

**L'EROSION ACCELEREE DES SOLS CULTIVES DANS LA
MONTAGNE ANDINE DE L'EQUATEUR (AMERIQUE DU SUD)**

***(SYNTHESE D'UNE RECHERCHE POUR L'OBTENTION
DE L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES)***

***G. De Noni, Géographe physicien, Chercheur à l'ORSTOM,
Laboratoire de Comportement des Sols Cultivés
(Montpellier)***

AVANT-PROPOS

1) ANTECEDENTS

- *sur ma carrière scientifique*

Je suis âgé de 43 ans (marié, 3 enfants à charge), j'ai débuté à l'ORSTOM en 1976 en tant que VSNA puis j'ai intégré le corps des chercheurs en 1978, année où j'ai soutenu une thèse de 3^e cycle de géographie physique à l'Université de Clermont-Ferrand sous la direction des professeurs M. Derruau, P. Pélissier et R. Neboit. Je suis actuellement chargé de recherche 1^{ère} classe, 7^{ème} échelon et membre du Département MAA (Milieux et Activités Agricoles) de l'ORSTOM.

Après une période d'expatriation en Amérique latine (1976-91), je me trouve actuellement en poste au Centre ORSTOM de Montpellier dans le Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC) qui constitue la base arrière métropolitaine de mon UR de rattachement qui s'intitule : *"Bases bio-physiques de la gestion durable des agrosystèmes tropicaux"* (UR 35).

J'assume dans le cadre de cette UR l'animation scientifique du Grand Programme : *"Evaluation et conservation des terres, Stratégies paysannes"*. Depuis le début de l'année 1996, je suis le responsable du laboratoire LCSC qui compte une trentaine de personnes réparties pour moitié entre chercheurs, ingénieurs, techniciens et, étudiants en DEA, doctorants français et étrangers.

- sur la problématique scientifique

Durant ma carrière, ma production scientifique a été guidée par une conviction profonde sur le rôle que devait jouer la recherche scientifique pour le développement agricole en coopération. Cette orientation m'a conduit à me spécialiser progressivement sur les problèmes d'érosion des sols et à réfléchir à la conservation des terres qui constituent l'une des contraintes majeures à la durabilité des agrosystèmes des pays du Sud.

} fr.

Pendant très longtemps, ce type de problématique n'a intéressé que les seules sciences physiques ; néanmoins face aux nombreux échecs enregistrés ici ou là par les projets de conservation et de gestion des sols, les grands organismes internationaux comme le Banque Mondiale de Washington, l'Unesco et la FAO ont provoqué un changement des mentalités. C'est ainsi que, depuis une dizaine d'années, l'approche scientifique s'est étoffée et a pris une dimension à la fois multi-scalaire et interdisciplinaire où l'homme, parce qu'il est à la fois à l'origine de l'accélération du phénomène et la principale victime des dégâts occasionnés, occupe le centre du débat. C'est dans ce contexte en pleine évolution que j'ai pu m'impliquer sur cette problématique et faire apprécier le rôle du géographe physicien à l'interface entre les sciences du milieu et la connaissance de la société.

Si l'érosion est un phénomène naturel dont l'évolution est globalement lente sur les sols cultivés tant que ces derniers

bénéficient d'une bonne couverture végétale ; on constate, lorsque la population croît massivement et qu'elle modifie les conditions d'utilisation des sols notamment par l'extension rapide des activités agricoles et urbaines, une accélération des phénomènes d'érosion qui s'accompagnent d'une baisse importante de la fertilité des sols. A l'approche du 3ème millénaire, le contrôle de l'érosion représente un enjeu fondamental pour le développement si on estime que près de 80% de l'humanité, soit environ 5 milliards d'habitants, se trouvent ou se trouvera sous peu dans des pays du tiers-monde où, depuis des siècles, l'agriculture est l'activité dont dépend la survie des populations.

2) L'ITINERAIRE DE MES RECHERCHES

Les "bonnes" terres agricoles étant déjà surpeuplées dans la plupart des cas, les populations se déplacent et s'installent dans des régions nouvelles où le poids des contraintes naturelles est fort. Cette évolution pose le problème de la gestion durable de l'agrosystème. C'est dans ce contexte que j'ai commencé ma carrière en Amazonie et l'expérience ainsi acquise m'a conduit à me tourner vers les milieux de montagne. Dans cette orientation, l'étape de ma carrière effectuée dans les Andes d'Equateur, où s'est déroulé le programme de recherche que je présente dans cette habilitation, a constitué l'une des périodes clé de ma carrière en Amérique latine. Par la suite, de retour en France, j'ai pu valoriser les acquis et étendre le cadre de mon action aux montagnes

méditerranéennes et travailler aussi en Asie du sud-est (voir point 3.2).

L'Amazonie

Chronologiquement, j'ai débuté mes premières recherches à l'ORSTOM en Amazonie qui a connu, au début des années 1970, une extension rapide des voies de circulation (routes et pistes) provoquée par la découverte d'importantes réserves pétrolières et de leur exploitation. L'ouverture de la région au reste du pays conduit un grand nombre d'agriculteurs andins, poussés à l'exode par l'épuisement des sols dans la montagne, à s'installer en Amazonie. Cette région, considérée jusqu'alors comme un "enfer vert" impénétrable, devient pour l'état un enjeu à double facette :

- économique d'abord, pour faire face aux vagues successives de colons issus essentiellement de la région andine du pays où la population paysanne avait augmenté rapidement. Pour pouvoir maîtriser ces mouvements de population, l'état recherchait un compromis entre une utilisation agricole viable des sols et une gestion conservatoire des ressources naturelles,
- politique, ensuite, pour protéger cette région, devenue attractive, d'une éventuelle invasion territoriale par

l'installation d'une partie des colons à proximité de la frontière avec le Pérou. Il faut rappeler que l'histoire de l'Equateur et du Pérou a été émaillée par de multiples conflits frontaliers pour la conquête de l'Amazonie, plus précisément pour son sous-sol riche en pétrole.

L'objectif de l'équipe où j'étais inséré était, sur la base d'une évaluation cartographique des unités morpho-pédologiques de l'Amazonie équatorienne, d'une part d'identifier et de caractériser les terres en cours de colonisation et d'autre part de distinguer parmi les unités restantes, les zones aptes pour l'agriculture et celles à protéger pour leur patrimoine floristique et faunique. Dans cet esprit, j'ai travaillé, dans des conditions très difficiles de prospection, dans les 4 provinces qui forment l'Amazonie équatorienne - du nord au sud : Napo, Pastaza, Morona-Santiago et Zamora-Chinchipe - et j'ai interprété, à cette occasion, plusieurs centaines de photographies aériennes à l'échelle du 40.000 et du 60.000 ème ainsi que des scènes Landsat. J'ai participé avec M. Sourdat (pédologue) à la réalisation de la carte morpho-pédologique de la Province de Napo (51.800 km²) et j'ai exécuté seul celle de la province de Pastaza (32.000 km²). Avec F. Colmet-Daage (agro-pédologue), j'ai réalisé la cartographie de 19 feuilles au 50.000 ème des provinces de Morona-Santiago et Zamora-Chinchipe. Les cartes, que j'ai réalisées à cette occasion, sont citées dans la partie "cartes et documents d'exposition" de ma bibliographie (voir point 4).

Les problématiques, les méthodologies et les résultats issus de cette recherche en Amazonie ont été diffusés dans plusieurs documents que j'ai fait figurer également dans la bibliographie du point 4. Parmi ceux-ci, on peut ressortir les documents de synthèse suivants :

- un doctorat de 3^{ème} cycle (1978) sur l'Amazonie équatorienne (Province de Pastaza), soutenu à l' Institut de Géographie de Clermont-Fd,
- des cartes de synthèse dans 2 atlas géographiques édités en couleurs (Ed. IGM, 1977 et Ed. "Jeune Afrique", 1980).

Outre les acquis obtenus dans les domaines de la géomorphologie et de l'agro-pédologie, on soulignera essentiellement que cette recherche a permis de discuter et d'analyser le poids des contraintes naturelles dans le cadre d'une colonisation massive de la région amazonienne. L'exploitation inconsidérée de la forêt n'étant pas une solution à long terme, il ressortait qu'il fallait agir également à l'origine du problème, principalement dans les Andes d'où provenait la grande majorité des colons. Pour pouvoir contrôler l'exode rural, la mise en place d'un programme de lutte contre l'érosion des sols était nécessaire dans les Andes ce qui m'a conduit à m'intéresser à ce milieu montagnard.

Les Andes

C'est à l'occasion de ce programme d'étude sur les Andes que je me suis totalement investi sur la thématique de l'érosion et la conservation des sols agricoles. Compte tenu qu'il existait peu de références sur l'érosion accélérée des sols cultivés en Equateur et sur la montagne andine en général, plusieurs types d'approches ont été développées afin de répondre à l'objectif contractuel qui visait à identifier des méthodes conservatoires efficaces et à la portée du paysannat local. C'est ainsi que des recherches multi-scalaires, tant dans le domaine de la cartographie que dans celui de l'expérimentation en situations témoins et améliorées ou de l'enquête agronomique, ont été mises en place et adaptées aux conditions locales. Durant la période où je suis resté en Equateur, cette recherche a donné lieu à plusieurs publications à mesure de l'obtention des résultats (voir bibliographie, au point 4). Avant de quitter l'Equateur, tous les résultats bruts ainsi que les notes techniques et méthodologiques ont été remis au partenaire ("Guia metodologica y practica del proyecto DNA-ORSTOM", Accord DNA-ORSTOM, 67 p. avec 31 fig. et cartes, "Las estaciones: problematica - escogitamiento - resultados" , Accord DNA-ORSTOM, 165 p. et "La simulacion de lluvia : metodologias y practicas, Accord DNA-ORSTOM, 66 p.).

Il manquait donc une synthèse scientifique sur les méthodes utilisées et les résultats acquis au cours de toute la période.

C'est l'objet de la présente habilitation qui pose le problème de la gestion durable des agrosystèmes de montagne, de la survie d'un groupe humain et d'une structure agraire particulière, "le minifundio". De la synthèse présentée ici, on peut tirer un bilan qui se compose de plusieurs grands types d'acquis :

- d'ordre méthodologique. On a tenté d'apprécier l'érosion accélérée des sols cultivés à différentes échelles : régionale, grands bassins versants (de 5000 à 20.000 km²) et versants. Parmi celles-ci, l'échelle du bassin versant s'est révélée être une échelle d'appréciation pertinente et utile, tant au niveau de l'étude des manifestations érosives et de leurs causes qu'à celui de la valorisation des résultats pour la gestion conservatoire des sols cultivés andins. En effet, le bassin versant, parce qu'il intègre les relations existant entre les parties amont et aval d'un relief, fournit un découpage naturel du milieu bien adapté à la montagne ;

- d'ordre scientifique. Des expérimentations sous pluies naturelles et simulées ont permis, sur des situations cultivées témoins, d'effectuer un bilan de l'érosion accélérée des sols cultivés et de hiérarchiser les facteurs mis en cause. Dans tous les cas, l'érosion est forte même s'il existe des différences de comportement entre les situations culturelles pour un même type de sol et globalement entre les sols des différentes stations étudiées. Les sols andiques, lorsqu'ils sont mis en culture, se montrent plus sensibles à l'érosion que les autres types de sol, en particulier les sols vertiques. Le

taux d'argile dans les sols constitue un critère essentiel d'évaluation de la résistance des sols cultivés à l'érosion accélérée. L'inclinaison de la pente est aussi un facteur primordial.

Néanmoins, notre analyse montre aussi que le poids des contraintes naturelles, imposé par la haute montagne andine, n'est pas suffisant pour expliquer à lui seul l'ampleur des phénomènes. L'extension dans le cadre du minifundio d'un agrosystème original sur les versants et les hautes terres andines contribue également à fragiliser le milieu et à accélérer l'érosion des sols cultivés, depuis une quarantaine d'années. Dans l'état actuel et à l'opposé des stratégies conservatoires mises au point par les sociétés pré-hispaniques, avec des densités de population élevées pour l'époque, le minifundio souffre d'un manque évident de "savoir-faire" et d'appui technique extérieur. A condition de combler "ces manques" et en s'inspirant de l'exemple des sociétés d'autrefois, la maîtrise de l'érosion semble possible. Notre recherche pose un diagnostic d'espoir et évince toutes formes de catastrophisme, en proposant des solutions pratiques de lutte anti-érosive ;

- d'ordre technique appliqué à la gestion des terres. Notre recherche aborde le domaine de la gestion conservatoire des sols. Grâce aux mesures réalisées en situations témoins qui ont permis de hiérarchiser les facteurs d'accélération de l'érosion des sols cultivés, il a été possible d'envisager des solutions pour intervenir sur ces derniers. Ces solutions ont été testées expérimentalement sur des situations améliorées

qui montrent, par comparaison avec les situations témoins, que la progression de l'érosion n'est pas une fatalité. L'homme étant impliqué directement dans la dynamique des processus, son influence peut être corrigée de façon à ramener les effets de l'érosion à des normes admissibles, dans notre cas à moins d'une tonne par hectare et par an. En prenant en compte les matériaux et les "savoir-faire" locaux, on a pu mettre au point des méthodes efficaces pour dissiper l'énergie du ruissellement et pour contrôler l'érosion mécanique dite "sèche" et les effets des reports hydriques ("run on") qui sont les principaux mécanismes mis en jeu ;

et d'administration de la recherche, enfin. Mon travail s'est effectué dans le cadre d'une équipe franco-équatorienne, composée notamment de M. Viennot et J. Asseline (pédologues de l'ORSTOM), et de G. Trujillo et E. Custode, agronomes équatoriens. Durant toute la période de la recherche, j'étais Responsable de l'Antenne ORSTOM au Ministère équatorien de l'Agriculture et de l'Elevage et Responsable scientifique et administratif de cette équipe. Grâce à ma formation de géographe, j'ai pu, je le pense, favoriser l'intégration de disciplines multiples et éviter, ainsi, des orientations dans des voies trop strictement disciplinaires et fondamentales, ce qui n'était pas le but recherché compte tenu de la demande spécifique et appliquée du partenaire. Resituer sans cesse la problématique par rapport à des milieux géographiques et des bassins versants représentatifs où les facteurs naturels n'agissent pas seuls mais en inter-relations avec l'homme et diriger la recherche vers l'application des résultats au service

du développement en coopération ont été les "maîtres mots" de mon action.

Durant cette même période, j'ai assumé également les responsabilités suivantes :

- de 1986 à 1991 : Représentant adjoint, Mission ORSTOM-Quito,
- de 1990 à 1991 : Régisseur d'Avances et de Recettes, Mission ORSTOM-Quito,

3) LA VALORISATION DE MES RECHERCHES : POUR UNE GEOGRAPHIE APPLIQUEE

La valorisation de mes recherches s'est amorcée d'abord en Equateur et en Amérique latine à mesure de la diffusion des résultats, elles s'est poursuivie et s'est enrichie par la suite avec mon retour en France, au centre ORSTOM de Montpellier.

