	33.00	47.25	60.96	8.06	13.71
Versant ouest						
. surfaces planes non chaotiques						
P. 15	40.04	51.73	57.38	64.55	11.69	7.17
P. 21	65.25	73.80	47.25	54.19	8.55	6.94
. surfaces planes chaotiques						
P. 26	45.59	58.13	42.53	54.84	12.54	12.31
Zones d'apport alluvio-colluvial						
P. 7	53.69	69.48	42.53	45.36	15.79	2.83
P. 41	41.54	53.48	47.25	53.79	11.94	6.54

CONCLUSION

Partant de là, on peut suggérer l'estimation de la productivité des unités pédologiques en ayant recours aux indices I_B' et I_Y'.

L'indice I_Y' doit être utilisé dans des unités géomorphologiques où il y a manifestement un vieillissement des formes et du sol, tandis que l'indice I_B' est plus approprié dans des unités géomorphologiques où la lithologie a une influence manifeste sur la pédogénèse.

Il faut également signaler que ces indices ne sont valables que là où la pente n'est pas une contrainte pour la mise en valeur agricole des sites.

A partir du moment où la pente intervient, il faudrait faire appel à d'autres méthodes d'évaluation, en l'occurrence les méthodes limitatives.

I_B = indice pédo – agronomique originel (voir procédé FRANKART et BOTIMA)
I_B' = I_B modifié
I_Y = indice pédo – agronomique originel (voir procédé SYS et FRANKART)
I_Y' = I_y modifié

BIBLIOGRAPHIE

CHAMPROUX (J.P.), 1967 – Productivité et potentialité des sols préliminaires à l'aménagement. Application aux régions naturelles de Mayaga – Bugeresa, Rwanda. Mémoire U.C.L., 60 p.

ESCHENBRENNER (V.) & BADARELLO (L.), 1978 – Etude pédologique de la région d'Odienné, Côte d'Ivoire. Carte des paysages morpho – pédologiques ; feuille d'Odienné (1/200.000) ; Not. expl. n° 74, ORSTOM (Paris), 123 p., 8 cartes.

FRANKART (R.) & BOTIMA (B.), 1969 – Contribution à l'aménagement agricole de la Région de Bugeresa ; Mémoire U.C.L. ; 52 p.

RIQUIER (J.), BRAMA (D.L.) & CORNET (J.), 1970 – A new system of soil appraisal in terms of actual potential productivity (Irst approx.). FAO, Soil resources and development and conser – vation service. Land and Water development. Division approaches to land classification, Soil Bull., n° 22, FAO, Rome, 120 p.

STORIE (R.E.), 1954. Land classification as used in California, Ve Congr. Inter. Sci. du sol, Léopoldville, vol III, p. 407 – 412.

SYS (C.) & FRANKART (R.), 1971 – Evaluation des sols dans les Tropiques humides. *Sols Africains*, Vol XVI, p. 177 – 199.

Soil Taxonomy, 1975 – A basic system of soil classification for making and interpreting. Soil Surveys. Soil conservation service, USDA, Agricultural Handbook n° 436.

GENESE, CARACTERISTIQUES ET CONTRAINTES D'AMENAGEMENT DES SOLS ACIDES A HORIZON SOMBRE DE PROFONDEUR DE LA REGION DE HAUTE ALTITUDE DU RWANDA

B. MUTWEWINGABO
Université Nationale – BP 117 – Butaré – RWANDA

RESUME

Les sols à horizon sombre de profondeur occupent d'importantes superficies en Afrique Centrale et particulièrement dans la région de haute altitude du Rwanda située entre 1800 et 2800 m d'altitude. Ces sols, très fortement à extrêmement acides et pourvus de teneurs élevées d'aluminium soluble, posent non seulement de sérieux problèmes de fertilité, mais constituent aussi un défi du point de vue taxonomique étant donné l'existence de controverses quant à la genèse de ces horizons sombres.

Une étude de caractérisation macro et microscopique de ces sols a mis en évidence plusieurs traits pédologiques dont la majorité sont superposés et entrecroisés, de sorte qu'il a été quasi impossible de classer ces traits par ordre chronologique. Elle a révélé un remaniement intense des sols par les processus de bio et de pédoturbation, érosion comprise, et plusieurs phases de développement des sols (sols polyphasés). Dans ces sols plusieurs phénomènes, notamment la présence de charbon de bois et de discontinuités latérales dans tous les horizons, plaident en faveur d'anciens horizons A de surface enfouis, qui ont été réorganisés dans la plupart des cas par des processus pédologiques et qui ont acquis les caractéristiques d'horizons B illuviaux. Par ailleurs, certains sols ont montré des cutanes d'illuviation complexes où des microlits de matière organique alternent avec des argilanes d'illuviation, ce qui complique la compréhension de la genèse de l'horizon sombre de profondeur. Plusieurs interprétations de la genèse de ces horizons sombres étant possibles, pour pouvoir classer ces sols dans les diverses taxonomies, nous proposons de modifier la définition de l'horizon sombre en supprimant l'adjectif "illuvial" qui traduit l'aspect génétique de ces sols. En outre, les études sur la mise en valeur de ces sols montrent la nécessité d'une

application combinée de chaux, de matière organique (fumier de ferme, compost, engrais vert) et d'engrais minéral N – P – K et Mg.

INTRODUCTION

Les sols à horizon sombre de profondeur occupent une étendue relativement importante en Afrique Centrale. D'après la carte géographique des sols dressée par l'Institut National pour l'Etude Agronomique au Congo (INEAC) en 1954, ils se rencontrent principalement dans les hauts plateaux du nord – est du Zaïre et dans les régions montagneuses voisines, à l'ouest de la vallée du rift, anciennement nommé Albert Tanganyika, et à l'est de ce rift dans les régions de haute altitude et de moyenne altitude du Rwanda et du Burundi, de même qu'au sud – ouest de l'Uganda (fig. 1).

Au Rwanda, ces sols occupent une superficie importante dans les régions de haute et de moyenne altitude situées au – dessus de 1 500 m (KELLOG et DAVOL, 1949 ; VAN WAMBEKE, 1963 ; NEEL, 1968 ; FRANKART, 1981). Dans la région de haute altitude comprise entre 1 800 et 2 800 m d'altitude, ils sont probablement les plus abondants des sols acides de cette région.

Ces sols, caractérisés par un horizon sombre de profondeur, sont généralement très acides, désaturés en bases et pourvus de grandes quantités d'aluminium soluble. Ils sont connus non seulement par les sérieux problèmes de fertilité qu'ils posent, mais également par le défi qu'ils présentent au point de vue taxonomique, face aux controverses quant à la genèse de leur horizon foncé de profondeur.

Pour certains, et particulièrement les pédologues de l'INEAC qui ont surtout travaillé au Zaïre (RUHE, 1956 ; SYS *et al.*, 1961), l'horizon sombre de profondeur est un horizon B formé par l'accumulation de matière organique illuviée sous l'influence prépondérante du climat. Il se serait formé par un processus identique à celui de l'horizon spodique rencontré dans les régions de climat tempéré. Ces sols à horizon sombre ayant généralement les caractéristiques d'un kaolisol, certains auteurs (RUHE, 1956) envisagent la possibilité d'un sol polygénique qui aurait évolué sous l'influence des différents régimes climatiques qui se sont succédés en Afrique Centrale. Des périodes climatiques froides et humides auraient créé un environnement favorable à la podzolisation au cours du Pléistocène, puis

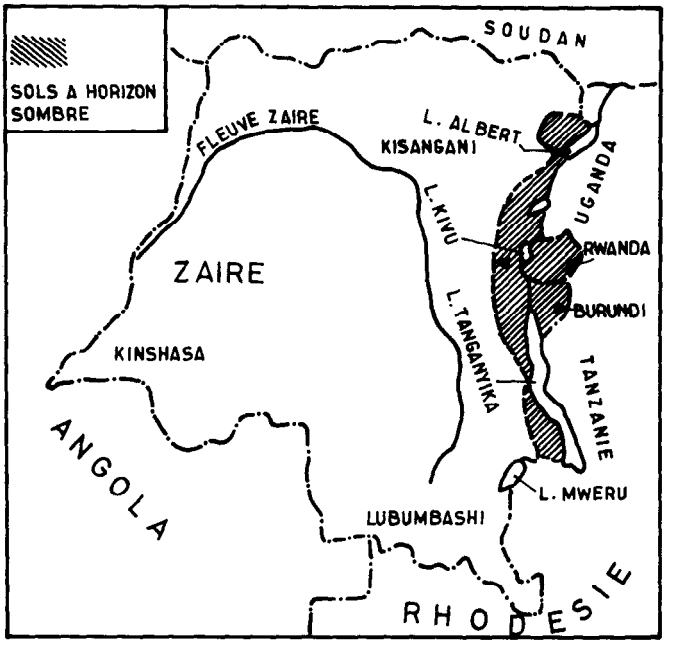


Figure 1 : *Esquisse de la carte de distribution des kaolisols à horizon sombre au Zaïre, au Rwanda et au Burundi (d'après INEAC, 1954)*

l'évolution serait devenue favorable au développement d'un kaolisol. Toutefois, sur la base de la situation de ces sols dans des zones climatiques spécifiques (climat de pluviosité élevée et d'altitude généralement supérieure à 1 500 m), ces auteurs (LEBRUN, 1955 ; RUHE, 1956) pensent que l'horizon sombre peut être le résultat des processus pédologiques actuels, comme il peut être le vestige d'un climat ancien (horizon relique), ou encore le résultat des effets combinés des différents climats anciens et du climat actuel. Pour d'autres, et plus particulièrement les pédologues qui ont surtout oeuvré au Rwanda (KELLOG et DAVOL, 1949 ; NEEL *et al.*, 1982), l'horizon sombre serait un ancien horizon A de surface enfoui, qui aurait acquis les caractéristiques d'un horizon B illuvial.

Le concept d'un horizon sombre formé par l'illuviation de la matière organique ayant été adopté par les auteurs de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975) et de l'INEAC (SYS *et al.*, 1961), et face aux controverses relatives à la genèse, il se pose alors un problème de classification de ces sols. En outre, comme ces sols chimiquement pauvres mais potentiellement intéressants au point de vue agricole sont peu exploités et

occupent d'importantes superficies dans la région de haute altitude densément peuplée, ils doivent faire l'objet d'une étude approfondie pour prouver des techniques appropriées à leur aménagement (MUTWEWINGABO, 1984).

Les objectifs de cet exposé sont :
- d'étudier les propriétés morphologiques et physico – chimiques de trois toposéquences de sols à horizon sombre de profondeur représentatives de la région de haute altitude du Rwanda où ils sont abondants ;
- de tenter, à l'aide des propriétés trouvées, de préciser laquelle des deux hypothèses relatives à la genèse de ces sols est la plus plausible et s'applique le mieux à ces sols ;
- de proposer une démarche à suivre pour arriver à classer facilement ces sols ;
- de discuter les types d'aménagement possibles, à l'aide des propriétés trouvées et des données d'autres travaux de fertilité et de cartographie réalisés dans la région.

I – MATERIEL ET METHODES

1.1. Approche scientifique

Nous avons adopté une démarche toposéquentielle (fig. 2) pour pouvoir comparer les variations morphologiques et physico – chimiques qui se produisent aussi bien à l'intérieur des profils isolés qu'au long de la pente. Trois toposéquences de sols représentatives de la région de haute altitude (1 800 m à 2 800 m) ont été choisies et analysées. Deux autres profils isolés ont été pris dans la région de Butare, à une altitude supérieure à 1 700 m, pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus dans la région de haute altitude.

1.2. Situation de sols

Les trois toposéquences de sols ont été choisies dans la région de Gikongoro, comprise entre 29°33' et 29°35' de longitude Est et entre 2°34' et 2°38' de latitude Sud. Les deux profils de sols ont été échantillonnés dans la région de Butare, comprise entre 29° 36' et 29° 38' de longitude Est et entre 2°30' et 2° 34' de latitude Sud.

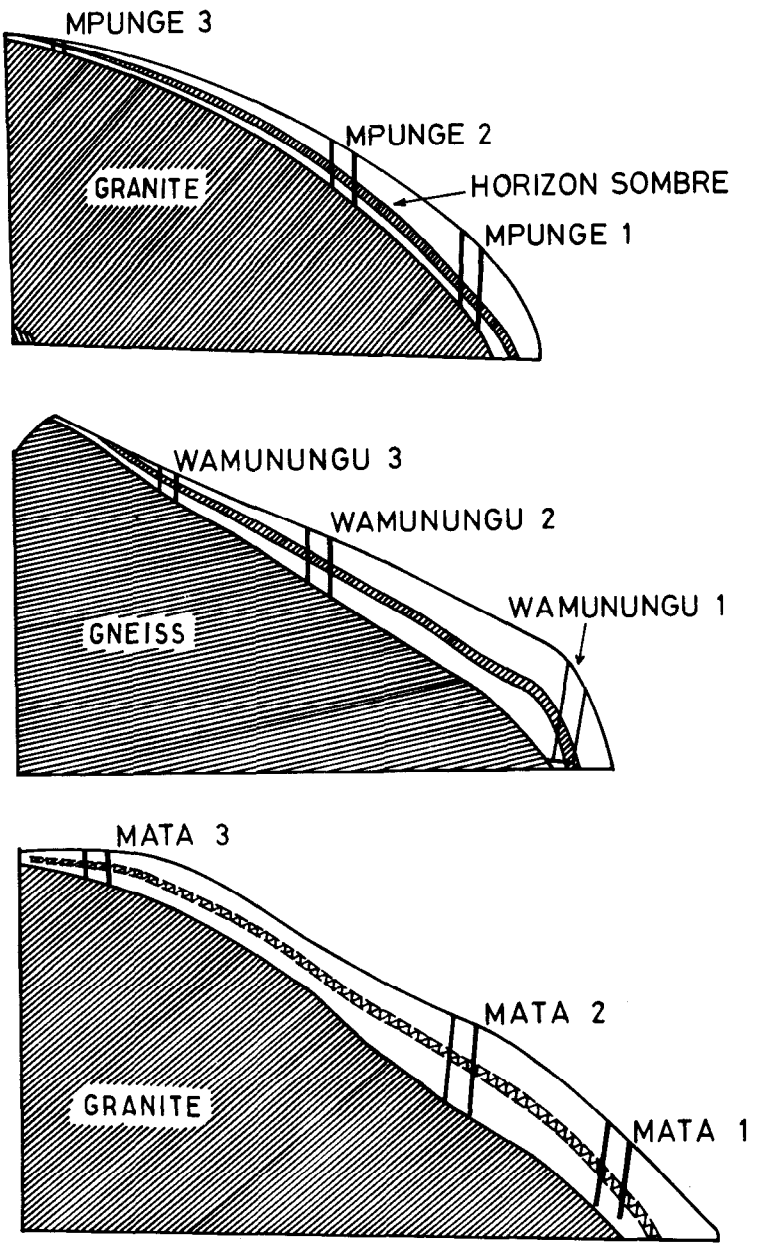


Figure 2 : *Situation des profils dans les toposéquences Mpunge, Wamunungu et Mata*

La région de Gikongoro jouit d'un climat caractérisé par une saison sèche de 2 à 3 mois (juin, juillet et août), une température moyenne de l'ordre de 18° C et une pluviosité moyenne annuelle de l'ordre de 1 400 mm. Les régimes d'humidité et de température du sol, estimés à partir des données climatiques disponibles de la station la plus proche (station de Mata) sont respectivement udique et isothermique. En milieu tropical, le régime udique signifie que le profil ne se dessèche pas pendant 60 jours consécutifs ou 90 jours cumulatifs à une profondeur de 18 à 50 cm, tandis que le régime de température isothermique signifie que la température moyenne du sol à une profondeur de 50 cm est égale ou supérieure à 15° C, mais inférieure à 22° C, et que la différence de température entre les mois les plus froids et les mois les plus chauds est inférieure ou égale à 5° C.

1.3. Caractéristiques géomorphologiques et bioclimatiques

La région de haute altitude fait partie du vieux socle africain, qui a été probablement remodelé par le système des cassures de l'Afrique de l'Est. Les différentes roches, d'âge précambien, sont très souvent associées et il en résulte une bonne relation entre la dureté des roches dominantes et les formes du relief. Les crêtes vives sont essentiellement formées de grès quartzeux, tandis que les croupes sommitales linéaires ou effilées reposent sur des roches dures diverses qui souvent affleurent en sommet de versant quand la pente devient forte.

La région échantillonnée comprend trois types de collines : les collines à sommets arrondis en forme de dômes, les collines à longues et fortes pentes et à sommets aigus et les collines à croupes arrondies surmontées de petits sommets en pain de sucre. Ces collines, séparées par des vallons de dimensions variables, correspondent à une succession de roches dures (gneiss, granites, quartzites ...) et de roches tendres. Le soubassement de la région est en effet à dominance de granite et gneiss, mais on y observe parfois l'influence d'autres types de roches, telles que des schistes, des micaschistes et des quartzites.

La végétation naturelle est une prairie dominée par l'*Eragrostis*. Les sols cultivés sont généralement ceux des sommets de collines et du haut des versants.

La région de Butare jouit d'un climat caractérisé par une saison sèche de 2 à 3 mois (juin à août), une moyenne de température annuelle de 19° C, une pluviosité totale moyenne de 1 200 mm et une température moyenne annuelle du sol de 21° C. Les régimes d'humidité et de température sont également udique et isothermique.

1.4. Description et analyse physique des sols

La description des sols a été faite en utilisant la terminologie de la Soil Taxonomy (SCS, 1975). L'analyse granulométrique a été réalisée à l'aide de la méthode modifiée de Bouyoucos sur des échantillons de sols séchés à l'air, broyés sans affecter les particules primaires et passés au tamis 2 mm, et après destruction de la matière organique par le peroxyde d'hydrogène et dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium d'une suspension légèrement acidifiée à l'acide chlorhydrique dilué pour rompre les liens sesquioxydiques. La masse volumique apparente sèche a été déterminée. Les indices d'homogénéité du sol, basés sur les fractions granulométriques exemptes d'argile ont été calculés. De même, les indices d'altération, basés sur le rapport limon fin (2 – 20 micromètres) sur argile (< 2 micromètres) ont été calculés.

1.5. Analyses chimiques et physico – chimiques

Les analyses chimiques ont porté sur les mesures de pH (à l'eau et au KCl), les dosages du carbone organique, de l'azote, des bases échangeables, de l'aluminium extractible au KCl et de la capacité d'échange cationique à l'acétate d'ammonium à pH 7,0. Pour divers types de sesquioxydes de fer et d'aluminium libres, les dosages du fer et de l'aluminium ont été effectués sur les extractions au citrate – dithionite – bicarbonate, au pyrophosphate de sodium 0,1 M et à l'oxalate acide d'ammonium à pH 3. Divers indices, tels que le degré de saturation en bases et en aluminium ont été calculés.

La détermination des caractéristiques de la charge des sols a été faite par la méthode de titration potentiométrique acide – base sur des suspensions de sols de concentrations variables en chlorure de sodium. Les données sur l'adsorption du phosphore

ont été obtenues par la méthode des isothermes d'adsorption du phosphore.

1.6. Analyse micromorphologique

Une analyse micromorphologique détaillée a été faite. Les données recherchées concernaient l'identification et l'organisation des constituants du fond matriciel, les assemblages plasmiques, les traits pédologiques orthiques et hérités ainsi que ceux d'origine biologique. Ces données ont été reliées à celles obtenues à l'échelle macroscopique et aux résultats des analyses physico-chimiques. Les terminologies utilisées sont celles de BREWER (1964), de BREWER et PAWLUK (1975), d'ESWARAN et BANOS (1976) et de FEDOROFF et BULLOCK (1978).

II - RESULTATS

2.1. Traits macromorphologiques

Tous les sols ont un horizon sombre de profondeur de morphologie variable. La structure de cet horizon est tantôt granuleuse, tantôt polyédrique angulaire ou subangulaire, avec ou sans revêtements argileux ; elle présente divers degrés de développement. Sa couleur est tantôt homogène, tantôt hétérogène ; elle correspond parfois à celle de l'horizon A de surface ou elle est plus foncée. Les limites de cet horizon sont presque toujours ondulées et interrompues, de sorte que les discontinuités latérales sont fréquentes. Cet horizon contient presque toujours des morceaux de charbon de bois de taille variée. Il renferme fréquemment des agrégats de matériel rougeâtre présentant beaucoup de similitudes avec le matériel des horizons plus profonds et plus particulièrement de l'horizon C.

Du haut en bas d'une colline, les sols deviennent profonds et l'horizon sombre s'enfonce davantage. Les sols des sommets et des versants intensivement cultivés ont un horizon sombre qui, le plus souvent, satisfait aux exigences morphologiques d'un horizon argilique, avec des revêtements argileux bien développés. Par

contre, les sols des sommets et des hauts versants qui sont restés sous prairies ne présentent pas ces caractères.

Dans l'ensemble, on observe une activité biologique intense qui s'étend sur une profondeur considérable, dépassant parfois 150 cm. Cette activité biologique est révélée par de nombreuses galeries d'origine végétale (racines) et animale, comblées par des microagrégats biologiques noirs à brun foncé à assemblage lâche.

2.2. Propriétés physiques

Tous les sols étudiés, excepté le sol Karubanda dérivé d'une roche schisteuse, proviennent de roches-mères essentiellement acides (granito-gneiss ou micaschistes). La teneur en argile est généralement élevée (30 à 70 %). Les tests d'homogénéité des matériaux des sols ont révélé des discontinuités texturales dans tous les profils, par une variation irrégulière des valeurs des indices observée dans chacun des profils. D'après VAN WAMBEKE (1962), un rapport limon fin/argile inférieur à 0,15 sur roche ignée ou métamorphique reflète une altération ferrallitique très poussée, tandis que les valeurs de ce rapport supérieures à 0,15 pour les sols dérivés de ces mêmes roches laissent envisager des quantités appréciables de minéraux altérables. D'après les valeurs calculées de cet indice, la majorité des sols étudiés ont une altération ferrallitique intense, et ceux situés en position intermédiaire des versants sont généralement les plus altérés. Certains sols des sommets et des piémonts ont tendance à contenir des limons en quantité relativement élevée, entraînant ainsi les valeurs du rapport limon fin/argile supérieures à 0,15.

2.3. Propriétés chimiques

Les sols étudiés, à l'exception du sol Karubanda dont le pH à l'eau varie de 5,20 à 5,50, sont très fortement acides. Les valeurs du pH à l'eau varient de 4,30 à 4,90, et celles du pH au KCl 1 N varient de 3,60 à 4,80. L'abaissement par le chlorure de potassium des valeurs du pH de ces sols donne ces valeurs de Δ pH négatives variant d'une demi-unité à plus d'une unité ($-0,5$ à $-1,2$). Ces valeurs Δ pH négatives sont attribuables à la matière organique. Les valeurs de pH mesurées dans une solution normale de fluorure de sodium (rapport sol/solution de

1/50) après un contact de 2 minutes varient de 7,0 à 10,0 et, dans tous les cas, les valeurs de pH mesurées dans ce même électrolyte après un contact de 60 minutes excèdent celles obtenues après deux minutes. La majorité des horizons sombres donnent des valeurs de pH au NaF supérieures à 9,40, valeur qui suggère la présence d'un matériau allophanique ou de composition semblable, ce qui a certainement un impact sur la rétrogradation de certains éléments apportés au sol, notamment le phosphore.

Tous ces sols de haute altitude sont très riches en matière organique. La teneur en matière organique varie de 2 à 5 % dans les 30 premiers centimètres des sols et la pénétration de la matière organique est tellement profonde que le taux se maintient au dessus de 1 % jusqu'à une profondeur de 1 mètre, ce qui représente plus de 10 kg de carbone organique par mètre cube dans le premier mètre. Cette pénétration profonde de la matière organique résulte en partie d'une activité biologique intense.

Les valeurs du rapport C/N sont généralement inférieures à 10, avec une teneur en azote qui varie de 0,10 à 0,40 %. Les très faibles valeurs de ce rapport sont liées au degré de décomposition élevé de la matière organique, et elles suggèrent qu'au cours des processus d'humification il y a production et accumulation de substances azotées.

Les teneurs en bases échangeables sont extrêmement faibles : elles sont généralement inférieures à 1 mé/100 g de sol. Par contre, dans les sols intensivement cultivés (sols anthropisés), et plus particulièrement sous bananeraie, il y a une saturation du complexe adsorbant, suite à une fumure régulière, de sorte que les bases échangeables et la capacité d'échange cationique augmentent de façon considérable, en même temps que le pH du sol. Les faibles teneurs en bases échangeables des sols sous *Eragrostis* reflètent une altération intense de ces sols et un lessivage poussé des bases sous l'effet des fortes précipitations. La très forte acidité de ces sols induit une teneur élevée en aluminium échangeable, qui atteint le plus souvent 3 à 4 mé/100 g de sol. Le degré de saturation en cet élément excède souvent 80 %. Ces sols accusent en outre des déficiences en certains éléments comme le phosphore.

Les valeurs de la capacité d'échange cationique (déterminée par l'acétate d'ammonium à pH 7) sont de loin plus élevées que celles déterminées par une solution normale de chlorure d'ammonium non tamponnée, mais elles dépassent rarement 35 mé/100 g d'argile. Les valeurs de la capacité d'échange cationique effective, considérée comme étant la somme des bases échangeables et de l'aluminium extractible par une solution normale de KCl, dépassent rarement 10 mé/100 g d'argile.

2.4. Formes du fer et de l'aluminium

Nous avons également étudié les formes du fer et de l'aluminium présentes dans ces sols. Pour cette étude, nous avons utilisé trois réactifs, considérés comme sélectifs dans l'extraction des divers composés de fer et d'aluminium dans les sols. Ces réactifs sont le dithionite – citrate bicarbonate (DCB), l'oxalate acide d'ammonium à pH 3,0 et le pyrophosphate de sodium 0,1 M à pH 10.

Théoriquement, le réactif DCB est supposé extraire toutes les formes de fer (hématite, goethite) et d'aluminium cristallines et les formes amorphes inorganiques et organiques de ces deux éléments, tandis que l'oxalate acide d'ammonium à pH 3 est supposé ne dissoudre que les produits amorphes de fer et d'aluminium inorganiques et organiques (Mc KEAGUE et DAY, 1966 ; BLUME et SCHWERTMANN, 1969) ; Le pyrophosphate de sodium est supposé n'extraire que le fer et l'aluminium liés à la matière organique.

Ainsi, théoriquement le réactif DCB devrait extraire plus de fer et d'aluminium que l'oxalate acide d'ammonium, de même que celui – ci devrait extraire plus de ces deux éléments que le pyrophosphate de sodium. Ainsi, la différence entre la quantité de fer et d'aluminium extraite par le DCB et celle extraite par l'oxalate acide d'ammonium devrait fournir une estimation de la quantité de fer ou d'aluminium existant sous des formes cristallines, tandis que la différence entre la quantité de fer plus d'aluminium extraite par l'oxalate acide d'ammonium et le pyrophosphate de sodium devrait fournir une estimation de la quantité de ces deux éléments existant sous des formes liées à la matière organique.

Les résultats obtenus dans notre étude montrent que, dans les sols étudiés, la quantité de fer libre extraite par le réactif DCB représente 85 à 100 % de la quantité de fer total obtenu par fusion au métaborate de lithium, ce qui suggère que presque tout le fer et l'aluminium présents dans ces sols sont sous la forme libre. Dans ces sols, le réactif DCB a extrait plus de fer et d'aluminium que l'oxalate acide d'ammonium à pH 3 ou le pyrophosphate de sodium 0,1 M à pH 10, résultats qui semblent normaux.

Par contre, à l'inverse des résultats habituellement obtenus, le pyrophosphate de sodium, qui est sensé n'extraire que les formes du fer et de l'aluminium chélatées ou incorporées dans la matière organique, a extrait dans la plupart des échantillons riches en matière organique plus de fer, et parfois plus d'aluminium, que l'oxalate acide d'ammonium (fig. 3). Ces résultats, qui mettent en cause la spécificité de deux réactifs dans l'extraction du fer libre, peuvent nous éclairer quant à la nature de la matière organique dans ces sols.

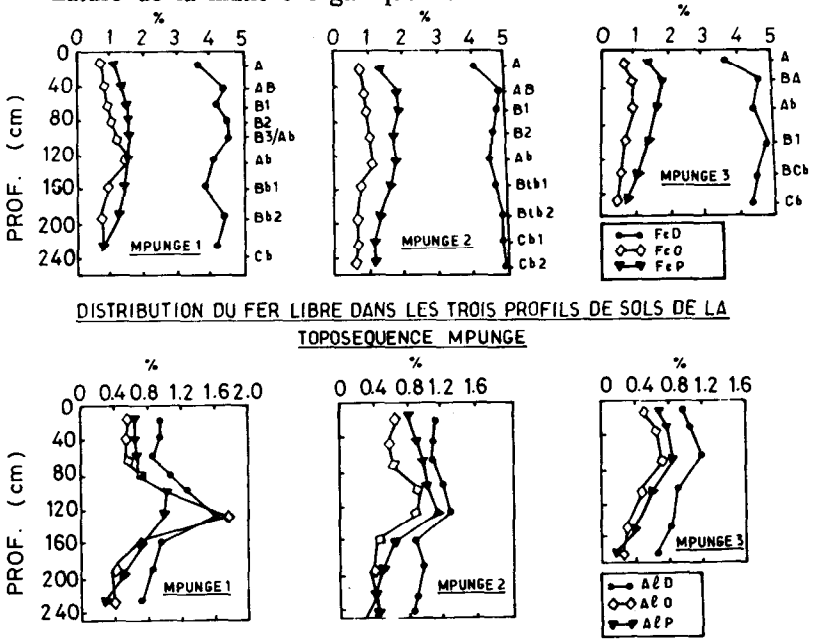


Figure 3 : *Distribution de l'aluminium libre dans les trois profils de sols de la toposéquence Mpunge*

D'après ces résultats, l'oxalate acide d'ammonium à pH 3 n'extrait pas la totalité des oxydes de fer et d'aluminium liés à la matière organique. L'inefficacité de ces réactifs proviendrait du fait que le fer et l'aluminium seraient plutôt associés aux acides humiques qu'aux acides fulviques, les premiers étant solubles dans les solutions acides. En effet, dans un milieu où la quantité d'acides humiques serait aussi importante que celle d'acides fulviques, le pyrophosphate de sodium 0,1 M à pH 10 serait plus efficace que l'oxalate acide d'ammonium dans l'extraction des formes du fer et de l'aluminium complexés ou incorporés à la matière organique. Cette efficacité du pyro-phosphate de sodium 0,1 M à pH 10 proviendrait donc à la fois de son alcalinité, qui permet de garder en solution tout aussi bien les acides humiques que les acides fulviques, et de son pouvoir complexant, qui permet le maintien du fer et de l'aluminium chélatés en solution.