En Equateur et en Amérique latine

J'ai pu valoriser mes recherches dans les domaines suivants :

- recherche pour le développement :

Grâce à la stratégie adoptée, qui était fondée sur l'installation dans le minifundio de stations qui servaient à la fois de sites de recherches et de sites de démonstration et de concertation entre agriculteurs et chercheurs, il a été ainsi possible d'appliquer et de valoriser les résultats de la recherche à l'échelle du terroir villageois (se reporter au chapitre 4 de l'habilitation). Cette action s'est soldée en particulier par la mise en place d'une opération où ont participé, en vraies conditions de terrain, une trentaine de familles vivant à proximité de la station de Mojanda. Celle-ci a pu réussir parce qu'elle s'appuyait sur une participation forte du paysannat local et sur des ouvrages conservatoires efficaces et d'un coût d'installation et d'entretien raisonnable, calculé en 1993 entre 1000 et 2000 FF/ha/5 ans selon les stations, soit près de 10 fois moins que ce qui était préconisé jusqu'alors ;

- formation du partenariat local :

Au début du programme, il n'existait au Ministère de l'Agriculture aucun service spécialisé sur l'érosion et la

conservation des sols. L'intérêt suscité par les premières recherches a permis la constitution d'un groupe de réflexion, auquel j'ai fortement contribué, et à la création du Programme National de Conservation des Sols (PRONACOS). Cette structure a évolué et s'est étoffée par la suite pour devenir une Direction Nationale Agricole (DNA) qui était, à mon départ d'Equateur, l'une des directions les plus importantes du Ministère de l'Agriculture. Grâce à la mise en place de ces moyens, il a été possible de :

- + former une équipe opérationnelle et adaptée aux objectifs contractuels du programme. Parmi les intervenants majeurs, G. Trujillo et E. Custode (volet diagnostic et expérimentation), W. Vivero (volet application) et E. Mendoza (laboratoire des sols) ont joué un rôle fondamental. A mon initiative, tous ont pu effectuer entre 1987 et 1992 des stages de spécialisation en France dans les laboratoires de l'ORSTOM et ont appris le français. Ils constituent actuellement l'épine dorsale de la DNA et sont "la mémoire" du travail accompli en coopération. Ils appliquent désormais notre approche méthodologique à plusieurs niveaux d'échelles - régionale, bassins versants et versants - utilisent de façon complémentaire des outils de recherche telles que la cartographie et les expérimentations sous pluies naturelles et simulées,

- + de mettre en place un réseau régional de stations de mesures de l'érosion en situations témoins et améliorées. Ce travail de formation a dépassé, par ailleurs, le cadre de

l'équipe du Ministère de l'Agriculture, en particulier dans le domaine de l'expérimentation sous pluies naturelles et simulées. A mon départ d'Equateur, le réseau de stations s'étendait, en effet, sur près de 800 km car il s'appuyait sur des équipes d'autres organismes régionaux de développement rural. Il concernait : l'UMACPA (Unité d'Aménagement du bassin de Paute) pour les Andes centrales, le CATER (Centre Andin de Technologie Rural) pour les Andes méridionales et l'UTB (Université Technique de Babahoyo) ;

- l'enseignement :

Chaque année et sur toutes les stations, des étudiants étaient placés sur le terrain pour assurer le suivi quotidien des observations. J'ai pu participer à l'encadrement de plusieurs promotions d'étudiants qui étaient chargés de ce suivi. 15 mémoires ~~de thèse~~ pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome, ont ainsi été réalisés. De 1986 à 1991, j'ai bénéficié du concours de 3 VSNA agronomes et contribué à leur formation.

Parallèlement, j'ai participé avec mes collègues équatoriens à l'ouverture d'un cycle nouveau d'enseignement sur la dégradation des terres dans les Universités - Catholique et Centrale - de Quito ainsi qu'à l'Institut Panaméricain de Géographie et d'Histoire (IPGH). J'ai donné, chaque année, une vingtaine d'heures de cours environ, en ~~classe~~ ^{sur le terrain} et sur le terrain. A ce titre, j'ai été chargé de l'encadrement de 2 thèses : l'une sur "L'histoire de l'érosion agricole en Equateur" (1989), l'autre sur "L'érosion éolienne dans la région de Tabacundo"

(1989-90). Après mon départ, mes collègues équatoriens ont poursuivi cet enseignement ;

- administration et direction des recherches :

A la suite de mes premières recherches en Amazonie et du recentrage des études sur l'érosion dans les Andes, j'ai eu la responsabilité d'élaborer les termes de référence de 2 conventions internationales engageant le Ministère équatorien de l'Agriculture et de l'Elevage (MAG) et l'ORSTOM (accord de coopération entre le PRONACOS - Programme National de Conservation des Sols du MAG et l'ORSTOM ; et accord de coopération entre la DNA - Direction Nationale Agricole du MAG et l'ORSTOM) et de diriger les équipes et les recherches correspondantes ;

- coopération internationale :

Durant le programme, j'ai réalisé plusieurs missions sur le continent sud-américain (Colombie, Uruguay, Argentine, Paraguay, Pérou et Brésil) qui m'ont permis d'engager des actions conjointes avec des organismes internationaux très actifs dans cette partie du monde. Parmi celles-ci, on peut citer ma participation :

+ au comité de pilotage de la FAO pour la mise en place d'une structure de formation sur l'agriculture de montagne dans les Andes et à celui du réseau MAB (Man and Biosphere) de l'UNESCO qui a participé au co-financement des stations et à

l'achat du simulateur de pluie. D'autre part, un séminaire a pu être organisé à Quito sur la conservation des sols grâce à l'appui de l'UNESCO,

+ à l'accueil et à l'encadrement d'étudiants proposés par l'Agence internationale des USA pour "Development strategies for fragile lands" et le Département d'Agronomie de l'Université de Cornell de New-York,

+ aux activités de l'ISCO (International Soil Conservation Organization) qui est l'une des structures de référence à l'échelle internationale pour les études sur l'érosion et la conservation des sols agricoles et qui est composée d'un groupe d'experts avec une forte représentation de géographes anglo-saxons et suisses.

Durant cette même période, j'étais membre élu du Conseil de l'Association Française de Géographie Physique (Collège des chercheurs) et du Comité Directeur du Collège des Géographes de l'Equateur.

**Depuis mon retour en France, au centre
ORSTOM de Montpellier**

Depuis mon retour en France, je me trouve ^{affecté} en poste au Laboratoire de comportement des sols cultivés (LCSC) qui est la structure de recherche de l'ORSTOM qui s'occupe des propriétés physiques et chimiques des sols tropicaux cultivés et des risques de dégradation. J'assume la responsabilité de ce laboratoire depuis le début de l'année 1996. Durant cette période, je me suis investi dans les domaines suivants :

- Activités de recherche. Elles se situent dans le prolongement de la problématique affichée dans les Andes équatoriennes et concernent les programmes suivants :

- " *Régénération et conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique Latine : Chili, Equateur et Mexique*". Il s'agit d'un programme CEE-STD3 qui fait intervenir différentes UR de l'ORSTOM, 3 pays latino-américains et pour l'Europe, l'ORSTOM et ^{qu'en ?} l'Allemagne. Parmi les andosols, il existe des sols particuliers qui se caractérisent par la présence d'horizons indurés qui les rendent incultes en l'état pour l'agriculture. Ces sols occupent une grande extension en Amérique Latine, notamment en Equateur, au Mexique et plus localement au Chili. Là où ces sols se développent, on observe une extension des paysages dégradés et une croissance de l'exode rural. L'objectif de ce programme est d'évaluer l'extension de ces

sols, leur comportement hydrodynamique et les possibilités de réhabilitation pour l'agriculture après ameublissement des horizons indurés. Ce programme m'a donné l'occasion d'encadrer, en 1995-96, 2 étudiants de l'Université de Paris VII sur les techniques d'interprétation des images du satellite Spot,

- "*Etude et évaluation des risques de dégradation des sols agricoles et gestion durable*". Il s'agit d'une activité de recherche propre au LCSC dont l'objectif est de mettre au point des innovations méthodologiques pouvant être transférées outre-mer dans le domaine de la dynamique du ruissellement, tant dans sa fonction de production (érodibilité et érodabilité) que dans celle de transfert (relations entre énergie du ruissellement, longueur et inclinaison de pente). Il s'agit d'une approche multi-échelles englobant des mesures à l'échelle du m² et de la parcelle ainsi que la spatialisation des données aux échelles locales (terroir, petite région). Parmi les actions en cours actuellement, j'interviens sur les sites suivants :

+ en milieu méditerranéen. Les recherches concernent 2 sites métropolitains : l'un se situe dans le sud-Aveyron, en collaboration avec la Chambre d'Agriculture de cette région et l'autre dans l'Hérault, sur le bassin-versant de Roujan, en collaboration avec l'INRA. Une nouvelle action devrait débuter en cours d'année au Maroc dans le cadre d'un autre programme CEE (Hydromed) où sont engagés plusieurs pays méditerranéens,

+ en Asie du sud-est. Ce programme, qui reçoit également l'appui de la CEE, concerne la mise en valeur de deux provinces montagneuses du Vietnam : Thai Yuen au nord et Lam Dong au sud. La mission, que j'ai réalisée dans ce pays en novembre 1995, m'a permis de dresser un premier inventaire des manifestations majeures de l'érosion des sols. A terme, ce programme vise à constituer un outil d'aide à la décision alimenté par une base de données focalisée, en particulier, sur les problèmes de dégradation du milieu ;

- Valorisation et direction des activités de recherche. Il s'agit parmi les faits saillants :

+ de ma contribution à la création d'une nouvelle UR et de l'animation scientifique du LCSC. Dans le cadre de la restructuration du département MAA (Milieux et Activités Agricoles) de l'ORSTOM en 1995, j'ai rédigé avec C. Feller la fiche scientifique et opérationnelle d'une nouvelle UR sur le thème : "Bases bio-physiques de la gestion durable des agrosystèmes tropicaux" et j'ai pris à ma charge le montage du Grand Programme : "*Evaluation, conservation des terres, Stratégies paysannes*". Enfin, compte tenu de mes nouvelles fonctions en tant que responsable du LCSC, je viens de rédiger un contrat de programme permettant d'engager et d'intégrer les activités du LCSC pour la période 1996-99 sur la thématique : " *Déterminants et spatialisation des risques de dégradation des sols tropicaux cultivés : études multi-échelles, en laboratoire et sur le terrain*" ;

+ de ma participation à l'équipe d'animation du Réseau Erosion. Je co-anime avec E. Roose et J.M. Lamachère, respectivement agro-pédologue et hydrologue de l'ORSTOM, ce réseau qui compte près de 700 membres répartis en Europe, Afrique et Amérique Latine. Au cours des 3 années passées, j'ai pu ainsi participer à l'organisation de 4 réunions, qui regroupent en moyenne une centaine de participants, sur les thèmes suivants : "Contribution de l'agriculture et de l'élevage à l'érosion : aspects positifs et négatifs (1993)", "L'environnement humain de l'érosion (1994)", "Etats de surface et érosion. Cartographie et évaluation des risques (1995)" et "L'érosion des sols en montagne méditerranéenne (1996)". La prochaine réunion aura lieu en 1997 au Canada, à l'invitation de la Société Québécoise de Science du Sol.

4) BIBLIOGRAPHIE

Toutes les références concernant les problèmes d'érosion et de conservation des sols dans les Andes équatoriennes sont repris dans l'habilitation pour illustrer les méthodes utilisées, la présentation et l'interprétation des résultats. Concernant cette liste bibliographique qui couvre ma carrière à l'ORSTOM, je souhaiterais faire ressortir les commentaires suivants :

- d'une part, durant ma période d'expatriation, ma production scientifique a été suscitée, pour sa plus grande part, par ma contribution :

+ à tous les documents de synthèse concernant la géographie de l'Equateur, en particulier : 2 atlas géographiques, l'ouvrage en 2 volumes "Equateur 1986" (Ed. ORSTOM) et la Géographie de base de l'Equateur (Ed. IPGH - ORSTOM),

+ ainsi qu'aux principales réunions et colloques, concernant la gestion et la dégradation des terres, qui se sont déroulées : en Equateur, en Amérique centrale et latine (Mexique, Venezuela, Colombie, Chili, Uruguay) et en France (Grenoble, Toulouse, AFGP et ORSTOM).

- d'autre part, la majorité de ma production scientifique est en français et en espagnol. Le recours à cette langue, même si les revues sont parfois d'une qualité secondaire, était le seul moyen efficace pour diffuser nos résultats en Equateur ainsi que sur le reste du continent latino-américain. Depuis mon retour en France, je m'efforce d'augmenter ma production en anglais.

Ma liste bibliographique est donc la suivante :

Articles dans Revues

De Noni, G., 1976 - Volcanismo reciente en Ecuador, Revista geografica n°9, IGM, Quito, p. 135-145, 2 cartes dans le texte.

- 2 De Noni, G., & Derruau, M., 1979 - "Sur la géomorphologie des pyroclastites dans les Andes de l'Equateur" (partie méridionale exclue). Cahiers ORSTOM, série Sciences Humaines, Vol. XVI, 3, p. 251-259.

De Noni, G., 1982 - "Análisis cualitativo de tres procesos de erosión en la Sierra volcánica del Ecuador". Documentos de investigación, Quito, CEDIG-ORSTOM, n° 2, p. 39-54.

De Noni, G., & Derruau, M., 1982 - "La geomorfología de los piroclastos en los Andes del Ecuador". Documentos de investigación, Quito, CEDIG-ORSTOM, n° 1., p. 21-32.

De Noni, G., Nouvelot, J. F., & Trujillo, G., 1984 - Erosión y conservación en la Sierra volcánica ecuatoriana : el ejemplo de las parcelas de Alangasi. Boletín extraordinario de la Sociedad ecuatoriana de la Ciencia del Suelo, Quito, p. 34-53.

De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1986 - L'érosion et la conservation des sols en Equateur. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. 22, n° 2, p. 235-245.

De Noni, G., Del.Pozo, G., & Nouvelot, J. F., 1984 - Diagnóstico de los procesos erosivos, sus causas y riesgos en base al uso de la información del inventario de recursos naturales renovables : un ejemplo en la Sierra ecuatoriana. Boletín extraordinario de la Ciencia del Suelo, Quito, p. 71-81.

De Noni, B., De Noni, G., Fernandez, M., & Peltre, P., 1986 - Accidentes climáticos y gestión de las quebradas de Quito. Análisis del aluvión de la Raya del 23 de enero de 1986. revue de CEPEIGE, Quito, p. 25-44.

De Noni, G., & Trujillo, G., 1986 - La erosión actual y potencial en Ecuador : localización, manifestaciones y causas. CEDIG-ORSTOM, Documentos de investigación, Quito, n° 6, p. 5-14.

De Noni, G., Nouvelot, J. F., & Trujillo, G., 1986 - Estudio cuantitativo de la erosión con fines de protección de los suelos : las parcelas de ALANGASI y Ilalo. CEDIG-ORSTOM, Documents de investigación, Quito, n° 6, p. 35-47.

10

De Noni, G., 1986 - Breve vision historica de la erosion en el Ecuador. CEDIG-ORSTOM, Documents de investigacion, Quito, n° 6, p. 15-23.

De Noni, G., Aspiazu, P., & al., 1986 - Erosion eolica al norte de la hoya de Quito. CEDIG-ORSTOM, Documents de investigacion, Quito, n° 6, p. 69-78.

De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1988 - El hombre y el erosion en El Ecuador. Revista geografica, IGM, Quito, n° 25, p. 169-180.

De Noni, B., De.Noni, G., Fernandez, M., & Peltre, P., 1988 - Drainage urbain et accidents climatiques à Quito (Equateur). Analyse d'un cas récent de crue boueuse. Cah. Sci. Hum., ORSTOM, Paris, Vol 24, n° 2, p. 225-249.

De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1989 - Erosion-conservacion de suelos : la experimentacion-demostracion, una herramienta en la lucha anti-erosiva. M.A.G.-PRESESUR, Loja, p. 1-15.

~~De Noni, G., & Viennot, M., 1989 - Le projet DNA-ORSTOM sur l'Etude de l'érosion et des pratiques de conservation des sols en Equateur. Réseau Erosion Bulletin, ORSTOM, Montpellier, p. 1-5.~~

De Noni, G., Viennot, M., & Trujillo, G., 1989 - La geografia al servicio del desarrollo agricola : el ejemplo del proyecto "Erosion y Conservacion de suelos en El Ecuador". Bulletin du Collège des Géographes de l'Equateur, Quito, n° 9, p. 2-4.

18 Trujillo, G., De.Noni, G., & Viennot, M., 1990 - La erosion del suelo en Ecuador. Revue de la Universidad Catolica del Ecuador, Année XVIII, Quito-Equateur, n° 53, p. 263-270.

De Noni, G., & Roose, E., 1990 - Erosion et Conservation des sols au Kenya et en Ethiopie (6^{ème} Conférence de l'ISCO). Réseau Erosion Bulletin, ORSTOM, Montpellier, n° 10, p. 139-146.

De Noni, G., Viennot, M., & Trujillo, G., 1990 - Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Equateur. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., Vol. 25, n° 1-2, p. 183-196.

De Noni, G., & Viennot, M., 1991 - L'érosion agricole dans les Andes de l'Equateur. Réseau Erosion Bulletin, ORSTOM, Montpellier, n°11, p. 206-209.

De Noni, G., & Viennot, M., 1993 - La lutte anti-érosive en milieu agricole : mythe ou réalité. Réseau Erosion Bulletin, ORSTOM, Montpellier, n° 13, p. 5-11.

De Noni, G., Misset M., Quantin P., Roose E. & Viennot, M., 1994 - Conservation et réhabilitation des sols agricoles a travers l'étude de 3 exemples menés par l'ORSTOM, Réseau Erosion Bulletin, ORSTOM, Montpellier, n° 14, p. 165-174.

De Noni, G., & Viennot, M., 1995 - Environnement historique de l'érosion des sols en Equateur, Réseau Erosion Bulletin, ORSTOM, Montpellier, n° 15, p. 96-103.

Asseline J., De Noni, G., Roose E. & Nouvelot J.F., 1995 -Caractérisation de l'érodibilité d'une terre de moyenne montagne méditerranéenne, Réseau Erosion Bulletin, ORSTOM, Montpellier, n° 15, p. 471-488.

A paraître en 1997 (publications acceptées) :

De Noni, G, Viennot, M. - Mutations récentes de l'agriculture équatorienne, conséquences sur la "durabilité" des agrosystèmes andins, Cah. ORSTOM; série Pédologie, Paris, 16 p.

De Noni, G., Viennot, M. - Spatialisation de l'érosion des sols en Equateur, in Réseau Erosion n° 16, Montpellier, 10 p.

Asseline, J., De Noni, G., Nouvelot, J.F., Roose, E. - Note sur la construction et l'utilisation d'un simulateur de ruissellement, Cah. ORSTOM; série Pédologie, Paris, 9 p. .

Chaume R., De Noni, G., Dessay N., Servenay A., Viennot M. - Etude multi-temporelle d'un sol volcanique induré des Andes équatoriennes à partir de deux images Spot, in "Revue de Photo-interprétation", Paris, 12 p.

De Noni G., Roose E. - Are soils researches still important for soil conservation ? A case study of runoff and subsurface runoff risks on a cultivated steep slope of Aveyron (Southern of France), in ISCO 9, Francfort, 10 p.

Barthès (B.), Albrecht (A.), De Noni (G.), Roose (E.). - Etude de l'érosion hydrique et de la fertilité des sols dans le sud Aveyron, à paraître dans "Etude et gestion des sols".

Chapitre d'ouvrage et d'actes de colloques et séminaires

De Noni, G., & Nouvelot, J. F., 1983 - Los principales procesos erosivos en Ecuador. in "Políticas sobre conservación de los recursos naturales renovables en particular del recurso suelo", Ed. PRONACOS-UNESCO, Quito, p. 50-61.

De Noni, G., 1984 - Study of erosion and soil conservation practices in Ecuador under implementation of a network of pilot projects, in "Environmental Perception for Latin America and the Caribbean". UNESCO. Montevideo, Uruguay, p. 35-38 .

De Noni, G., Nouvelot, J. F., & Trujillo, G., 1985 - Erosion and conservation of volcanic ash soils in the higlands of Ecuador :

a case study. *in* Taxonomy and management of andisols : sixth international soil classification workshop, Chile and Ecuador, part 1. SMSS (Washington), PUCC (Santiago de Chile), p. 263-274 .

De Noni, G., & Trujillo, G., 1986 - Degradacion de los suelos en el Ecuador : principales causas y algunas reflexiones sobre la conservacion de este recurso. *in* "Cultura" Vol. 8, n° 24a. Banco Central, Quito, p. 383-394 .

De Noni, G., & Viennot, M., 1986 - Estudio de algunos procesos de erosion en la Sierra volcanica del Ecuador (3200 m - 4800 m). *in* Manejo y conservacion de suelos en America Latina, Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo. Vol. 16, n° 1. Bogota, p. 23-31 .

De Noni, G., Pourrut, P., & Viennot, M., 1987 - Analyse de l'impact du "Nino" 1982-83 sur le milieu morphodynamique instable de l'Equateur. *in* "Climats et riches naturels". A.F.G.P. Paris, p. 157-168 .

De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1988 - The soil conservation project in the ecuadorian Sierra by MAG-ORSTOM. *in* "Usos sostenidos de tierras en laderas". DESFIL. Quito-Salcedo, p. 345-358 .

De Noni, G., & Trujillo, G., 1989 - Principales causas et quelques réflexions sur la dégradation et la conservation des sols en Equateur. *in* "Ecuador 1986". éd. de l'ORSTOM, Colloques et Séminaires, Paris, p. 133-143 .

De Noni, B., De.Noni, G., & Viennot, M., 1990 - Le poids de l'histoire sur la morphogenèse agricole des Andes de l'Equateur. *in* La Terre et les Hommes, Mélanges offerts à M. Derruau. A.P.F.L.C. Clermont-Ferrand, p. 511-534 .

10/ De Noni, G., & Viennot, M., 1990 - De l'approximation cartographique aux réalisations de terrain : la lutte contre l'érosion agricole dans les Andes équatoriennes. *in* "Les

sociétés rurales de montagne (Andes et Himalaya)". Université de Grenoble - CNRS, p. 61-65 .

Custode, E., De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1991 - La cangahua en el Ecuador caracterización morpho-edafológica y comportamiento frente a la erosión, *in* Suelos volcanicos endurecidos. 1 carte et 10 tab., Mexico, p. 332-346 .

De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1991 - Ensayo de análisis histórico, social y económico de la cangahua en el Ecuador, *in* Suelos volcanicos endurecidos. 1 carte et 5 tab., Mexico, p. 503-514 .

De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1992 - Soil erosion in the Andes of Ecuador, *in* Soil Conservation for survival. Ed. SWCS-ISCO-WASWC. Berne, p. 549-558.

De Noni, G., & Viennot, M., 1993 - Soil erosion and conservation on varied volcanic deposits in higland Ecuador, Universités de Leeds et de Birmingham.(sous presse).

De Noni, G., Misset, M. A., Quantin, P., Roose, E., Zebrowski, C., & Viennot, M., 1993 - Conservation et restauration des sols agricoles à travers l'étude de 3 exemples menés par l'ORSTOM : Algérie, Equateur et Mexique, Colloque International de Téhéran sur l'eau et les sols. (sous presse).

De Noni, G, Trujillo, G., Viennot, M., 1994 - Erosion agricole dans les Andes de l'Equateur, Bull. pédologique de la FAO, Ch. 13, n° 70, Rome, pp. 352-362.

(x) De Noni, G, Janeau, J.L., Prat, C., Trujillo, G., Viennot, M., 1994 - Hydrodynamique, érodibilité et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique latine (Equateur, Mexique et Nicaragua) : impact du matériau originel et effet de la réhabilitation agricole, XVè Congrès International de Science du Sol, vol. 6 a, Commission V, 10-16 Juillet 1994, Acapulco (Mexique) pp. 554-570.

De Noni , G., et al., 1994 : Révision et représentation iconographique des chapitres "Dynamique, Erosion et Fertilité des sols", in Sciences du Sud, ORSTOM, Paris, 167 p.

Asseline, J., De Noni, G., Nouvelot, J.F, Roose, E., 1994 - Soil erodability in mediteranean mountains of Aveyron (in southern of France), VIII^e Conférence International de l' ISCO, "Soil and Water Conservation : Challenges and Opportunities, New-Delhi (Inde), 4-8 Décembre 1994 (sous presse).

De Noni, G. Viennot M., 1996 - Spatialisation multi-temporelle et régionale dec la cangahua à partir d'images Spot, Colloque international sur les formations volcaniques indurées, Quito (sous presse).

De Noni, G. Viennot M., 1996 - Mesures de l'érosion sur des parcelles de ruissellement : cas de la cangahua récupérée pour l'agriculture (campagne 1993-95), Colloque international sur les formations volcaniques indurées, Quito (sous presse).

Thèse et documents de synthèse

De Noni, G., 1978 - "La cartographie au service d'un inventaire géomorphologique de la province du PASTAZA (Amazonie Equatorienne) : Types de relief et apports volcaniques". Thèse de 3^{ème} cycle, géographie physique des régions cristallines et volcaniques, Clermont-Ferrand, 142 p. multigr.

De Noni, G., Nouvelot, J. F., Trujillo, G., & Winckell, A., 1984 - Los principales procesos erosivos en Ecuador. PRONAREG-PRONACOS-ORSTOM, Quito, 31 p., avec une carte du pays (2 couleurs) à l'échelle de 1/1 000 000^e.

De Noni, G et al. 1986 - La erosion en Ecuador, CEDIG-ORSTOM, Documentos de Investigacion, Quito, 96 p.

Custode, E., De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1991 - "Las estaciones : problemática - escogitamiento - resultados". Accord DNA-ORSTOM, Quito, 165 p.

Custode, E., De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1991 - "Guía metodológica y práctica del proyecto DNA-ORSTOM". Accord DNA-ORSTOM, Quito, 67 p. avec 31 fig. et cartes.

Roose E., De Noni, G., Nouvelot, J.F., 1994 - Bulletin n° 14 du Réseau Erosion, Contribution de l'agroforesterie et de l'élevage à la restauration des sols, ORSTOM-Montpellier, 625 p.

Roose E., De Noni, G., Nouvelot, J.F., 1995 - Bulletin n° 15 du Réseau Erosion, L'environnement humain de l'érosion, ORSTOM-Montpellier, 613 p.

Roose E., De Noni, G., 1996 - Bulletin n° 16 du Réseau Erosion, Etas de surface et Cartographie des risques érosifs, ORSTOM-Montpellier, 621 p.

Rapports

De Noni, G. - 1980 - "Etude de quelques phénomènes morphodynamiques actuels dans la Sierra équatorienne". Rapport de la Section de géographie de l'ORSTOM, Paris, 43 p.

De Noni, G. - 1980 - "Les études pédo-géomorphologiques dans la province amazonienne du PASTAZA". Rapport de la Section de géographie de l'ORSTOM, Paris, 19 p.

De Noni, G., & Guevara, O. - 1980 - "Reconocimiento cartografico de la region amazonica ecuatoriana". Provincia del PASTAZA. Quito, PRONAREG, Acord MAG/ORSTOM, 36 p.

De Noni, G. - 1985 - Presentación de algunos resultados cualitativos y cuantitativos sobre la erosión en el Ecuador,

Curso sobre manejo y conservación de suelos. MAG-FAO, 9 p., Quito.

De Noni, G., Diallo, D., & Viennot, M. - 1993 - Utilisation de la Télédétection pour la cartographie de l'érosion dans les Andes de l'Equateur. Doc. de UTTIM, Montpellier, 20 p.

Asseline (J.), Custode (E.), De Noni (G.) et al. - 1993 - La simulacion de lluvia : metodologias y practicas, Accord DNA-ORSTOM, Quito, 66 p.

De Noni, G., Nouvelot, J.F., Roose E., 1994 - Projet de recherche sur l'érosion et la conservation des sols cultivés dans le Sud-Aveyron, Centre ORSTOM de Montpellier, 6p.

Feller, C., De Noni, G., 1995 - Bases bio-physiques de la gestion durable des agrosystèmes tropicaux, Centre ORSTOM (Dépt MAA), Montpellier, 12 p.

De Noni, G., 1996 - Déterminants et spatialisation des risques de dégradation des sols tropicaux cultivés : étude multi-échelle en laboratoire et sur le terrain, contrat de programme LCSC, Montpellier, 22 p.

De Noni, G., Gondard, P., Hervé D., Vacher J., 1996 - Intérêt scientifique d'un GP "Montagne" à l'ORSTOM, ORSTOM, Montpellier, 15 p.

Cartes et documents d'exposition

De Noni, G., 1977 - "Rio Villano, cartes des pentes et des sols dominants". 1/100 000^è. Atlas Géographique de la République d'Equateur, Quito, I.G.M., Accord MAG/ORSTOM .

De Noni, G., 1977 - "Rio Villano, cartes des paysages morphographiques". 1/100 000^è. Atlas Géographique de la République d'Equateur, Quito, I.G.M., Accord MAG/ORSTOM .

De Noni, G., & Guevara, O., 1979 - "Carte pédo-morphologique de la province du PASTAZA". 1/500 000^è, en couleur. Quito, PRONAREG, Accord MAG/ORSTOM .

De Noni, G., & Winckell, A., 1982 - "Volcanismo reciente : 2 mapas (Sierra y Galapagos) con comentario". Atlas del Ecuador, coleccion Atlas del Mundo, Edicion J.A., Paris, p. 16 .

De Noni, G., & Winckell, A., 1982 - "Comentario del mapa Relieve". Atlas del Ecuador, coleccion Atlas del Mundo, Edicion J.A., Paris, p. 9 .

Winckell, A., De Noni, G., & Sourdat, M., 1982 - "Geomorfologia : 1 mapa a 1/4 000 000^è con comentario". Atlas del Ecuador, coleccion Atlas del Mundo, Edicion J.A., Paris, p. 14-15 .

Almeida, G., De Noni, G., Nouvelot, J. F., & Winckell, A., 1983 - "Principales procesos erosivos en Ecuador. Carte à 1/1 000 000^è, 2 couleurs. PRONAREG - PRONACOS - ORSTOM, Quito .

De Noni, G., Trujillo, G., 1983 -, 12 panneaux d'exposition sur : "Sol, érosion et gestion des terres ".

De Noni, G., 1989 - 4 posters sur l'érosion et la conservation des sols primés par l'ISCO au cours de sa réunion en Ethiopie-Kenya.

De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1990 - 4 dépliants couleurs en espagnol sur : 1 El proyecto DNA-ORSTOM : Objetivos y resultados, 2 Los suelos en Ecuador, 3 La erosion en Ecuador et 4 La simulacion dde lluvias (en cours). .

De Noni, G., Trujillo, G., & Viennot, M., 1991 - 2 posters (1m x 0.60m) sur "La cangahua en Equateur". Séminaire International

"Tepetates" co-organisé par l'ORSTOM et Colegio de Postgrado de Montecillo, Mexico .

De.Noni, G., Viennot, M., Dessay, N., & Chaume, R., 1993 - 2 posters (1m x 0.60m) sur Télédétection et Erosion des sols et "Télédétection et gestion durable des sols". la Science en Fête, Montpellier .

De Noni, G., Trujillo, G., Viennot, M., 1994 - Poster sur "Reclamation of indurated volcanic soil ("Cangahua") in the highlands of Ecuador, XVè Congrès International de Science du Sol, 10-16 Juillet 1994, Acapulco (Mexique)

De Noni G., Fardoux, J., Vizier J.F., 1994 - Poster sur les activités du LCSC, Manifestations du Cinquantenaire de l'ORSTOM, Montpellier (Septembre 1994).

- Participation en 1993 à un "flash" télévisé (M6) sur la simulation de pluie et en 1994, avec l'équipe SUFCO-Université Paul Valéry de Montpellier III, à un film scientifique de 17 mn intitulé "Le Rougier en Fuite".

De Noni, G., 1996 - Présentation du Laboratoire de Comportement des Sols Cultivés à l'émission "Manager" de M6.

Conférences à des Colloques et Séminaires

De Noni, G., & Trujillo, G., 1985 - La conservación del suelo en Ecuador. Journée mondiale de l'environnement organisée par la Direction générale de l'environnement. Quito. 11 p.

De.Noni, G., Trujillo, G., Leiva, I., & Viennot, M., 1988 - Extension y agudizacion de los procesos de erosion en Ecuador. Colloque sur les "Risques Naturels" organisé par le Collège des Géographies de l'Equateur. Quito. 15p.

De.Noni, G., Viennot, M., & Trujillo, G., 1989 - La lucha anti-erosiva en El Ecuador : un reto agronomico y educacional. Actes du séminaire sur "Education et Environnement" organisé par la direction générale de l'Environnement (DIGEMA). Quito. 12 p.

De.Noni, G., & Viennot, M. - 1990, Transformations agraires et érosion des sols dans les Andes de l'Equateur. "Agriculture et paysanneries en Amérique Latine : Mutations et recompositions". Université de Toulouse le Mirail - CNRSO, 10 p. dactyl.

De.Noni, G., & Viennot, M., 1993 - Les recherches sur l'érosion par l'ORSTOM, évolution et perspectives : cas de la montagne équatorienne. Journées PIREN. Lyon.
11 p.

De Noni, G., 1994 - Présentation du film "Le Rougier en fuite", Réunion ORSTOM-Paris VII-ENS St Cloud, ORSTOM-Bondy.

De Noni, G., 1995 - Présentation du programme "Evaluation des terres et stratégies paysannes", Journées UR 35, ORSTOM, Montpellier.