Ainsi, d'après ces résultats, la matière organique des sols de la région concernée serait plus composée d'acides humiques que d'acides fulviques. Si c'est le cas, cela signifierait que cette matière organique est très fortement polymérisée, ce qui limiterait les possibilités de minéralisation et donc de contribution à la nutrition des plantes.

2.5. Propriétés de charge

Les propriétés de charge de certains échantillons provenant des horizons A de surface, des horizons B et des horizons sombres de profondeur ont été étudiées à l'aide de titrations potentiométriques acide-base (HCl et NaOH) de suspensions de sol de concentration variable en NaCl (0,1 N, 0,01 N et 0,001 N). La méthode utilisée est celle de BLOCK et de BRUYN (1970). Trois types de courbes de titration potentiométrique ont été obtenus, mais celui caractérisé par un point de charge zéro (PCZ) clairement défini par le point commun d'intersection des trois courbes de titration potentiométrique a été le plus fréquent et même s'est retrouvé dans au moins un horizon de chacun des profils étudiés (fig. 4). Il indique, au moins de façon qualitative, que le comportement électrochimique de ces sols est quasi identique à celui des oxydes métalliques pour lesquels le potentiel de surface de la double couche réversible est uniquement déterminé par l'activité

des ions H^+ et OH^- appelés ions déterminant le potentiel. Un tel comportement a révélé la prédominance dans ces sols d'une charge variable, comportement qui peut être approximativement décrit par les équations mathématiques de Nernst et Gouy–Chapman (VAN RAIJ et PEECH, 1972).

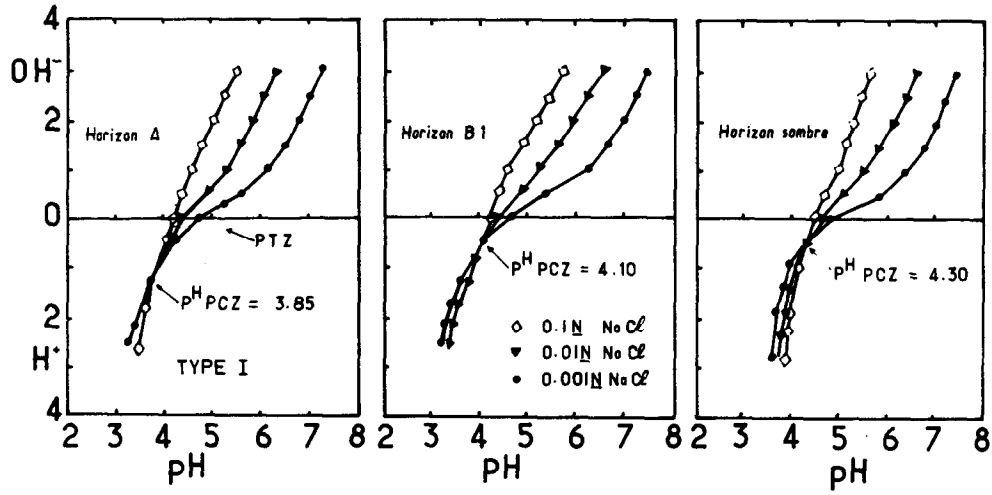


Figure 4 : *Courbes de titration potentiométrique des horizons A, B1 et sombre (Ab) du profil Mpunge 1*

Le pH au point de charge zéro est une valeur unique, indépendante de la concentration de NaCl, et à laquelle le signe de la charge nette change. Pour une valeur donnée de pH, située du côté alcalin de pH et PCZ, la quantité d'ions OH^- adsorbés (charge négative) augmente avec la force ionique de la suspension. De la même façon, pour une valeur de pH située du côté acide du pH au PCZ, l'accroissement de la force ionique de la suspension tend à augmenter l'adsorption des ions H^+ (charge positive). Toutefois, il y a lieu d'observer un phénomène particulier à ces sols : le rapprochement des trois courbes de titration potentiométrique observé au côté acide de PCZ résulte du pouvoir tampon élevé de ces sols, dû à leur richesse en aluminium soluble en milieu extrêmement acide.

Les valeurs $\Delta\ pH_{PCZ}$ (Tableau 1) obtenues par la différence entre le pH au KCl et le pH au PCZ ont été utilisées comme critères d'évaluation du degré d'évolution des sols (HENDERSHOT *et al.*, 1978 et 1979). Les faibles valeurs de ce

critère qui ont été obtenues rendent bien compte du degré d'altération élevée de ces sols et de la nature des constituants de la fraction colloïdale, essentiellement constituée de kaolinite et d'oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium.

Tableau 1 – *Valeurs de C, pH_{PCZ}, charge permanente, et ΔpH_{PCZ}*

Horizon	C	pH_{PCZ}	Charge permanente mé/100g	pH_{PCZ}
		MPUNGE		
A	2,41	3,85	−1,10	−0,05
B1	1,22	4,10	−0,50	−0,30
AB	2,17	4,30	−0,50	−0,40
		WAMUNUNGU 3		
Ap	1,15	IND.	–	–
Bt	0,55	3,65	−0,80	0,05
AB & Btb1	0,24	3,45	−1,20	0,35
		KARUBANDA		
Ap1	2,13	4,20	−2,45	0,40
Bt	1,58	IND.	–	–
AB1 & Btb1	1,03	IND.	–	–

Toutefois, si les valeurs du pH des sols au PCZ qui ont été déterminées varient de 3,45 à 4,20 et sont de loin inférieures à celles généralement rapportées pour les hydroxydes cristallins de fer et d'aluminium purs (de l'ordre de 8 à 10,2, selon HENDERSHOT et LAVKULICH, 1983), elles pourraient être expliquées par une teneur élevée de matière organique de ces sols (VAN RAIJ et PEECH, 1972 ; KENG et UEHARA, 1974). En effet, la matière organique ayant une valeur de pH au PCZ de l'ordre de 2 à 3, elle contribue à l'abaissement du point de charge zéro et par conséquent à l'augmentation de la charge permanente. Il est à remarquer que malgré la teneur élevée de matière organique de ces sols, la charge permanente calculée est très faible (elle varie de −0,50 à −2,45 mé/100 g de sol). Ces faibles valeurs font présumer un lessivage très rapide des cations ajoutés à ces sols et une forte adsorption des anions (en particulier du phosphate). Ces résultats entraînent une

problématique quant à la mise en valeur de ces sols. D'une part ils sont très riches en matière organique, mais d'autre part ils ont une charge permanente très faible. Or théoriquement, pour améliorer leur charge, il faudrait d'abord conserver ou augmenter le taux de matière organique et ensuite chauler pour accroître le pH à une valeur au moins de l'ordre de 5. Cette valeur permet d'inhiber la présence de l'aluminium soluble qui, non seulement à certaines concentrations peut être toxique pour certaines cultures, mais qui joue également un rôle primordial dans la fixation du phosphore dans ces sols. En réalité, que se passe-t-il ? Voici une question dont nous discuterons au chapitre de l'aménagement de ces sols.

2.6. Comportement du phosphore

Les sols à horizons sombres de profondeur étant reconnus pour leurs déficiences en phosphore et pour leur capacité élevée de fixation de cet élément, des études relatives à l'adsorption du phosphore ont été réalisées à l'aide des méthodes des isothermes d'adsorption. Les résultats de ces études montrent que ces sols adsorbent des quantités considérables de phosphates. Les adsorptions maximales de phosphore, calculées à l'aide de l'équation de Langmuir, varient de 1 500 à 17 000 microgrammes de phosphore par gramme de sol.

De même, à l'aide des isothermes d'adsorption tels que ceux utilisés par FOX et KAMPRATH (1970), les quantités de phosphore à ajouter au sol pour avoir une concentration de 0.2 ppm dans la solution du sol (quantités généralement considérées comme étant optimales pour assurer le plein développement végétatif de la plupart des plantes cultivées, *Cf.* BECKWITH, 1965) sont élevées ; elles varient de 200 à 1 000 microgrammes de phosphore par gramme de sol, avec une moyenne de 400 microgrammes de phosphore par gramme de sol, ce qui équivaut à une moyenne de 800 kg de phosphore par hectare ou environ 1 800 kg de P_2O_5/ha.

D'après l'échelle de JUO et FOX (1977), fondée sur la quantité de phosphore nécessaire pour atteindre la valeur de 0,2 ppm de phosphore dans la solution du sol, les sols de cette région de haute altitude appartiennent à des catégories qui fixent des quantités moyennes à très élevées de phosphate. Ces résultats

suggèrent encore une fois que la fraction argileuse de ces sols contient essentiellement des minéraux argileux de type kaolinite, des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, ainsi que des matériaux amorphes désilicatés (allophanes), qui ont un pouvoir fixateur pour le phosphore élevé.

2.7. Micromorphologie

2.7.1. Sols de Gikongoro

L'étude micromorphologique des sols échantillonnés dans la préfecture Gikongoro a révélé un certain nombre de caractéristiques très variées et très significatives.

Dans l'ensemble, ces sols sont caractérisés par une altération ferrallitique intense, mais celle-ci est, plus prononcée dans la partie supérieure des profils ou l'on n'observe que des traces de plagioclases et de très faibles quantités de fines paillettes de muscovite. Les biotites ont été complètement altérées. Le squelette est essentiellement constitué de nombreux grains de quartz ; ces grains sont généralement corrodés, carriés, fracturés ou microfissurés, et certains présentent des microfissures remplies de plasma sesquioxydique, opaque en lumière polarisée non analysée (LPNA). Des grains de quartz qui présentent de telles caractéristiques sont des "runiquartz", d'après le terminologie d'ESWARAN et SYS (1975). La quantité de ces "runiquartz" varie selon les horizons dans chacun des profils.

Le plasma varie verticalement au point de vue de sa composition et de son organisation. Les horizons A superficiels et les horizons sombres de profondeur ont une matrice organo-minérale abondante, qui s'organise différemment dans ces deux horizons. Le plasma des horizons sombres de profondeur a tendance à floculer, à s'agréger et à former une microstructure granuleuse ou spongieuse de type congélique (selon ESWARAN et BANOS, 1976), ce qui n'est pas le cas des horizons A superficiels.

Les horizons B situés au-dessus de l'horizon sombre de profondeur ont généralement deux phases matricielles : une phase jaune-rouge qui l'emporte sur la phase brun-rouge enrichie en matière organique. Cette phase jaune-rouge est caractérisée par de nombreuses micro-inclusions sesquioxydiques, responsables de son aspect poussiéreux lorsqu'elle est observée en LPNA à de forts grossissements. La majorité de ces micro-inclusions sesquioxydiques sont rougeâtres en LPA sous de fortes intensités lumineuses, et ont le plus souvent une forme globulaire ou sphéroïdale. Cette phase se retrouve dans certains horizons sombres de profondeur, en quantités limitées, sous forme de plages.

Dans les horizons B et C sous-jacents à l'horizon sombre, la diminution marquée des substances humiques s'accompagne d'une disparition presque complète de la phase brun-rouge foncée. Dans ces horizons profonds, on observe un véritable saupoudrage, au sein de la matrice, de micro-inclusions ferrugineuses contrastées et bien striées, à côté desquelles se trouvent de nombreux micro-nodules ferrugineux de diamètre variant entre 5 et 150 micromètres, et d'autres concentrations sesquioxydiques sous forme de nodules ou de sesquanes, sous forme d'amas dans la matrice, ou infiltrées à l'intérieur de microfissures dans certains quartz.

Ces sols sont caractérisés par une porosité très variable selon les horizons. Les horizons superficiels et les horizons sombres de profondeur sont très microstructurés et ont une porosité d'entassement composé. Les autres horizons sus et sous-jacents à l'horizon sombre de profondeur ont essentiellement une porosité constituée de cavités, de chenaux et de fentes.

L'organisation habituelle des constituants du sol est plasmi-porphyrique, sauf dans les horizons A de surface et sombres de profondeur où l'on observe parfois le type grani-porphyrique. Par contre, les modèles de distribution relative spécifiques résultant des processus pédogénétiques sont complexes et varient selon les horizons. On trouve des associations d'unités matrigraniques, matrifrag-

moïdiques, matrigranoïdiques ou même humimatrigraniques ou granoïdiques selon les horizons.

Ces sols présentent une faible expression des assemblages plasmiques dans la partie supérieure des profils, alors que ceux-ci sont plus variés et plus développés en profondeur, la quantité élevée de substances humiques masquant les séparations plasmiques (le plasma est isotique). Dans les autres horizons, sus et sous-jacents à l'horizon sombre, on observe des assemblages sépiques, dont les plus importants sont ooïdsépiques, masépiques et lattisépiques, les deux derniers étant plus développés dans la partie inférieure des profils. L'assemblage ooïdsépique est observé dans l'ensemble des horizons des profils, sous forme d'orientations plasmiques circulaires ou ovoïdes bordant la face des microagrégats et même de certaines papules, ou marquant une discontinuité, non visible en lumière naturelle, avec le fond plasmique adjacent.

Dans la partie supérieure des profils des sols sous *Eragrostis*, il n'existe aucune preuve d'illuviation de l'argile. Ce n'est qu'à partir d'une profondeur d'environ 150 cm que l'on observe des accumulations texturales (essentiellement argileuses), qui apparaissent sous forme de cutanes simples ou de cutanes composés de types variés :

- ferriargilanes homogènes, jaune-orange, sans micro-inclusions ferrugineuses, apparaissant sous formes de revêtements ou de dépôts comblant partiellement ou totalement les vides ;
- ferriargilanes microlités à nombreuses micro-inclusions sesquioxydiques ;
- ferriargilanes et argilanes de vides en voie de fragmentation ;
- ferriargilanes complexes, souvent microlites, avec alternance de microlités rouges et jaunes, d'argilanes, sesquantes et siltanes.

Par contre, dans les sols cultivés, particulièrement ceux du haut ou de la partie intermédiaire des versants, on observe un développement des horizons argiliques immédiatement en dessous de l'horizon A superficiel.

L'horizon sombre est en même temps un horizon argilique pourvu d'importantes accumulations argileuses (ferriargilanes) et limono – argileuses (siltanes – ferriargilanes). De très rares organo – ferriargilanes ont également été observés.

Enfin, ces sols présentent quelques traits morphologiques particuliers, comme des lithoreliques à assemblage masépique bien développé et de nombreux pédotubules.

L'interprétation des traits pédologiques de ces sols permet de parvenir aux conclusions suivantes. L'existence des "runiquartz" dans certains horizons et leur absence dans d'autres confirme la présence de discontinuités dans les matériaux.

Par ailleurs, l'interprétation de l'assemblage ooïdsépique est rendue difficile par le nombre varié de processus qui peuvent contribuer à son développement, bien qu'ils puissent coexister dans ces sols. Cet assemblage est souvent interprété comme une caractéristique des sols très altérés (ESWARAN et SYS, 1976), comme le résultat de l'activité faunique (VERHAYE et STOOPS, 1975) ou tout simplement comme étant relié au phénomène de microagrégation du sol, phénomène qui est parfois favorisé par le transport des matériaux par l'érosion (BUOL et ESWARAN, 1977). Cet assemblage plasmique, qui parfois se manifeste sous forme de séparations plasmiques ovoïdes ou circulaires délimitant des anneaux concentriques plus ou moins emboîtés les uns dans les autres pourrait donc être le résultat de la rotation de microagrégats ou de grains squelettiques à l'intérieur d'une matrice argileuse. Cette rotation aurait donc favorisé l'enrobage de ces microagrégats ou de ces grains squelettiques par plusieurs pellicules argileuses successives. Deux ou plusieurs pellicules argileuses pourraient donc signifier une reprise de l'agrégat ou du noyau squelettique deux ou plusieurs fois.

La confrontation de tous les traits pédologiques observés dans l'ensemble des sols de Gikongoro a donc mis en évidence un remaniement intense des sols, remaniement

prouvé entre autres par les débris d'argilanes (papules) à divers stades d'intégration dans le fond matriciel des horizons et à l'intérieur des volumes pédotubuliques, la rotondité des agrégats qui ne peut résulter que du mouvement rotatoire au cours du malaxage du sol, les lithoreliques arrachées par l'érosion et mélangées au sol, et enfin de nombreux pédotubules résultant d'une activité faunique intense.

2.7.2. Sols de Butare

En vue de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus dans la région de Gikongoro, deux profils supplémentaires ont été analysés dans la région de Butare. Contrairement aux sols de Gikongoro, la translocation de l'argile est un processus important dans l'ensemble de ces sols. Une caractéristique importante observée dans l'un des profils est la présence de divers types de cutanes complexes d'illuviation dans l'horizon sombre, qui est en même temps un horizon argilique. Il s'agit :

- de ferriargilanes épais, microlités ou pas, avec ou sans micro – inclusions ;
- de ferriargilanes complexes zonés et lités, constitués d'une alternance de lits, les uns argileux, les autres argilo – humiques. Par ailleurs, certains argilanes observés dans cet horizon ne sont pas du tout teintés de matière organique. Comme dans les sols de Gikongoro, les horizons inférieurs à l'horizon sombre sont caractérisés par des séparations plasmiques ooïdsépiques, masépiques et lattisépiques bien développées et renferment des ferriargilanes d'illuviation souvent complexes, microlités avec ou sans microinclusions ferrugineuses. De plus, le nombre de papules est important. Des "runiquartz" sont présents dans certains horizons d'un profil donné et absent dans d'autres.

L'interprétation des données micromorphologiques des sols étudiés à Butare a conduit aux conclusions suivantes. La morphologie des cutanes présents dans les divers horizons de ces sols indique une translocation importante de l'argile et de la matière organique et suggère que

l'horizon sombre n'est pas un horizon enterré. Par contre, la présence des "runiquartz" suggère la nature transportée du matériel, tandis que les papules imprégnés par des sesquioxydes et localisés dans les horizons profonds seraient des reliques. De même, le microlitage de cutanes de nature différente (microlits argileux, microlits argilo-humiques, microlits limoneux) suggère des phases différentes dans le développement des sols. Certains cutanes non teintés de matière organique dans les horizons supérieurs à l'horizon sombre et dans celui-ci seraient postérieurs à la formation de l'horizon sombre. La superposition de tous ces traits pédologiques indique donc plusieurs phases de développement des sols (sols polyphasés).

2.7.3. Conclusion

L'étude micromorphologique des onze profils analysés a mis en évidence plusieurs traits pédologiques que l'analyse macroscopique ne peut déceler. La majorité d'entre eux sont souvent superposés et entrecroisés, de sorte qu'il est presque impossible de les classer par ordre chronologique. L'analyse de tous ces traits a toutefois révélé un remaniement intense des profils par les processus de bio et de pédoturbation, érosion comprise, et plusieurs phases de développement des sols (sols polyphasés).

Dans la recherche d'une explication à la genèse de l'horizon sombre de profondeur, la confrontation des données macro et microscopiques a mis en évidence plusieurs phénomènes qui plaident en faveur d'un ancien horizon A de surface enfoui, qui dans la plupart des cas a été fortement réorganisé par des processus pédologiques et a acquis les caractéristiques d'un horizon B illuvial.

Les arguments en faveur d'un horizon A enfoui sont notamment :

- l'existence au sein de cet horizon, partout où il se rencontre, de morceaux de charbon de bois de taille variée qui ne peuvent être que le résultat d'une combustion ;

- la présence d'agrégats rougeâtres qui présentent de fortes similitudes avec le matériel de l'horizon C, et qui sont interprétés comme ayant été introduits dans cet horizon par l'érosion ;
- les discontinuités latérales de cet horizon.

Toutefois, si nous avons privilégié cette hypothèse, plusieurs caractères compliquent l'histoire de la genèse de ces sols. C'est le cas des cutanes d'illuviation complexes microlités ou zonés avec certaines zones assombries par de la matière organique. Ces zones de matière organique en alternance avec les phases d'illuviation d'argile pure plaident en faveur d'horizon sombre d'illuviation de la matière organique. Dans certains profils, et particulièrement ceux de Butare, si l'horizon sombre est un horizon génétique formé par l'illuviation de la matière organique, il ne se serait cependant pas formé par des processus pédologiques actuels ; il appartiendrait donc à une pédogénèse révolue (*Cf.* cutanes d'argile récents non teintés de matière organique dans les horizons sombres et dans les horizons sus-jacents des sols où le caractère illuvial de la matière organique apparaît).

D'autres caractères rendent difficile l'interprétation de la genèse de cet horizon. Il s'agit notamment de certaines de ses propriétés chimiques, qui contrastent avec celles de l'horizon A de surface. Parmi les propriétés particulières à cet horizon, on trouve l'augmentation par rapport aux horizons sus et sous-jacents des teneurs en fer et en aluminium extractibles par l'oxalate acide d'ammonium ou par le pyrophosphate de sodium 0,1 M ainsi que les valeurs du pH au NaF souvent supérieures à 9,40.

Compte tenu d'autres interprétations possibles pouvant mener à une conclusion différente de la nôtre, des recherches supplémentaires, telles que la datation de la matière organique au carbone 14 et des études géomorphologiques détaillées de la région, s'avèrent nécessaires pour confirmer ou infirmer les résultats de notre étude.

III - DEMARCHE PROPOSEE POUR CLASSER CES SOLS

L'hypothèse à laquelle nous sommes arrivés crée une controverse, car d'après la carte des associations des sols du Rwanda et du Burundi levée par VAN WAMBEKE (1963) et d'après les travaux d'autres chercheurs (NEEL, 1968), la région échantillonnée est reconnue comme étant celle des sols à horizon sombre. Etant donné la définition de l'horizon sombre adoptée par l'INEAC (SYS *et al.*, 1961) et par les auteurs de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975), les sols étudiés, qui ont des horizons foncés considérés comme étant des horizons A enfouis, ne devraient pas être classés parmi les sols à horizon sombre de ces classifications. Il faut donc proposer une démarche pour pouvoir intégrer ces sols dans les classifications INEAC et Soil Taxonomy.

Il s'avère nécessaire de vérifier par des études micromorphologiques si notre conclusion s'applique à une région beaucoup plus vaste, et même à toute la région des sols à horizon sombre délimitée par l'INEAC en 1954.

Dans le cas où cette conclusion s'appliquerait à toute la région reconnue comme étant celle des sols à horizon sombre, le problème de la classification de ces sols peut être résolu en modifiant simplement la définition de l'horizon sombre (suppression de l'aspect génétique). La définition proposée est la suivante :

"L'horizon sombre est un horizon minéral, de profondeur, noir, brun - gris ou brun - foncé, formé par l'accumulation de la matière organique et rencontré dans des sols naturellement bien drainés des régions tropicales et subtropicales. Il possède une luminosité (value) et/ou une saturation (chroma) de la couleur inférieure à celle des horizons immédiatement sus et sous - jacents. Par rapport à ces derniers horizons, il accuse en général une augmentation en carbone organique, mais ce critère n'est pas absolu".

Dans le cas où notre conclusion ne s'appliquerait qu'à une région importante, mais pas à toute la région reconnue comme étant celle à horizon sombre, il deviendrait nécessaire, pour pouvoir classer ces sols, d'ajouter dans la Soil Taxonomy et dans la classification de l'INEAC un certain nombre de critère permettant d'inclure les sols à horizon foncé qui sont des horizons A enfouis.

IV – AMENAGEMENT

L'ensemble des sols minéraux de collines non volcaniques des régions de haute altitude du Rwanda, dont les sols à horizon sombre de profondeur constituent la majorité, présente du point de vue agronomique plusieurs caractéristiques géomorphologiques, physico – chimiques et bio – climatiques communes et ont par conséquent les mêmes contraintes d'aménagement. Ces sols, qui occupent environ 30 % de la superficie de terres cultivables, se rencontrent dans plusieurs préfectures du Pays. Ils occupent les régions agro – climatiques de la Crête Zaïre – Nil qui s'étend sur les préfectures Gikongoro, Cyangugu, Kibuye et Gisenyi et certaines zones des hautes terres du Buberuka en préfectures de Byumba et Ruhengeri, ainsi que certaines communes en altitude des préfectures Kigali et Gitarama.

Les sols étudiés sont très acides et pourvus de grandes quantités d'aluminium échangeable. Malgré leurs bonnes propriétés physiques, ces sols sont soumis à des contraintes variées qui limitent leur mise en valeur rationnelle : contraintes physiques (relief très accidenté avec des pentes dépassant souvent 45 à 50 %, associé à une pluviosité très élevée, de l'ordre de 1 400 à 1 800 mm par an, entraînant des risques importants d'érosion par ruissellement et par glissement de terrain ainsi que le lessivage des éléments nutritifs solubles, climat froid – 11 à 18 °C – limitant le nombre de cultures adaptées à la région) ; contraintes socio – économiques (disponibilité limitée d'intrants agricoles tels que les engrais minéraux, la fumure organique, faible revenu des paysans pour se procurer les intrants agricoles nécessaires à la mise en valeur des terres, insuffisance d'information et d'encadrement des agriculteurs quant à l'utilisation judicieuse des divers intrants agricoles) ; contraintes techniques (méthodes modernes peu développées, faible ou non utilisation des engrais, peu de référentiels techniques convaincants en matière de conservation et d'amélioration des terres) ; contraintes naturelles (propriétés physico – chimiques et biologiques des sols médiocres).

Sur le plan physico – chimique, la très forte acidité de ces sols et leur teneur en aluminium échangeable élevée sont parmi les princi – paux facteurs limitatifs pour la production agricole. La majorité des sols sous *Eragrostis* et sous fougères (deux plantes indicatrices des sols très dégradés), à l'exception de quelques sols anthropisés qui

sont déjà améliorés par l'apport répété de déchets de ferme et qui ont un pH relativement élevé, ont un pH à l'eau souvent inférieur à 4,5, qui par endroits descend jusqu'à des valeurs de l'ordre de 3,5. A ces valeurs l'aluminium apparaît à des teneurs moyennes de 3 à 4 mé/100 g, qui sont considérées comme toxiques pour la plupart des plantes cultivées.

Une si forte acidité des sols entraîne le ralentissement de la vie microbienne, et par conséquent une faible minéralisation de l'azote, en plus d'une diminution de l'assimilabilité de la plupart des éléments essentiels à la plante.

Face à cette très forte acidité et à la présence des teneurs élevées en aluminium échangeable ainsi qu'à la présence d'une charge négative très faible démontrée par l'étude électrochimique, la mise en valeur de ces sols passe par l'augmentation du taux de matière organique (fumier de ferme, compost, engrais verts) et la pratique du chaulage.

Sur la base des valeurs d'aluminium échangeable trouvées, les quantités théoriques (en tonnes/ha) de chaux peuvent être estimées par la formule de KAMPRATH (1970). En équivalent CaCO3 en tonnes/ha, il faut 1,65 mé x/100 g de sol pour mener le pH du sol au voisinage des valeurs 5,2 à 5,5, valeurs où la toxicité aluminique est éliminée. Il faudrait de 5 à 6 tonnes, et même jusqu'à 12 à 13 tonnes de CaCO3 à l'hectare dans certains cas extrêmes des sols de la Crête Zaïre – Nil où la teneur en aluminium atteint 6 à 8 mé/100 g, pour supprimer la toxicité aluminique.

Sachant que la chaux de première qualité produite au Rwanda correspond à 50 % de la chaux pure, la quantité moyenne de chaux requise par hectare pour la majorité des sols serait donc de 10 à 12 tonnes, pour une valeur de 120 000 à 144 000 francs rwandais (1 600 à 1 920 dollars US) au prix de 12 francs rwandais le kilo de chaux.

Toutefois, les premiers essais de fertilité menés sur ces sols depuis 1980 montrent que des quantités de chaux éteinte de qualité moyenne à 50 % de $Ca(OH)_2$ de l'ordre de 2,5 à 4 tonnes/ha donnent des résultats plus ou moins satisfaisants, du moins pour certaines cultures, notamment la pomme de terre et le blé. Cela peut s'expliquer par le fait que le but du chaulage n'est pas d'amener le

sol à neutralité, mais plutôt de neutraliser l'aluminium échangeable et de prévenir ainsi la toxicité et la forte rétrogradation du phosphore.

Concernant l'apport de la fumure organique dans ces sols, beaucoup de controverses subsistent. Certains se demandent, pourquoi il faudrait effectuer un apport de fumure organique dans des sols où la teneur en matière organique est déjà élevée (2 à 8 % de matière organique dans les 30 premiers centimètres du sol).