De Noni, G., 1996 - Intérêt scientifique d'un GP "Montagne" à l'ORSTOM, Séminaire DPS, ORSTOM, Montpellier.

9 De Noni, G., 1996 - Indicateurs de durabilité des terres (LQI) : définitions et utilisations : cas du Togo et du Burkina-Faso.

INTRODUCTION

Parmi les différentes étapes scientifiques qui composent ma carrière à l'ORSTOM, j'ai choisi pour élaborer cette habilitation la période 1986-92 qui constitue une étape-clé de mon activité dans l'Institut, à la fois en tant que chercheur et responsable d'une équipe pluridisciplinaire franco-équatorienne (voir avant-propos). Plusieurs raisons scientifiques président à ce choix :

- le thème de la recherche d'abord qui, parce qu'il concerne l'étude de l'érosion accélérée ou anthropique des sols cultivés, pose le problème des relations et des interactions "homme-milieu", objet d'analyse fondamentale et d'approche environnementaliste du géographe (Neboit, 1991 ; Veyret, Pech, 1993 ; Derruau et al.1996) ;

- le milieu où s'est déroulé cette recherche qui, parce qu'il se situe dans la cordillère des Andes de l'Equateur, pose le problème de l'approche de l'érosion en montagne tropicale volcanique et fait ressortir les limites du modèle de prévision de l'érosion établi par les américains Wischmeier et Smith (Wischmeier, Smith, 1960, 1978). Au cours des dernières années, la plupart des recherches se sont inspirées de ce modèle et ont contribué à une meilleure définition des effets de la battance de la pluie sur les états de surface du sol et la naissance de l'érosion en nappe (Roose, 1980 ; Boiffin, 1984 ; Le Bissonnais, 1988 ; Casenave, Valentin, 1989). Notre recherche dans les Andes présente un autre point de vue en montrant que les effets de l'érosion en nappe sont secondaires

par rapport à une érosion linéaire dominante (Heusch 1971 ; Hurni, 1989) ; Roose, 1994) ;

- et la finalité de cette recherche qui, parce qu'elle est orientée vers des propositions d'aménagement et de lutte anti-érosive, pose le problème du transfert des résultats scientifiques vers l'application (Tricart, 1962, 1978). Dans ce domaine, des progrès restent à faire comme le montre chaque année, malgré la multiplication des recherches sur l'érosion, le nombre encore trop important de projets de développement voués à l'échec (Hudson, 1991 ; Stocking, 1992).

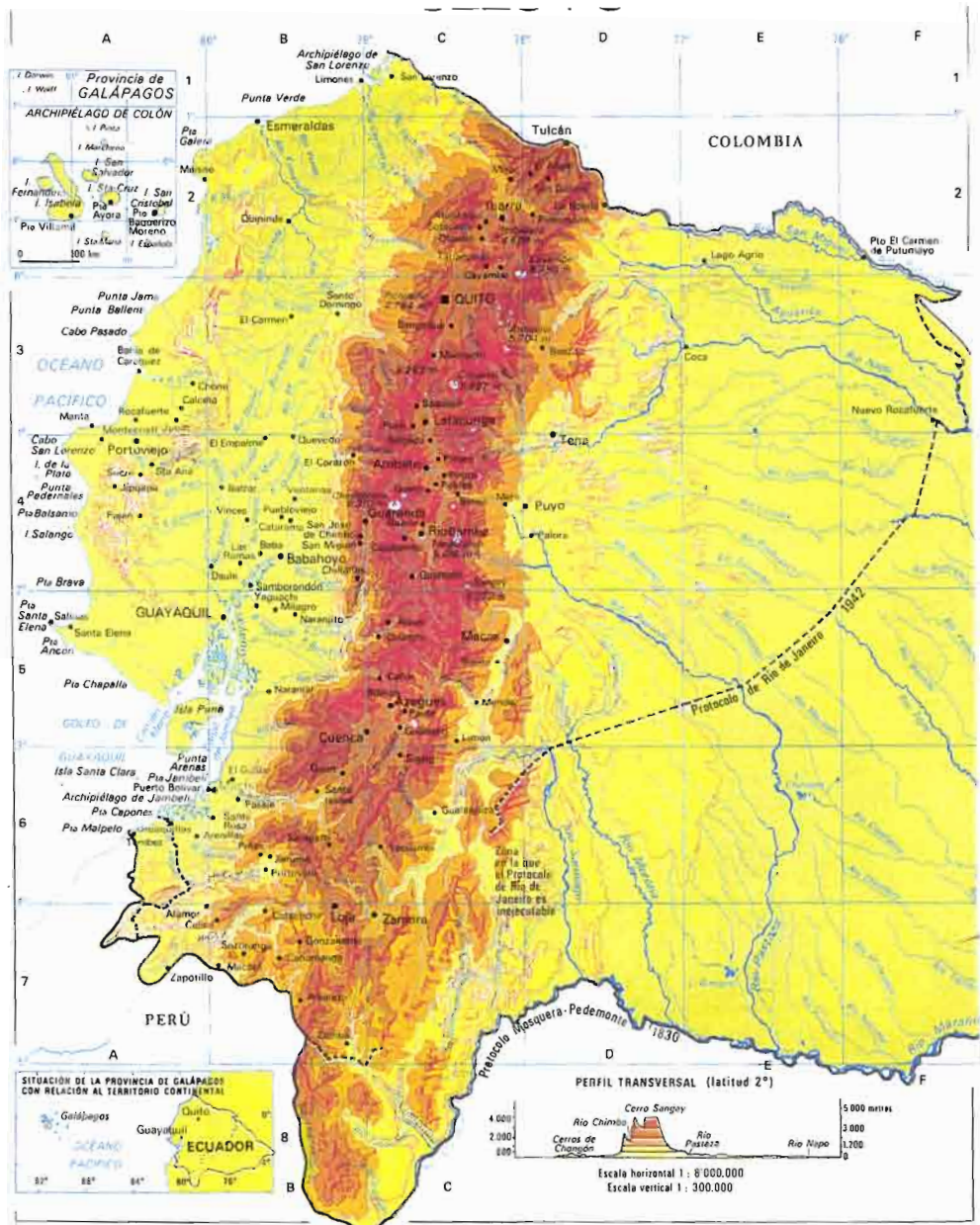
L'Equateur est situé sur la façade pacifique du continent sud-américain et couvre une superficie de 270.670 km², soit la moitié à peine du territoire français. Le pays est traversé par la Cordillère des Andes et s'étend de part et d'autre de la ligne équatoriale sur 1°25' de latitude au nord et sur 5° de latitude au sud. Il est limité au Nord par la Colombie et, au Sud et à l'Est, par le Pérou (carte n° 1)¹.

Comme dans la plupart des pays en voie de développement, l'agriculture a été de tous temps pour l'Equateur l'activité principale qui a assuré la survie des populations. Malgré les initiatives de l'état pour diversifier l'activité économique et

¹ La carte du relief permet, en outre, de situer les noms de lieux et de localités utilisés dans ce document.

Carte du relief de l'Equateur

Carte n°1



Source : Atlas JA
del Ecuador, 1982

(les fortes altitudes sont en marron et correspondent à l'emplacement
de la Sierra au centre du pays)

Situation de l'Equateur sur le continent Sud - Américain



- 270.000 Km² > 10 . 10⁶ HAB.

3 - Régions naturelles

- 1 - la Costa

- 2 - la Sierra

- 3 - l'Amazonie

l'orienter vers des secteurs tels le tourisme, l'aquaculture ou la transformation des produits pétroliers, le pays est resté très dépendant des produits issus de la terre et de l'agriculture. Cette dépendance est d'autant plus marquée aujourd'hui que les besoins alimentaires des populations, liés à une forte croissance démographique, se sont fortement accrus ; il est à noter que depuis le début du siècle (INEC, 1991), la population de l'Equateur a été multipliée par dix et dépasse actuellement 10 millions d'habitants.

Face à cette situation, l'Equateur, comme d'autres pays en voie de développement, n'a donc d'autre recours que de puiser encore d'avantage dans les potentialités offertes par les ressources naturelles, en particulier par le sol ressource essentielle à la production agricole.

Néanmoins, les capacités du sol à produire ne sont pas inépuisables et lorsque la pression démographique augmente de la sorte, les populations fragilisent le milieu en accélérant la dégradation des sols. Rappelons que plusieurs facteurs d'ordre anthropique se combinent pour expliquer ce processus de fragilisation ; parmi les plus courants, on évoque généralement : l'abandon des modes traditionnels de gestion des terres (racourcissement du temps de jachère par exemple), le défrichement de nouvelles terres considérées jusqu'alors comme marginales et plus sensibles à l'érosion, l'ensemble étant lié à un accès traditionnellement très limité des populations aux moyens financiers et techniques pour amender ou améliorer les sols (Hudson, 1973, 1992 ; Pieri, 1989 ;

Roose, 1994).

En Equateur, les responsables de la politique agricole du pays ont pris progressivement conscience de l'accélération des risques d'érosion des sols en relation avec la croissance de la population et sa nouvelle répartition géographique. Si pendant des siècles, un "équilibre" relatif s'était établi entre les potentialités des sols, les besoins des populations et les techniques héritées d'un lointain "savoir-faire" inca, ces conditions ont changé, en particulier au cours des trente dernières années. Durant cette période, par exemple, sous la pression démographique du petit paysannat, des concentrations humaines importantes (densités de l'ordre de 80 à 200 hab./km², Delaunay, 1990) se sont développées sur des versants compris entre 20 et 70% de pente et jusqu'alors peu humanisés. Les paysages se sont transformés et les versants, qui semblaient stabilisés avant leur aménagement, montrent désormais des empreintes d'érosion essentiellement concentrée (réseaux denses de griffures, rigoles et ravines). Localement, les versants sont partiellement décapés et montrent des surfaces stériles pour l'agriculture.

Au-delà de ce constat général, étayé par quelques cas très localisés, il n'existait aucun diagnostic scientifique sur l'érosion des sols en Equateur. Le gouvernement équatorien, sensibilisé par l'acuité de cette question et conscient que dans ce contexte, le sol ne peut plus demeurer une ressource renouvelable, a recherché la collaboration d'une coopération

étrangère pour évaluer la gravité de l'érosion des sols et pour analyser les principaux facteurs intervenant, avec la finalité d'identifier des méthodes d'aménagement des versants et de lutte anti-érosive. C'est ainsi qu'une convention entre le Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage de l'Equateur (MAG) et l'Institut français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) a été signée ; témoignage par ailleurs des excellentes relations unissant nos deux pays depuis très longtemps².

La recherche présentée ici vise, sur la base d'une analyse des manifestations et des facteurs de l'érosion accélérée des sols, à proposer une gestion mieux adaptée, plus durable, du milieu andin de l'Equateur où vit une partie importante de la population agricole du pays. Notre recherche, parce qu'elle s'appuie tant sur une approche méthodologique que sur des aspects de recherche fondamentale et appliquée, peut donc servir d'exemple à d'autres pays andins ou de montagne tropicale. Dans un souci d'objectivité et d'efficacité, elle exclut toute approche alarmiste ou catastrophiste, les différents acteurs (chercheurs, paysannat, secteur privé, état) s'associant vers le même but, celui de trouver des solutions

² Malgré l'éloignement géographique, nos deux pays entretiennent des relations étroites depuis très longtemps. Parmi les faits marquants, on peut signaler : au XVIII^e siècle, les travaux en Equateur de la mission géodésique française, dirigée par La Condamine et Bouguer, dont l'impact local très apprécié fut à l'origine du choix de l'appellation "Equateur" pour nommer le pays lorsque celui-ci devint indépendant ; et au XIX^e siècle, les démarches entreprises par le président de l'époque, Garcia Moreno, dans sa lutte contre l'Angleterre pour placer son pays sous protectorat français.

techniques pour améliorer les aptitudes agricoles de la ressource sol.

Afin de pouvoir répondre positivement à cette finalité, j'ai suivi la méthode de travail suivante qui s'appuie sur plusieurs niveaux d'approches :

- i) une approche géographique et historique du milieu à l'échelle régionale de la Sierra aboutissant au constat de l'érosion accélérée des versants aménagés et au zonage du territoire en grands bassins versants représentatifs ;

- ii) une approche expérimentale dans le cadre de ces grands bassins représentatifs où j'ai privilégié le choix de 7 sites regroupant 26 stations de mesures de l'érosion. Sur chaque station, j'ai utilisé un dispositif de mesures (parcelles de ruissellement de 100 à 1000 m² de surface et simulations de pluies sur des micro-parcelles de 1 mètre carré) pour pouvoir hiérarchiser les facteurs de déclenchement de l'érosion mis en cause et analyser les processus dans le but d'intervenir efficacement sur ces derniers ;

- iii) et une autre approche concernant la gestion des terres qui vise à traduire concrètement sur le terrain, en concertation avec le paysannat, les acquis de la recherche sous la forme de propositions d'ouvrages et de pratiques dérivées des traditions locales.

Le plan du présent document est organisé, en toute logique, en fonction de ces trois approches. En ce sens, nous suivons ce que recommandait Fournier (1972), géographe puis agronome qui a défendu tout au long de sa carrière la cause de la gestion durable des terres sous les tropiques :

"Guérir une maladie nécessite avant tout de la connaître. La reconnaissance et l'étude de l'érosion sont les préalables de toute politique de conservation".

CHAPITRE PREMIER

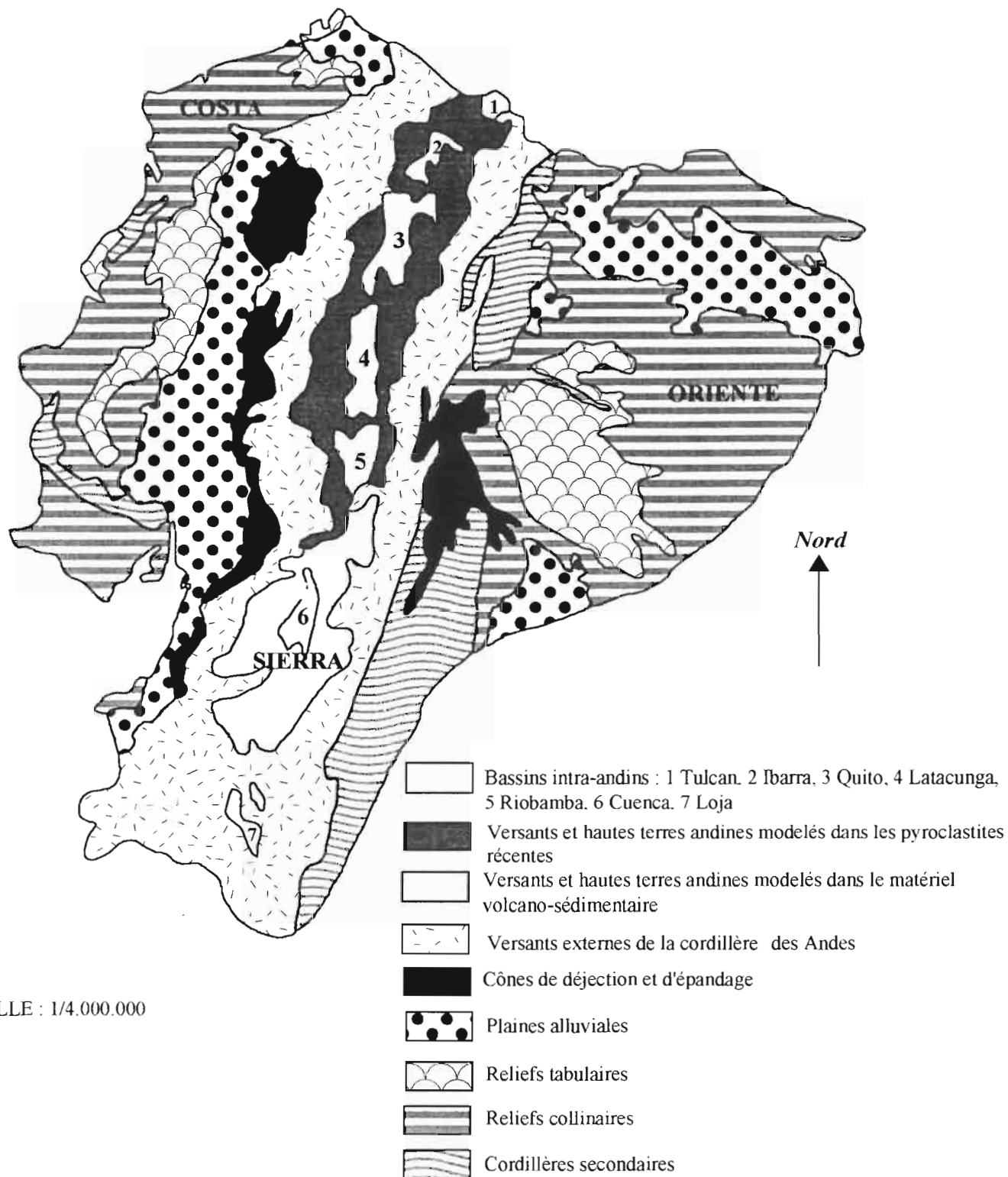
***APPROCHE GEOGRAPHIQUE ET HISTORIQUE
DE L'EROSION ACCELEREE DES SOLS
DANS LA SIERRA***

L'Equateur est formé de 3 grandes régions géographiques qui sont (carte n° 2)¹ :

- au centre du pays, la montagne andine appelée "Sierra", qui, du fait de sa position centrale et méridienne, a imposé naturellement la division du pays en 3 régions géographiques. La Sierra est divisée en deux cordillères parallèles séparées par une dépression. Cette dernière est subdivisée en une série de petits bassins, pour la plupart d'origine tectonique, qui s'étagent du nord au sud entre 1500 et 3000 m. (Sauer, 1965 ; Colmet-Daage et al., 1979-80 ; Derruau, De Noni, 1979 ; Colmet-Daage, Zebrowski et al., 1983-85). Dans la partie nord et centre de la Sierra, depuis la frontière colombienne jusqu'à la zone de Alausi, soit sur les 2/3 environ de la région, les cordillères portent de hauts strato-volcans (4500-6000 m) qui ont émis de puissants dépôts pyroclastiques (carte n° 3). Les sols dérivés de ce matériau sont des andosols (carte n° 4). Dans la partie sud de la Sierra, depuis la zone de Alausi jusqu'à la frontière péruvienne, les pyroclastites disparaissent. Le modelé est taillé dans les roches du socle sur les cordillères et dans des dépôts détritiques sédimentaires dans les bassins de la dépression. Les sols dominant dans cette partie de la Sierra sont des sols ferrallitiques et fersiallitiques sur les cordillères, et des sols molliques et vertiques dans la dépression (cartes n° 2 et 4) ;

¹ Les îles Galapagos, qui sont situées à 1000 km au large des côtes équatoriennes, font partie du territoire équatorien. Nous n'avons pas pris en compte ces îles dans l'étude parce qu'elles forment un vaste parc naturel où l'activité agricole est très réduite.

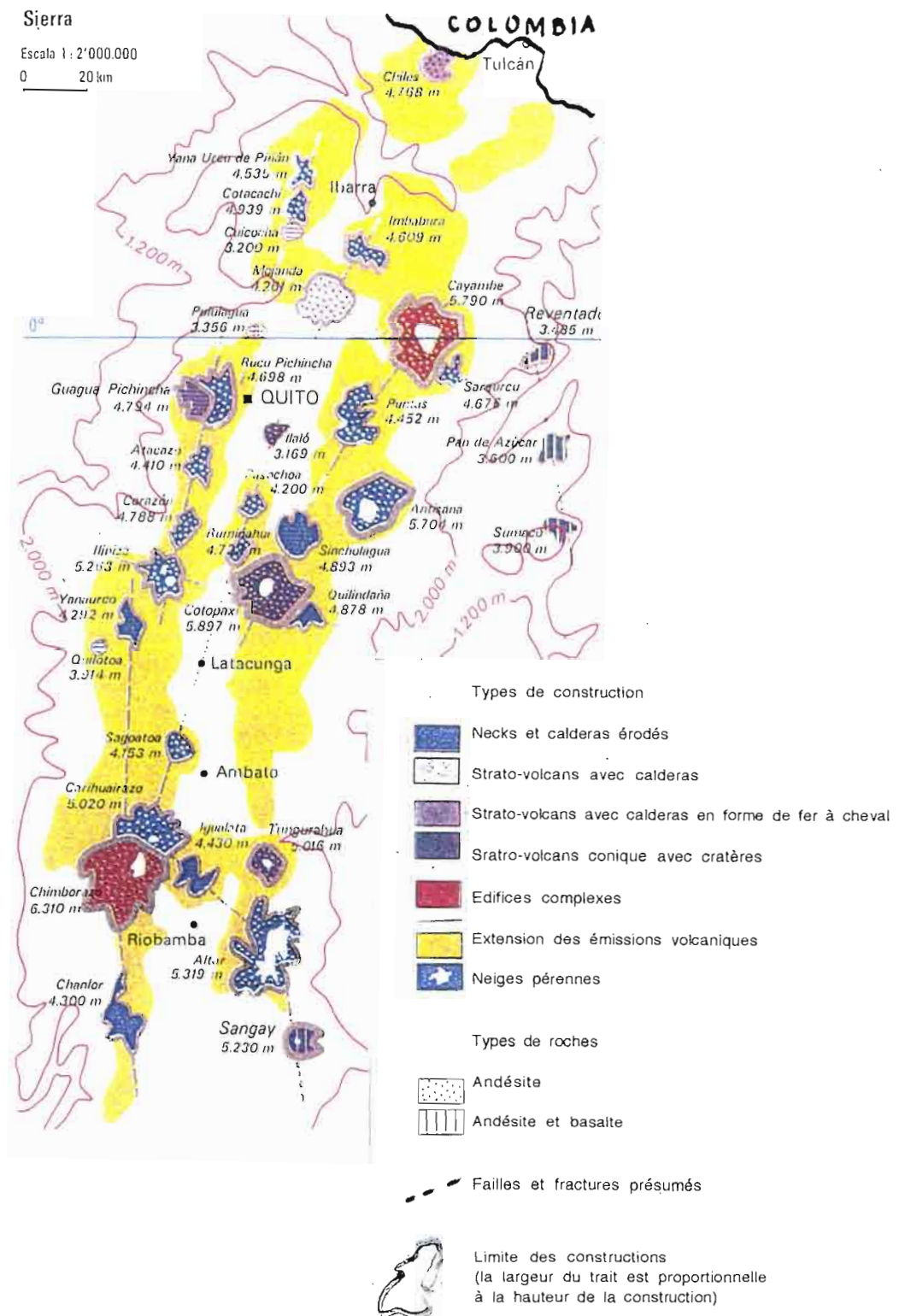
Principaux ensembles topographiques de l'Equateur



ECHELLE : 1/4.000.000

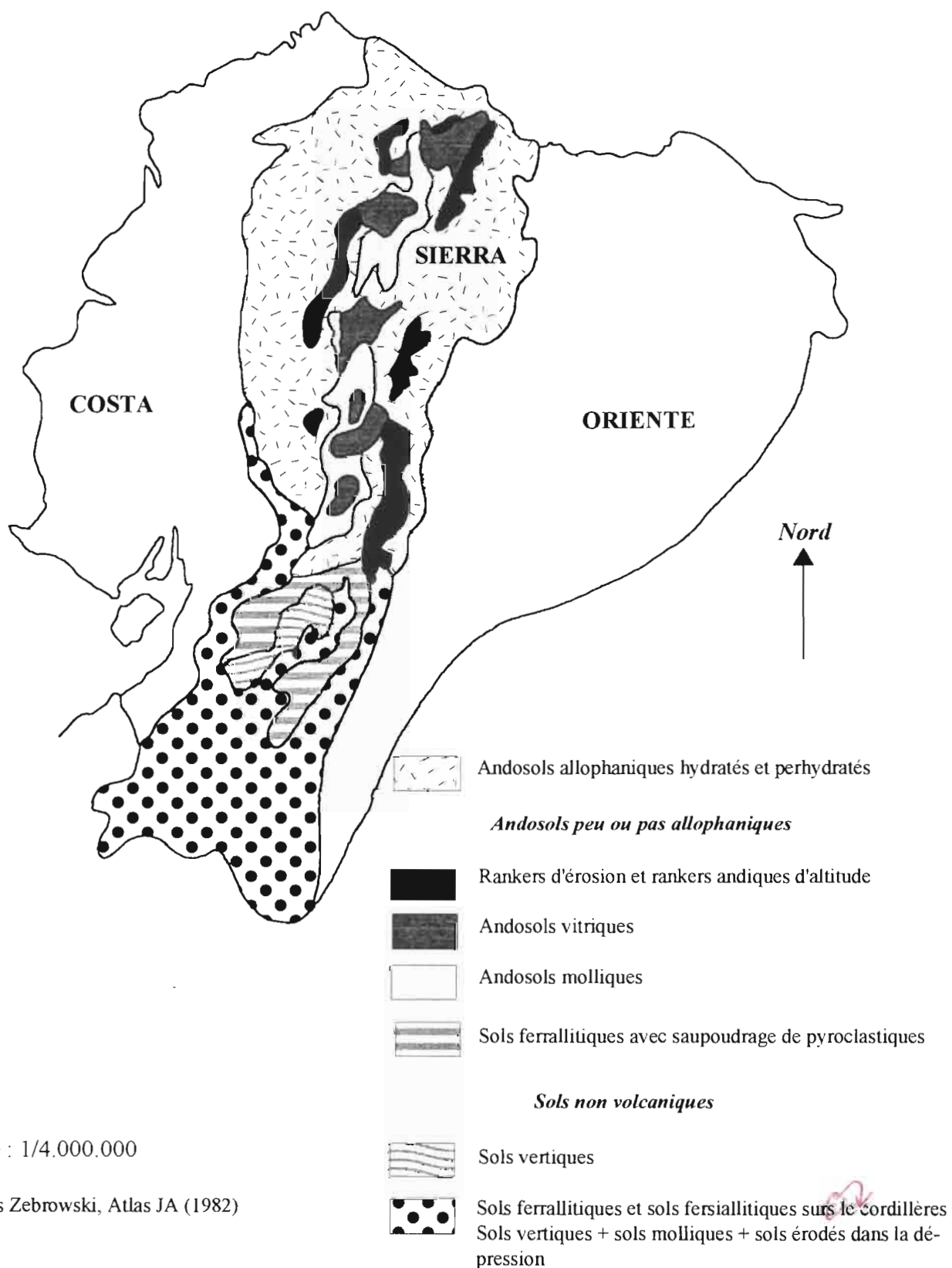
Le volcanisme quaternaire dans la Sierra

Carte n° 3



(Adaptation de la carte "Volcanismo reciente" in Atlas JA, De Noni-Winckell, 1982)

Carte des sols de la Sierra



NOTA : on trouve également dans les parties nord et sud de la dépression un andosol avec un horizon induré (cangahua) qui correspond à des zones où les andosols molliques et vitriques ont été érodés. Pour ne pas surcharger la carte, la cangahua a été cartographiée à part (voir carte 8)

- à l'ouest de la Sierra, une façade côtière ("Costa") ouverte sur l'Océan Pacifique. En comparaison, la Costa présente de faibles altitudes (0-500 m) où prédominent deux types de paysages : des reliefs sédimentaires argileux et gréseux, modelés en une mosaïque de collines et de reliefs monoclinaux, et une vaste plaine alluviale qui se termine par le delta du "rio Guayas" (Winckell, Zebrowski et al., 1975-83);

- à l'est de la Sierra, un vaste espace forestier qui fait partie du bassin amazonien, "l'Oriente", dont les altitudes sont comprises entre 200 et 600 m. Une fois franchis les énormes cônes de déjection qui envoient le pied des Andes, la région laisse apparaître un relief monotone de collines argileuses rouges disposées en demi-orange. Bien que représentant près de 50 % de la superficie du pays, l'Oriente est une région peu accessible et faiblement mise en valeur (Sourdat, Custode, 1983 ; De Noni, 1978 ; De Noni, Guevara, 1980).

Dans ces trois régions, les marques d'érosion accélérée des sols dans les zones aménagées sont fortes mais inégales ; la Sierra, qui est la partie andine du pays, est évidemment la plus affectée. Ce constat s'inscrit donc dans un contexte physique particulier de haute montagne tropicale mais il prend en compte aussi un contexte socio-économique spécifique caractérisé par une évolution historique qui a provoqué, par étapes successives, de profondes modifications sociales au sein du paysannat.

1) L'IMPORTANCE DE L'EROSION ACCELEREE

Evaluer l'importance de l'érosion accélérée des sols agricoles a constitué la première étape de notre démarche. L'objectif était :

- d'établir un inventaire des dynamiques et d'approfondir les mécanismes de déclenchement de l'érosion afin de pouvoir envisager une lutte efficace,
- de fournir au partenaire équatorien, en terme de stratégie, des informations sur la gravité des dynamiques qui permettraient de choisir des projets-pilotes pouvant servir d'exemples pour informer et former le paysannat local.

Pour réaliser cette évaluation, je suis parti des données existantes, notamment des cartes pédologiques et d'utilisation des sols élaborées, entre 1974 et 1982, par l'ORSTOM et le Ministère équatorien de l'Agriculture dans le cadre d'un premier accord de coopération. Ces cartes concernent :

- les sols de la Sierra (Colmet-Daage, Zebrowski), de la Costa (Winckell, Zebrowski) à l'échelle de 1/200.000, et de l'Oriente amazonien (Custode, Sourdat et De Noni) à l'échelle de 1/500.000 ;
- et l'utilisation des terres de la Sierra (Gondard) et de la Costa (Huttel, Winckell et Zebrowski) à l'échelle de 1/200.000.

A partir de ces cartes et des travaux de terrain, j'ai pu reconnaître les unités dominantes de sol et d'occupation des paysages. Il a été ainsi possible de réaliser une étude relativement fine des principales dynamiques et d'observer les relations existant entre les mécanismes de déclenchement, les types d'usage du sol et les facteurs physiques du milieu. Très rapidement, les sorties de terrain ont montré l'importance de l'érosion accélérée dans la Sierra ce qui m'a conduit à utiliser plus précisément les cartes de cette région pour choisir des sites représentatifs où j'ai ~~pu~~^{ai} réalisé des observations fines à l'échelle de la parcelle paysanne.

La Sierra étant totalement couverte du nord et au sud par les cartes pédologiques et d'utilisation des sols, toutes les régions agricoles de la Sierra ont pu être ainsi prospectées avec précision. A l'échelle de 1/200.000, la Sierra est couverte par 9 cartes dont le découpage est imposé par l'Institut Géographique Militaire de l'Equateur. Les cartes de Tulcan, Ibarra, Quito, Latacunga-Ambato, Riobamba couvrent le domaine des pyroclastites dans la Sierra nord et centre ; les cartes de Cuenca, Loja, Macara, Zamora couvrent la Sierra méridionale.