Pour nous, cet apport est indispensable pour, non seulement améliorer la charge négative de ces sols à faible activité d'argile, mais aussi pour activer la vie microbienne indispensable à la minéralisation de la matière organique, apparemment inerte dans les conditions actuelles.

A l'aide des isothermes d'adsorption du phosphore, les exigences en phosphore estimées pour atteindre la concentration de 0,2 ppm de phosphore dans la solution du sol ont été en moyenne de 400 microgrammes de phosphore par gramme de sol, ce qui correspond approximativement à 1 800 kg de P_2O_5 par hectare ou 4 tonnes de superphosphate triple, soit une valeur de 120 000 francs rwandais (ou 1 600 dollars US), au prix de 30 francs rwandais par kilo d'engrais.

Des applications en une fois de quantités aussi élevées sont inaccessibles à l'agriculteur rwandais, et l'on peut se poser la question de la rentabilité financière de cette opération. Si l'agriculteur avait les moyens de se procurer les engrais minéraux, la stratégie que l'on pourrait adopter consisterait, à fractionner cette dose moyenne de 1 800 kg de P_2O_5 et d'appliquer annuellement une dose de 450 kg de P_2O_5 par hectare, dont 150 kg en bandes et 300 kg à la volée, jusqu'à atteindre sur une même parcelle un total d'au moins 1 800 kg de P_2O_5 en 4 ans. L'avantage d'une application à la volée est d'homogénéiser la concentration de l'engrais dans l'espace de toute la couche de sol exploitable par les racines des plantes, tandis que celui d'appliquer en bandes est de s'assurer que la plante reçoit effectivement suffisamment d'engrais appliqué dès le démarrage.

Les sols acides des régions de haute altitude accusent des déficiences non seulement en phosphore, mais aussi en potassium, azote et magnésium. Compte tenu du rôle primordial de l'azote et de ces

autres éléments dans la production végétale, une formule d'engrais comprenant les éléments N – P – K et Mg serait souhaitable. Malheureusement les doses optimales de ces trois éléments, chacun pris individuellement, sont pour le moment inconnues. Des expérimentations sont nécessaires, avec des protocoles qui permettront d'établir les courbes de réponse pour chacun de ces éléments et d'évaluer la quantité optimale à appliquer sur les différentes cultures.

Avant de conclure, nous avons jugé important de donner à titre d'exemple quelques résultats obtenus à l'aide d'essais préliminaires d'interactions de fumure organique (doses 0, 6, 12 et 18 t/ha), d'engrais minéral NPK 17 – 17 – 17 (doses 0, 0,1, 0,2 et 0,3 t/ha) et de chaux (doses 0, 2, 4 et 6 t/ha) sur la culture de la pomme de terre selon le dispositif en split – split – plot. Les conclusions de l'interprétation des résultats (tableau 2) sont les suivantes :

Tableau 2 : *Expérience factorielle en split – split – plot sur la pomme de terre comportant respectivement fumier, engrais et chaux (4 doses pour chaque traitement) pour 4 répétitions*

Traitements			Rendement	Traitements			Rendement
Fumier	Engrais	Chaux		Fumier	Engrais	Chaux	
t/ha				t/ha			
0	0	0	2	0	0,1	4	9
0	0	2	7	0	0,2	4	11
0	0	4	8	0	0,3	4	11
0	0,1	0	2	6	0,1	0	4
0	0,2	0	3	6	0,2	0	6
0	0,3	0	3	6	0,3	0	6
6	0	0	2	18	0,1	0	5
12	0	0	4	18	0,2	0	6
18	0	0	4	18	0,3	0	8
0	0,1	2	10	6	0,2	2	10
0	0,2	2	11	12	0,2	2	13
0	0,3	2	11	18	0,2	2	15

- l'utilisation de la fumure organiques seule, à des doses inférieures à 20 t/ha/an, est sans effet significatif sur le rendement, sauf pour les sols anthropisés qui sont déjà améliorés par les applications répétées de déchets de ferme par les agriculteurs ;
- l'utilisation de l'engrais minéral NPK 17 – 17 – 17 seul, à des doses allant jusqu'à 3 t/ha, est sans résultat et constitue un gaspillage de fonds ;
- l'utilisation de la chaux augmente sensiblement le rendement de la pomme de terre ;
- l'utilisation combinée de la fumure organique et de l'engrais minéral, ou de l'engrais chimique avec la chaux augmente sensiblement le rendement, mais le meilleur rendement est obtenu avec la combinaison de la chaux avec l'engrais ;
- enfin, c'est la combinaison ternaire (fumier, engrais minéral, chaux) qui produit les rendements les plus élevés et les plus économiques.

Concernant les méthodes de fertilisation intégrées avec l'agroforesterie, elles sont loin d'être mises au point dans cette région. Les recherches sur les espèces agroforestières adaptées doivent se poursuivre. Néanmoins, pour produire suffisamment de biomasse sous forme d'engrais verts avec des légumineuses fixatrices d'azote dans ces sols extrêmement acides, un apport de chaux et d'éléments fertilisants (presque équivalent à celui appliqué aux cultures vivrières) est nécessaire.

A ces problèmes de fertilité s'ajoutent ceux relatifs aux aménagements antiérosifs compte tenu des pentes fortes et des conditions de pluviosité élevée favorisant le transport de matières solides par ruissellement, reptation et éboulement de terrain. Trouver les aménagements anti – érosifs appropriés pour lutter au maximum contre les dégâts susceptibles de se produire lors de la mise en culture de ces terres doit constituer une préoccupation majeure pour les chercheurs.

Nous pensons qu'en raison de la susceptibilité au glissement de terrain, les techniques de lutte anti – érosive qui devraient être essayées sont celles qui permettent à l'eau de s'écouler avec la moindre énergie. Ainsi, les associations de cultures, les cultures en bandes alternées, les haies vives unies et bien espacées, l'augmentation de la stabilité structurale par apport de fumier et la jachère sont les plus indiquées. Les recherches doivent donc se

poursuivre pour évaluer correctement l'efficacité des systèmes de fossés aveugles et des terrasses quant au maintien des éléments solides et solubles dans ces sols.

CONCLUSION

L'utilisation d'amendements calcaires s'avère indispensable pour résoudre le problème de l'acidité des sols des régions de haute altitude du Rwanda, qui produit une forte toxicité aluminique. Toutefois, l'utilisation de cet intrant ne doit pas être une finalité en soi : elle doit amorcer la production d'une quantité suffisante de biomasse pour augmenter le taux de matière organique du sol et accroître l'activité biologique. Pour obtenir des rendements élevés, il faut utiliser conjointement la chaux, la fumure organique et les engrais minéraux. Les recherches sur ces sols acides doivent être coordonnées et planifiées. De même, pour une meilleure exploitation des données et les échanges d'expérience, la caractérisation préalable des sites et du matériel d'expérimentation, ainsi que l'emploi des mêmes protocoles est nécessaire, du moins à l'échelle nationale ou régionale. Enfin, la recherche de systèmes de culture tenant compte des fertilisants, des semences sélectionnées et des produits phytosanitaires est recommandée.

BIBLIOGRAPHIE

BECKWITH (R.S.), 1965 - Sorbed phosphate and standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. *Austr. J. of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 5 : 52 - 58.

BLOCK (L.) & DE BRUYN (P.L.), 1970 - The ionic double layer at the ZNO/solution interface.I. The experimental point of zero charge. *J. Colloid. Interface Sci.*, 32 : 518 - 525.

BLUME (H.P.) & SCHWERTMANN (U.) 1969 - Genetic evaluation of profile distribution of aluminium, iron and manganese oxides. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33 : 438 - 444.

BREWER (R.), 1964 – Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons. New – York, London, Sydney, 470 p.

BREWER (R.) & PAWLUK (S.), 1975 – Investigations of some soils developped in hummocks of Canadian Sub – Arctic and Southern – Arctic regions.I. Morphology and Micromorphology. *Can. J. Soil Sci.*, 55 : 301 – 319.

BUOL (S.W.) & ESWARAN (H.), 1977 – The micromorphology of oxisols. *In* Proceedings of the Vth international Working meeting on soil micromorphology. Granada, Espania, 1978, pp. 325 – 347.

ESWARAN (H.) & BANOS (C.), 1976 – Related distribution patterns in soils and their significance. *Anales Edof. y Agrobiol.*, 35 : 33 – 45.

ESWARAN (H.) & SYS (C.), 1975 – A pedogenetical study of soils developped on ultrabasic rocks from Sabah, Malaysia. Proc. 4th ASEAN Soil Conf. Kuala Lumpur, Malaysia.

ESWARAN (H.) & SYS (C.), 1976 – Micromorphological and mineralogical properties of the Quoin Hill toposequence. *Pédologie*, 26 : 280 – 291.

FEDOROFF (N.) & BULLOCK (P.), 1978 – Principes et méthodologie de la description microscopique des sols. Congrès de micromorphologie des sols. Grenade. pp. 59 – 72. Vol. I. Micromorphologia de Suelos. Proc. V. Int. Work. Meet. Soil micromorphology. Granada.

FOX (R.L.) & KAMPRATH (E.J.), 1970 – Phosphate sorption isotherms for evaluating the P requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34 : 902 – 907.

FRANKART (R.), 1981 – Les sols à horizon sombre du Rwanda et du Burundi. Communication à la 4ème Conférence internationale sur les sols, tenue au Rwanda du 2 au 12 juin 1981.

HENDERSHOT (W.H.) & LAVKULICH (L.M.), 1978 – The use of ZPC to assess pedogenic development – *Soil Sci. Am. J.*, 43 : 468 – 472.

HENDERSHOT (W.H.) & LAVKULICH (L.M.), 1983 – Effect of sesquioxyde coatings on surface charge of standard mineral and soil samples. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47 : 1 252 – 1 260.

HENDERSHOT (W.H.), SINGLETON (G.A.) & LAVKULICH (L.M.), 1979 – Variation in surface charge characteristics in a soil chronosequence. *Soil Sci. Am. J.*, 43 : 387 – 389.

I.N.E.A.C., 1954 – Carte provisoire des zones pédologiques : but, programme. Réalisations de l'I.N.E.A.C. Publ. I.N.E.A.C., 100 p.

JUO (A.S.R.) & FOX (R.L.), 1977 – Phosphate sorption characteristics of some benchmark soils of West Africa. *Soil Sci.*, 124(6) : 370 – 376.

KELLOGG (G.E.) & DAVOL (F.D.), 1949 – An exploratory study of soil groups in the Belgian Congo. Publ. I.N.E.A.C., Sér. Scient., 46 : 73 p.

KENG (J.K.C.) & UEHARA (G.), 1974 – Chemistry, mineralogy and taxonomy of oxisols and ultisols. *Soil and Crop Sci. Soc. of Fla. Proc.*, 33 : 119 – 126.

LEBRUN (J.), 1955 – Comptes rendus des débats. C.V. Ve Congr. Inter. Sci. Sol., Léopoldville, 16 – 21 août 1954, 468 p.

MC KEAGUE (J.A.) & DAY (J.H.), 1966 – Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.*, 46 : 13 – 22.

MUTWEWINGABO (B.), 1984 – Pédogenèse et micromorphologie de trois toposéquences de sols à horizon sombre de profondeur de Gikongoro et de deux pédons de Butare (Rwanda). Isothermes et caractéristiques d'adsorption du phosphore par ces sols. Thèse Univ. Laval (Québec).

NEEL (H.), 1968 – Etude pédologique de Mata. ISAR – RUBONA (Rapport pédologique inédit).

NEEL (H.) & KIMBLE (H.J.M.), PERCRUYSSEN (J.), ESWARAN (H), 1982 – The sombric horizon in Rwanda, genetic or burried horizon. *In* Agronomy abstract. Annual meetings. American Society of Agronomy Crop Science. Soc. of America Soil Sci. pp. 235 – 236.

RUHE (R.V.), 1956 – Landscape evolution in the high Ituri Belgian Congo. Publ. I.N.E.A.C., Série Scient., n° 66, 108 p.

SOIL SURVEY STAFF, 1975 – Soil Taxonomy : a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agric. Hands n° 436, U.S.D.A. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

SYS (C.), VAN WANBEKE (A.), FRANKART (R.F.), GILSON (P.), JONGEN (P.), PECROT (A.), BERCE (J.M.) & JAMAGNE (M.), 1961 – La cartographie des sols du Congo. Ses principes et ses méthodes. I.N.E.A.C., Ser. Scient., n° 66, 149 p.

VAN RAIJ. (B.) & PEECH (M.), 1972 – Eelctrochemical properties of some oxisols and alfisols of the tropics. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36 : 587 – 593.

VAN WANBEKE (A.), 1962 – Criteria for classifying tropical soils by age. *J. Soil Sci.*, 13 : 124 – 132.

VAN WAMBEKE (A.), 1963 – Note explicative de la carte des sols du Rwanda et du Burundi. Publ. I.N.E.A.C. Carte des sols et de la végétation du Congo, du Rwanda et du Burundi. Bruxelles.

VERHAYE (W.) & STOOPS (G.), 1975 – Nature and evolution of soils developed on the granit complex in the subhumid tropic (Ivory Coast). II. Micromorphology and Mineralogy. *Pédologie*, 25(1) : 40 – 55.

DISCUSSIONS ET SYNTHESE SUR LE THEME DE L'EVALUATION DES TERRES POUR LA MISE EN VALEUR

Président	**: F. NGOUANZE**
Vice – Président	**: M. CAMARA**
Rapporteur	**: C. VALENTIN**

P. BRABANT, dans le premier exposé consacré à "l'évaluation des terres : quelques règles de base" rappelle qu'en dépit des risques et des difficultés, le pédologue devrait toujours accompagner ses cartes de sols de cartes d'évaluation des terres.

Les facilités qu'offrent les nouvelles techniques infographiques permettent, en effet, d'éditer plus rapidement et plus économiquement des cartes selon l'évolution des techniques agricoles et du matériel génétique utilisé.

Discussion

Les questions font apparaître que :
- cette approche, voisine de celle du projet FAO/PNUD/INS au Togo permet une meilleure identification des facteurs conduisant à :
  . l'amélioration des systèmes de cultures ou leur correction ;
  . la prévention des dégradations ;
- pour le pédologue, il convient de rester prudent en dehors de son domaine propre, notamment pour tout ce qui a trait aux facteurs sociologiques ;
- en dépit d'une durée de vie plus courte, une carte d'aptitude, voire de "vocation naturelle des terroirs", reste une retombée du travail pédologique plus accessible aux décideurs qu'une carte de contraintes ;
- le terme de terroir, utilisé par P. BRABANT, revêt généralement une autre signification en agronomie et en géographie.

Dans le second exposé, consacré au "test d'adaptabilité des méthodes paramétriques dans le champ volcanique de Tschibidinda – Tschibati (Sud

Kivu/Zaïre), P. MONDJALIS met l'accent sur la nécessité d'adapter les indices d'évaluation des terres pour les sols d'origine volcanique. Ceux – ci devraient notamment intégrer le facteur pente. Cet exposé n'a pas donné lieu à débat.

Le troisième exposé, présenté par B. MUTWEWINGABO, "Genèse, caractéristiques et contraintes d'aménagement des sols acides de la région de haute altitude du Rwanda", a mis l'accent sur les problèmes que posent ces sols :

- en terme de fertilité, du fait de leur forte teneur en aluminium échangeable ;
- en terme de classification et de pédogénèse, notamment pour ce qui concerne l'horizon sombrique.

La discussion, orientée au début sur le brûlis et l'écobuage, interdits au Rwanda, a ensuite dévié vers la genèse de l'horizon sombrique, sujet peu en rapport avec le thème de la séance.

Réflexions du rapporteur

Cette séance a mis en lumière l'existence de deux grandes approches possibles pour l'évaluation des terres :

- une que l'on peut qualifier de naturaliste : elle se fonde sur des observations de terrain quant aux organisations et au fonctionnement des sols,
- une autre plus numériste : elle utilise des indices calculés à partir de paramètres essentiellement physico – chimiques.

Bien évidemment, ces deux approches ne sont pas exclusives l'une de l'autre. Peut – être est – il possible d'envisager que les moyens informatiques modernes vont permettre d'intégrer l'ensemble du savoir acquis depuis plus de cinquante ans en Afrique sur :

- les principales contraintes par plante,
- les systèmes de culture dans toute leur complexité : cultures associées, en relais, etc ...

Toutefois, il reste certain que le meilleur "système expert" n'évitera jamais au pédologue la nécessité d'observer sur le terrain l'organisation, le fonctionnement et l'évolution actuelle des sols en relation avec leur mode de gestion.

SEANCE DE SYNTHESE

RAPPORT DE SYNTHESE

R. POSS

Ce Premier Séminaire Franco – Africain de Pédologie Tropicale était destiné à faire le point de nos connaissances sur l'organisation des sols tropicaux et sur leur mise en valeur, ce qui était résumé dans le titre choisi : "*Les sols tropicaux : bien les connaître pour mieux les utiliser*".

Les trois journées de travail en salle ont été divisées en séances d'une demi – journée, consacrées chacune à un thème :

BIEN CONNAITRE LES SOLS ...

- Organisation des sols dans le paysage.
- Aspects actuels de la connaissance des sols à différentes échelles.

... POUR MIEUX LES UTILISER.

- Caractérisation des sols sous culture.
- Fonctionnement des sols et alimentation des plantes.
- Evaluation des terres pour la mise en valeur.

Au cours des trois jours de tournée (de Lomé à la région de la Kara) quatre sites ont été visités :

- la station agronomique de la DRA à Ativémé (50 km au Nord de Lomé), où le thème de la variabilité latérale des sols et de ses conséquences agronomiques a été développé à partir d'une étude à grande échelle,
- le point d'essai IRAT de Davié (35 km au Nord de Lomé), où l'accent a été mis sur la dynamique de l'eau et des éléments minéraux sous culture de maïs, dans le cas d'un sol rouge ferrallitique profond (terres de Barre),

- la région de Kouméa – Farendé (20 km au Nord de Kara), qui a permis d'observer différents types d'organisation de sols sur les versants, en fonction du type de roche – mère et des reprises d'érosion,
- le bassin versant du Badjo (10 km au Nord – Est de Kara), un exemple d'aménagement intégré pour lutter contre la dégradation des sols dans un contexte de densité de population élevée et de fortes pentes.

Pour effectuer la synthèse de l'ensemble des discussions, nous allons distinguer ce qui relève de la connaissance des sols de ce qui concerne leur utilisation.

I – LA CONNAISSANCE DES SOLS

Toutes les communications qui se situaient à l'échelle du paysage (M. GAVAUD, P. BRABANT, Y. GUERO, M. RAUNET, G. ROSSI), ont insisté sur le fait que la répartition des sols dans l'espace n'est pas aléatoire, mais qu'elle présente au contraire une forte organisation. En effet, les sols sont constitués par la superposition d'un faible nombre de volumes pédologiques (ensembles d'horizons) que l'on retrouve partout en Afrique (M. GAVAUD). Les types de superposition et de succession de ces volumes sur les versants sont limités, ce qui donne naissance à quelques grands types de toposéquences ("systèmes – sol" de P. BRABANT).

Lorsque les facteurs pédogénétiques varient peu latéralement, la même organisation se répète dans le paysage (M. GAVAUD, P. BRABANT) et l'étude fine de toposéquences représentatives (niveau 2 de P. BRABANT) est la base de l'extrapolation régionale. Cette approche des paysages pédologiques à l'aide de quelques types de toposéquences semble permettre de rendre compte de la majorité des types d'organisation en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale. Elle peut s'appuyer sur l'interprétation des images satellitaires et des images radar.

En revanche, lorsque les facteurs pédogénétiques sont hétérogènes, la succession des sols sur les versants est moins systématique et la généralisation à l'échelle du paysage est plus délicate (P. FAURE, B. VOLKOFF).

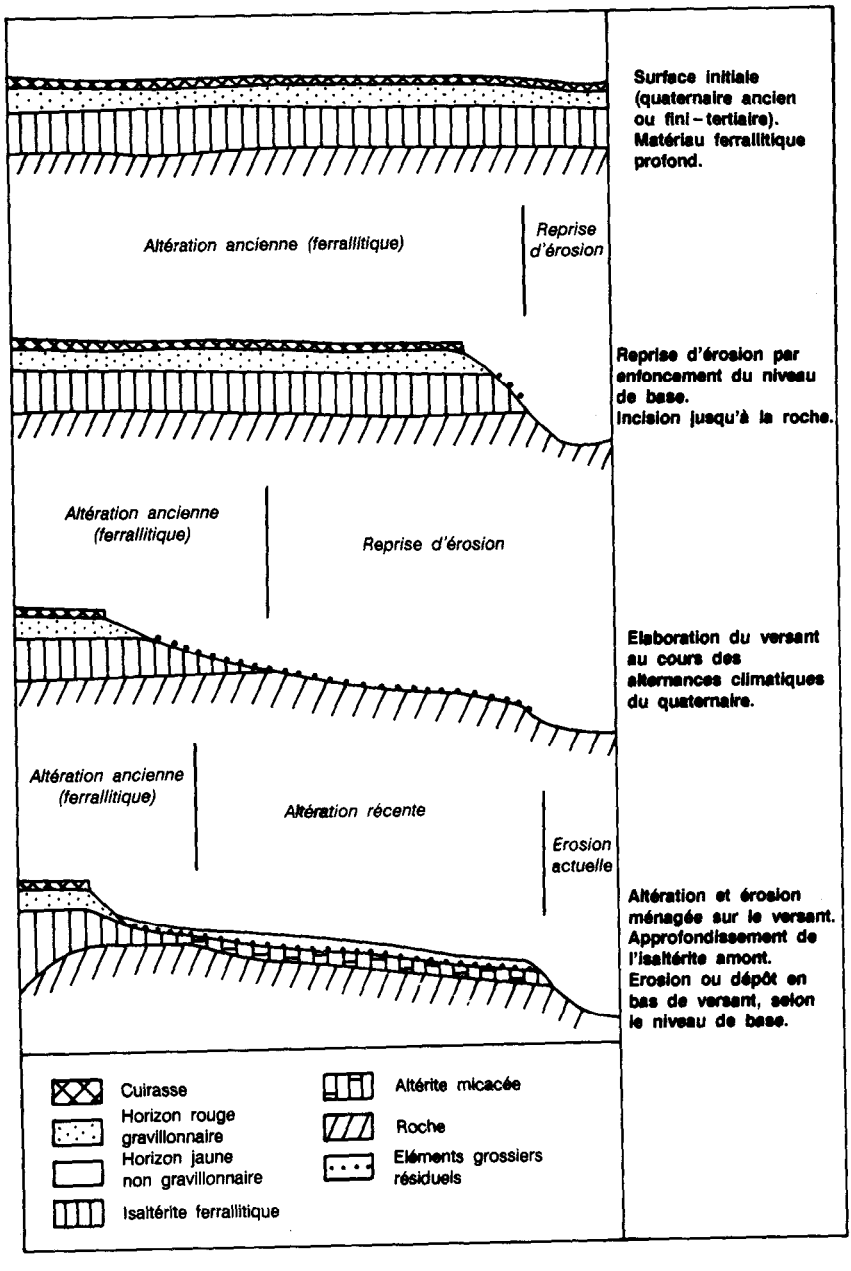


Figure 1 : *Interprétation de l'évolution du paysage sur roche mésocrate dans la région de la Kara.*

Les profils observés au nord Togo dans la région de Kouméa – Farendé ont permis de comprendre le rôle de la roche – mère et des reprises d'érosion dans la mise en place des sols (P. FAURE).

- La séquence KKJ, située sur des roches mésocrates, résulte d'une entaille profonde dans un matériau ferrallitique ancien, par suite de la rupture d'un important seuil rocheux sur la rivière qui draine la région. L'organisation actuelle des sols est très représentative de nombreux versants de la zone tropicale sèche à une saison des pluies : des lambeaux de l'ancienne surface ferrallitique subsistent en sommet de forme, alors que les versants portent des sols plus jeunes, qui présentent un niveau riche en éléments grossiers ("stone – line", "nappe de gravats" ou "horizons graveleux" selon les auteurs). La figure 1 résume l'interprétation actuellement admise pour expliquer les organisations observées.

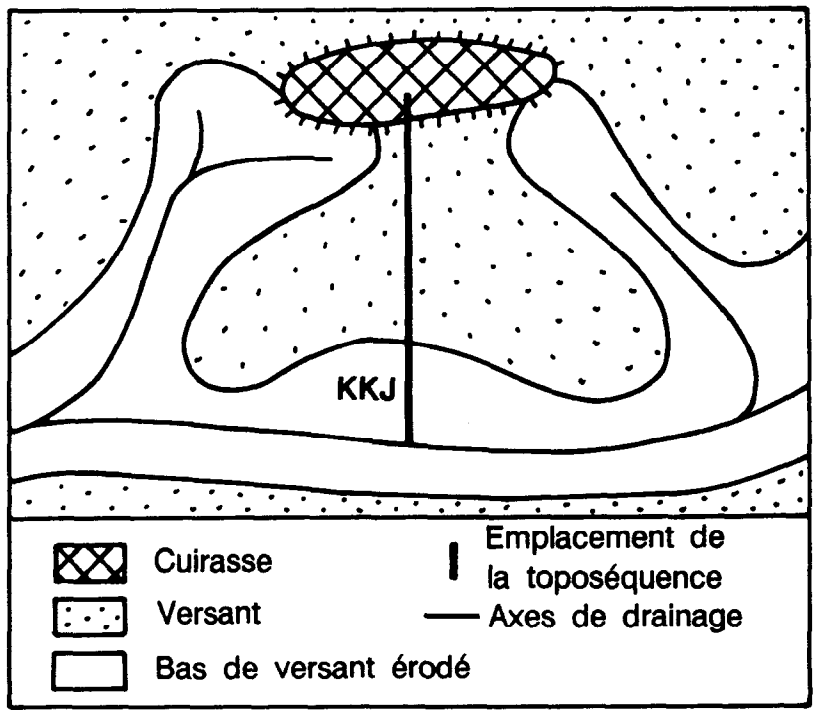


Figure 2 : *Organisation schématique du paysage à proximité de la toposéquence KKJ.*

Mais la reprise d'érosion a progressé vers l'amont en profitant de lignes de faiblesse, ce qui introduit une anisotropie dans le milieu. A partir de la butte cuirassée du sommet de la séquence KKJ vers l'axe de drainage, la succession des sols varie en fonction de la position de l'axe de drainage de premier ordre (fig. 2) : la séquence KKJ représente le développement maximal du versant, mais la séquence peut ne comporter que des sols ferrallitiques relictuels passant directement aux sols de l'entaille actuelle, lorsque la reprise d'érosion atteint la butte cuirassée.

- Le vertisol de Farendé illustre parfaitement le résultat d'une reprise d'érosion au contact entre une colline de roches vertes et le glacis cuirassé qui l'entoure (fig. 3). Il se forme une dépression périphérique, avec des sols bruns eutrophes (appelés aussi sols fersiallitiques ou cambisols) sur les versants et des vertisols en position de bas-fond. Cette organisation est systématique dans toute l'Afrique de l'Ouest et dans toute l'Afrique Centrale. Le cas des sols bruns eutrophes est un exemple de la confusion qui règne actuellement au niveau des systèmes de classification, et des erreurs qui peuvent apparaître lorsque la description des sols est condensée dans une appellation taxonomique. Il est donc souhaitable de se détacher des taxonomies pour décrire les sols et pour comprendre leur organisation, et de n'utiliser les références taxonomiques qu'à l'issue du travail, afin de faciliter les échanges avec les autres équipes.

Dans tous les cas étudiés lors du Séminaire, la dynamique de l'eau a été reconnue comme le résultat et le moteur de la différenciation des sols. Elle intervient en premier lieu par sa force érosive, qui dépend largement de son infiltration dans le sol. C. VALENTIN a montré combien l'infiltrabilité pouvait varier dans le temps et l'espace. Elle est également à l'origine de l'évolution interne actuelle des sols. Les études qui ont été présentées ont montré que la direction principale des mouvements est parfois verticale (cas des terres de Barre), mais qu'il existe très généralement une composante latérale, qui peut complètement modifier l'organisation des sols (S. WOROU, P. FAURE).