Les prospections de terrain ont montré que l'érosion concentrée sous forme de rigoles et de ravines² dans les régions aménagées était la dynamique majeure qui provoquait les pertes en terre les plus importantes. A titre d'exemple, on a reproduit, parmi les cartes à 1/200.000 mentionnées antérieurement, une portion de la carte en couleurs de l'utilisation des sols de la région d'Ibarra dressée par Gondard (1975-83). Les couleurs affectées aux différentes unités représentent (carte n° 5) :

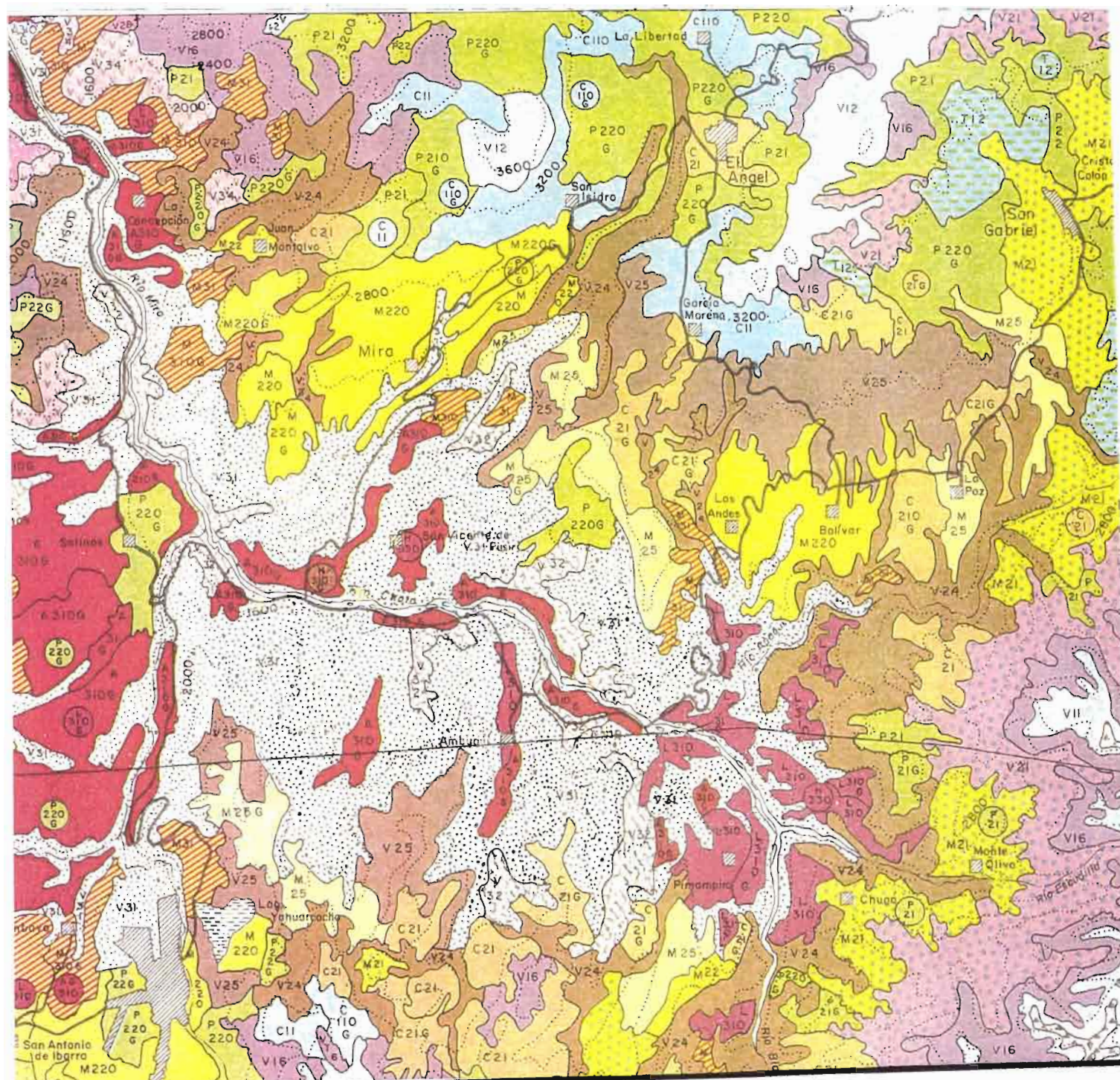
- les productions agricoles : jaune pour le maïs, vert pour les pâturages et rouge pour l'horticulture,
- la végétation "naturelle" : bleu avec des points blancs pour les arbustes ("matorral") et bleu pour la végétation herbacée d'altitude ("paramo"), au-delà de 3200 m,
- les zones présentant des problèmes d'érosion concentrée : marron pour les zones avec des sols peu profonds pourvus d'une végétation discontinue et affectés par un réseau de ravines moyennement dense ; blanc avec des points noirs pour les zones très dégradées. Cette dernière zone est si fortement affectée par l'érosion qu'il n'a pas été possible de distinguer les secteurs très ravinés et les secteurs où le décapage

² On a distingué les manifestations dues au ruissellement concentré de la manière suivante :

- celles qui sont effaçables par les techniques culturales : les griffures (moins de 5 cm de large et autant de profondeur) et les rigoles (10 à 15 cm de large et jusqu'à 25 cm de profondeur),
- celles qui ne sont pas effaçables par les techniques culturales : les ravines (25 à 50 cm de large et autant de profondeur) et les ravins qui sont d'échelle métrique ou plurimétrique.

CARTE D'UTILISATION DES SOLS D'IBARRA

d'après Gondard et al., 1975-83, échelle 1/200.000



LEGENDE

Agriculture

- Jaune : maïs
- Vert : pâturage
- Rouge : horticulture

Végétation

- Bleu : Paramo
+ matorral
- Rose : formation
arborée

Erosion

- Marron : sols peu
profonds, mal couverts
+ rigoles
- Blanc + points noirs :
zones très dégradées



Réseau dense de petites ravines sur un versant aménagé du bassin de Riobamba, à l'époque du semis du maïs (2900 m d'altitude). Le sol est un andosol mollique et la pente du versant est de l'ordre de 40%



Réseau assez dense de rigoles sur des parcelles portant une culture d'orge (versant oriental du volcan Mojanda à 3300 m d'altitude). Le sol est un andosol vitrique développé sur une pente de 30%. On note, comme sur la photo ci-dessus, l'absence d'ouvrages conservatoires.



Affleurements de cangahua (zones blanches) sur un petit versant (pente de 15%) du bassin de Quito (2600 m d'altitude). L'érosion concentrée a fait disparaître le sol arable, de faible épaisseur ici (andosol mollique tronqué) ce qui a provoqué le décapage de la cangahua. Le ruissellement diffus est la dynamique dominante sur la cangahua.



Décapage de la cangahua par l'érosion concentrée (zones blanches) sur la partie sommitale d'un versant (30% de pente) du bassin de Riobamba (2800 m d'altitude). Les paysans ont dû abandonner cette partie du versant. L'absence d'aménagement sur la cangahua est à l'origine de reports hydriques importants et d'une reprise de l'érosion concentrée dans les parcelles situées plus bas.

généralisé laisse affleurer les couches indurées d'une formation volcanique originale, appelée "cangahua", très étendue dans la Sierra nord et centre et dont il sera question plus loin.

Dans la Sierra méridionale, sur un substrat non volcanique, l'importance du ruissellement concentré et de l'érosion associée est tout aussi forte dans les régions aménagées.

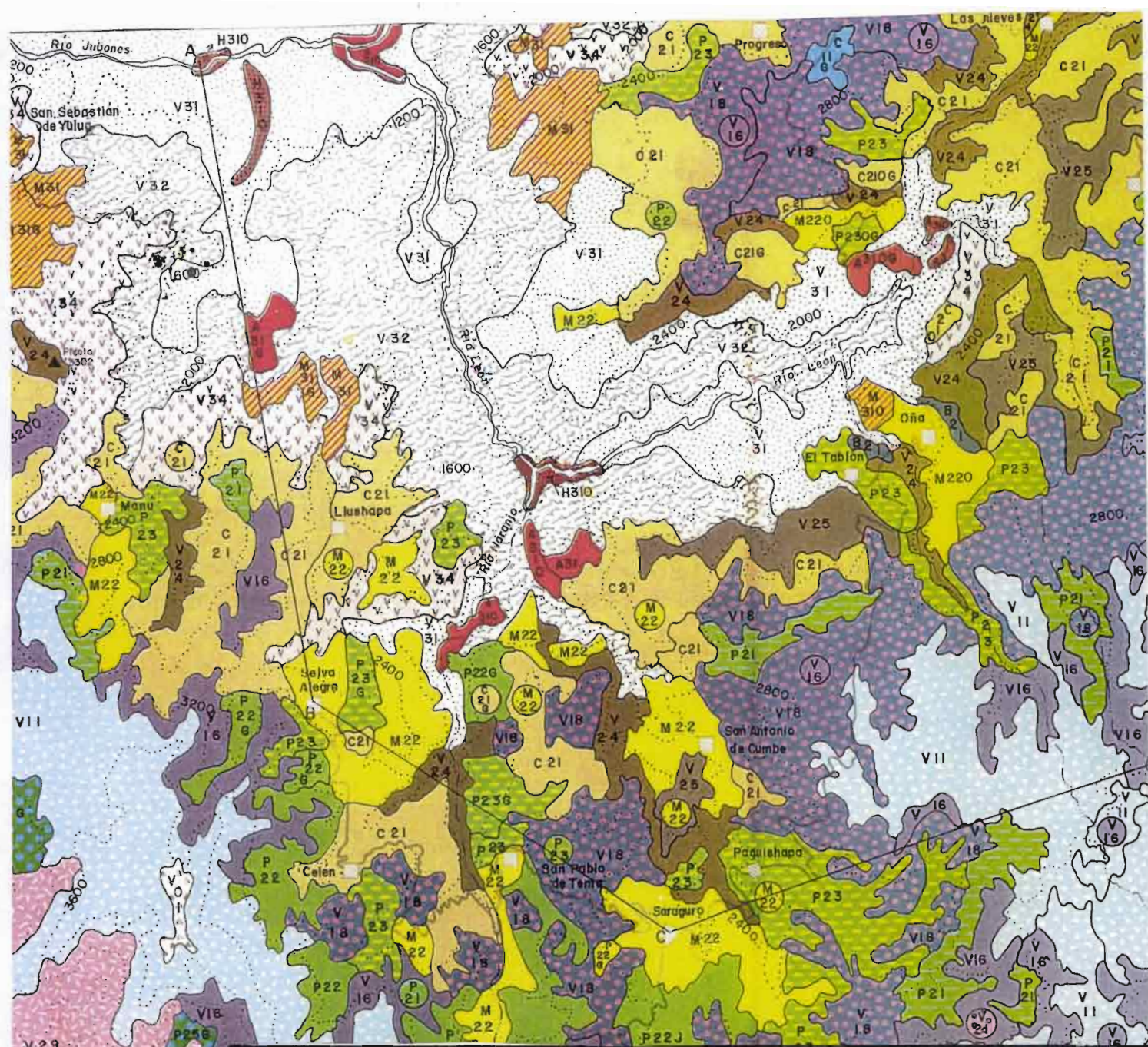
La portion d'une autre carte dressée également par Gondard (1975-83) dans la région de Loja, dans une zone où affleurent les roches du socle sur les points hauts et les dépôts détritiques dans la vallée du Léon, fait ressortir la présence (carte n° 6) :

- de productions agricoles : jaune et jaune hachuré en rouge pour le maïs, vert pour les pâturages, marron clair pour les céréales et orange pour la canne à sucre dans les bas-fonds,
- de zones de végétation "naturelle", en mauve avec des points roses, où dominent des arbustes de type "matorral" développés sur des sols ferrallitiques,
- et des zones présentant des problèmes d'érosion concentrée : marron foncé pour les secteurs avec un chevelu dense de rigoles et de ravines et des sols peu épais ; blanc, avec des trames noires, pour les secteurs très ravinés présentant localement des bad-lands.

CARTE n° 6

CARTE D'UTILISATION DES SOLS DE LOJA

d'après Gondard et al., 1975-83, échelle 1/200.000



LEGENDE

Agriculture

- Jaune : maïs
- Jaune clair : céréales
- Orange : canne à sucre
- Vert : pâturage

Végétation

- Bleu : Paramo
- Violet : matorral
- Rose : formation arborée humide (versants externes)

Erosion

- Marron : sols peu profonds, réseau dense rigoles + ravines,
- Blanc : zones très dégradées + bad-lands



Erosion éolienne sur des parcelles d'orge du bassin de Riobamba (3000-3200 m d'altitude). Le sable fin de l'andodol vitrique est transporté par le vent et piégé par les lignes de végétation. En haut et à gauche de la photo, la présence de rigoles et de ravines montre que l'érosion concentrée prend le relais durant la saison des pluies.



Traces de mouvements de masse relayés par l'érosion concentrée sur un versant pâturé de la partie orientale du bassin de Quito (40% de pente, 2800m d'altitude). L'andosol mollique possède en profondeur un horizon argileux, relativement épais (0,60 m) et riche en montmorillonites. Les fortes pluies liées au piétinement des animaux suffisent pour déclencher la dynamique



Versant très raviné dans la partie nord du bassin de Loja (35% de pente moyenne, 2400 m d'altitude). Le sol arable a été érodé et le versant évolue vers un modelé de "bad- lands" aux dépens de dépôts sédimentaires sablo-argileux. Autrefois, il existait des parcelles de maïs sur ce versant.



Ravinement généralisé des versants dans le bassin de Catamayo qui est l'une des zones les plus basses de toute la dépression interandine (1500 m d'altitude). L'érosion concentrée affecte ici le socle de la cordillère occidentale. Les altérites sont peu épaisses en général et le socle a été décapé localement (zones plus claires).

De façon plus précise, les prospections de terrain ont montré que l'action du ruissellement concentré est associée dans la plupart des cas à d'autres dynamiques³ selon un système de relais : soit un relais spatial dans le cas du ruissellement diffus et des mouvements de masse soit un relais temporel dans le cas de l'érosion éolienne. En définitive, j'ai donc retenu trois dynamiques principales :

- le ruissellement concentré relayé spatialement par le ruissellement diffus³,
- les mouvements de masse relayés spatialement par le ruissellement concentré,
- et le ruissellement concentré relayé temporellement par l'érosion éolienne.

Le ruissellement concentré relayé par le ruissellement diffus est le type de dynamique qui domine dans toute la Sierra.

Dans la Sierra volcanique, cette dynamique est particulièrement active dans les zones aménagées sur des versants constitués essentiellement de dépôts pyroclastiques et situés dans la dépression inter-andine (carte n° 4). Ces dépôts, dont l'épaisseur maximale est de l'ordre de 1 mètre à 1,50 mètre, sont composés de sables fins et grossiers, en

³ Le système de relais diffère selon la nature du substrat. Sur les pyroclastites, le ruissellement diffus agit essentiellement sur la cangahua décapée, à un stade où la dynamique d'érosion du versant est déjà très avancée. Sur les roches du socle et sur les dépôts détritiques, le ruissellement diffus intervient au départ de la dynamique sur les sommets de versants.

alternance avec des pierres ponces. Ils portent des andosols vitriques, d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur, meubles et pulvérulents, faiblement agrégés et pauvres en matière organique (< 2%).

Sous ces dépôts, se trouve une formation volcanique indurée, la cangahua, dont la présence a été signalée sur la carte d'utilisation des terres de Ibarra (carte n° 5). L'épaisseur de la cangahua peut être localement importante et dépasser 10 mètres. Sous la cangahua, on retrouve une superposition de lits pyroclastiques, essentiellement sableux et ponceux.

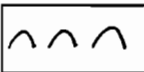
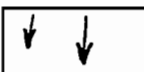
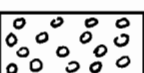
Les zones cultivées ont été aménagées par de petits paysans ("minifundio"). Entre 2000 et 3000 mètres, le maïs est la production agricole principale ; au-delà de cette altitude, il est remplacé par d'autres cultures, orge, pomme de terre et fève (voir carte n° 12, p. 69).

Un versant, convexo-concave, situé à une quinzaine de kilomètres au NW de la ville de Latacunga dans le grand bassin de Pastaza, fournit un exemple de ce type de dynamique dominant dans l'étage compris entre 2000 et 3000 mètres d'altitude (carte n° 7, échelle de 1/20.000). Dans sa partie basse et moyenne, le versant est occupé par de petites parcelles de maïs qui passent progressivement vers le haut à des parcelles d'orge et de pommes de terre. Au pied du versant, dans le bassin, existent des pâturages irrigués. Dans la partie rectiligne du versant, les pentes sont comprises entre 30 et 40 %, elles s'abaissent progressivement vers la bas et forment une concavité basale au contact avec la petite vallée du "rio Macas" (pente de l'ordre de 2 à 10 %).

Cartographie de l'érosion concentrée relayée par le
ruissellement diffus sur les andosols vitriques et la
cangahua du bassin de Latacunga

Echelle : 1/20.000



-  Partie sommitale convexe
du versant (sans érosion)
-  Accumulations éoliennes
-  Ruissellement diffus sur la
Cangahua
-  Ruissellement concentré et diffus
dans les secteurs où alternent la
cangahua et la couverture pyro-
clastique (andosols vitriques)
-  Réseau discontinu de rigoles et de
ravines sur la couverture
pyroclastique
-  Ruissellement diffus + rigoles
localisées sur les dépôts colluviaux
de bas de versant
-  Incision de grand de taille,
ravin > 10 m de profondeur
-  zone alluviale
-  Lit mineur du Rio Macas

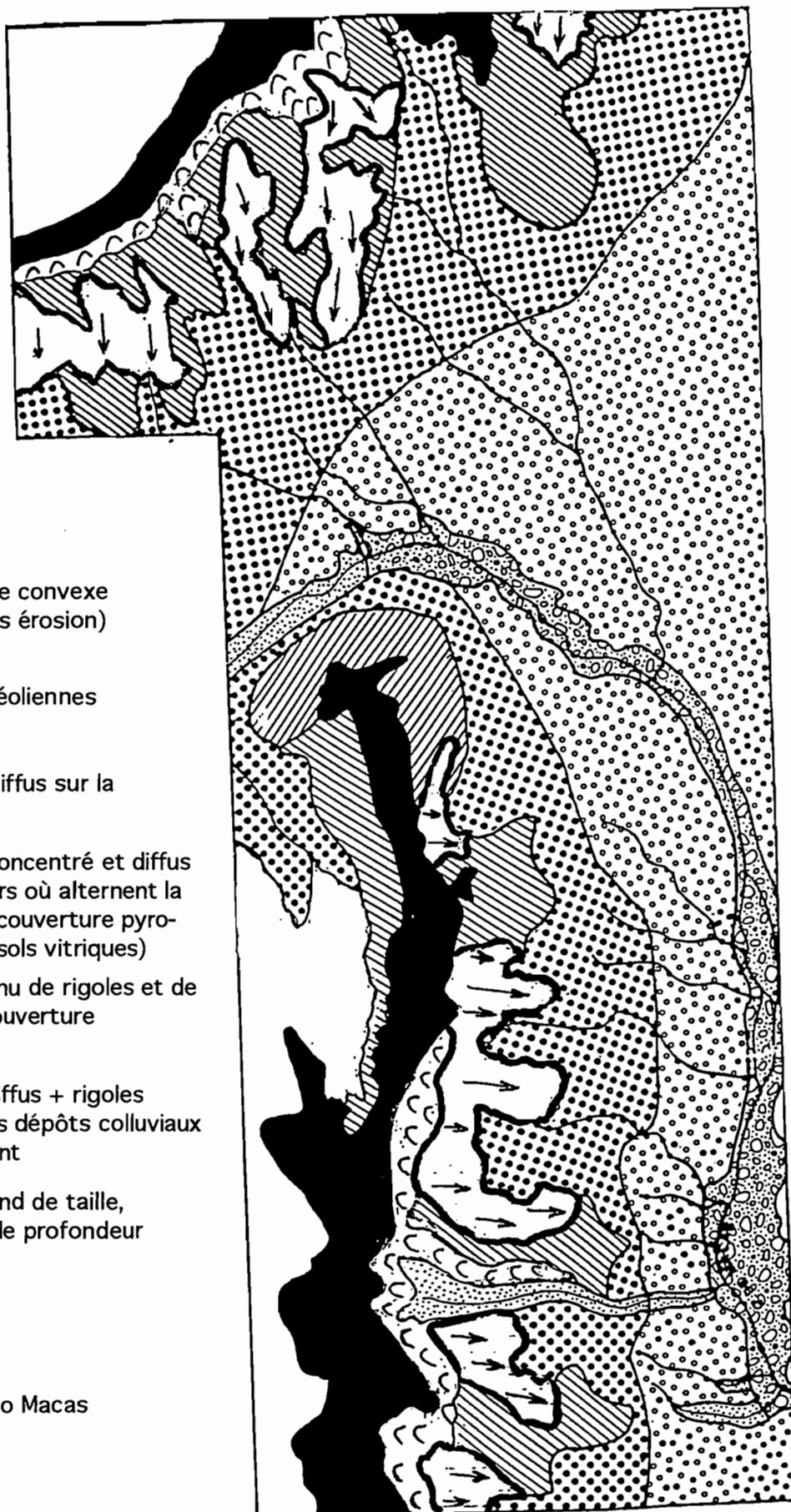
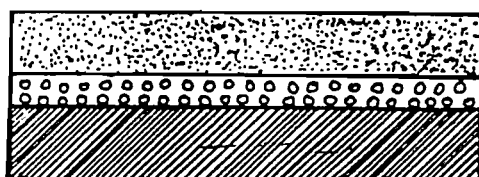


Fig. n° 1

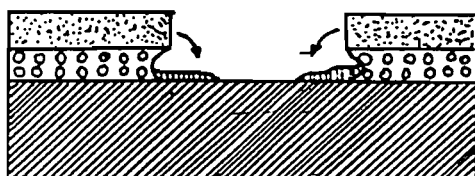
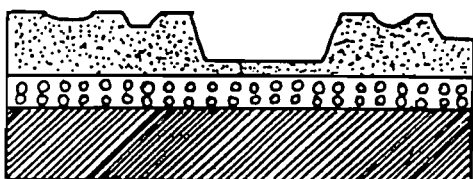
Le ruissellement concentré (bassin de Latacunga)



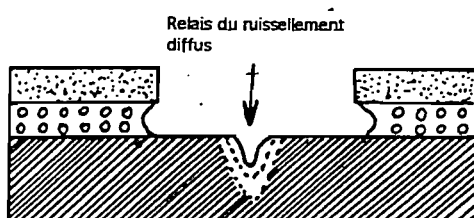
Dessin schématique d'un versant représentatif du bassin de Latacunga
où le ruissellement concentré (flèches noires) décape
les andosols vitriques et fait affleurer la cangahua (en noir)



Situation de départ : andosol
vitrique
(sables en pointillés, ponces avec
des cercles) sur la cangahua
(rayures)



La ravine, en forme de "U",
progresse sans difficulté sur
l'andosol, meuble et pulvérulent,
jusqu'à atteindre la cangahua



Relais du ruissellement
diffus

La progression de la ravine est
ralentie par la cangahua indurée.

Le ruissellement diffus devient alors
dominant

Sur ce versant, dès que la pente atteint 2 à 5% d'inclinaison, le ruissellement se concentre rapidement dans les pyroclastites meubles. Le chevelu formé par les rigoles et les ravines est relativement lâche et d'échelle centimétrique. Cette impression d'ensemble est due au tracé irrégulier et discontinu des incisions dont les bords sont instables et s'écroulent facilement à mesure que le ruissellement se concentre dans les pyroclastites. En l'absence de fond topographique, des flèches, qui indiquent le sens de la plus grande pente, ont été dessinées dans les secteurs affectés par le ruissellement (carte n° 7).

Les formes d'érosion deviennent pérennes, notamment les ravines, lorsque l'érosion est parvenue jusqu'à la cangahua, en général dans les parties du versant où la topographie favorise la confluence des filets d'eau. Dans la cangahua, la vitesse de creusement par l'érosion est considérablement ralentie du fait de la grande résistance de ce matériau et les incisions évoluent sous l'effet des micro-éboulements des berges taillées dans les pyroclastites. Cela aboutit par recul des versants à donner des ravines et des ravins en forme de "U", d'échelle métrique. Par recoupements successifs des versants de plusieurs ravines, le versant évolue vers un décapage généralisé des dépôts pyroclastiques qui disparaissent au profit de la cangahua. Les coupes de la figure n° 1 montrent l'évolution du ruissellement concentré par étapes successives jusqu'à atteindre la cangahua. Dans cette formation, les entailles sont plutôt rares et très localisées, elles présentent en général un profil en forme de "V" et se situent là où

l'énergie du ruissellement est suffisamment forte pour inciser cette formation, sur des pentes supérieures à 40 %. En règle générale, le ruissellement diffus est la dynamique dominante sur la cangahua. Son impact sur le façonnement du versant reste toutefois modeste et consiste essentiellement en une action de "balayage" généralisé qui contribue à lisser et nettoyer les surfaces de cangahua.

Au-delà de 3200 m d'altitude dans le domaine des cordillères situé au-dessus de la dépression inter-andine, l'érosion concentrée paraît moins importante bien que les versants soient plus pentus et plus arrosés. La raison principale est due à l'occupation humaine qui est plus lâche que dans la dépression. Les sols sont des andosols hydratés bien structurés, de couleur noir, développés sur 1 m d'épaisseur environ et bénéficiant d'une bonne couverture végétale : "paramo et matorral" sur les hautes terres des cordillères et forêts denses sur les versants exposés aux influences pacifiques et amazoniennes. A cette altitude, la cangahua n'existe plus.

L'érosion accélérée ne concerne que les zones aménagées situées le long et à proximité des axes de communications qui traversent les cordillères. Pour l'instant, la dynamique ne dépasse pas le stade des griffures et des rigoles dont une partie est effacée à l'occasion des labours (pentes de 20 à 70%). Toutefois, une extension des défrichements peut laisser craindre une accélération de la dynamique dans les zones aménagées, avec des risques de reprise d'érosion dans les zones situées plus à l'aval.

Dans la Sierra méridionale, sur un substrat très différent de celui de la Sierra pyroclastique (cartes n° 2 et 4), le ruissellement concentré et le ruissellement diffus sont également actifs. Quels que soient les substrats présents dans cette partie de la Sierra, dépôts sédimentaires dans la dépression et roches du socle sur les cordillères, les versants présentent des sols érodés dans les zones aménagées.

Les zones les plus érodées sont situées dans les petits bassins de la dépression andine. Les versants sont modelés dans des dépôts détritiques très épais (argile, sables, conglomérats), contemporains de l'érection des Andes au tertiaire. (Faucher, Savoyat, 1973). Localement, ces dépôts forment des reliefs monoclinaux où alternent des bancs de grès, des argilites métamorphisées et des couches d'argile et de sable. Les sols sont peu épais dans l'ensemble : ce sont soit des sols argilo-caillouteux ou sablo-caillouteux soit des sols argilo-sableux d'une quarantaine de centimètres d'épaisseur au plus (sols molliques). Ils sont fortement ravinés par un chevelu dense de rigoles, de ravines et de petits ravins.

En général, les versants présentent des profils convexo-concaves et s'érodent selon un système de relais différent de celui qui affecte les pyroclastites. Ce système se compose de trois phases : i) action du ruissellement diffus sur le sommet convexe des versants (5 à 15% de pente ; ii) puis action de l'érosion concentrée qui relaie le ruissellement diffus dans la partie rectiligne du versant (20 à 40% de pente) et qui incise les sols par un chevelu dense de rigoles et de ravines ; iii)

enfin, évolution de l'érosion concentrée vers le ravinement généralisé en "bad-lands" à la base concave du versant (pente de 10 à 20%).

Dans la plupart des cas, la présence d'un matériau détritique, relativement homogène et épais, favorise le creusement d'incisions en "V". Il existe, cependant, des situations locales où les incisions évoluent vers un profil en "U". C'est le cas, par exemple, sur les reliefs monoclinaux où le matériau est plus hétérogène. L'érosion progresse plus rapidement dans les couches d'argiles et de sables que sur les couches dures de grès et d'argilites. Lorsque les ravines atteignent les couches dures, le creusement vertical est ralenti et elles évoluent latéralement par l'érosion des couches les plus tendres. L'élargissement progressif des ravines aboutit au décapage des couches dures selon une dynamique similaire à celle que j'ai décrite dans le cas de la cangahua.

Sur les cordillères du Sud comme pour celles de la Sierra du Nord, les empreintes de l'érosion concentrée sont plus lâches que dans la dépression inter-andine et traduisent l'état de dispersion des zones aménagées ainsi que la présence d'une végétation "naturelle" dense. Les versants sont taillés dans les roches du socle : roches volcaniques basiques très anciennes (dolérites, basaltes, diabases entre autres), d'âge crétacé, sur la cordillère occidentale ; roches métamorphiques (gneiss, micaschistes), d'âge paléozoïque, liées au socle guyano-brésilien, sur la cordillère orientale.

Sur les cordillères, les précipitations (plus de 1000 mm par an) entretiennent une humidité ambiante constante au cours de l'année qui favorise l'altération des roches du socles et le développement de sols ferralitiques et fersiallitiques. Dans les zones aménagées sur ces sols, le chevelu de l'érosion concentrée est plus ou moins dense sur les pentes comprises entre 20 et 40%. Les incisions présentent en général une forme en "V" : rigoles et ravines d'échelle centimétrique et quelques ravins d'ordre mètre.

L'érosion concentrée est active également lorsqu'elle est **associée à des mouvements de masse**. Dans ce cas, l'érosion concentrée joue le rôle de relais spatial par rapport aux mouvements de masse qui sont à l'origine de la dynamique.

Ce type de dynamique est plus localisé que celle précédemment envisagée, son existence dans la Sierra dépend : i) de la nature du substrat et des sols qui en dérivent. La présence d'argile, qui est un matériau sensible à la présence d'un excès d'eau, est un élément déterminant ; ii) de l'utilisation des sols dans les zones aménagées. Dans la Sierra, les zones de pâturage, où le passage des animaux provoque sur le sol des surcharges superficielles accompagnées de petits effets de cisaillements, sont surtout affectées par cette dynamique.

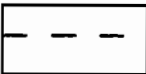
Dans la Sierra volcanique, les versants affectés par cette dynamique sont couverts par une cendre volcanique très noire, riche en limons et sables fins et sont situés essentiellement dans la dépression inter-andine. Sur cette cendre, se sont développés des sols qui se caractérisent par la présence, à la base du profil, d'un horizon très argileux (épaisseur comprise entre 0,20 à 0,80 m) riche en montmorillonites (andosols molliques, carte n° 4). Comme dans le cas des pyroclastites sablo-ponceuses, ces cendres recouvrent la cangahua.

L'exemple étudié est situé à proximité de la ville de Quito et correspond à un petit interfluve de forme allongée. Les pentes des versants sont de l'ordre de 10-15% au sommet et au pied des versants et comprises entre 20 et 40% dans la partie médiane. Sur la carte n° 8, l'interfluve est délimité par un trait noir épais discontinu. Il est situé sur le grand versant qui sépare le site de Quito, à 2800 mètres d'altitude, et le fond de la dépression inter-andine qui se trouve à 2500 mètres d'altitude. Il se distingue du reste du versant par la présence d'une ravine profonde qui longe son versant occidental. Les sols sont des andosols molliques d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur, au-delà de cette profondeur se trouve la cangahua. Ils sont pâturés toute l'année par des troupeaux de moutons et de chèvres.

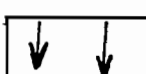
Cet exemple permet d'apprécier que les sols sont soumis à une dynamique érosive particulièrement active. Les principales marques dans le paysage sont la présence : i) de petits talus d'érosion, d'une quarantaine de centimètres de hauteur, qui entaillent les andosols molliques et de talus d'érosion plus hauts, atteignant jusqu'à 1 mètre de hauteur, qui tranchent les



Sur l'interfluve

-  Limite topographique de l'interfluve
-  Surface de l'interfluve divisée en 9 niveaux séparés par des talus d'érosion (0,50 m à 1 m de hauteur)
-  Petits talus d'érosion (0,2-0,3 m de hauteur) taillés dans le sol mollique
-  Modelé de "terrassettes" décimétriques provoquées par le piétinement des animaux (versant oriental)
-  Réseau lâche de rigoles et ravines sur colluvions

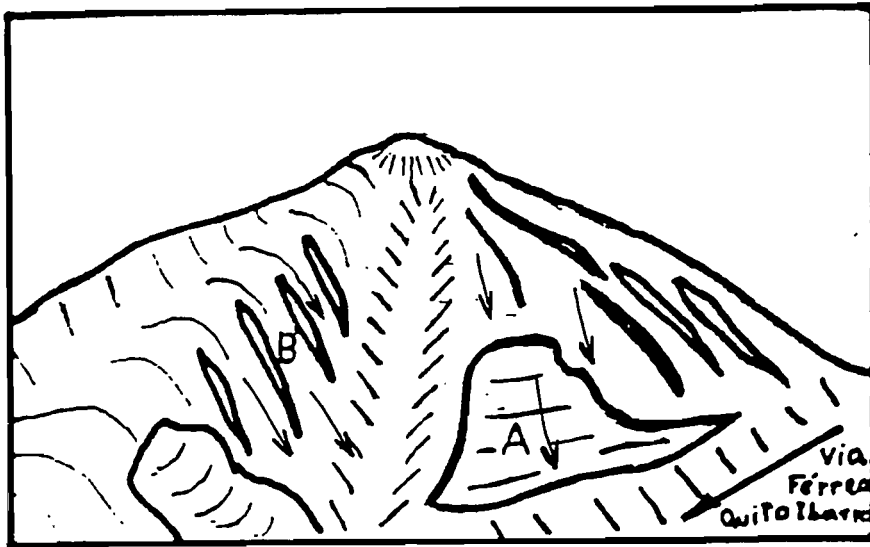
Hors de l'interfluve

-  Ruissellement diffus sur la cangahua affleurante
-  Grands talus d'érosion, hauteur > 1m.
-  Zone aménagée : rigoles dans les champs et "terrassettes" décimétriques dans les pâturages
-  Réseau dense de rigoles dans les parcelles de maïs
-  Principales incisions, ravins > 10 m de profondeur