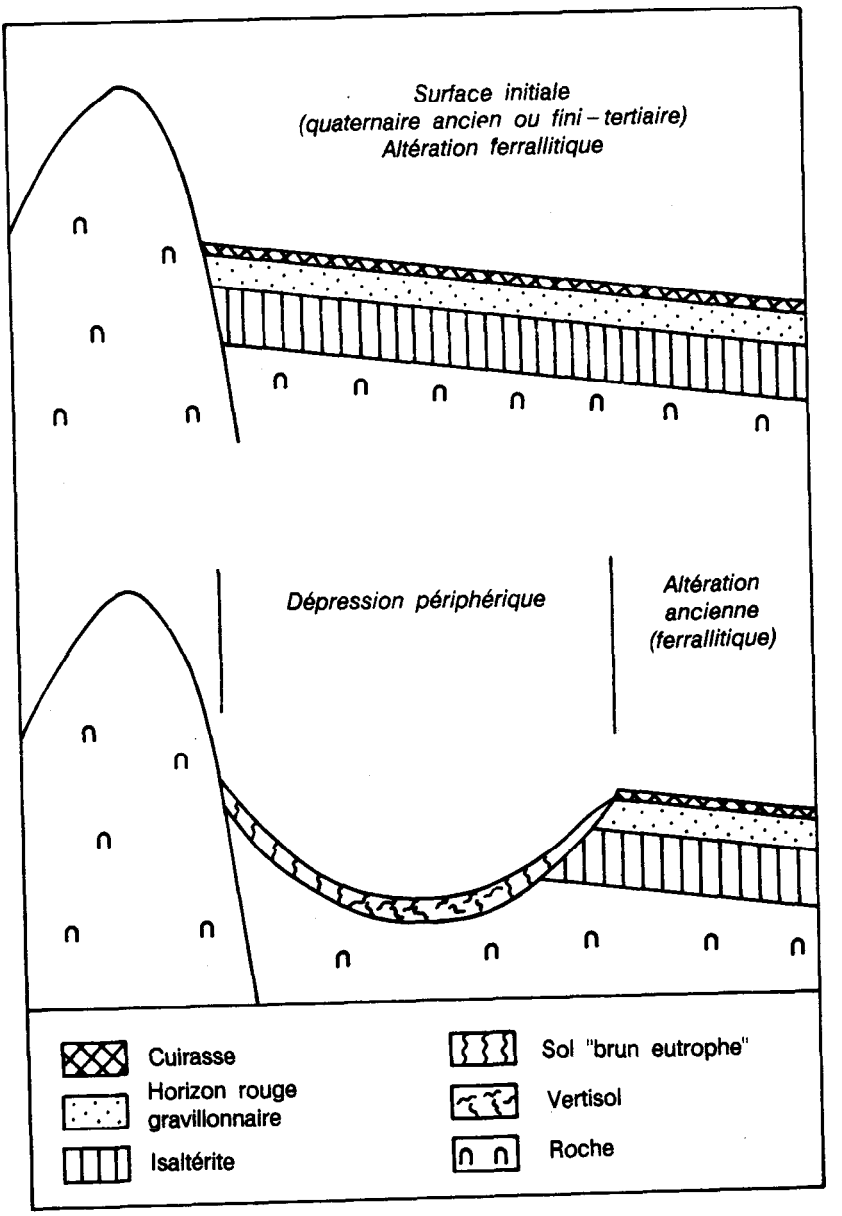


Figure 3 : *Interprétation de l'évolution du paysage sur roche basique en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale.*

II – L'UTILISATION DES SOLS

Plusieurs exposés ont insisté sur les liaisons entre les propriétés des sols et la croissance des plantes. Dans certains cas les contraintes pédologiques empêchent toute culture. C'est le cas des sols encroûtés ou à structure très massive (J.P. PALLO), ou des sols alcalisés (Y. GUERO) dans lesquels les racines ne parviennent pas à se développer. C'est également le cas des sols acides des zones humides (crête Zaïre – Nil, B. MUTWEWINGABO ; R. MOREAU). Souvent, cependant, les contraintes pédologiques ne constituent pas un obstacle absolu, mais un facteur d'hétérogénéité dans les parcelles cultivées (R. MOREAU, S. WOROU), qu'il est généralement difficile d'appréhender. En effet, la plante ne réagit pas toujours aux gradients pédologiques observés (P. SIBAND, H. SARAGONI, R. MOREAU), et il reste beaucoup à faire pour mieux identifier les caractéristiques pédologiques qui agissent réellement sur la croissance des plantes. De plus, la mise en culture modifie profondément l'organisation, le fonctionnement et les propriétés physico – chimiques des sols, selon des modalités qu'il est encore impossible de définir précisément à partir de la description des sols sous végétation naturelle (P. SIBAND).

Pour que les études des sols aient un impact au niveau du développement, il faut procéder à l'évaluation des terres (P. BRABANT). Il est donc nécessaire de dresser des cartes d'aptitudes qui intègrent le climat, les facteurs humains, les besoins des plantes et les risques de dégradation du milieu (T. TCHEMI). Pour définir un degré d'aptitude pour chaque sol, deux démarches ont été proposées. P. BRABANT a développé une démarche naturaliste, fondée sur analyse qualitative du milieu. P. MONDJALIS a exposé les derniers développements des méthodes paramétriques, et leur intérêt dans le cas du Zaïre. Dans la démarche qui conduit à l'évaluation des terres, il est indispensable de travailler en collaboration avec les spécialistes d'autres disciplines, afin de ne pas sortir de son domaine de compétence.

CONCLUSION GENERALE

Tout développement de l'agriculture africaine, dans des voies qui permet-tent le maintien à long terme du potentiel de production, nécessite une bonne connaissance des sols. Celle-ci doit porter sur la répartition des sols dans l'espace pour mieux définir l'implantation des projets et des parcelles, sur leur fonctionnement actuel, qui conditionne l'avenir et certaines propriétés agronomiques, et sur une meilleure connaissance des paramètres influant directement sur la croissance des plantes.

Les sols étant organisés sur les versants, il est indispensable de réaliser des études toposéquentielles pour comprendre la répartition des sols dans le paysage (niveau 2 de P. BRABANT). Le nombre de types d'organisation étant limité dans une région donnée, ce type d'approche permet d'obtenir rapidement une caractérisation des différents milieux pédologiques. L'analyse des toposéquences doit s'affranchir des taxonomies, pour parvenir à définir l'organisation des horizons sur les versants, clé de la compréhen-sion du versant et de sa dynamique. La référence aux systèmes taxonomiques ne doit intervenir qu'à la fin du travail, comme moyen de communication avec les autres équipes.

APERCU SUR LE REFERENTIEL PEDOLOGIQUE - DISCUSSION

Ce second point de la séance de synthèse s'est décomposée en 3 parties :
- Introduction (G. PEDRO)
- Présentation du référentiel pédologique (C. CHEVERRY)
- Points essentiels de la discussion (résumé)

INTRODUCTION

Les pédologues francophones ont été habitués à l'utilisation de la CPCS (1967), qui est une classification comme une autre, si ce n'est qu'elle est avant tout de type morphogénétique. Mais la Science des Sols ayant beaucoup avancé pendant ces vingt dernières années (en tout cas plus qu'entre DOKOUCHAEV et 1965), il est certain que la CPCS n'est plus à jour. Au demeurant l'approche morphogénétique est maintenue, car cette voie paraît être encore la mieux adaptée à un développement intelligent et harmonieux de la Science des Sols.

Il a été montré tout au long de ce Séminaire qu'on pouvait faire de la pédologie sur le terrain sans classification (compréhension de la répartition spatiale des sols). Ceci ne veut pas dire qu'une classification soit sans intérêt ; cela signifie simplement que celle-ci n'est plus l'épicentre de la discipline. Elle peut donc toujours être utilisée pour le transfert des connaissances, mais cette utilisation est faite *a posteriori* (et non plus *a priori*).

Dans cet usage, qui n'est en fait qu'une traduction d'un état pédologique donné dans un code déterminé fixé à l'avance, tous les systèmes de classification peuvent être envisagés. Les pédologues francophones sont habitués à une classification morphogénétique, mais, dans certains cas et suivant les termes du contrat, les pédologues de l'ORSTOM ont eu à exprimer leurs données pédologiques avec d'autres systèmes :
- par exemple, les cartes réalisées en Amérique Latine (Equateur et Vénézuela notamment) avaient comme code la Soil Taxonomy ;

- en Indonésie en revanche, les orstomiens ont dû utiliser la légende FAO pour exprimer leurs cartes.

Cela n'a eu aucune répercussions sur le découpage pédologique proposé, puisque l'étiquetage était effectué *a posteriori*. Mais c'est l'étiquetage lui-même qui a pu poser des problèmes dans un certain nombre de cas, par suite de l'inadéquation entre, d'une part la méthode de découpage basée sur l'existence d'unités naturelles et la possibilité d'individualisation de couvertures pédologiques à variations continues au sein de telle ou telle unité, et d'autre part tel ou tel système de classification, qui repose plus ou moins implicitement sur la notion d'entité - sol.

Aussi les pédologues français ont-ils été amenés à réfléchir à cette disharmonie, et c'est pour cette raison qu'ils ont commencé à concevoir un nouveau système de structuration des connaissances pédologiques, qui garderait la philosophie morphogénétique, tout en prenant en compte la discontinuité de la couverture pédologique. C'est ce qui a été appelé le référentiel pédologique.

Le tout est de s'entendre sur :
- la notion de référence pédologique,
- la nature et la symbolisation des horizons spécifiques d'une couverture pédologique donnée,
- le niveau de précision dans la caractérisation pédologique, étant admis que la prise en compte d'une trop grande précision au sein d'un canevas général et universel de structuration conduirait automatiquement à un blocage du système.

M. CHEVERRY va présenter maintenant l'état des travaux réalisés à ce jour, en se référant essentiellement aux sols des zones non tropicales qui ont été les plus étudiés jusqu'ici. Auparavant, il est bon de préciser certains points en ce qui concerne les sols tropicaux.

A ce propos, si on se réfère aux travaux effectués durant ces dernières décennies par les pédologues francophones, on se doit de distinguer deux cas : la zone tropicale sèche et la zone tropicale humide et forestière.

Dans la première zone (zone soudanienne avec ses franges, ou zone des savanes), les recherches sont bien avancées, en sorte que l'on connait aujourd'hui relativement bien la "clé" des systèmes pédologiques.

En prenant en compte par exemple,
- les systèmes – sols déjà caractérisés (*Cf.* P. BRABANT, M. GAVAUD, G. BOCQUIER, R. BOULET, E. FRITSCH ...),
- les héritages pédologiques (*Cf.* A. LEVEQUE, P. FAURE, V. ESCHENBRENNER ...),
- l'évolution des horizons apicaux et leur mise en équilibre avec les nouvelles conditions du milieu (C. VALENTIN, M. GAVAUD ...),

il est certain qu'on dispose de presque tous les éléments pour bâtir, dans le cas de l'Afrique de l'Ouest soudanienne, un référentiel pédologique qui soit opérationnel.

En ce qui concerne la zone humide forestière en revanche, quelques travaux de fond ont été réalisés (F.X. HUMBEL, J.P. MULLER, ...), mais on est loin d'avoir, en Afrique, la maîtrise des systèmes pédologiques. Aussi, le référentiel pédologique ne deviendra performant que lorsque de nouvelles recherches auront été effectuées. Notons toutefois ici qu'en Amérique Latine forestière (Guyane, Amazonie ...), les choses sont à ce jour plus avancées (R. BOULET, A. CHAUVEL, Y. LUCAS, E. FRITSCH, L. VEILLON, H. ROBAIN, M. et C. GRIMALDI ...).

I – PRESENTATION DU REFERENTIEL PEDOLOGIQUE

1. Le Référentiel Pédologique (R.P.) est fondé sur les quatre principes suivants :

a – Les objets étudiés sont des couvertures pédologiques, qui peuvent être subdivisées en horizons.
b – Le mode de pensée est morpho – génétique.
c – Il s'agit d'un référentiel et non d'une classification de sols.
d – L'analyse de l'organisation spatiale de la couverture pédolo – gique se fait *sans* le recours à ce référentiel ; mais, une fois analysée, l'expression synthétique de cette organisation est facilitée par un *langage* : c'est le rôle du référentiel.

2. Observation et conceptualisation

Ce sont deux démarches de nature différente. Les relations entre l'observation et la conceptualisation, effectuée à partir de la première, peuvent être schématisées dans le tableau ci – dessous :

OBSERVATION	CONCEPTUALISATION
Horizon	**Horizons de référence** (au nombre de 50 environ)
Solum – profil . Solum diagnostique . Macrocaractères . Position dans le pédopaysage	**Références** (au nombre de 100 environ)
Système pédologique	**Types**

3. Le Référentiel Pédologique est d'abord une typologie

Le Référentiel présente une collection de références. Il s'agit donc d'abord d'une typologie. Cette typologie est établie d'après :
- la morphologie des solums,
- les propriétés de comportement et de fonctionnement du sol,
- les processus pédogénétiques, dans la mesure où ils sont bien connus.

Le Référentiel sera aussi un *langage*.

4. Comment est caractérisée une référence dans le Référentiel ?

Chaque référence est renseignée par :
- sa définition et sa signification pédogénétique,
- ses solums diagnostiques et les macro – caractères spécifiques,
- sa situation dans le paysage,
- ses propriétés agronomiques,
- la liste des types connus (quantitatifs).

5. Définition du "type"

Le type est défini par un qualificatif ajouté à une référence :

référence + qualificatif = type

Règle d'écriture : une référence est toujours écrite en lettres majuscules, tandis que le type est en lettres minuscules.

Exemples :

REFERENCE	TYPE
. LITHOVERTISOL	calcarique (à horizon K en profondeur)
. RHODOFERSIALSOL DESATURE	glossique
La référence présente un horizon B	fersiallitique (BF) et rhodique (BFr)
un solum A/E/BFr/MouR	
Le type est défini par le caractère glossique de l'horizon E.	

6. Les grands ensembles (G.E.)

Ils regroupent plusieurs références qui présentent de nombreux caractères communs (par exemple les mêmes horizons de référence).
Exemples : le grand ensemble des vertisols, celui des fersialsols.

7. La démarche de rattachement d'un solum observé

Cette démarche comporte trois étapes successives :

a – la caractérisation : des horizons, des transitions entre horizons, de l'environnement du site, du fonctionnement saisonnier ;
b – l'interprétation ;
c – le rattachement proprement dit à une référence ou à un grand ensemble par un raisonnement pédologique. Le rattachement à une référence peut être simple (le solum présente les propriétés caractéristiques d'une seule référence) ; il peut être double (le solum présente des propriétés caractéristiques de deux références) ou imparfait

(les caractères du solum ne correspondent exactement à aucune référence).

II - POINTS ESSENTIELS DE LA DISCUSSION

Ils peuvent être résumés de la façon suivante :

1 - Les participants ont été intéressés par la présentation du Référentiel Pédologique, mais n'ont pas fait tellement la différence avec un système de classification, surtout si la caractérisation se situe à un niveau très bas ; dans ce cas, le Référentiel Pédologique pourrait apparaître comme une sorte de "Soil Taxonomy *bis*".

2 - Le référentiel doit rester ouvert, de façon à pouvoir incorporer tous les éléments qui seront découverts ultérieurement.

3 - Il y a eu unanimité quant à l'intérêt d'une bonne caractérisation des horizons tropicaux spécifiques. Cela devrait être relativement aisé pour la zone tropicale soudanienne. En outre, il faudrait se mettre d'accord sur les dénominations et notations appropriées.

4 - Les pédologues doivent toujours tenir compte de l'aspect général du sol (de sa "tête"), et ne pas s'enfermer trop rigidement dans un système de classification, quel qu'il soit, basé sur des caractéristiques particulières.

5 - En ce qui concerne les sols tropicaux, les pédologues africains francophones se sentent concernés et souhaitent pouvoir intervenir dans les travaux en cours.

BILAN DU SEMINAIRE ET ORIENTATIONS POUR L'AVENIR

G. PEDRO

PRESENTATION DU BILAN

"Bien connaître les sols pour mieux les utiliser", c'est en premier lieu dépasser les problèmes de classification :

- d'abord parce que les classifications ont montré leurs limites et leur ambiguité. Le document publié par l'ISRIC (Technical paper n° 16. Comparative classification of some deep well-drained red clay soils of Mozambique) est éloquent à ce sujet, tant est grande la dispersion des dénominations proposées par 16 pédologues chevronnés en référence à la Soil Taxonomy et à la Légende FAO, et ce, même au niveau d'une classe ;

- ensuite, parce que la compartimentation pédologique doit faire apparaître, dans la mesure du possible, des limites "naturelles".

De ce point de vue, il a été montré au cours de SOLTROP 89 qu'on pouvait procéder de deux manières, suivant le temps imparti à l'opération cartographique :

- si le temps est relativement court, une observation attentive des paysages et une prise en compte de l'action des facteurs externes suffisent à esquisser la structure du domaine étudié et à préciser les composantes pédologiques. M. RAUNET a exposé ce genre de méthode avec laquelle, si l'on se réfère aux posters SOLTROP 89, on peut établir des documents cartographiques de niveaux 1, 3 ou 4.

- si on a la maîtrise du temps et des crédits de recherche, on se doit d'aller plus loin et de prendre en compte aussi, à côté de la structure générale, d'autres éléments importants tels la genèse, le fonctionnement et l'évolution du système. Il faut donc faire intervenir, à un haut niveau d'analyse, l'action des facteurs internes et la dynamique pédologique (système-sol de P. BRABANT). Tout ceci implique d'abord une

reconnaissance générale (niveau 1), qui va permettre de choisir des sites représentatifs (niveau 2), puis, sur ces sites, des études détaillées et pluri – annuelles, portant sur la constitution et la dynamique du système. Ce n'est qu'à l'issue de ces recherches que l'on peut aborder aisément les travaux cartographiques de niveaux 3, 4 et 5.

*

* *

Par ailleurs, "*bien connaître les sols*" implique de dépasser la notion relativement étriquée du sol, qui se trouve plus ou moins dans le subconscient des agropédologues, et de prôner une étude du sol dans son intégralité.

Or ceci signifie :
- de s'impliquer encore plus dans l'observation des faits et des caractères ;
- de considérer ensemble et simultanément tout ce qui est latéralement lié (système – sol) ;
- de faire intervenir non seulement les horizons de surface, mais *tous* les horizons de la couverture qui jouent un rôle dans le fonctionnement dynamique du système et, de ce fait, dans les problèmes d'alimentation hydrique et minérale des plantes ;
- de se préoccuper de la variabilité spatiale à grande échelle, surtout pour le choix des stations expérimentales et des points d'essais agronomiques ;
- d'avoir bien à l'esprit qu'en régions tropicales le sol est un système fragile ; de la sorte, il ne suffit pas de le pourvoir en éléments nutritifs, il faut en même temps maintenir son intégrité lors de la mise en valeur (*sustainability*). La connaissance et la maîtrise des caractéristiques physico – hydriques comptent tout autant, si ce n'est plus, que les aspects chimiques liés à la fertilisation.

I - ASPECTS GEOGRAPHIQUES - FORCES ET FAIBLESSES EN AFRIQUE DE L'OUEST

Deux constations se sont imposées à l'issue des travaux :

- une connaissance encore très insuffisante de la pédologie en zone tropicale humide forestière (Cameroun, Congo, Côte d'Ivoire, Gabon, Guinée ...)[1], ce qui implique la réalisation d'études approfondies à deux niveaux :
  . niveau 1 : structure générale des paysages, avec appoint des travaux de télédétection, mais surtout nécessité de disposer de couvertures radar, qui ont montré leur intérêt pour ce genre de prospections en Amérique Latine ;
  . niveau 2 : choix de sites représentatifs et mise en place d'études dynamiques (hydropédologiques) de bassins versants.
  Il va sans dire que ce genre d'opérations nécessite un support financier important.

- une connaissance relativement bonne de la zone soudanienne avec les travaux de sites réalisés jusqu'ici (niveau 2). Les recherches effectuées, par exemple Ndok (Nord Cameroun) par P. BRABANT et plus récemment à Boro Borotou (Côte d'Ivoire) par E. FRITSCH *et al.* peuvent être considérées comme des

[1] C'est à ce propos que la notion ancienne de "latérites" est revenue à l'usage dans un certain nombre d'études tropicales de ces dernières années, qui est en fait une forme d'expression du malaise actuel pour appréhender ces formations par la voie pédologique classique. Dans la réalité, ce mot recouvre toutes les couvertures pédologiques des zones tropicales qui sont particulièrement épaisses, vieilles et très évoluées géochimiquement, et dont la description fait appel à des regroupements d'horizons. C'est ainsi que l'on tend à considérer 3 ensembles : un ensemble inférieur altéritique, un ensemble intermédiaire d'accumulation et un ensemble supérieur meuble, que certains auteurs (A. LEVEQUE, P. FAURE, par exemple) ont désigné sous le nom de niveaux (I, II, III).
En réalité, ce vocable recouvre un monde tout à fait particulier de la pédologie, dont on n'a pas encore trouvé la "clé".

exemples typiques de recherches de niveau 2, donc transposables à tous les systèmes – sols similaires.

Il est bon de noter ici que ce genre de travaux ne constitue pas à proprement parler une méthode de compartimentation à grande échelle, mais se présente avant tout comme une recherche en vue d'aboutir à une meilleure compartimentation de l'espace.

II – MODALITES DE COLLABORATION ET DE PARTENARIAT

En fonction des orientations et des constations effectuées tout au long du Séminaire SOLTROP 89, le problème du partenariat pourrait déboucher sur deux types d'action coopérative :

- une se déroulant sur le terrain en Afrique,
- une seconde située principalement en France.

1. Travaux de recherche et mise sur pied d'ateliers en Afrique

Seront présentés successivement les cas de la zone forestière et de la zone soudanienne.

a. En zone forestière, comme il vient d'être indiqué plus haut, les travaux se situent à deux niveaux :
   - reconnaissance et dénombrement des systèmes – sols caractéristiques, avec l'aide *impérative* dans ces milieux difficiles de la couverture radar. B. VOLKOFF pourrait faire le point à ce sujet et présenter un plan aux autorités de tutelle ;
   - choix de quelques sites représentatifs. Etude de leur constitution et suivi régulier de leur fonctionnement pendant quelques années (à définir avec les pays concernés).

b. En zone soudanienne, le plan d'action suggéré par P. BRABANT semble avoir acquis l'adhésion des participants (*Cf.* proposition ci – après) ; brièvement il comporte trois volets :

   - **court terme** : mise sur pied dès que possible (1990) d'un atelier de travail sur le terrain dans une région bien

connue, afin de présenter le résultat des recherches approfondies réalisées jusqu'ici. Groupant une quinzaine de pédologues africains, cet atelier pourrait se tenir dans le Nord Cameroun. Les buts seraient les suivants :
. présentation des systèmes – sols reconnus ;
. description, reconnaissance et dénominations des horizons caractéristiques ;
. modalités de découpage vertical en fonction de l'échelle du document cartographique à produire ; correspondance avec les classifications ;
. relations avec les problèmes d'aménagement et de mise en valeur.

- **moyen terme** : participation des pays africains avec l'ORSTOM au projet mondial SOTER piloté par l'ISRIC (AISS), puisqu'en ce qui concerne l'Afrique de l'Ouest le maître d'oeuvre désigné par l'ISRIC est l'ORSTOM. Il s'agit de la réalisation d'une carte des sols au 1/1 000 000 d'une vaste zone du domaine soudano – guinéen.
  Souhait d'une collaboration régionale et d'une harmonisation avec la FAO (M. SANT'ANNA).

- **long terme** : mise en place de nouvelles études approfondies sur des systèmes – sols non inventoriés à ce jour (programme à établir avec les pays concernés).

2. Appui en France à des pédologues africains

La poursuite du partenariat implique la possibilité d'accueil en France de pédologues africains francophones en vue de leur perfectionnement pendant des séjours de courte durée (2 à 3 mois).

La réalisation d'un tel programme va de pair naturellement :
- avec la mise en place en France de structures d'accueil (Recherche et Formation) ;
- avec le développement d'un système d'allocation de stages pour chercheurs africains confirmés.

Ces différents points seront à développer auprès des autorités de tutelle.

III – VOEUX EN VUE DE L'ORGANISATION PERIODIQUE DE SEMINAIRES TYPE SOLTROP

Les pédologues africains ont été unanimes à reconnaître l'intérêt de ce type de séminaire, aussi bien au plan intellectuel que sous l'aspect de la convivialité, et à souhaiter qu'une suite soit donnée à ce genre de réunion. Les organisateurs de SOLTROP 89 ont pris acte de ce souhait, qu'ils transmettront à leurs autorités de tutelle (Ministère de la Coopération – ORSTOM ...). Il restera aussi à définir la périodicité la plus adéquate, ainsi que le lieu d'accueil. En tout état de cause, le pays retenu devra disposer d'études de terrain approfondies aux différents niveaux envisagés au cours du séminaire de Lomé.

PROPOSITIONS DETAILLEES EN VUE D'UN PLAN D'ACTION POUR LA CONNAISSANCE ET LA MISE EN VALEUR DES SOLS DE LA ZONE DES SAVANES DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

P. BRABANT

L'analyse des travaux sur les sols effectués depuis 1945 en Afrique francophone montre qu'il faut distinguer deux zones principales :

- la zone forestière humide, déjà largement défrichée en 1989, où dominent les sols ferrallitiques ;
- la zone des savanes, avec alternance de saison sèche et humide. Les sols y sont beaucoup plus variés que dans la zone forestière ; cependant, la majorité d'entre eux est constituée par les sols ferrugineux tropicaux et les autres types de sols qui leurs sont étroitement associés dans le paysage.

Le plan d'action qui est proposé ne concerne que les sols de la zone des savanes, parce que l'état actuel des connaissances sur ces sols est beaucoup plus avancé que sur les sols de la zone forestière.

Ce plan comporte trois types d'activités, se déroulant à court, moyen et long terme.

I - ACTIVITES A COURT TERME : OBSERVATION ET CARACTERISATION DES HORIZONS DES SOLS TROPICAUX

Au cours du Séminaire SOLTROP 89, nous avons pu constater, durant les exposés comme sur le terrain, que l'identification d'horizons bien caractérisés était une opération tout à fait fondamentale pour connaître les sols. Par ailleurs, nous savons que le CPCS, le système FAO et la Soil Taxonomy présentent des lacunes, en ce qui concerne la définition des horizons des sols tropicaux. Prenons l'exemple de l'horizon rougeâtre

d'accumulation d'hydroxydes de fer, si caractéristique des sols ferrugineux et si pratique à utiliser pour identifier ces sols ; cet horizon n'est répertorié dans aucune classification ; ni la CPCS, ni la FAO, ni la Soil Taxonomy ne le mentionnent.

D'autre part, il s'avère que la caractérisation et l'identification des horizons fondées sur des analyses chimiques de laboratoire présentent de nombreux inconvénients, alors que le choix de caractères morphologiques est plus fiable et plus pertinent. En contrepartie, ce dernier nécessite une observation minutieuse sur le terrain, activité qu'on aurait, semble-t-il, tendance à négliger.

Des travaux ont déjà montré que la gamme des horizons dans la zone des savanes de l'Afrique sub-saharienne n'est pas large et que ces horizons sont homologues d'une région à l'autre.

Par conséquent, la première proposition consisterait à organiser des ateliers de terrain (*Field Workshop*), dont l'objectif serait d'apprendre aux participants à identifier les principaux horizons de la zone des savanes par l'observation sur le terrain, et ensuite à leur montrer comment ces horizons s'ordonnent dans le paysage pour constituer des systèmes-sols.

Les résultats obtenus pourraient être valorisés, entre autres, par une proposition commune adressée à l'Association Internationale de la Science du Sol (5ème commission) d'un référentiel des horizons pour les sols tropicaux.

La mise en oeuvre de ces ateliers devrait se faire en tenant compte de quelques règles :
- le nombre de participants ne doit pas être trop élevé : 12 à 15 au maximum ;
- la priorité doit être donnée aux jeunes chercheurs qui débutent leur carrière et qui ne sont pas encore surchargés d'obligations administratives ;
- le terrain doit être choisi dans une région où de nombreuses études détaillées ont déjà été effectuées.

Le Nord Cameroun pourrait convenir pour le premier atelier de terrain. Nous proposons donc à Monsieur BINDZI TSALA, Directeur du Centre National des Sols de ce pays, de contacter ses autorités de tutelle et de nous faire savoir si celles-ci donneraient leur accord pour la tenue de ce premier atelier de terrain.

II – ACTIVITES A MOYEN TERME : INVENTAIRE REGIONAL DES SYSTEMES – SOLS

La zone des savanes de l'Afrique de l'Ouest a été largement prospectée depuis une quarantaine d'années. Deux mille cartes de sols environ ont été réalisées et publiées.

Pour lire et comprendre ces cartes, il est nécessaire de consulter les légendes. Or, presque toutes ces cartes ont une légende fondée sur les classifications de sols. Ces classifications ont évolué durant ces quarante années ; de plus, elles sont différentes d'un pays à l'autre. Tout cela fait que la couverture cartographique régionale de l'Afrique sub – saharienne apparaît comme très hétérogène et sans corrélation apparente d'un pays à l'autre.

Pourtant, nous savons que des sols portant des dénominations différentes peuvent être regroupés dans le même ensemble et, par conséquent, être soumis au même mode d'aménagement rural.

Citons par exemple les sols de Casamance, les terres de Barre au Togo, au Bénin, au Nigéria, les Koros du Tchad. Dans les légendes des cartes, ils sont dénommés "sols ferrugineux tropicaux", "sols faiblement ferrallitiques", "sols ferrallitiques faiblement désaturés" ou encore "acrisols", "lixisols", "ultisols". En réalité, ils constituent un ensemble relativement homogène présentant la même association ordonnée d'horizons ; autrement dit, ils constituent un même type de système – sol.

L'objectif de cet inventaire est donc de réactualiser toutes ces cartes de sols, d'effectuer les corrélations nécessaires entre elles et d'harmoniser les légendes.

Pour cela, il faut commencer par inventorier les systèmes – sols de la zone des savanes (dont une douzaine sont déjà connus) et rattacher ensuite les diverses unités des cartes de sols existantes au système – sol auquel elles appartiennent.

Ce type de travail a déjà été effectué dans le Nord Cameroun (P. BRABANT et M. GAVAUD, 1985). Une trentaine de cartes de sols à différentes échelles ont été corrélées entre elles, et il en a résulté une

carte de synthèse beaucoup plus simple, et surtout mieux adaptée aux besoins des utilisateurs.

L'inventaire que nous proposons de réaliser à moyen terme pourrait être mené par un coordinateur régional, avec la collaboration des services nationaux des pays concernés et l'appui des instituts internationaux de recherche agronomique implantés dans la région.

La méthode de travail consisterait essentiellement à valoriser les cartes de sols existantes et d'autres travaux effectués sur des sites représentatifs depuis une quinzaine d'années. L'accent sera mis sur les techniques d'identification des systèmes – sols par télédétection et sur le traitement des données par l'informatique.

Les résultats obtenus au terme de cet inventaire seraient :
- de simplifier considérablement les cartes d'inventaire des ressources en sols de l'Afrique des savanes sub – sahariennes ;
- de produire des cartes comportant une légende non taxonomique, d'une lecture plus facile pour les utilisateurs, et mieux adaptée pour effectuer l'évaluation des terres ;
- de faciliter le transfert des connaissances d'un pays à l'autre. Que deux pédologues sachent, au moins, si leurs discussions portent sur le même objet (ce qui n'est pas toujours évident en Science des Sols) ;
- de faciliter aussi le transfert de l'expérimentation agronomique et d'opérer avec le maximum de chances de succès, sachant que le transfert s'effectue d'un type de terrain à un autre terrain homologue.

Le projet SOTER, présenté au Séminaire FAO de Cotonou en novembre 1988, a le même objectif. Mais sa mise en oeuvre est actuellement freinée par des contraintes administratives et financières.

Il nous paraît trop ambitieux de lancer dans l'immédiat un vaste programme régional. Il serait plus raisonnable de sélectionner, après le Nord Cameroun, une seconde zone – test.

Le Togo, qui est déjà couvert par de nombreuses cartes de sols à diverses échelles, conviendrait pour un programme à moyen terme d'une durée approximative de trois ans.

Les résultats obtenus pourraient alors être extrapolés aux pays franco – phones voisins (Bénin, Burkina Faso, Nord de la Côte d'Ivoire, Mali, Niger) et peut – être aux pays anglophones (Nord du Ghana et du Nigéria).

III - ACTIVITES A LONG TERME : APPUI SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LES ETUDES DETAILLEES DE SYSTEMES - SOLS DANS DES SITES REPRESENTATIFS

Parmi les systèmes - sols déjà répertoriés dans la zone des savanes, quelques uns (moins de 5) sont déjà connus dans le détail à partir d'études faites dans des sites représentatifs : au Burkina Faso, au Cameroun, en Côte d'Ivoire et au Tchad.

L'expérience a montré le grand intérêt de l'étude de sites représentatifs pour connaître l'organisation du sol dans le paysage et son fonctionnement saisonnier, pour en faire ensuite un inventaire détaillé en vue de l'aménagement et de la mise en valeur agricole.

L'étude de sites représentatifs devrait être une activité de base des services nationaux des sols. Ces sites sont à sélectionner soigneusement en fonction de l'importance de chaque système - sol pour le développement rural du pays, en tenant compte de sa nature, de sa localisation, de sa superficie et des contraintes socio - économiques.

Or ces études sont longues, coûteuses, et elles nécessitent parfois un équipement non disponible dans ces services nationaux.

C'est donc dans ce domaine que devrait porter la plus grande part de l'appui scientifique, technique et financier (si possible) des instituts de recherche français et européens spécialisés dans les sols tropicaux.

Cet appui est d'autant plus intéressant que ces travaux peuvent également servir de support à des thèses, souvent utiles, parfois nécessaires pour les jeunes chercheurs nationaux.

Le principal résultat attendu serait de fournir, sur chaque système - sol étudié, les données de base pour le cartographier à moyenne et à grande échelle, pour mieux l'utiliser dans un souci de conservation et pour faire une évaluation des terres.

Chaque système - sol pourrait être alors segmenté en unités de paysage homogènes, correspondant au même type d'utilisation et d'aménagement.

Enfin viendrait la dernière opération, qui consiste à corréler ces unités avec les termes vernaculaires locaux et avec les unités taxonomiques des classifications.

Ce serait l'ébauche d'un véritable répertoire régional des sols qui s'avère de plus en plus nécessaire.

CEREMONIE DE CLOTURE

REMERCIEMENTS DU COMITE D'ORGANISATION ET LECTURE DES RECOMMANDATIONS GENERALES DU SEMINAIRE

G. PEDRO
ORSTOM Paris

Le Président du Séminaire, Président de la Commission Scientifique Hydrologie – Pédologie de l'ORSTOM, a remercié tout d'abord les Autorités togolaises (Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique – Université du Bénin) et les Autorités françaises : Ministère de la Coopération (sous – Direction de la Recherche), ORSTOM et Agence de Coopération Culturelle et Technique (ACCT), pour leur appui constant dans la réalisation de ce Premier Séminaire Franco – Africain de Pédologie Tropicale. Il rappelle à cet effet que SOLTROP 89 a rassemblé 52 pédologues africains appartenant à 18 pays, au Bureau inter – africain des sols (OUA) et à la FAO, 19 pédologues français de Métropole ou en affectation en Afrique, appartenant à l'ORSTOM, au CIRAD et à l'INRA, et 7 pédologues européens en poste en Afrique dans le cadre de la FAO et de l'IITA.

Il a ensuite fait brièvement état des principales conclusions et recommandations qui ont résulté des travaux du Séminaire et des échanges ayant eu lieu lors de la séance de synthèse (*Cf.* ci – dessus) :

1 – Dépasser en Science des Sols le problème des classifications de sols. La compartimentation de l'espace pédologique faisant apparaître les limites naturelles peut être réalisée de nos jours sans faire appel à des systèmes de classification. Seul un étiquettage *a posteriori* en vue des transferts scientifiques ou technologiques, implique une référence à une classification générale.

2 – A l'avenir, mettre l'accent en Afrique de l'Ouest sur des travaux de recherche localisés en zone humide forestière, avec deux sortes d'opérations impliquant un appui financier des Autorités compétentes :
   - couverture radar du domaine forestier,
   - choix et études de sites représentatifs.

3 – Organiser dans un avenir très proche (1990) un atelier de terrain en zone soudanienne (Nord Cameroun) pour les pédologues africains concernés (15 – 20) sous la direction de P. BRABANT. Cet atelier de perfectionnement comporterait les volets suivants :
- reconnaissance des systèmes – sols caractéristiques,
- reconnaissance des horizons spécifiques ; problèmes de dénomination,
- modalités du découpage vertical,
- relations avec la classification des sols,
- conséquences sur le plan de la mise en valeur.

4 – Prévoir en France des structures d'accueil et des allocations de stage de courtes durées (2 – 3 mois), en vue de recevoir chaque année des pédologues africains dans les Instituts tropicaux français.

5 – Envisager pour l'avenir l'organisation périodique de Séminaires pédologiques franco – africains de ce type (SOLTROP II...). Les pédologues français spécialistes des régions tropicales se sont dits prêts à s'y investir. Quant à la mise sur pied et à la réussite de ce genre de réunions, elle implique :
- un appui moral et financier des Autorités françaises de tutelle (Ministère de la Coopération – ORSTOM) ;
- un appui scientifique et technique du pays africain qui serait l'hôte du Séminaire.

Si SOLTROP 89 peut être considéré comme une réussite, c'est sans aucun doute parce que toutes les conditions en question ont été réunies au Togo.

DISCOURS DE CLOTURE

K.F. SEDDOH
Université du Bénin – BP 1515 – Lomé – TOGO

Messieurs les Membres du Comité Central du R.P.T.,

Excellences Messieurs les Ambassadeurs et Représentants des Organisations Internationales,

Monsieur le Représentant de la FAO,

Mesdames et Messieurs les Directeurs et Chefs de Services,

Chers amis participants au Premier Séminaire Franco-Africain de Pédologie Tropicale,

Honorables invités,

Mesdames, Messieurs.

Au terme d'une semaine de travail dense et assidu qui vous a permis de passer au crible les sols de notre continent, je voudrais, au nom du Ministre de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique, adresser aux uns et aux autres mes félicitations pour la qualité de l'important travail accompli.

Je pense aux conférenciers principaux qui nous ont présenté des exposés clairs abondamment documentés et parfaitement bien illustrés.

Certaines communications représentaient plus d'une dizaine d'années de travail et reflétaient une expérience riche et diversifiée accumulée patiemment au fil des ans. Plusieurs des exposés ont été des exemples de pédagogie s'appuyant sur des posters de grande qualité, où des phénomènes et des méthodologies complexes nous ont été présentés de façon simple, dépouillés de tous les détails qui risquaient d'embrouiller la compréhension des messages.

Nous nous sommes réjouis de retrouver ces posters sur le terrain, pour illustrer la présentation des profils que nous étions invités à observer.

C'est l'occasion de rappeler la minutie de l'organisation matérielle. Cette recherche de la perfection a été retrouvée non seulement dans la présentation des documents de travail, mais également sur le terrain où l'intendance a suivi d'une façon qui frôlait parfois le prodige.

Tout cela a permis de placer les participants au séminaire dans des conditions excellentes, ce qui a sans doute facilité la concentration, la discipline et l'assiduité, qui représentent autant de signes évidents d'intérêt.

Enfin, je n'oublie pas la vigilance permanente du Professeur Georges Pédro, qui a joué de façon parfaite son rôle d'animateur scientifique du séminaire, saisissant toutes les occasions pour faire des mises au point et inviter les conférenciers à faire le lien entre les exposés introductifs et les observations de terrain.

Monsieur l'Ambassadeur, Mesdames, Messieurs, en vous accueillant à Lomé, nous avions formulé le voeu que votre réunion soit un dialogue entre spécialistes de Science des Sols travaillant dans des conditions diverses et ayant des orientations et préoccupations différentes.

La richesse des débats qui ont entouré les exposés introductifs et les discussions parfois animées sur le terrain nous ont donné la preuve que cet objectif a été largement atteint.

Au-delà du dialogue et de l'échange qui ont permis de créer ou de renforcer les liens d'amitié, les discussions auront facilité la mise en valeur de certaines constantes de la pédologie tropicale. Tel problème évoqué au sujet des sols du Togo a été étudié par d'autres chercheurs au Cameroun ou au Sénégal.

La confrontation des différents résultats permettra peut-être d'aller plus loin dans l'explication de ces phénomènes.

Les études de détail qui nous ont été présentées, aussi bien pendant les exposés du séminaire que sur le terrain, montrent que c'est à travers de telles recherches que l'on parviendra à mieux cerner la dynamique spatiale des couvertures pédologiques afin de parvenir à une meilleure compréhension des systèmes. C'est cela qui fera de la carte pédologique une véritable synthèse, impliquant non seulement la description de profils pédologiques, mais également la compréhension que le pédologue a de la génèse de ces profils et de leurs potentialités agronomiques.

J'en viens donc aux aspects appliqués de la pédologie qui ont été sous-jacents à toutes les explications présentées. Sur le plan de la méthodologie, chacun des participants a pu apprécier les cinq niveaux de connaissance, allant de la distribution des sols dans le paysage jusqu'à l'évaluation des terres en vue de leur aménagement.

En outre, les recherches agro-pédologiques qui nous ont été présentées nous ont rappelé que le sol est un système vivant qui se forme, évolue et peut mourir. La manière dont ce sol est utilisé joue un rôle déterminant dans sa dégradation ou dans le maintien de ses potentialités agronomiques. Il faut parfois plus d'une dizaine d'années pour reconstituer un sol complètement épuisé.

Tout cela nous rappelle la pertinence du thème que vous avez choisi pour votre séminaire. Il faut bien connaître un sol pour être en mesure d'en tirer le meilleur parti pour un développement agronomique harmonieux.

Il ne fait aucun doute que la pertinence de ce thème va largement au-delà du cadre d'un seul séminaire. Je formule donc le voeu que vous puissiez vous retrouver sur d'autres sites pour poursuivre la discussion qui a si bien commencé à Lomé.

Le séminaire de Lomé aura également eu le mérite de permettre la mise en valeur d'une donnée importante, qui fait la force de la francophonie. C'est que la diversité des provenances et des horizons géographiques, la diversité des cultures, la diversité des écoles de formation, loin de constituer un facteur de division, peut devenir une véritable richesse lorsque l'on sait faire passer les petites différences au second plan pour mettre l'accent sur les priorités dominantes.

Cette vision politique est également celle qui forme le substrat de la doctrine de notre parti, le Rassemblement du Peuple Togolais, qui a fait de la multitude des ethnies représentées dans notre pays un peuple uni qui regarde dans une seule direction : celle d'un développement économique et culturel harmonieux.

En renouvelant mes remerciements au Ministère Français de la Coopération, à l'Agence de Coopération Culturelle et Technique et à l'ORSTOM pour le soutien qu'ils ont accordé à l'organisation de ce Premier Séminaire Franco-Africain, je souhaite à chacun de vous un bon retour dans son pays et je déclare clos, au nom du Ministre de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique, le Premier Séminaire Franco-Africain de Pédologie Tropicale.

Vive l'amitié et la solidarité pour un renforcement de l'espace francophone.

POSTERS

LISTE DES POSTERS SOLTROP 89

Numéros des posters	
–	Poster de présentation du Séminaire : Bien connaître les sols pour mieux les utiliser.
1	Les 5 niveaux de la connaissance des sols.
2 – 3	Niveau 1 – Travaux exploratoires Poster 2 : objectifs et méthodes. Poster 3 : résultats.
4 – 5 – 6	Niveau 2 – Etude de sites représentatifs Poster 4 : objectifs et méthodes. Poster 5 : résultats. Poster 6 : interprétation des résultats.
7 – 8	Niveau 3 – Inventaire national des ressources en sols Poster 7 : objectifs et méthodes. Poster 8 : . résultats de l'inventaire, . la carte, l'échelle, la légende.
9 – 10	Niveau 4 – Travaux appliqués à un projet de développement Poster 9 : objectifs et méthodes. Poster 10 : résultats : . la carte, l'échelle, la légende, . l'évaluation des terres.

11 – 12 Niveau 5 – Travaux appliqués à la mise en oeuvre d'un projet de développement

Poster 11 : objectifs et méthodes.
Poster 12 : résultats :
. la carte, l'échelle, la légende,
. l'évaluation des terres,
. la corrélation avec les classifications des sols.

13 Etat et risques de dégradation du sol.

14 – 15 Evaluation des terres. Quelques règles de base.

16 – 17 – 18 Comment utiliser les classifications des sols ?

Poster 16 : ce qu'il ne faut pas faire.
Poster 17 : ce qu'il est recommandé de faire.
Poster 18 : la complexité est plus apparente que réelle.

19 Protection et conservation des sols : une priorité absolue (projet GLASOD – zone n° 1).

LES SOLS DU TOGO ET LA CULTURE COTONNIERE

D. BLAVET*, E. JALLAS et R. POSS***
**ORSTOM - BP 375 - Lomé - TOGO*
***IRCT - BP 1 - Anié - TOGO*

1 - L'IMPLANTATION IRCT AU TOGO : DU ZONAGE ECOGEOGRAPHIQUE AUX SITES EXPERIMENTAUX.

Le Togo a été divisé en 10 méso-régions, qui prennent en compte la pluviosité, la densité de population et la nature des sols. Les 8 points d'appui de l'IRCT et la station centrale de Kolocopé sont répartis du Nord au Sud de la zone cotonnière. Presque toutes les méso-régions possèdent au moins un point d'appui.

2 - LE SITE EXPERIMENTAL : DE L'ETUDE PEDOLOGIQUE A L'EXPERIMENTATION AGRONOMIQUE.

Au sein d'une station, il existe une variabilité toposéquentielle ou latérale qui s'exprime par la présence de sols très différents. Cette variabilité est déterminante dans le choix de l'implantation des blocs d'essai.

Cependant deux stations très distantes peuvent présenter des sols morphologiquement proches. Les expérimentations de techniques culturales conduites sur l'une peuvent donc orienter des essais similaires réalisés sur l'autre.

3 - L'INTERPRETATION AGRO-PEDOLOGIQUE : INTEGRATION DES DONNEES DU MILIEU ET DES RESULTATS DES ESSAIS.

La prise en compte des caractéristiques agro-pédologiques stationnelles permet de compléter l'interprétation des résultats expérimentaux.

4 – CONCLUSION

En situant les résultats obtenus sur les points d'essais dans le contexte agro – pédologique local, il est possible de proposer des recommandations régionalisées adaptées à chaque type de milieu.

ANALYSE DU PROFIL CULTURAL

Ph. DE BLIC
ORSTOM Montpellier

L'analyse de l'organisation macrostructurale du sol à ses différents niveaux associe étroitement approche morphologique et mesures physiques afin de mieux comprendre les relations existant entre techniques culturales, fonctionnement du sol et comportement des peuplements végétaux.

A chaque niveau d'organisation macrostructurale, on peut identifier et cartographier, à un moment donné, un certain nombre d'unités qui se distinguent les unes des autres par leur structure, c'est-à-dire :
- par la taille, la nature et l'agencement des unités structurales d'ordre immédiatement inférieur qui les constituent ;
- par certaines propriétés découlant de cet arrangement (porosité, compacité par exemple).

Quatre niveaux peuvent être reconnus dans l'organisation macrostructurale des sols :

1 - l'élément structural, terme qui regroupe à la fois les éléments pédiques naturels et les mottes et fragments créés par les outils agricoles ;

2 - le volume structural homogène, unité de base majeure pour caractériser l'hétérogénéité latérale du sol ;

3 - l'horizon, unité de base majeure pour caractériser l'hétérogénéité verticale du sol ;

4 - le profil cultural, considéré non pas seulement comme un moyen d'analyser la couverture pédologique, mais bien comme un niveau d'organisation majeur du système sol-plante.

Cette analyse de l'organisation macrostructurale peut et doit souvent être complétée :

- par l'étude des microstructures (fonds matriciels) et des mégastructures (couverture pédologique) ;
- par une analyse fine de la répartition et de la morphologie des racines.

Elle peut alors constituer un outil très efficace pour tout ce qui concerne les diagnostics de fertilité et les transferts d'échelle.

INFLUENCE DU REGIME HYDRIQUE SUR LA POROSITE ET L'ORGANISATION DES SOLS D'UNE COUVERTURE FERRALLITIQUE DE LA REGION DE TANGA (TANZANIE)

M. KILASARA* & D. TESSIER **
**SOKOINE UNIVERSITY - MOROGORO - TANZANIE*
***Laboratoire des sols INRA - 78000 VERSAILLES - FRANCE*

Les sols ferrallitiques de Tanzanie ont une très forte tendance à se compacter, surtout dans les horizons de surface. Aussi sont-ils susceptibles, lors de la mise en valeur, de subir une forte dégradation de leurs propriétés physiques.

Une recherche permettant d'étudier l'évolution de ces sols a été menée pour caractériser ce phénomène. A cet effet, on a procédé à l'étude simultanée de la porosité et du contenu en eau, à des potentiels de l'eau variés, de différents horizons des sols.

La séquence étudiée est en jachère et comporte trois sols du sommet au bas de versant : sols ferrallitiques typiques (ferralsols rhodiques - FAO, tropeptique eutrustox - Soil Conservation Service), sols ferrallitiques faiblement désaturés (luvisols ferriques - FAO, ochric rhodustalfs - S.C.S.) et sols hydromorphes (fluvisols eutriques - FAO, eutric fluvaquents - S.C.S.).

Les résultats obtenus montrent que la porosité (indice des vides) ainsi que le contenu en eau (indice d'eau) mesurés dans les conditions hydriques extrêmes (pF 1,5 et 4,2) sont des paramètres fondamentaux pour suivre l'évolution des propriétés propres à chaque type de sol.

L'indice des vides à pF 1,5 et l'indice d'eau diminuent systématiquement dans l'ordre suivant : sols ferrallitiques typiques > sols ferrallitiques faiblement désaturés > sols hydromorphes.

Ce sont les horizons supérieurs Ap et AB des sols bien drainés d'une part, les horizons hydromorphes d'autre part, qui sont les moins poreux, mais aussi les moins hydratés, par rapport aux horizons B oxiques ou à caractère oxique.

Deux sortes de dégradation structurale ont été mises en évidence : une associée à l'influence de l'hydromorphie, et une seconde qui découle de la variation des conditions atmosphériques (cycles d'humectation – dessiccation) sur les horizons supérieurs (Ap et AB). Les résultats montrent que la dégradation structurale des horizons supérieurs n'intervient qu'aux niveaux d'organisation macroscopiques du sol correspondant aux pores voisins de 50 µm, tandis que celle provoquée par l'hydromorphie se situe même au – delà de l'échelle macroscopique. Les horizons hydromorphes sont gonflants et peuvent rester saturés d'eau, même jusqu'à pF 3. En revanche, les horizons oxiques ou à caractère oxique sont plus rigides et pratiquement toujours aérés.

En conclusion, il apparaît que le premier stade de la dégradation des propriétés physiques de ces sols consiste en une diminution de la macroporosité. Celle – ci peut aller jusqu'à sa disparition dans certains horizons hydromorphes. La diminution de la microporosité, telle que le révèlent les teneurs en eau à pF 4,2, apparaît comme étant un facteur de la dégradation de la structure beaucoup plus grave que l'évolution précédente, car il affecte l'organisation des constituants argileux eux – mêmes. Les courbes de rétention d'eau montrent ainsi comment et à quels niveaux d'organisation la dégradation du sol se produit. Il s'agit donc d'une approche plus complète et plus satisfaisante que celle recourant à des méthodes classiques comme l'étude de la stabilité structurale par l'intermédiaire de tests.

CONTRIBUTIONS COMPLEMENTAIRES

LES RESEAUX IBSRAM DE RECHERCHE SUR LA GESTION DES SOLS : APPROCHE, METHODOLOGIE, DEVELOPPEMENT

M. Latham
IBSRAM – P.O. Box 9–109 – Bangkok – THAILANDE

RESUME

L'IBSRAM (International Board For Soil Research And Management) a été créé en 1983 pour promouvoir des recherches appliquées en science du sol, destinées à accroître une production agricole viable dans les pays en voie de développement.

L'approche IBSRAM est une démarche multidisciplinaire, incluant agronomie, pédologie et sciences sociales, destinée à trouver des systèmes de culture adaptés aux conditions du milieu et répondant aux critères de profitabilité, sustainabilité et acceptabilité par les paysans. Les diverses conditions socio–économiques existant en zones tropicales amènent à rechercher des options à divers niveaux d'investissement. Les solutions ne pourront être transférées aux paysans que par des études de détail des sols – ne portant pas seulement sur la classification, mais aussi sur les caractères édaphiques et leurs variations spatiales.

La méthode utilisée par l'IBSRAM pour atteindre ces objectifs est celle de la constitution de réseaux de recherche collaborative. Dans ces réseaux, l'IBSRAM, les coopérateurs – organisations de recherche agronomique nationales – et les donateurs doivent agir en étroite collaboration. L'IBSRAM a établi trois réseaux de recherche en Afrique :

- *gestion des vertisols en milieux semi–arides,*
- *gestion des sols acides des régions humides,*
- *défrichement et mise en valeur agricole des terres.*

INTRODUCTION

Chaque jour nous fournit des exemples de gestion inappropriée des sols tropicaux : ravages de l'érosion au Népal, dégradation des sols en Afrique forestière après défrichement, désertification en zones sahéliennes. Pourtant, pendant de nombreuses années, les agronomes ont conduit des expérimentations en zones tropicales et les pédologues ont levé des cartes de sol. Ces expérimentations et ces cartes auraient normalement dû permettre d'éviter en grande partie ces erreurs. La révolution verte, qui dans les années 70 a permis, grâce aux progrès de la génétique, d'accroître la production de céréales dans les terres fertiles d'Asie et d'Amérique latine, a un moment fait espérer qu'une solution aux problèmes de la production alimentaire en zone tropicale pourrait être trouvée. Hélas, les résultats obtenus dans les terres fertiles se sont révélés peu transposables dans les terrains plus difficiles, en particulier en Afrique. Les cartes pédologiques, peu compréhensibles pour les non-initiés, ont souvent été ignorées par les agronomes. Leur contenu et leur précision ne correspondaient souvent pas aux détails requis.

Dans ce contexte, les Centres de Recherche Agronomique Internationaux (CIRA) du Groupe Consultatif pour la Recherche Agronomique Internationale (GCRAI) ont ressenti la nécessité de créer un organisme coordinateur qui pourrait faire la liaison entre pédologues et agronomes et, par une meilleure prise en compte du facteur sol, faciliter l'adaptation et le transfert des techniques agronomiques nouvelles aux petits paysans. Dans ce contexte, le "Conseil pour la recherche sur les sols et leur gestion" (IBSRAM) a été créé en 1983 avec l'appui de différents pays dont la France ; il avait pour objectif principal la promotion de recherches appliquées en science du sol, en vue de favoriser et d'accroître une production agricole soutenue dans les pays en voie de développement. Plus précisément, l'IBSRAM a concentré son intérêt sur la gestion des sols pour la production de cultures vivrières.

I - APPROCHE

L'approche IBSRAM des problèmes de recherche sur la gestion des sols est une démarche multidisciplinaire. Reconnaissant que de très nombreuses expérimentations ont été conduites sur les composantes de la fertilité des sols, l'IBSRAM a décidé de concentrer ses efforts

sur l'expérimentation de systèmes de culture adaptés aux conditions naturelles, sur l'étude de leur productivité, de leur impact sur le sol et son environnement, et sur leur acceptabilité par les paysans. Agronomie, pédologie et sciences sociales se trouvent ainsi associées afin de trouver des systèmes de cultures adaptés au milieu et répondant aux critères de profitabilité, de sustainabilité et d'acceptabilité.

Envisager les problèmes d'acceptabilité signifie que l'on puisse fournir aux paysans diverses options, en particuler des options ne nécessitant que de faibles investissements. Les solutions agronomiques impliquant l'usage de forts intrants sont maintenant relativement bien connues. Tout le monde a en mémoire les succès de la riziculture en Asie, de la céréaliculture en Inde ou de la culture du soja dans les terres acides des *cerrados* du Brésil. Mais les solutions à faibles intrants existent – elles ? Des recherches récentes ont ouvert la voie dans ce domaine. Sur sols acides tropicaux, SANCHEZ et BENITES (1987), à Yurimaguas au Pérou, ont montré la possibilité d'obtenir un fort accroissement de la production d'un système traditionnel par l'implantation de variétés de riz tolérantes à l'acidité du sol et par une rotation avec du pois niébé (*Vigna unguiculata*). Là où les fermiers, en culture itinérante, produisaient une récolte de 2,8 tonnes de riz en une culture, ils ont réussi à maintenir sept cycles culturaux successifs et à produire 13,8 tonnes de grain sur la même parcelle.

De même, en Inde, l'International Crop Research Institute for the Semi – Arid Tropics (ICRISAT) a pu montrer, sur une expérimentation à long terme, qu'une gestion améliorée des vertisols, incluant la création de planches surélevées pour rallonger la saison de culture par plantation tôt en saison sans risque d'engorgement superficiel, permettait de produire deux cultures successives au cours d'une même saison et de multiplier les rendements par cinq au six par rapport au système traditionnel (KANWAR et VIRMANI, 1987).

Sur les sols de pente, les expérimentations de l'International Institute for Tropical Agriculture (IITA) au Nigéria et de l'Université des Philippines ont montré que l'utilisation de cultures en couloir, ou encore la création de bandes enherbées suivant les courbes de niveau, permettaient de maintenir une production agricole acceptable tout en prévenant l'érosion (LAL, 1987 ; PANINGBATAN, 1987).

Ces techniques et d'autres, fondées sur la suppression des contraintes pédologiques grâce à des méthodes biologiques ou mécaniques, sont – elles transférables directement ?

Pendant un temps, les chercheurs de l'Université de Hawaï et de Porto Rico (SWINDALE, 1978) ont suscité l'espoir que les sols classés au niveau de la famille de la "Soil Taxonomy" pourraient servir de base au transfert des techniques agricoles d'un endroit à un autre. Hélas, les résultats publiés (SILVA *et al.*, 1985) montrent que l'on est loin du compte. Les auteurs du rapport final ne peuvent montrer de corrélations satisfaisantes entre famille de sol et traitements agronomiques, même en présence d'irrigation et de forts apports d'engrais. Ceci ne signifie pas qu'il n'y a pas de possibilité de transfert. Les grandes catégories de sols ont des caractéristiques intrinsèques, telles la texture, la minéralogie, la matière organique ou l'engorgement par l'eau qui les différencient suffisamment pour leur permettre de servir de base au transfert de principes généraux de gestion des sols. Par la suite, toutefois, ces principes ont besoin d'être adaptés aux conditions locales – spécificité géographique – et testés. Une caractérisation détaillée des sites d'expérimentation – non seulement au niveau de la classification, mais aussi au niveau des caractéristiques édaphiques et de leur variations spatiales – permettra, à l'échelle locale, des transferts de résultats expérimentaux vers des systèmes pédologiques et socio – économiques similaires.

II – METHODOLOGIE

Tenant compte des nécessités d'adaptation des techniques agricoles aux conditions spécifiques des milieux considérés, il est rapidement apparu que la création d'une station de recherche expérimentale pour l'étude de la gestion des sols relevait de l'utopie. La recherche sur la gestion des sols nécessite au contraire une démarche multilocale qui permet de mieux apprécier l'efficacité des techniques testées en fonction des variations du milieu. L'expérimentation multilocale à l'échelle d'un continent comme l'Afrique, ou à l'échelle globale, requiert la création de réseaux dans lesquels les organismes de recherche agronomique sont impliqués. L'IBSRAM a donc retenu la création de réseaux en tant que méthode de travail et plus particulièrement la création de réseaux de recherche en collaboration (GREENLAND *et al.*, 1987, IBSRAM, 1988a). Dans ces réseaux de

recherche, l'expérimentation est décidée en commun par les collaborateurs, une coordination est établie afin d'assurer l'homogénéité des travaux effectués, et les participants se réunissent régulièrement afin de comparer leurs résultats et de prévoir les actions à venir. L'agence coordinatrice, dans ce cas l'IBSRAM, joue le rôle de catalyseur pour l'établissement des réseaux, de promoteur pour aider à formuler les projets nationaux et à trouver des financements, de coordonnateur des projets afin d'en assurer le suivi, et de banque de données afin de comparer les résultats des projets nationaux et d'en diffuser les résultats. De plus, l'agence coordonnatrice organise une dissémination de l'information et assure des cours de formation complémentaire sur des sujets intéressant les réseaux. Les coopérateurs participent au choix des objectifs, des expérimentations à mener et des méthodes à utiliser, préparent les projets de recherche, conduisent les expérimentations, traitent les résultats et bénéficient d'un accès à la banque de données. Tout cela nécessite bien évidemment des fonds pour les projets et pour la coordination, fonds qui sont négociés cas par cas avec les donateurs.

Plusieurs conditions doivent être remplies pour qu'un réseau réussisse :

- les recherches doivent être concentrées sur un petit nombre de sujets. Dans les réseaux IBSRAM, une expérimentation centrale par réseau, menée par tous les coopérateurs, a été décidée ;
- les coopérateurs doivent utiliser les mêmes méthodes d'expérimentation et d'analyse ;
- une coordination est nécessaire afin d'assurer l'homogénéité des résultats ;
- les résultats doivent être porteurs d'applications importantes pour le développement agricole afin d'obtenir un soutien des donateurs ;
- un certain enthousiasme est nécessaire de la part de tous les participants afin qu'il n'y ait pas de points faibles dans le réseau.

III - DEVELOPPEMENT

Comment cette approche et cette méthodologie se sont-elles traduites dans les faits ? L'IBSRAM, créé en 1983, a effectivement débuté ses activités en 1985. Au début de 1987, trois réseaux ont été créés en Afrique :

- gestion des vertisols en milieux semi – arides,
- gestion des sols acides des régions humides,
- défrichement et mise en valeur agricole des terres.

De ces trois réseaux, le réseau vertisol est le plus ancien. Son coordonnateur, le professeur Peter AHN, a été recruté en mai 1987. Trois projets sont maintenant en cours d'opération – au Ghana, au Kenya et au Zimbabwe – et quatre en sont au stade de discussions finales – Bénin, Burkina Faso, Ethiopie et Nigéria. Au cours du mois de janvier 1989, un atelier de travail mené au Zimbabwe a permis de discuter les premiers résultats obtenus. Le projet du Zimbabwe de collecte de l'eau et plantation des cultures en fond de billon a été visité et discuté. L'année étant très sèche, l'avantage de la culture en billon, pour laquelle l'eau s'accumule dans le fond de billon, par rapport à la plantation à plat, est apparu très nettement. Vingt – cinq participants africains étaient réunis et les discussions sur la collecte de l'eau, le drainage et l'alimentation minérale des cultures sur vertisols ont été extrêmement animées.

Le réseau sur la gestion des sols acides a mis plus de temps à s'établir. Le coordonnateur, le Dr. Otto SPAARGAREN, a seulement été recruté en mars 1988. Huit projets nationaux, au Burundi, au Cameroun, au Congo, en Côte d'Ivoire, au Ghana, au Nigéria, à Madagascar et au Rwanda, ont été discutés. Les travaux, menés avec de faibles financements, ont débutés au Congo, en Côte d'Ivoire, à Madagascar, et récemment au Cameroun.

La mise en place de ces réseaux a nécessité l'organisation d'ateliers de travail au Cameroun en janvier 1986 (IBSRAM, 1987a), au Kenya en décembre 1986 (IBSRAM, 1987b), en Zambie en mars 1987 (IBSRAM, 1987c) et tout récemment au Zimbabwe en janvier 1989.

En 1988 l'accent a été mis sur la méthodologie à suivre. Deux ateliers de formation ont été organisés ; l'un à l'IITA au Nigéria en mars 1988 sur les problèmes de sélection et de caractérisation des sites ainsi que sur les méthodes à employer pour le suivi des expérimentations (IBSRAM, 1988b), l'autre en septembre 1988 à Yurimaguas, au Pérou, avec l'équipe de l'université de Caroline du Nord, sur les pratiques culturales à mener dans les expérimentations.

Ce processus a pu paraître long à certains d'entre vous qui, associés aux efforts de l'IBSRAM depuis le début, aimeraient voir plus de

projets opérationnels. L'organisation des réseaux, la préparation des projets et la recherche de financement sont des opérations souvent plus longues que prévues. Les réseaux sont toutefois maintenant opérationnels et je suis sûr qu'avec votre aide et celle des donateurs qui nous ont soutenus depuis le début, ils vont maintenant progresser rapidement.

CONCLUSION

Quelle leçon doit-on retirer des deux ans d'activité des réseaux IBSRAM en Afrique ?

- Les sujets de recherche appliquée proposés par l'IBSRAM ont rencontré en Afrique un accueil très chaleureux, même si parfois certains chercheurs auraient préféré travailler sur des sujets plus académiques.

- Les réseaux IBSRAM, bien qu'imparfaits, ont créé des liens qui n'existaient pas toujours entre pédologues et agronomes des différents pays africains, et en particulier entre chercheurs francophones et anglophones.

- La méthode des réseaux – avec réunion préliminaire, préparation de projets (incluant souvent de multiples rédactions), soumission à des donateurs – peut paraître longue et compliquée. Elle est cependant la seule voie possible dans un monde où l'argent pour la recherche se fait rare et sélectif.

- Les réseaux IBSRAM ne doivent pas rompre les liens privilégiés existant entre chercheurs des pays développés et chercheurs africains, mais au contraire doivent les renforcer autour d'objectifs communs et les diversifier en faisant appel à l'intérêt croissant manifesté par de multiples chercheurs dans les pays développés. Ces liens correspondent à une nécessité intellectuelle – une expérimentation doit être utilisée au maximum par des chercheurs venant d'horizons différents – et pratique – un financement auprès d'un donateur est plus simple lorsqu'une coopération avec l'un de ses ressortissants est possible. M. LEVALLOIS, Président du Conseil d'Administration de l'ORSTOM, plaidait dans la dernière lettre de l'ORSTOM pour un véritable partenariat dans les activités de recherche. C'est, me semble-t-il, une voie à poursuivre, tant avec l'ORSTOM qu'avec d'autres partenaires.

- L'utilisation de la science du sol pour le développement agricole en Afrique est une nécessité pressante qui requiert un effort concerté. L'Afrique a besoin de cartes des sols utilisables pour le développement agricole, de méthodes de gestion des sols adaptées, et de plans d'utilisation des sols.

L'IBSRAM, dans le domaine de la gestion des sols qui est le sien, peut aider, avec d'autres partenaires, à définir ces objectifs et à les atteindre. Mais il a besoin pour cela de la compréhension et de la coopération de ses partenaires dans les pays en voie de développement et dans les pays donateurs. L'élaboration même de ce partenariat est un long processus. Il implique non seulement les scientifiques entre eux, quelle que soit leur origine, mais aussi les utilisateurs finaux et les maillons intermédiaires qui représentent la vulgarisation. C'est, me semble-t-il, la seule voie possible pour la création d'une science du sol africaine solide, dynamique et ouverte aux problèmes urgents du développement agricole.

BIBLIOGRAPHIE

GREENLAND (D.J.) & CRASWELL (E.T.) and MAGG (M.), 1987 – International networks and their potential contribution to crop and soil management research. *Outlook on agriculture*, 16(1) : 42 – 50.

IBSRAM (1987a) – Land development and management of acid soils in Africa/Défrichement – mise en valeur des sols acides en Afrique. IBSRAM Proceedings n° 4, IBSRAM. (Bangkok), 183 p.

IBSRAM (1987b) – Management of Vertisols under semi-arid conditions. IBSRAM Proceedings n° 6, IBSRAM (Bangkok), 345 p.

IBSRAM (1987c) – Land development and management of acid soils in Africa II. IBSRAM Proceedings n° 7, IBSRAM (Bangkok), 339 p.

IBSRAM (1988a) – IBSRAM strategy, programmes and budget plans. IBSRAM (Bangkok), 58 p.

IBSRAM (1988b) – First training workshop on site selection and characterization. ISBRAM Technical Notes n° 1, IBSRAM (Bangkok), 298 p.

KANWAR (J.S.) & VIRMANI (S.M.), (1987) – Management of Vertisols for improved crop production in the semi-arid tropicals : a plan for technology transfer network in Africa. Management of Vertisols under semi-arid conditions, 157-172. IBSRAM proceedings n° 6, IBSRAM (Bangkok).

LAL (R.), 1987 – Need for, approaches to, and consequences of land clearing and development in the tropics. *In* : Tropical land clearing for sustainable agriculture, 15-27. IBSRAM Proceeding n° 3,. IBSRAM (Bangkok).

PANINGBATAN (E.P.), 1987 – Alley cropping in the Philippines. In : Soil management under humid conditions in Asia and Pacific, 385-396. IBSRAM Proceedings n° 5, IBSRAM (Bangkok).

SANCHEZ (P.A.) & BENITES (J.R.), 1987 – Low-input cropping for acid soils of the humid tropics : a transition technology between shifting cultivation and continuous cropping. *In* : AFRICALAND – Land development and management of acid soils in Africa II, 85-106. IBSRAM Proceedings n° 7. IBSRAM (Bangkok).

SILVA (J.A.), ed. 1985 – Soil-based agrotechnology transfer. Benchmark Soil Project. University of Hawaï (Hawaï, USA), 269 p.

SWINDALE (L.D.), ed. 1978 – Soil resources data for agricultural development. University of Hawaï (Hawaï, USA), 306 p.

EXEMPLE D'AMENAGEMENT D'UN BASSIN VERSANT POUR LUTTER CONTRE LA DEGRADATION DES SOLS

Bassin versant de Lassa – Badjo (Togo)

T.T. TCHEMI
I.N.S. – BP 1026 – TOGO

INTRODUCTION

L'optique et les approches préconisées pour le Projet de Conservation des Sols s'inscrivent dans la nouvelle stratégie du Développement Rural ainsi que dans les plans prioritaires fixés par le Gouvernement, à savoir l'augmentation de la production vivrière par et pour le paysan considéré à la fois comme l'acteur et le bénéficiaire principal de toutes actions à entreprendre ; ces actions, tout en étant compatibles avec les impératifs de conservation, doivent viser avant tout à l'amélioration des moyens ou paramètres de production, dont le plus essentiel est la terre cultivable : l'amélioration et la conservation de ce capital sol doivent donc être considérées et reconnues comme des mesures permanentes et vitales pour l'économie du pays.

Cette préoccupation conservationiste s'était traduite très tôt par la création, la mise en place et le renforcement progressif de la Division de Conservation des Sols et des Eaux (DCSE) au sein de l'Institut National des Sols (INS), placé sous la tutelle du Ministère du Développement Rural (MDR). Ainsi, l'INS, qui se préoccupait presque exclusivement de la cartographie classique des sols jusqu'à la fin des années 70, a diversifié ses activités à la suite de la création de la DCSE.

I – STRATEGIE DE LA DIVISION ET DU PROJET

L'approche, à l'échelle du pays, du problème de la conservation et de la mise en valeur des ressources en terre se fait par le biais d'inventaires, d'évaluations et de bilans progressivement plus spécifiques et menés simultanément dans le contexte physique des différents ensembles de paysages géographiques d'une part, et au niveau de groupes humains ou unités socio – économiques spécifiques et homogènes leur correspondant, d'autre part.

Cette stratégie a été préconisée et mise en pratique dans le cadre de programmes d'assistance PNUD/FAO ou de TCP/FAO dans le massif africain du Fouta – Djalon au niveau de bassins représentatifs "pilotes" (PRP) ou en Amérique Latine dans les périmètres particulièrement affectés par des problèmes d'érosion en milieu subtropical montagneux ; les principales séquences méthodologiques de cette approche peuvent se définir comme suit :

- structuration de l'espace en ensembles de paysages ou milieux homogènes, tant du point de vue du milieu physique que de celui de leur dynamique socio – économique et culturelle ;

- identification et délimitation, dans ces ensembles homogènes, d'aires problématiques représentatives (avec leurs contraintes physiques et les groupes ou communautés humaines affectés par ces limitations) ;

- approche, information, sensibilisation et organisation des communautés paysannes dans leur système cultural et leur structure agraire, en vue de formuler et de mettre en oeuvre, avec leur concours et leur participation directe, des modèles d'aménagement adaptés à leurs problèmes et à leur milieu ;

- transfert, reproduction ou adaptation de ces modèles à des problématiques homogènes et compilation des expériences, résultats et suivis sous forme de manuels et de mémentos pratiques destinés aux principaux bénéficiaires – cibles ;

- contribution à la formulation progressive d'un plan, d'une législation ou d'un code national d'exploitation, conservation ou récupération des ressources en terre et en eau du pays.

La mise en oeuvre et l'optimisation d'une telle stratégie implique des interactions et consultations permanentes entre les diverses entités nationales directement ou indirectement concernées par l'utilisation et la gestion des ressources naturelles renouvelables, telles que les terres cultivables, les forêts et les eaux.

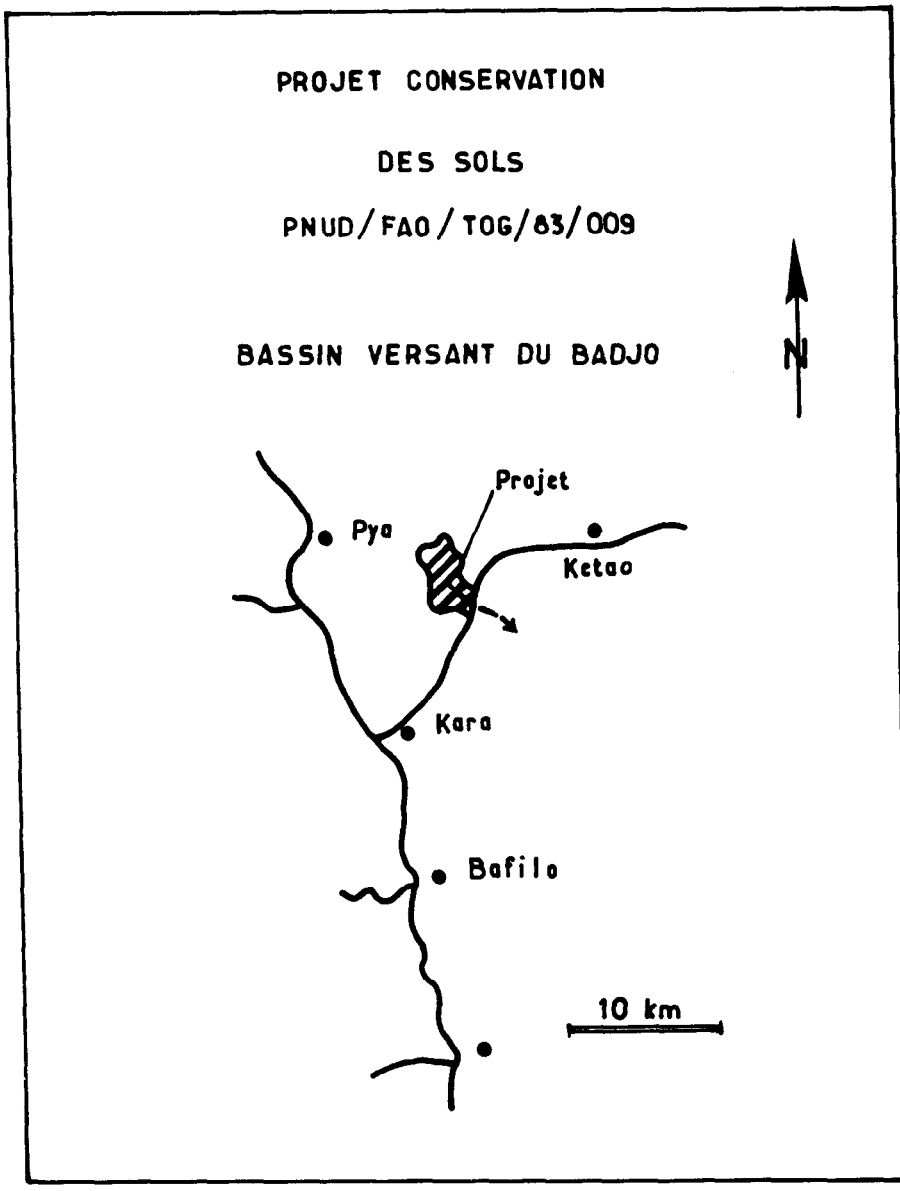
D'une manière générale, l'application d'une stratégie d'aménagement au niveau d'aires représentatives, c'est-à-dire dans un périmètre restreint et spécifique, ne doit en aucun cas faire oublier le caractère à la fois global et intégré des opérations ; dans ce sens, les modèles proposés aux communautés paysannes doivent se conformer à 3 conditions essentielles :

- s'insérer dans un schéma d'**aménagement cohérent** ;
- être **productifs** et **rentables** à court terme, tout en assurant la **protection** et la **restauration** des ressources naturelles ;
- être **acceptables** par les populations locales et réalisables avec leur concours.

II - PRESENTATION SOMMAIRE DU BASSIN VERSANT DE DEMONSTRATION

Le bassin versant de démonstration de "Lassa-Badjo" se trouve à 10 km au nord-est de la ville Kara (voir carte de localisation). Il couvre une superficie de 850 ha et est peuplé de près d'un millier d'habitants, pour la plupart agriculteurs.

Du point de vue physiographique, le bassin versant concerné comporte quatre unités majeures : la plaine (210 ha), les vallées alluviales ou colluviales (15 ha), les bas-fonds de montagnes et de collines (166 ha) et les flancs de montagnes aux pentes raides, essentiellement rocailleuses, qui occupent plus de 50 % du bassin-versant (460 ha).


PROJET CONSERVATION
DES SOLS
PNUD/FAO/TOG/83/009
BASSIN VERSANT DU BADJO
N
Projet
Pya
Ketao
Kara
Bafilo
10 km

III - PROBLEMATIQUE DU BASSIN VERSANT ET MISE EN APPLICATION DE LA STRATEGIE D'AMENAGEMENT

3.1. Problématique

La pression démographique, assez élevée dans la région de la Kara, tend à confiner les agriculteurs sur des surfaces de plus en plus réduites et les pousse à utiliser des terres marginales. La dimension des champs est comprise entre 0,1 et 0,5 ha, et les parcelles appartenant à un même paysan sont dispersées dans le paysage.

L'utilisation inappropriée du milieu a conduit à une érosion hydrique rendue évidente par l'affleurement fréquent de la roche-mère. Les flancs abrupts et rocailleux, qui devraient faire l'objet d'une mise en défens ou d'un reboisement systématique, ont été déboisés et mis en culture. De plus, les feux de brousse annuels diminuent la qualité de la végétation et le nombre d'espèces présentes.

Par ailleurs, le problème du bois de feux se pose avec une telle acuité que la population se rabat sur les tiges et autres résidus de récoltes. C'est un cercle vicieux, dont les retombées à plus ou moins longue échéance sont l'appauvrissement des sols en matière organique et la baisse de leur productivité.

C'est dans ce contexte de dégradation des ressources naturelles, et sur la base des connaissances ancestrales des habitants du milieu, que le projet PNUD/FAO/TOG/83/009 "Assistance en Conservation et Aménagement des Sols" s'est installé.

Les paysans Kabyé ont développé depuis des siècles des techniques antiérosives et d'amélioration des sols qui leur permettent d'exploiter les flancs des montagnes : construction de terrasses en pierres sèches pour freiner le ruissellement et l'érosion hydrique des sols et établissement de compostières traditionnelles constituées d'une excavation remplie d'herbes et de déchets d'animaux. L'ensemble de ce système, qui a fonctionné à merveille depuis des siècles, a commencé depuis

quelques décennies à perdre de son efficacité. Ceci résulte principalement e l'inadaptation de ces techniques à satisfaire les besoins de production agricole d'une population croissante, et de la dégradation progressive des structures antiérosives par manque d'entretien (population vieillissante car les jeunes partent chercher un travail rémunéré dans les villes). La diminution de la fertilité des sols, qui résulte d'apports moins fréquents de matière organique, a, en conjonction avec les autres facteurs, accentué la nécessité de concevoir un type d'aménagement qui protège les sols en s'inspirant des traditions locales.

Les conditions écologiques permettent la culture du sorgho, du petit mil, du haricot, de l'arachide et de l'igname. Le changement des habitudes alimentaires a favorisé l'introduction du maïs, surtout cultivé dans le sud du pays.

3.2. Mise en application de la stratégie d'aménagement et de conservation des sols et des eaux

3.2.1. Préliminaire

L'assistance financière et technique du programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) et de l'Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation (FAO) reste décisive dans la mise en application de cette stratégie. L'appui de ces organismes de coopération s'est traduit par la mise en place d'une méthodologie permettant de cerner les problèmes de conservation des sols. Elle consiste à procéder dans un premier temps au découpage du pays en zones homogènes présentant chacune des problèmes spécifiques et des potentialités de développement particulières. La carte des zones écogéographiques du Togo regroupe l'ensemble des zones homogènes. Au niveau de chaque zone ou sous-zone, un périmètre représentatif "pilote" (PRP) est choisi. Il sert de périmètre de démonstration sur les techniques de conservation des sols et des eaux et, surtout, il permet de tester des modèles acceptables par la population rurale dans le cadre de la préserva-

tion, de la correction et de l'amélioration des ressources naturelles existantes.

L'étude des périmètres représentatifs "pilotes" débute par l'établissement de cartes thématiques : les cartes de pentes, de l'occupation actuelle des terres, de la couverture pédologique, de la répartition spatiale de la population et des risques d'érosion sont élaborées, puis elles sont superposées pour aboutir à une carte de synthèse qui permet d'élaborer le plan d'aménagement à mettre en place.

L'acceptabilité du modèle et sa réalisation par la population locale sont des conditions *sine qua non* de réussite des projets de conservation des sols et des eaux. Ces conditions sont d'autant plus contraignantes que le périmètre représentatif "pilote" de Lassa – Badjo est en plein coeur du pays Kabyé. En effet, cette région connaît un exode rural sans précédent, qui laisse au terroir une population vieillissante ne possédant plus la force physique nécessaire à l'entretien des ouvrages antiérosifs.

3.2.2. Actions concrètes dans le bassin versant de Lassa – Badjo

3.2.2.1. La sensibilisation des habitants

Les premières prises de contact avec les habitants de la localité remontent en 1985. Des réunions ont ensuite permis de sensibiliser la population à la nécessité d'entamer des actions de conservation et de régénération du milieu.

Au cours de la sensibilisation, des diapositives et des films sur les problèmes de dégradation des ressources naturelles et les actions concrètes envisageables sont projetés aux agriculteurs. A la suite de longues discussions, des engagements formels sont pris sur des actions correctives ou de restauration.

3.2.2.2. Aménagement du milieu

Reboisement et activités connexes

Afin de créer l'envie de reboiser les sommets et les flancs dénudés du périmètre, une pépinière villageoise a été installée. D'une étendue de 0,25 ha à l'origine, cette pépinière a été agrandie à 0,75 ha pour répondre aux demandes. Entraînés et formés aux techniques de gestion d'une pépinière, les paysans assurent les petits travaux afférents, comme l'empotage, le semis des graines et l'arrosage. La mise en place d'une compostière permet de trouver sur les lieux même la terre nécessaire.

Les plants issus de la pépinière sont souvent mis en terre dans le voisinage immédiat par les paysans eux-mêmes. En principe, les emplacements les plus menacés reçoivent les plants en priorité. Cinq hectares ont été reboisés en 1987 et 10 ha en 1988. Mais les efforts en matière de reboisement sont malheureusement souvent annihilés par le passage des feux de brousse.

Mise en place ou réfection des structures antiérosives

Etant donné les habitudes ancestrales des paysans, faire adopter des techniques simples de lutte antiérosive n'a posé aucune difficulté. Il s'agissait de perpétuer, en les améliorant, les techniques de construction des terrasses ou des murettes en pierres sèches, l'installation des fosses d'absorption ou de diversion, et les banquettes ou diguettes.

En 1987, 10 ha ont été traités en labour suivant les courbes de niveau et 800 m de terrasses et 230 m de banquettes ont été construits. Au cours de la campagne 1988, une

plus forte mobilisation des paysans a permis de labourer 20 ha suivant les courbes de niveau et de réaliser 4 000 m de terrasses et 50 m de banquettes. Sur la plupart des terrasses, qui sont en fait des terrasses progressives, le *Cajanus Cajan* (une légumineuse à usages multiples appréciée dans le milieu) a été utilisée pour améliorer la fertilité.

Les travaux sont effectués sous forme d'entr'aide dans les parcelles individuelles, et par l'ensemble des membres du groupement dans les champs communautaires. Actuellement 4 groupements de 11 à 18 membres ont été constitués dans le bassin de Lassa.

Fabrication du compost

A cause des feux de brousse répétés et de la tendance des paysans à brûler les résidus de récoltes sur les champs, les sols présentent des teneurs en matière organique incompatibles avec une exploitation agricole intensive. En vue de remonter les taux de matière organique, les agriculteurs ont été initiés à la fabrication d'un compost, composé essentiellement d'herbe mélangée à de la drèche de bière (présence d'une brasserie à 10 km).

Les compostières traditionnelles, qu'on retrouve à proximité de chaque groupe d'habitations, reçoivent en outre des déjections animales qui améliorent la qualité de la fumure.

Activités connexes

Le plan d'aménagement du bassin de Lassa, établi dans le cadre des activités du projet, indique qu'il existe en moyenne une source au kilomètre carré. Ces sources demandent à être aménagées en vue d'obtenir de l'eau courante, en particulier pour les habitants des crêtes et

des flancs qui n'ont pas bénéficié de l'adduction d'eau, qui a couvert la plus grande partie de la région. Ainsi, avec la participation de la population locale, le captage des sources a débuté. Dans d'autres cas, des puits ont été creusés.

Conscients du fait que le service des travaux publics ne peut à lui seul résoudre toutes les questions de construction et de réfection des pistes, les habitants se sont mobilisés pour créer ou remettre en état des voies de desserte (environ 5 500 m de piste).

CONCLUSION

Les sols minéraux bruts occupent la majeure partie du bassin de démonstration de Lassa. Situés sur les flancs ou sur les sommets, ils constituent des sols marginaux au point de vue agricole soumis à une forte pression démographique. Ils sont mis en valeur avec des techniques d'exploitation qui étaient naguère efficaces en matière de lutte antiérosive, mais qui ont cessé de remplir ce rôle par manque d'entretien. Ainsi, fortement érodés, les flancs et les sommets ne présentent que des sols squelettiques à forte charge en éléments grossiers.

Au bas des pentes et dans les plaines, le colluvionnement a apporté un matériau le plus souvent peu fertile, épuisé par une agriculture intensive.

Dans ce contexte, le projet de conservation des sols peut constituer un exemple pour l'ensemble de la région. Etant donné la grande variété des besoins à satisfaire, un projet de type intégré se justifierait pleinement, mais devrait compter sur la participation volontaire de la population pour aboutir. Pour l'instant les reboisements des flancs de montagne et des terrains épuisés, ainsi que la mise en place de structures antiérosives et de techniques de restauration des sols, semblent constituer les premières priorités.

EFFETS DE LA CULTURE ATTELEE SUR L'EROSION ET LA CONSERVATION DES SOLS AU NORD BENIN

H. A. AZONTONDE
CENAP – BP 988 – Cotonou – BENIN

RESUME

La préparation physique des sols et l'obtention d'un degré d'ameublissement favorable est une opération à réaliser chaque année avant les semis. Le sarclage à la houe, trop superficiel, ne permet pas d'atteindre cet objectif. Le labour à la traction animale, par contre, grâce au réglage de la profondeur de labour, crée dans le sol les conditions nécessaires à une bonne utilisation des eaux de pluie, en réduisant le ruissellement et la baisse de fertilité.

Après avoir brièvement exposé les caractéristiques physiques et morphologiques des sols du versant et défini le site d'essai, le matériel d'expérimentation est précisé, ainsi que les objectifs du travail du sol et les effets bénéfiques qui proviennent de la traction animale, à travers la réduction de l'érosion et de la baisse de fertilité, l'ameublissement du sol et le gain en rendement.

INTRODUCTION

La culture attelée a été introduite au Bénin, et principalement au Nord dans la province du Borgou, vers les années 1935 et 1955. Cette pratique, timidement acceptée il y a 30 ans par une population composée à 90 % d'éleveurs, est actuellement en plein essor.

La préparation du sol avant le labour exige un important essouchement, et met donc à nu d'importantes superficies de terre.

Dans cette étude, nos investigations, qui se sont déroulées pendant 10 ans (1979 – 1988), se limitent à l'utilisation de la culture attelée sur des parcelles d'érosion, avec des mesures de pertes en terre, du ruissellement et de la résistance du sol au pénétromètre.

Après un rappel sommaire des généralités sur les sols par une étude toposéquentielle, nous analyserons les effets de ce mode de préparation physique des sols sur leurs propriétés, aussi bien physiques que chimiques.

I - QUELQUES GENERALITES SUR LES SOLS

1.1. Etude sommaire d'une toposéquence

Avant d'aborder l'étude de l'impact de la culture attelée sur l'érosion et la conservation des sols, il a paru intéressant de mener une étude rapide de la distribution des sols le long des versants portant les parcelles d'essais.

1.2. Caractères généraux de la toposéquence

La toposéquence, longue de 630 m, présente une dénivellation totale d'environ 20 m, pour une pente moyenne de 2,7 %. Cette pente décroît grossièrement du sommet de l'interfluve vers l'axe de drainage, lui donnant une forme légèrement concave. Les pentes passent donc de 3 % au tiers amont du versant, à 3,2 % sur le tiers médiant et à 2 % sur le tiers aval.

La végétation est une savane arborée claire à *Isoberlinia doka*, *Burkea africana*, *Daniellia oliveri* et *Detarium spp.* en sommet de versant. Elle est remplacée par une savane arbustive basse à *Terminalia macroptera* et *Mytragina inermis*, avec des *Cyperus* vers le bas de versant.

1.2.1. Distribution des sols

Quatre fosses pédologiques, numérotées de 1 à 4, ont été ouvertes à partir du sommet de l'interfluve. Elles ont permis d'identifier et de différencier les sols le long de la toposéquence. Cette différenciation semble suivre certaines règles ; ainsi, sur le sommet, nous observons des sols présentant trois niveaux :

- un niveau superficiel peu épais et peu concrétionné,
- un niveau intermédiaire très concrétionné,
- un niveau en bas du profil peu concrétionné, mais bariolé.

Vers le bas du versant, le 3e niveau devient non seulement plus concrétionné et moins profond, mais il se prend également en masse et se transforme en carapace de plus en plus dure, alors que les deux premiers niveaux deviennent de moins en moins concrétionnés.

1.2.2. Classification des sols de la toposéquence

Les sols ont été classés en référence à la classification française (C.P.C.S., 1967), la légende de la carte mondiale des sols (F.A.O., 1988) et la Soil Taxonomy (1975) ; (tableau 1).

Profil n° 1 :

0 – 20 cm : Frais, 10YR 3/4 (brun rougeâtre foncé) ; sablo – limoneux gravillonnaire (30 % de graviers de quartz, concrétions et nodules à sesquioxydes), structure polyédrique subangulaire, grumeleuse par endroits, morceaux de charbon, nombreuses racines.

20 – 35 cm : Frais, 7,5YR 4/6 (brun vif) ; limono – argilo – sableux très gravillonnaire (60 % de graviers de quartz, concrétions et nodules à sesquioxydes), structure poly – édrique subangulaire moyenne, assez nombreuses racines horizontales, galeries de termites.

35 – 100 cm : Frais, 5YR 4/6 (rouge jaunâtre), nombreux niveaux rouges très fermes, limono – argileux gravillonnaire (30 % de graviers de quartz et fragments de cuirasse), paillettes de micas, peu de racines, galeries de termites. Structure identique à celle du précédent horizon (20 – 35 cm).

100 – 150 cm : Frais, bariolé, 2,5YR 4/6 (rouge), 7,5YR 5/6 (brun vif, et 10YR 6/6 (jaune

brunâtre) ; argileux, nombreux niveaux rouges fermes limoneux, structure massive, débit polyédrique, angulaire moyen, paillettes de micas.

Profil n° 2 :

0 – 20 cm : Frais, 10YR 4/3 (brun foncé), sablo – limoneux, peu gravillonnaire (10 % de graviers de quartz et nodules de ses – quioxydes), structure polyédrique suban – gulaire fine à tendance grumeleuse, très poreux, très nombreuses racines, nids de fourmis.

20 – 40 cm : Frais, 5YR 4/6 (rouge jaunâtre), limono – sableux gravillonnaire (25 – 35 % de graviers de quartz et nodules de sesquioxydes), structure polyédrique subangulaire moyenne bien développée, très poreux, assez nombreuses racines, galeries de termites.

40 – 65 cm : Frais, 5YR 5/6 (rouge jaunâtre), limono – sableux, très gravillonnaire (60 % de graviers de quartz, concrétions et nodules de fer et de manganèse), structure faiblement développée polyédrique subangulaire, modelée par les éléments grossiers, très poreux, peu de racines, galeries de termites.

65 – 110 cm : Frais, bariolé, 2,5YR 4/5 (rouge), 5YR 5/6 (rouge jaunâtre) 7,5YR 5/8 (brun vif), horizon cimenté en carapace, structure massive, galeries de termites.

110 – 160 cm : Frais, 5YR 5/6 (rouge jaunâtre), limono – argileux à argileux, structure faiblement développée polyédrique angu – laire moyenne, peu poreux, ferme, galeries de termites.

Profil n° 3 :

0 – 15 cm : Frais, 7,5YR 3/2 (brun foncé), limono – sableux, structure polyédrique subangulaire à tendance grumeleuse moyenne, très poreux, nombreuses racines, galeries de termites.

15 – 30 cm : Frais, 5YR 4/4 (brun rougeâtre, taches discrètes 7,5YR 4/4 (brunes), limono – sableux, structure polyédrique nette, poreux nombreuses racines, poches.

30 – 55 cm : Frais, 7,5 YR 5/6 (brun vif), taches 5YR 5/8 (rouge jaunâtre limono – sableux, structure bien développée polyédrique subangulaire moyenne, poreux, nombreuses racines horizontales, poches.

50 – 150 cm : Frais, horizon induré en cuirasse.

Profil n° 4 :

0 – 15 cm : Humide, 5YR 2,5/1 (noir), limono – sableux, structure subangulaire, grumeleuse par endroits associée au chevelu racinaire, très poreux, très nombreuses racines, cavités de termites, terricules de vers de terre.

15 – 40 cm : Humide, 7,5YR 3/2 (brun foncé), taches 7,5YR 4/4 (brunes) limono – sableux, structure polyédrique subangulaire moyen, poreux, très nombreuses racines, cavités de termites.

La nappe phréatique est à 35 cm de la surface du sol.

Tableau 1 : *Classification des sols de la toposéquence*

Sols	Classification C.P.C.S.	Légende F.A.O. 1988	Soil Taxonomy
1	Sols ferrugineux tropicaux appauvris modaux à faciès concrétionné	Acrisol sque – lettiferrique	Typic Haplustult
2	Sols ferrugineux tropicaux appauvris modaux à faciès induré	Acrisol sque – lettiferrique	Typic Haplustult
3	Sols ferrugineux tropicaux appauvris hydromorphes sur matériau induré	Acrisol ferri – que phase proferrique	Petroferric Haplustalf
4	Sols hydromorphes peu humifères à gley et à battement de nappe de forte amplitude	Gleysols eutriques	Aquic Chromustert

Il ressort de ce tableau que, de l'amont à l'aval de la toposéquence, on passe des sols ferrugineux tropicaux appauvris concrétionnés sur le plateau, aux sols hydromorphes en bas de pente en passant par les sols ferrugineux tropicaux appauvris indurés sur les versants.

Les parcelles d'érosion qui ont servi de cadre aux essais sur la culture attelée sont situées sur le tiers médian du versant, et par conséquent sur les sols ferrugineux tropicaux appauvris modaux à faciès induré.

1.3. Etat de surface

Le taux de gravillons, qui était de 10 % dans les 10 cm supérieurs avant le démarrage des essais dans toutes les

parcelles, est passé à 12 %, 20 % et 60 % suivant le travail du sol.

Les parcelles sont entièrement dessouchées et l'on n'enregistre comme adventice dominante que l'*Andropogon gayanus*, qui s'installe et envahit toutes les parcelles après la récolte. Son action nettoyante par le contrôle des autres mauvaises herbes est spectaculaire.

L'humidité du sol avant le labour est de 1 à 2 % en surface.

II – LE TRAVAIL DU SOL

Le travail du sol consiste à le traiter mécaniquement avec des instruments adaptés, de façon à lui donner des propriétés physiques satisfaisantes avant les semis.

2.1. Objectifs

Le travail du sol vise la suppression des mauvaises herbes, l'ameublissement du sol, l'établissement d'un bon lit de semence et l'aération du sol.

2.2. Matériel de travail du sol

Dans le cadre de l'opération de développement de la culture attelée au Bénin, il a été fait appel à un multiculteur (type ARARA) qui constitue l'élément fondamental de la chaîne de culture. Composé d'un âge sur lequel s'adaptent les mancherons et le support de la roue, cet élément de base peut recevoir quatre équipements adaptables (CANARD, 1976) :

- un corps de charrue,
- un butteur à ailes mobiles,
- un canadien 3 ou 5 dents,
- une souleveuse d'arachide.

2.2.1. La charrue

Elle est de type retourneur asymétrique ou à versoir ; l'axe de traction ne passe pas par la pointe du soc, mais se trouve légèrement déporté vers le labour.

Au bâti de base sont fixés le régulateur de traction et le corps de charrue. Le soc, le contre-sep et le talon, en contact avec la terre, s'usent plus ou moins rapidement et doivent être remplacés périodiquement, environ tous les 10 ou 30 hectares suivant la nature des sols travaillés.

2.2.2. Champs de labour ou parcelle d'essai

Le champ de labour est constitué ici de 5 parcelles d'érosion de forme rectangulaire, délimitées par des tôles de fer 10/10 non ondulées, larges de 30 cm, enfoncées dans le sol sur une profondeur de 10 cm. L'aval des parcelles se termine par une gouttière de recueil reliée à un système de réception par un canal d'amenée.

Le système récepteur est composé de deux cuves métalliques reliées. La capacité de chaque cuve est équivalente à un ruissellement de 50 mm sur la parcelle.

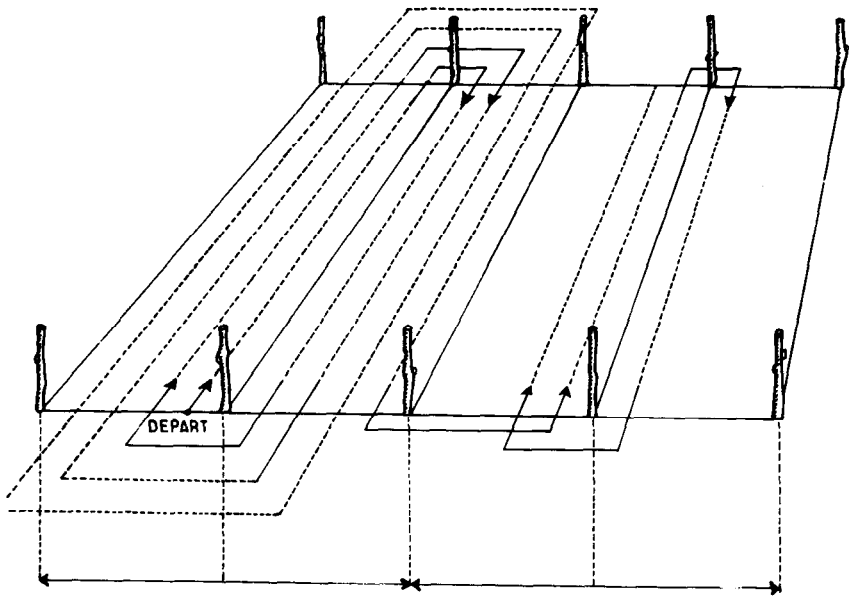
Les 5 parcelles sont situées les unes à côté des autres sur une pente de 3,2 %, au même niveau du tiers médian du versant.

Elles ont les dimensions suivantes :
- longueur : 22,13 m
- largeur : 4,52 m
- surface : 100 m^2

2.3. Méthode de réalisation du labour

Avant le labour, deux opérations importantes doivent être réalisées ; il s'agit du piquetage de la parcelle et de l'enlèvement des tôles de délimitation. On laboure ensuite à partir du centre vers l'extérieur, la terre étant rejetée vers l'intérieur ; la charrue coupe la terre et la déverse toujours du même côté par rapport à la direction d'avancement. Le travail

PLANCHE 1 PIQUETAGE D'UN CHAMP DE LABOUR



PROFIL DU LABOUR

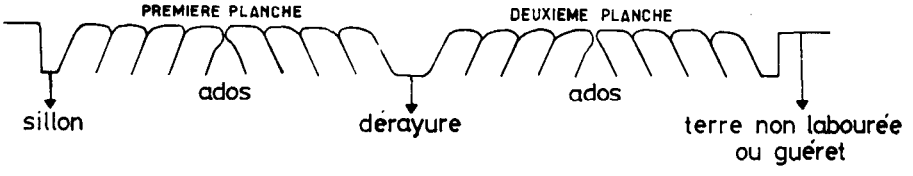


Tableau 2 : *Pertes de terre et ruissellement à Alafiarou Parakou*

Années	Pluvio-sité (mm)	P1 (témoin nu)		P2		P3		P4		P5	
		Pertes de terre t/ha	Coef de ruissel %	Pertes de terre t/ha	Coef de ruissel %	Pertes de terre t/ha	Coef de ruissel %	Pertes de terre t/ha	Coef de ruissel	Pertes de terre t/ha	Coef de ruissel
1977 coton	1.000	15	9,7	h// 18	5,7	h// 17	5,7	h//paillage 4,1	2,3	h//paillage 1,3	1,4
1978 niébé	1.346	35	18	h // 15	4,9	h// 11	3,9	h//paillage 1,5	1,6	h//paillage 0,54	0,75
1979 maïs	1.214	16	16	h ⊥ 1,5	5,0	ch // 1,6	3,7	h// 1,6	4,7	ch ⊥ 0,25	1,0
1980 Andro-pogon	1.188	8,3	15	h ⊥ 0,16	0,26	ch// 0,37	0,63	h// 0,41	2,2	ch ⊥ 0,18	0,38
1981 coton	1.018	6,7	30	ch// 0,65	8,2	h// 1,8	7,9	h ⊥ 0,97	5,7	ch ⊥ 0,20	2,1
1982 maïs	928	5,1	26	ch// 0,15	0,47	h// 0,29	0,45	h ⊥ 0,14	0,36	ch ⊥ 0,08	0,13
1983 coton	672	3,2	20	h// 0,72	5,8	ch// 0,38	0,01	h ⊥ 0,39	0,04	ch ⊥ 0,15	0,01
1984 maïs	1.237	12	7,8	h// 2,4	2,3	ch// 1,4	1,8	h ⊥ 1,7	1,9	ch ⊥ 0,76	0,78
1985 maïs	1.147	9,8	10	h ⊥ 3,3	2,7	ch// 5,2	1,5	h// 5,7	4,8	ch ⊥ 1,2	1,7
1986 maïs	941	5,8	4,4	ch// 3,2	1,1	h ⊥ 0,96	0,40	h// 2,1	0,96	ch ⊥ 0,18	ch 0,01
1987 arachide	852	17	2,8	ch// 1,8	0,38	h ⊥ 0,72	0,18	h// 1,5	0,24	ch ⊥ 0,05	0,01
1988 arachide	1.305	20	32	ch// 13	3,3	h ⊥ 8,3	2,8	h// 12	2,4	ch ⊥ 0,83	0,13

Légende : h// : billonnage à la houe dans le sens de la pente
h⊥ : billonnage isohypse fait à la houe
ch : charrue

ainsi réalisé est appelé labour en planches. Il comporte une dérayure centrale entre les deux planches (planche 1).

La même opération est reprise en sens contraire pour confectionner des billons.

2.4. Effets du travail du sol à la traction animale sur l'érosion et le ruissellement

Le billonnage isohypse réalisé à la traction animale sous une pluviosité annuelle de 1 200 mm réduit les pertes en terre de 16 t à 0,25 t/ha, soit 1,25 %, et le ruissellement à 5 % de sa valeur sur sol nu. Ce même mode de labour, fait à la houe sous la même pluviométrie, réduit les pertes en terre et le ruissellement respectivement à 10 % et 25 % de leur valeur sur sol nu (tableau 2). Sous une pluviométrie plus faible (672 mm), l'érosion est réduite de plus de 99 % sur un sol portant des billons isohypses réalisés à la traction animale. Cette même technique culturale, réalisée à la houe, réduit l'érosion de 90 % de sa valeur sur parcelle nue. Ces résultats montrent une bonne efficacité du billonnage fait à la traction animale dans le contrôle de l'érosion hydrique. Cette efficacité est due à la profondeur du labour (15 cm), à l'enfouissement des végétaux verts et des résidus de récolte réalisé par le versoir de la charrue.

D'autres mesures, telles que la pénétrométrie (résistance à la pénétration du pénétromètre), la disponibilité en éléments minéraux et le rendement, confirment l'efficacité du billonnage isohypse fait à la traction animale dans la conservation des sols et des eaux.

2.5. Effets du travail du sol à la traction animale sur son ameublissement

Il se forme sur les sols rouges ferrugineux tropicaux lessivés non protégés, exposés aux actions des gouttes de pluie, des pellicules de battance de 0,2 à 1 cm d'épaisseur constituées de dépôts successifs de terre fine (limon, argile) et très peu perméables. Ces "organisations pelliculaires superficielles" (O.P.S., VALENTIN, 1981) ralentissent fortement l'infiltration de l'eau dans le sol.

Le travail du sol, notamment le billonnage isohypse, non seulement réduit la formation de ces pellicules et crée des obstacles qui obligent l'eau à s'infiltrer, mais il diminue également la résistance des sols à la pénétration des outils agricoles. Cette baisse est encore plus grande quand le billonnage est réalisé avec la traction animale (tableau 3).

Des mesures faites à l'aide d'un pénétromètre (Soiltest CL – 700 Pocket Penetrometer) font ressortir que la résistance à la pénétration passe de 1,7 à 1,3 kg/cm^2. Ceci signifie que le billonnage isohypse, particulièrement celui fait à la traction animale, laisse à la disposition des plantes un sol plus meuble, donc plus facilement exploitable par les racines et plus perméable à l'eau.

Tableau 3 : *Effets du travail du sol à la traction animale sur la pénétrométrie*

Aménagement	Pénétrométrie kg/cm2
Sol nu	1,70
Maïs ou coton à plat	1,51
Maïs ou coton avec billonnage réalisé à la houe	1,45 et 1,72
Maïs ou coton avec billonnage isohypse réalisé à la traction animale	1,30
L.S.D.	0,18
n = 350 CV (%)	16

2.6. Effets du travail du sol à la traction animale sur la disponibilité en éléments minéraux (tableau 4)

Des analyses chimiques faites sur la terre entraînée ont donné les résultats suivants :

- sur sol non protégé, la matière organique semble être entraînée préférentiellement ; sa teneur varie entre 2,5 et 5 % (tableau 4) alors que les horizons de surface de la terre en place dans ces parcelles contiennent de 1 à 3 % de matière organique,

- la terre entraînée a sensiblement la même composition chimique que la terre en place (0,5 à 2 ‰ d'azote, 0,20 mé/100 g de potassium, 0,70 mé/100 g de magnésium et 0,05 % de phosphore.

Donc, pour une quantité moyenne de 15 t/ha/an de terre entraînée sur sols ferrugineux tropicaux non protégés, les pertes en matière organique seraient de l'ordre de 450 kg/ha/an. Celles en bases échangeables de 150 kg de sulfate d'ammonium à 2 %/ha, 45 kg de phosphate bicalcique à 40 % et 3 kg de chlorure de potassium à 60 %. Sur parcelles travaillées à la traction animale (billonnage isohypse sur P4 et P5) les pertes sont de l'ordre de :

- 3 kg de matière organique/ha/an,
- 2,5 kg de sulfate d'ammonium à 20%/ha,
- 0,75 kg de phosphate bicalcique à 40 %/ha,
- 0,15 kg de chlorure de potassium à 60 %/ha.

Ces pertes enregistrées sur parcelles aménagées sont négligeables. Cela montre l'importance du travail du sol, et notamment de celui réalisé par la traction animale dans la conservation des éléments minéraux et organiques du sol.

Tableau 4 : *Qualité de la terre entraînée des parcelles : matière organique, granulométrie, bases échangeables*

N° par-celle	C	N	A	Lf	Lg	Sf	Sg	T	Mg	K	Na
	%	‰	%	%	%	%	%	mé	mé	mé	mé
1	1,50	1,22	7,1	3,8	1,6	13,0	71,0	4,22	0,68	0,25	0,03
2	1,15	1,05	4,2	3,0	2,2	19,9	68,0	2,04	0,58	0,25	0,06
3	0,98	0,85	4,0	2,8	1,8	20,4	69,8	3,60	0,39	0,15	0,08
4	0,80	0,77	3,5	3,5	2,2	21,6	66,9	3,42	1,00	0,36	0,12
5	0,76	0,67	3,1	3,2	2,5	26,2	64,9	3,30	0,50	0,30	0,13

2.7. Effets du travail du sol à la traction animale sur le rendement

De nombreux travaux effectués en station d'érosion ont permis de mettre en évidence la composante travail du sol à la traction animale dans l'élaboration du rendement d'une culture.

Tous les autres facteurs, notamment les sarclages fréquents, la fumure minérale vulgarisée et les traitements phytosanitaires sont optimisés de façon à ne pas devenir limitants.

A un témoin non travaillé sont comparés les travaux suivants :
- labour isohypse à la traction animale (profondeur 15 cm),
- labour suivant la pente à la traction animale,
- labour isohypse à la houe (5 à 8 cm).

L'analyse des résultats montre, par rapport au témoin, que :
- le labour suivant la pente à la traction animale donne des gains variant de 12 à 40 %,
- le labour isohypse à la houe donne des gains de 25 à 70 %,
- le labour isohypse à la traction animale donne des gains de 50 à 90 % (tableau 5).

Tableau 5 : *Effet du travail du sol à la traction animale sur les rendements de quelques cultures (rendements en t/ha)*

Cultures	Témoin non travaillé	Labour isohypse à la houe	Labour suivant la pente à la charrue	Labour isohypse à la charrue
Coton	0,8	1,0	0,9	1,4
Maïs	2,1	2,9	2,6	3,1
Arachide	1,0	1,7	1,4	

CONCLUSION

Il ressort de cette étude que la culture attelée pratiquée sur les sols ferrugineux tropicaux lessivés présente de nombreux avantages dans la conservation des sols.

Au nombre de ces effets bénéfiques il faut citer l'augmentation très sensible de la vitesse d'exécution du travail, qui permet aux paysans de doubler ou tripler les superficies emblavées. Il est possible également, à partir de ce mode de travail du sol, d'augmenter (15 – 20 cm) ou de réduire (15 – 8 cm) la profondeur de labour suivant la nature du sol. Des mesures effectuées en station d'érosion ont montré que le grattage en sec ou en humide ne concerne que la couche 0 – 8 cm.

Malgré les nombreux avantages que la population rurale du Borgou retire de la pratique de la culture attelée, de nombreux agriculteurs restent encore réticents à l'adoption de ce mode de labour. Des enquêtes menées au sein de cette couche de population font ressortir, au nombre des raisons évoquées, la difficulté d'abandonner les pratiques culturales traditionnelles, mais aussi le temps nécessaire aux travaux préparatoires du labour (essouchement) des nouveaux périmètres. Ces travaux se font à la houe et peuvent prendre un temps considérable.

La particularité majeure de cette étude est l'utilisation de la traction animale sur des parcelles d'érosion de 22 m de long et 4,5 m de large, alors que l'âge et la chaîne de traction font 30 m de long.

Il est possible également, à partir de ce type de travail, de mieux cerner le rôle du billonnage isohypse dans la conservation de l'eau et de la fertilité des sols.

BIBLIOGRAPHIE

CANARD (P.), 1976 – Guide pratique de la culture attelée au Bénin. PNUD/FAO

VALENTIN (C.), 1981 – Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique. (Agadez – Niger) Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. Thèse Doct. 3ème Cycle. Université Paris VII., 229 p.

EFFETS DU DEFRICHEMENT ET DE LA MISE EN CULTURE SUR LES CARACTERES DES SOLS. EXEMPLES EN COTE D'IVOIRE

G. YORO

RESUME

Nous avons procédé à une synthèse sommaire des travaux réalisés en Côte d'Ivoire sur l'évolution des sols après défrichement et mise en culture. Ces différents travaux mettent en évidence une dégradation des caractères physiques (densité apparente, stabilité structurale, résistance à la pénétration), chimiques (teneur en carbone total et minéralisable, en azote total et ammoniacal, pH, capacité d'échange) et hydriques (infiltration). Parallèlement, l'érosion et la lixiviation des éléments nutritifs augmentent.

Cette dégradation des propriétés du sol semble dépendre des états initiaux, des types de défrichement et des systèmes d'exploitation. C'est ce que montre notamment une étude réalisée le long d'une toposéquence où le défrichement motorisé a provoqué des modifications immédiates par la création de quatre volumes de sol différents.

INTRODUCTION

L'évolution des caractères des sols en Côte d'Ivoire, après défrichement et mise en culture, a été étudiée par de nombreux chercheurs (de BLIC, 1976 ; AKODO, 1977 ; MOREAU, 1978, 1979 et 1983 ; MONG-GINE, 1979 ; FRITSCH, 1982 ; YORO, 1984). Elle est en rapport avec la nature et le travail du sol, le système cultural, le type de culture et le microclimat.

Au cours de cet exposé introductif, nous allons brièvement présenter quelques exemples d'évolution des caractères des sols due à la mise en culture. Nous terminerons ensuite par l'étude d'un cas portant sur les effets immédiats observés le long d'une toposéquence après défrichement motorisé.

I - EVOLUTION DES CARACTERES DE SOLS SOUS CULTURE

1.1. Caractères physiques

IS

L'indice d'instabilité structurale (HENIN *et al.*, 1958) augmente sous l'effet de la mise en culture. Son augmentation se manifeste dès le défrichement (MOREAU, 1983). Elle est la plus importante dans le cas de défrichement mécanisé (fig. 1).

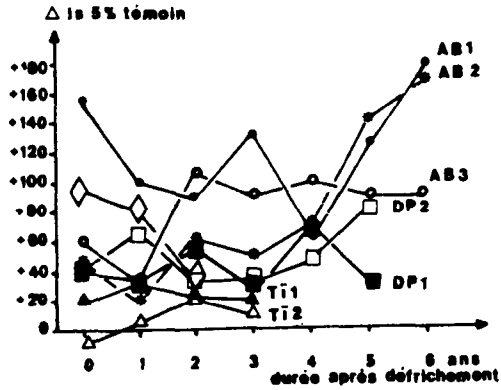


Figure 1 : *Evolution de la stabilité structurale (MOREAU, 1983)*

FRITSCH (1982) note cependant, en zone forestière sous brûlis, que la mise en culture du sol, puis sa recolonisation par un recrû ne produit aucune modification de l'indice d'instabilité structurale des horizons 0 - 10cm.

Densité apparente

La mise en culture provoque une diminution de la densité apparente des horizons superficiels (0 - 10cm). Cette diminution est liée au travail du sol et n'est pas observée sur tous les types de sol, notamment sur ceux naturellement meubles (MONGINE, 1979) mais non organiques. En effet, dans les sols tourbeux sous culture de banane, les valeurs de la densité apparente ont doublé en 14 ans (fig. 2, GODEFROY et YAO, 1989).

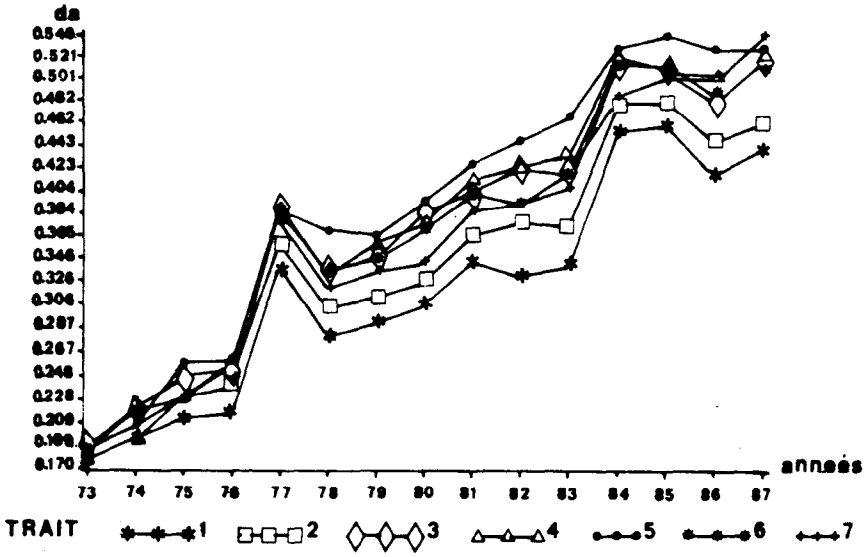


Figure 2 : *Evolution de la densité apparente dans les sols tourbeux sous bananier (GODEFROY et YAO, 1983)*

Résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration diminue dans les horizons supérieurs après défrichement et mise en culture. La diminution, par rapport à l'état initial, dépend du type de sol et du passé cultural (fig. 3).

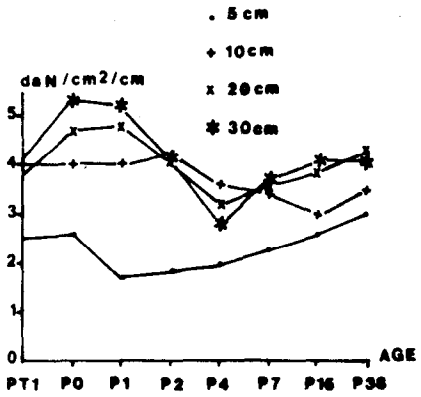


Figure 3 : *Evolution de la résistance à la pénétration (FRITSCH, 1982)*

1.2. Caractères hydriques

Des nombreux travaux réalisés en Côte d'Ivoire (COLLINET et VALENTIN, 1979 ; POHE, 1981 ; VALENTIN, 1981 ; FRITSCH, 1982 ; COLLINET, 1984), il ressort que l'infiltration de l'eau dans le sol est étroitement liée à l'aspect de la surface. Elle varie, en effet, avec la présence de rejets biologiques, d'accumulations sableuses, de croûtes, d'éléments grossiers et de la couverture végétale. L'érosion est influencée par les mêmes facteurs (fig. 4).

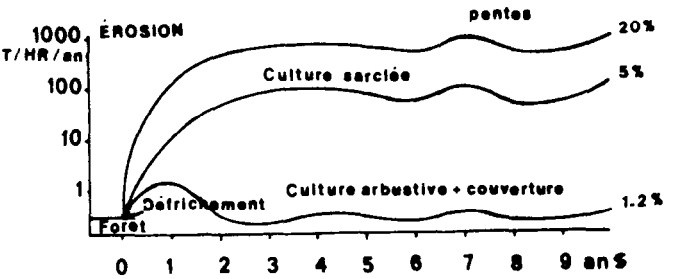


Figure 4 : *Dynamique de l'érosion (ROOSE, 1983)*

1.3. Caractères chimiques et biologiques

Carbone total et azote total

Les taux de carbone total et d'azote total diminuent dès le défrichement (MOREAU, 1983). La diminution paraît liée au mode de défrichement. Ainsi, elle est la plus marquée sur les sols défrichés mécaniquement avec un bulldozer.

Somme des bases échangeables

La somme des bases échangeables augmente après un défrichement suivi de brûlis (MOREAU, 1983). FRITSCH (1982) constate, en revanche, une légère baisse suivie d'une augmentation qui tend, sous recrû, vers le niveau initial. Dans les sols tourbeux sous culture de banane, la baisse de la somme des bases échangeables est marquée.

pH

La mise en culture provoque une diminution du pH et, par conséquent, une acidification des sols. Cette évolution dépend du type de sol (MONG-GINE, 1979) et des pratiques culturales (fig. 5) et, en général, est étroitement corrélée au taux de saturation (FRITSCH, 1982 ; YORO, 1986).

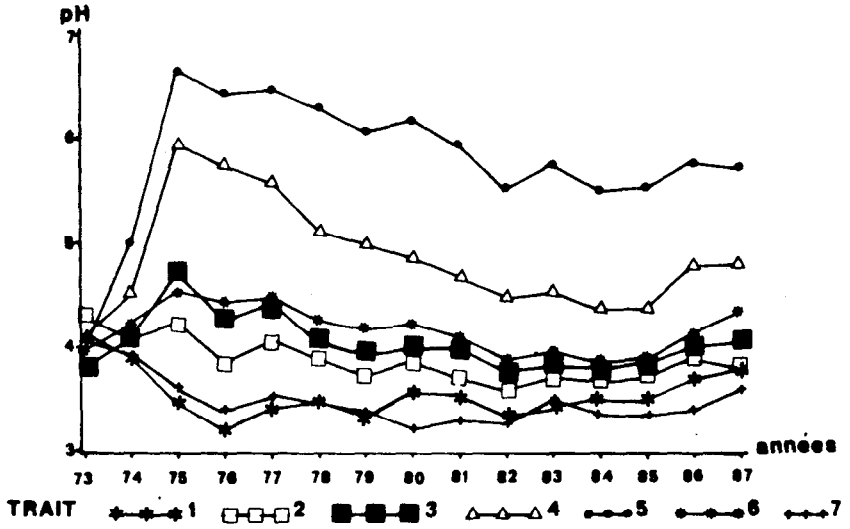


Figure 5 : *Evolution du pH dans les sols tourbeux sous bananier (GODEFROY et YAO, 1989)*

Activité phosphatasique

FRITSCH (1982) et MOREAU (1983) notent que la mise en culture s'accompagne d'une diminution des valeurs de l'activité phosphatasique. L'importance de cette diminution dépend du mode de défrichement et essentiellement de l'appauvrissement en matière organique (GNAMBA, 1987).

II - EFFETS IMMEDIATS DU DEFRICHEMENT MOTORISE LE LONG D'UNE TOPOSEQUENCE

2.1. Caractères des sols de la toposéquence avant défrichement

La toposéquence (fig. 6) a été subdivisée en trois segments topographiques (sommet, versant et bas-fond). Les caractéristiques initiales sont portées sur la figure 7.

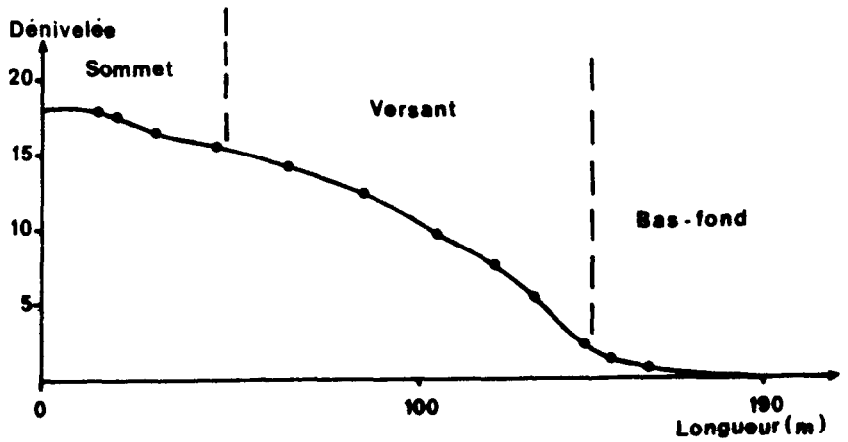


Figure 6 : *Modelé du paysage défriché mécaniquement*

On remarque une variation verticale et horizontale des caractéristiques physiques et chimiques. La variation horizontale semble être en rapport avec les types de sols identifiés le long de la toposéquence (remanié appauvri au sommet, rajeuni remanié sur le versant et peu évolué d'apport alluvial, hydromorphe dans le bas-fond).

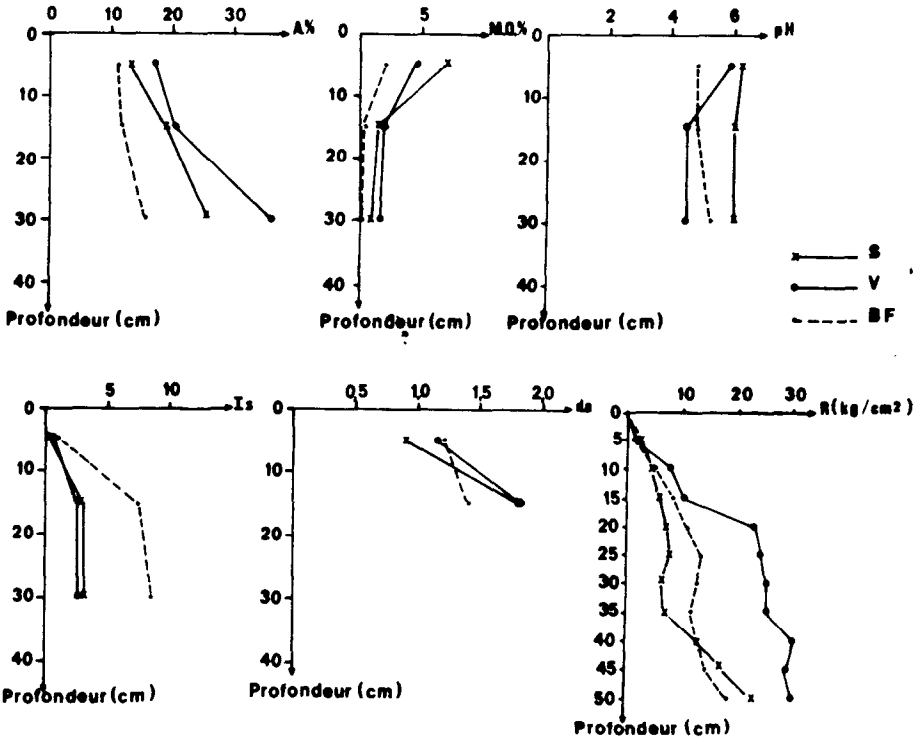


Figure 7 : *Caractéristiques initiales des sols de la toposéquence*

2.2. Caractères des sols après défrichement motorisé

Le défrichement motorisé a provoqué, dans chaque position topographique, l'apparition de quatre volumes de sol distincts : A, AB, BR et BD.

L'examen des propriétés physiques, chimiques et pénétrométriques de ces quatre volumes de sol (fig. 8 à 13) montre que :

- le taux d'argile, l'indice d'instabilité structurale et la densité apparente confirment la différence entre les quatre volumes de sol ;
- le taux de matière organique permet de distinguer trois volumes de sol A, AB et BR ou BD ;
- le pH met en évidence deux types de volumes de sol : A et AB d'une part, BR et BD d'autre part ;
- la résistance à la pénétration fait ressortir la différence entre les volumes de sol résultant d'accumulation (A, AB et BR) et les volumes de sol décapés (BD).

Les modifications, dans chaque position topographique, dépendent du type de sol. Ainsi la dégradation structurale marquée dans le bas-fond est due à la texture sableuse (71,6%) et à la faible teneur en matière organique (1,8%).

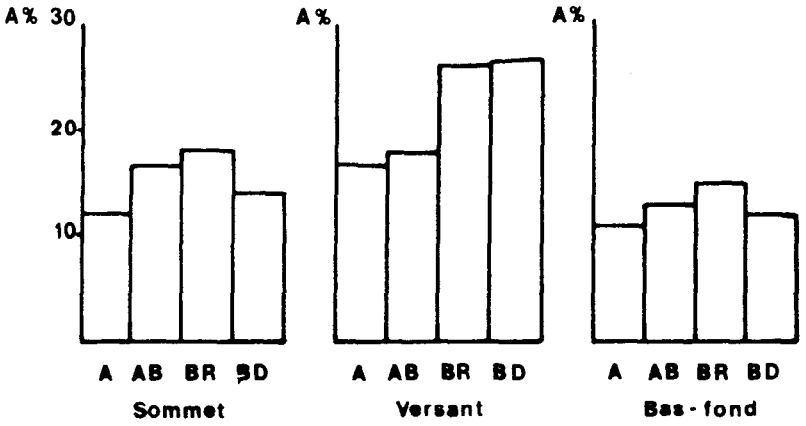


Figure 8 : *Taux d'argile des volumes de sol selon les positions topographiques*

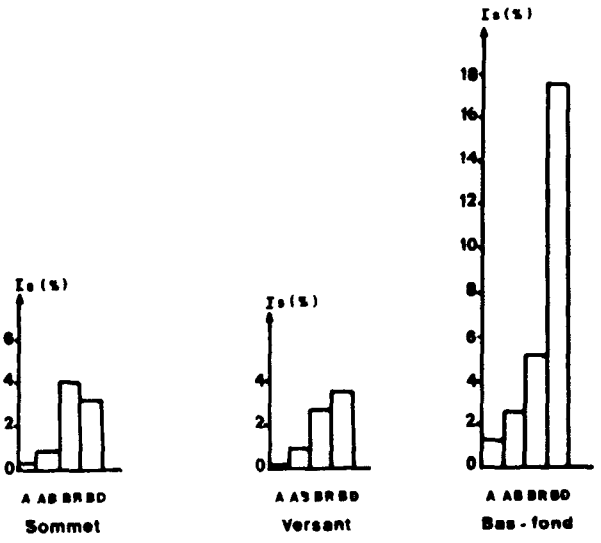


Figure 9 : *Indice d'instabilité des volumes de sol selon les positions topographiques*

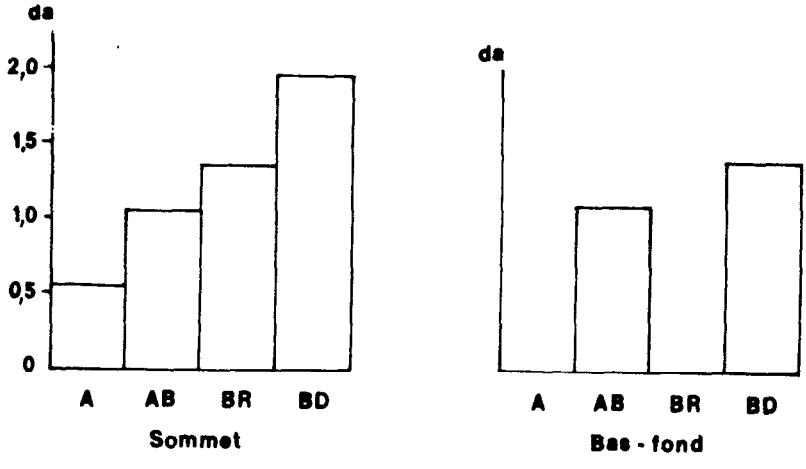


Figure 10 : *Densité apparente des volumes de sol*

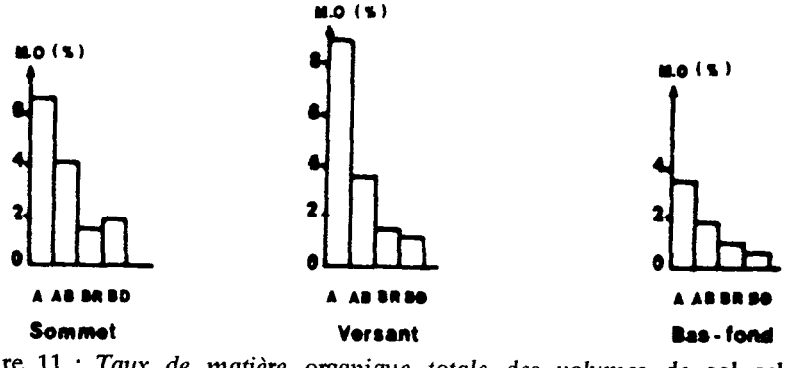


Figure 11 : *Taux de matière organique totale des volumes de sol selon les positions topographiques*

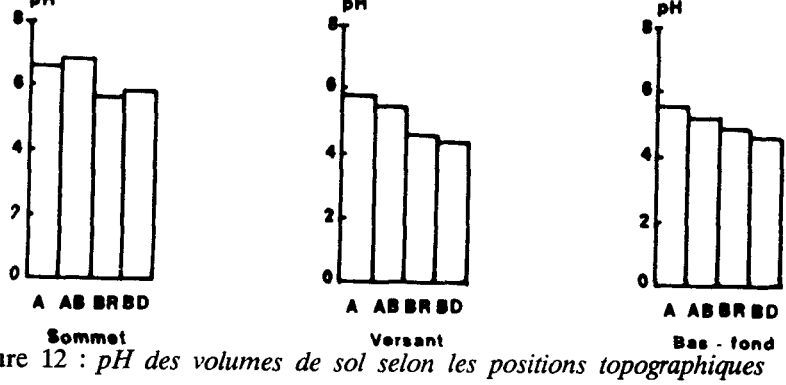


Figure 12 : *pH des volumes de sol selon les positions topographiques*

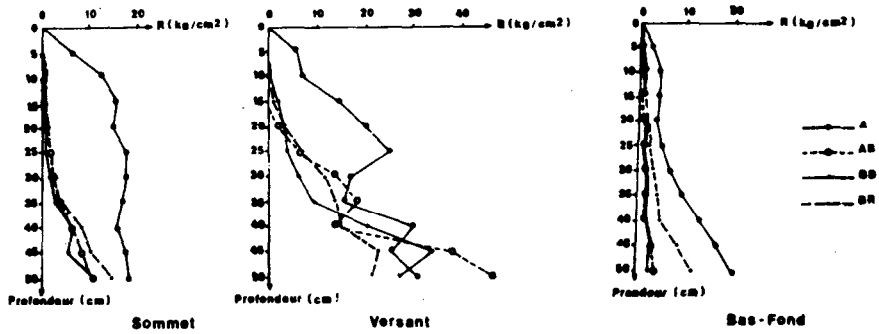


Figure 13 : *Résistance à la pénétration des volumes de sol selon les positions topographiques*

CONCLUSION

Les caractères des sols de Côte d'Ivoire évoluent sous l'effet du défrichement et de la mise en culture. L'évolution est marquée dans le cas des cultures mécanisées et concerne essentiellement les horizons superficiels (0 – 20 cm). Le défrichement motorisé entraîne un remaniement de la surface du sol. Les modifications le long d'une toposéquence reflètent la nature des sols défrichés.

BIBLIOGRAPHIE

AKODO (E. A), 1977 – Etude de l'évolution biochimique des sols ferrallitiques forestiers de basse Côte d'Ivoire, sous l'effet du défrichement. ORSTOM, Adiopodoumé, 80 p.

BLIC (Ph. de), 1976 – Evolution des sols après défrichement et mise en culture semi – mécanisée dans la région centre. Enquête pédologique effectuée en 1975 sur les ensembles de Boyakro et Brikro (secteur de Kounahiri). ORSTOM – A.V.B., Adiopodoumé, 20 p.

COLLINET (J.), 1984 – Hydrodynamique superficielle et érosion comparée de quelques sols ferrallitiques sur défriches forestières traditionnelles (Côte d'Ivoire) *in* : Challenges in Africa hydrology and water resources, IASH publ. n° 144, pp 499 – 516.

COLLINET (J.) & VALENTIN (C.), 1979 – Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cah. ORSTOM*, sér. pédol., 17(4) : 283 – 328.

FRITSCH (E.), 1982 – Evolution des sols sous recrû forestier après mise en culture traditionnelle dans le Sud – Ouest de Côte d'Ivoire. ORSTOM, Adiopodoumé, 60 p, multigr.

GNAMBA (A. S.), 1987 – Activité biologique des types de surfaces observés après différents modes de défrichement des sols du bas Cavaly. D. E. A. en écologie tropicale. ORSTOM – Université d'Abidjan, 25 p.

GODEFROY (J.) & YAO (T.N.), 1989 – Action du chaulage sur les caractéristiques physico – chimiques et la productivité d'un sol tourbeux en culture bananière. A paraître.

HENIN (S.), MONNIER (G.) & COMBEAU (A.), 1958 – Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.*, 9 (1) : 73 – 92.

MONG – GINE (T.), 1979 – Mise en culture et interactions eau – sol – plante : étude de trois sites en région ferrallitique de savane (Touba, nord – ouest de la Côte d'Ivoire). ORSTOM, Adiopodoumé, 54 p., multigr.

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.

MOREAU (R.), 1979 – Etude suivie des caractéristiques analytiques du sol sur le bloc cultural d'Abouakro (région centre Côte d'Ivoire). Présentation sommaire des résultats obtenus sur les quatre premières années de mise en culture. ORSTOM, Adiopodoumé, 8 p., multigr.

MOREAU (R.), 1983 – Evolution des sols sous différents modes de mise en culture, en Côte d'Ivoire forestière et préforestière. *Cah. ORSTOM*, sér. pédol., (20)4 : 311 – 325.

POHE (J.), 1981 – Influence des gravillons sur l'hydrodynamique superficielle (étude expérimentale sous pluies simulées). ORSTOM, Adiopodoumé, 29 p., multigr.

ROOSE (E.J.), 1983 – Ruissellement et érosion avant et après défrichement en fonction du type de culture en Afrique occidentale. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., 20(4) : 327 – 339.

VALENTIN (C.), 1981 – Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez – Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie de l'eau. Thèse 3ème cycle, Univers. Paris VII, Etudes et Thèses, ORSTOM, 1985, 259 p.

YORO (G.), 1984 – Modification des profils culturaux des sols ferrallitiques sur sables tertiaires après mise en culture traditionnelle et semi – mécanisée. ORSTOM, Adiopodoumé, 18 p., multigr.

YORO (G.), 1986 – Appréciation des caractéristiques physico – chimiques des sols selon leur position topographique dans un bassin versant sur schiste, au centre – nord – ouest de la Côte d'Ivoire. ORSTOM, Adiopodoumé, 23 p., multigr.

ANNEXES

LISTE DES PAYS REPRESENTES

Pays africains	Pays européens	Organismes Internationaux
Bénin	Allemagne	FAO
Burkina Faso	Belgique	Bureau Interafricain des sols (OUA)
Burundi	France	IITA Bénin
Cameroun	Pays Bas	
Centrafrique		
Congo		
Côte d'Ivoire		
Gabon		
Guinée		
Guinée Bissau		
Madagascar		
Mali		
Niger		
Rwanda		
Sénégal		
Tanzanie		
Togo		
Zaïre		

Annexes

LISTE ET ADRESSE DES PARTICIPANTS

ALLEMAGNE
Hubertus FRANZEN
IITA Bénin
BP 06 2523
COTONOU
BENIN

ALLEMAGNE
Ronald KUHNE
IITA Bénin
BP 06 2523
COTONOU
BENIN

ALLEMAGNE
Heinz SCHMIDT
DRDR
SOKODE
TOGO

BELGIQUE
Clément MATHIEU
FAO/BNPCS
BP 2157
BANGUI
Rep. CENTRAFRICAINE

BENIN
Anastase AZONTONDE
CENAP
BP 988
COTONOU
BENIN

BENIN
A. Mouïnou IGUE
CENAP
BP 988
COTONOU
BENIN

BENIN
Noël JOHNSON K.
OUA/CSTR
N.P.A. Building 26/28
Marina P.M.B. 2359
LAGOS
NIGERIA

BURKINA FASO
François PALLO
BUNASOL
BP 7142
OUAGADOUGOU
BURKINA FASO

BURKINA FASO
Noumbié SOURABIE
BUNASOL
BP 7142
OUAGADOUGOU
BURKINA FASO

BURKINA FASO
Prosper ZOMBRE
Université (IDR)
BP 7021
OUAGADOUGOU
BURKINA FASO

BURUNDI
Célestin BIGURA
ISABU
BP 795
BUJUMBURA
BURUNDI

CAMEROUN
Paul BILONG
Université de Yaoundé/Département
des Sciences de la Terre
BP 812
Yaoundé
CAMEROUN

CAMEROUN
Joseph BINDZI
IRA/CNS
BP 5578
YAOUNE
CAMEROUN

CAMEROUN
Appolinaire MOUKAM
IRA/CNS
PMB 25
BUEA
CAMEROUN

CAMEROUN
Lamine SEINY BOUKAR
IRA/CNS
BP 33
MAROUA
CAMEROUN

CENTRAFRIQUE
Fidèle NGOUANZE
BNPCS
BP 1374
BANGUI
Rep. CENTRAFRICAINE

CENTRAFRIQUE
Ahmed OUSMAN
BNPCS
BP 1374
BANGUI
Rép. CENTRAFRICAINE

CONGO
Jean – Mathias KOUD
Université
BP 237 INSSED
BRAZZAVILLE
CONGO

CONGO
Antoine MAPANGUI
DGRST/ORSTOM
BP 181
BRAZZAVILLE
CONGO

COTE D'IVOIRE
Ayemou ASSA
Faculté des Sciences et Techniques
22 BP 582
ABIDJAN 22
COTE D'IVOIRE

COTE D'IVOIRE
Gnahoua GODO
IIRSDA
BP V 51
ABIDJAN 01
COTE D'IVOIRE

FRANCE
Didier BLAVET
ORSTOM
BP 375
LOME
TOGO

FRANCE
Pierre BRABANT
ORSTOM
70 – 74, route d'Aulnay
93140 BONDY
FRANCE

FRANCE
Paul FAURE
ORSTOM
70 – 74, route d'Aulnay
93140 BONDY
FRANCE

FRANCE
Michel GAVAUD
ORSTOM
BP 1386
DAKAR
SENEGAL

FRANCE
Claude HANRION
ORSTOM/Université du
Bénin
BP 375
LOME
TOGO

FRANCE
François LENOIR
ORSTOM
BP 375
LOME
TOGO

FRANCE
Georges PEDRO
ORSTOM
213, rue Lafayette
75480 PARIS CEDEX 10
FRANCE

FRANCE
Claude CHEVERRY
ENSA
65, rue de Saint Brieuc
35042 RENNES CEDEX
FRANCE

FRANCE
Emmanuel FRITSCH
ORSTOM
BP 5
54500 VANDOEUVRE
FRANCE

FRANCE
Jean – Claude GRIESBACH
FAO
25, avenue de Duisbourg
LOME
TOGO

FRANCE
Marc LATHAM
IBSRAM
P.O. Box 9 – 109 Bankhen
BANGKOK – 10900
THAILANDE

FRANCE
Roland MOREAU
ORSTOM
BP 5045
34032 MONTPELLIER CEDEX
FRANCE

FRANCE
Catherine PLEUVRET
ORSTOM
BP 375
LOME
TOGO

FRANCE
Roland POSS
ORSTOM s/c DB/SRA
CEN Cadarache
13115 Saint Paul Lez Durance
FRANCE

FRANCE
Michel RAUNET
IRAT/CIRAD
BP 5035
34032 MONTPELLIER CEDEX
FRANCE

FRANCE
Hugues SARAGONI
DRA/IRAT
BP 2318
LOME
TOGO

FRANCE
Pierre SIBAND
IRAT/CIRAD
BP 5035
34032 MONTPELLIER CEDEX
FRANCE

FRANCE
Christian VALENTIN
ORSTOM
70 – 74 route d'Aulnay
93140 BONDY
FRANCE

FRANCE
Boris VOLKOFF
ORSTOM
BP 1857
YAOUNDE
CAMEROUN

GABON
Jean – Bernard MOUTSINGA
IRAF
BP 2246
LIBREVILLE
GABON

GUINEE
Mamadi CAMARA
SENASOL
BP 576
CONAKRY
Rep. de GUINEE

GUINEE
Mamadou SOW
SENASOL
BP 576
CONAKRY
Rep. de GUINEE

GUINEE BISSAU
Alexandre DA COSTA SILVA
MDRP/DHAS
BP 71
BISSAU
GUINEE BISSAU

MADAGASCAR
Raymond RABESON
FOFIFA/CENRADERU
BP 1444
ANTANANARIVO – 101
MADAGASCAR

MADAGASCAR
Justin Dumont RAKOTOMIRAHO
IRNT MRSTD
Tsimbazaza
ANTANANARIVO – 101
MADAGASCAR

MALI
Modibo DIALLO
AGP/SRCVO/IER
BP 438
BAMAKO
MALI

MALI
Bassirou KEITA
IER
BP 438
BAMAKO
MALI

NIGER
Yadji GUERO
Faculté d'Agronomie
BP 10960
NIAMEY
NIGER

PAYS BAS
Godert VAN LYNDEN
FAO
BP 4388
LOME
TOGO

RWANDA
Bernard MUTWEWINGABO
Université Nale du Rwanda
BP 117
BUTARE
RWANDA

SENEGAL
Mamadou KHOUMA
OMVG
BP 2353
DAKAR
SENEGAL

TANZANIE
Method KILASARA
Sokoine University
Labo des Sols CNRA
78000 VERSAILLES
FRANCE

TANZANIE
John J. MSAKY
Sokoine University
P.O. Box 3008
MOROGORO
TANZANIE

TOGO
K. AGBEKO
Université du Bénin ESA
BP 1515
LOME
TOGO

TOGO
Atchouzou AKATA
Institut National des Sols
BP 1026
LOME
TOGO

TOGO
Koffi Lomko ALLAGLO
Institut National des Sols
BP 1026
LOME
TOGO

TOGO
D. Kwasi AWUTE
Direction Générale du
Développement Rural
BP 341
LOME
TOGO

TOGO
Koffi AZIAGBEDE
Institut National des Sols
BP 1026
LOME
TOGO

TOGO
Kokou EGUE
Institut National des Sols
BP 1026
LOME
TOGO

TOGO
Agudze KDEDZROKU
Ferle Semencière de
Sotouboua
SOTOUBOUA
TOGO

TOGO
Ezoun MATHE
Institut National des Sols
BP 1026
LOME
TOGO

TOGO
Koffi MISSOU - ASSOGBA
Institut National des Sols
BP 10126
LOME
TOGO

TOGO
Racim SANT'ANNA
FAO
BP 1628
ACCRA
GHANA

TOGO
Pocanam DOUTI
IRCT
BP 1
ANIE
TOGO

TOGO
Daouda ESSOH
Université du Bénin
BP 1515
LOME
TOGO

TOGO
K. KOUNESTRON
Université du Bénin
BP 1515
LOME
TOGO

TOGO
Kohlavi MAWOUSSI
Institut National des Sols
BP 1026
LOME
TOGO

TOGO
Kodjo OLYMPIO
Institut National de la Recherche
BP 1174
LOME
TOGO

TOGO
Komlavi SEDDOH
Université du Bénin
BP 1515
LOME
TOGO

TOGO
Koffi SODJADAN
Institut National des Sols
BP 1026
LOME
TOGO

TOGO
Komi SOMANA
Direction Recherche Agronomique
BP 2318
LOME
TOGO

TOGO
Tchapkro TCHEMI
Institut National des Sols
BP 1026
LOME
TOGO

TOGO
Boglo TOSSAH
Institut National des Sols
BP 1026
LOME
TOGO

TOGO
Soklou WOROU
INS/ORSTOM
BP 375
LOME
TOGO

ZAIRE
Poto MONDJALIS
INERA
BP 2015
KISANGANI
ZAIRE

Annexes

NOMBRE ET TYPE DE PARTICIPANTS PAR PAYS

Nationalité	Type de participants			
	A	B	C	Tous
Allemagne	0	5	0	5
Belgique	0	1	0	1
Bénin	2	1	0	3
Burkina Faso	2	1	0	3
Burundi	1	0	0	1
Cameroun	4	0	0	4
Centrafrique	2	0	0	2
Congo	2	0	0	2
Côte d'Ivoire	2	0	0	2
France	11	6	2	19
Gabon	1	0	0	1
Guinée	2	0	0	2
Guinée Bissau	1	0	0	1
Madagascar	2	0	0	2
Mali	2	0	0	2
Niger	1	0	0	1
Pays – Bas	0	0	1	1
Rwanda	1	0	0	1
Sénégal	1	0	0	1
Tanzanie	2	0	0	2
Togo	0	9	12	21
Zaïre	1	0	0	1
TOUS	40	23	15	78

Participants A : participants invités résidant hors du Togo
Participants B : participants venant à leurs frais
Participants C : participants invités résidant au Togo