Le ruissellement associé à des mouvements de masse

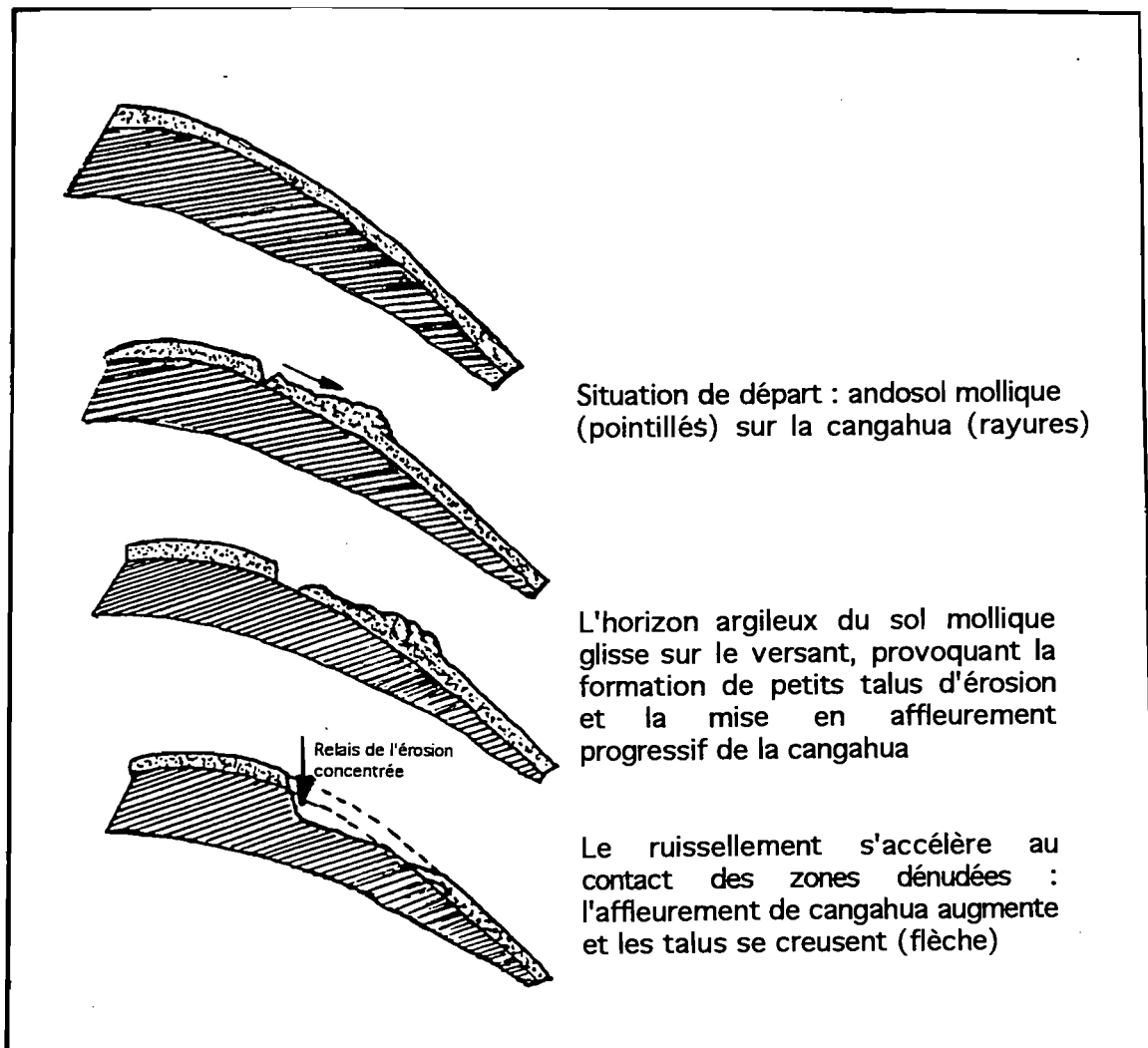
Fig. n° 2

(bassin de Quito)



Dessin schématique d'un versant représentatif du bassin de Quito où l'érosion décape les andosols molliques et fait affleurer la cangahua (A). Les formes d'érosion, d'allure linéaire au départ (B), évoluent vers des formes plus ou moins circulaires

La dynamique évolue dans le sens de la plus grande pente, ici 25 à 30% (flèches)



andosols molliques et la cangahua sur le sommet de l'interfluve et sur son versant méridional. Des talus plus hauts, supérieurs à 1 mètre de hauteur, ont été observés hors de l'interfluve sur le versant principal ; ii) d'un chevelu assez dense de rigoles sur les dépôts colluvio-alluviaux où la végétation est clairsemée (versant occidental de l'interfluve) ainsi que dans les parcelles de maïs qui entourent l'interfluve (les flèches noires indiquent le sens de la plus grande pente) ; iii) un modelé de "terrassettes" décimétriques, provoquées par le piétinement des animaux, présent sur le versant nord et est de l'interfluve ainsi que dans les pâturages situés hors de l'interfluve ; iv) et de petites zones localisées sur le sommet de l'interfluve où la cangahua est décapée, et une zone beaucoup plus grande située sur le versant principal, à l'amont de l'interfluve.

Il semble bien, lors de précipitations abondantes, que la saturation en eau des andosols molliques, en particulier de leurs horizons argileux, préside au déclenchement de la dynamique (figure n° 2). Partant de là, toute pression exercée par une action anthropique (dans la plupart des cas, le piétinement des animaux), accélère le glissement de l'horizon argileux sur la cangahua. La surface topographique laisse apparaître, sous l'effet des cisaillements superficiels, la présence de petits glissements en paquets séparés par des micro-talus d'échelle décimétrique. A partir de ces talus, l'érosion concentrée prend le relais. L'eau se concentre en petites cascades à la base des talus qui progressent en profondeur jusqu'à atteindre la cangahua.

L'érosion concentrée est active également dans les zones situées entre les talus où les andosols molliques présentent un profil tronqué du fait du glissement de l'horizon argileux. Il ne reste plus qu'un horizon sableux fin et limoneux, d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, très sensible à l'érosion concentrée dès que la pente atteint 10% d'inclinaison et que la végétation est clairsemée. L'érosion de cet horizon aboutit au décapage de la cangahua, sur des surfaces d'échelle hectométrique.

Considérant que les mouvements de masse envisagés dans ce cas provoquent localement le déplacement de l'horizon argileux du sol, transformé en une masse boueuse, sur un substrat stable de cangahua, on peut admettre que ceux-ci se rattachent plus à une dynamique de type "solifluxion" qu'à des mouvements provoqués par des glissements de terrain. Ceci étant, c'est le relais pris par l'érosion concentrée qui est déterminant pour faire évoluer le versant vers un décapage généralisé de la cangahua. Une fois ce stade d'évolution atteint, la dynamique de creusement est ralentie dans la cangahua et seule est vraiment active sur ce substrat induré l'action de "balayage" due au ruissellement diffus.

Dans la partie méridionale de la Sierra, ce type de dynamique a été observé également dans le bassin de Cuenca et plus localement dans la région de Loja, sur les versants des cordillères en cours d'aménagement.

Dans le bassin de Cuenca où règne une pluviométrie plus élevée que dans les autres bassins de la Sierra (800-1300 mm), les versants affectés forment un paysage de collines convexes dont les pentes sont comprises entre 15 et 40 %. L'activité principale sur ces collines est l'élevage de bovins pour la production de lait et de viande.

Les versants sont constitués de dépôts détritiques sur les 2 ou 3 premiers mètres, existe ensuite un mélange de sable et d'argile auquel succède en profondeur une succession de lits franchement argileux. Les sols sablo-argileux, moyennement épais (0,40 à 0,50 m), présentent des caractères vertiques.

La surface topographique des versants est entaillée par des niches de décollement en arc de cercle qui constituent autant de petits talus (de 0,40 à 1 mètre de hauteur) tranchant la couche superficielle de sable et d'argile. Ce type de forme témoigne de l'action d'une dynamique de foirage au niveau des lits d'argile profonds, provoquant la mise en porte-en-faux et le cisaillement de la couche superficielle. Une fois le substrat mis à nu, l'érosion concentrée prend le relais. Les flancs des niches sont ravinés par un réseau dense de rigoles et de petites ravines. Dans les cas où l'évolution est plus avancée, l'érosion aboutit à un ravinement généralisé en bad-lands, d'échelle hectométrique.

Sur les versants des cordillères, des coups de cuillère, d'échelle métrique, apparaissent localement. La dynamique affecte les altérites argileuses et décape les roches du socle. Ces formes ont été localisées dans les zones aménagées et n'ont jamais été observées sous la forêt qui couvre les versants. Sur les altérites mises à nu par les coups de cuillère,

l'érosion ravinante prend le relais jusqu'à atteindre la roche saine.

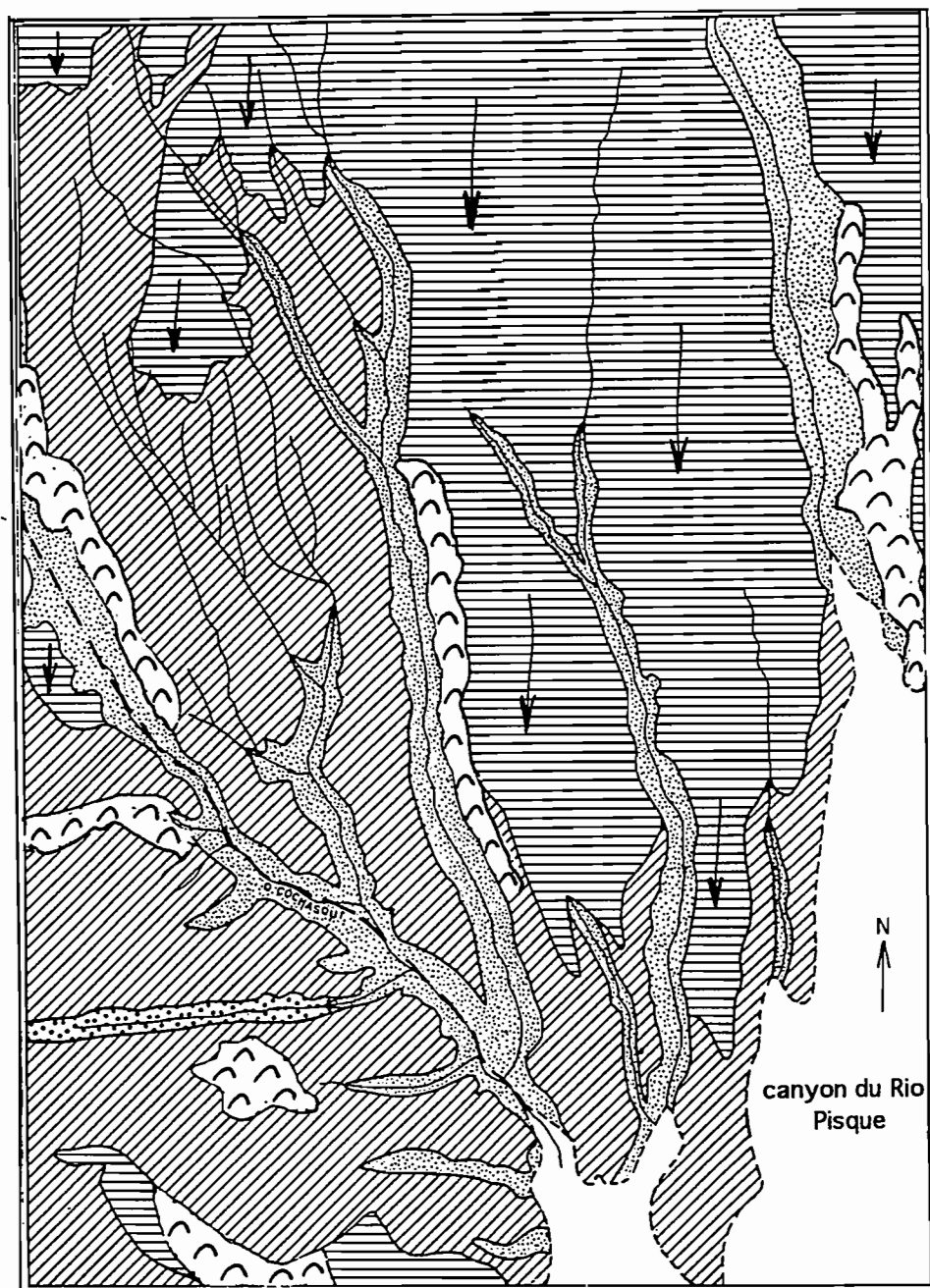
Le troisième et dernier type de dynamique représentative correspond à **l'association de l'érosion concentrée et de l'érosion éolienne**. Par rapport aux deux dynamiques précédentes, cette dynamique se distingue par : i) la nature du substrat qu'elle affecte. Seule la Sierra volcanique est concernée par son action dans les zones où existent des sols sableux fins ; ii) et le rôle exercé par l'érosion éolienne qui agit en tant que relais temporel dans des zones où le vent trouve des conditions favorables.

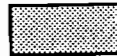
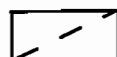
Les zones, qui sont touchées par cette dynamique, sont plus restreintes que celles affectées par l'érosion hydrique et sont localisées dans le grand bassin de Guayllabamba, à proximité de Quito, et dans le grand bassin de Pastaza, à proximité de Riobamba.

La zone étudiée est située dans le bassin de Quito sur le versant oriental du volcan Mojanda (carte n° 9). Elle est caractérisée par une faible pluviométrie (moins de 600 mm de pluie par an) et soumise, au moins deux mois consécutifs, aux effets desséchants du "foehn". Le versant étudié correspond à la concavité basale (10 à 15 % de pente) qui est profondément entaillée, plus de 100 m, par le cañon du Rio Pisque. Deux parties distinctes forment ce versant. La partie signalée par

carte n° 9

Cartographie de l'érosion concentrée relayée par
l'érosion éolienne, au pied du versant oriental
du volcan Mojanda (partie nord du bassin de Quito)

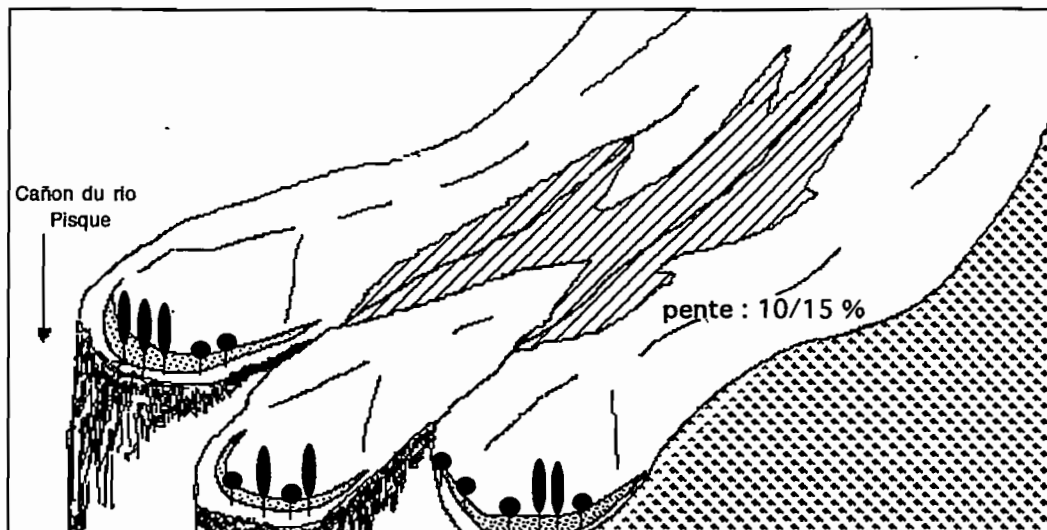


-  Accumulations sableuses de 0,4 à 1 m d'épaisseur ("rebdous et nebkas")
-  Réseau dense de rigoles et de petites ravines sur andosols vitriques (pente de 10 à 15%)
-  Ruissellement diffus sur la cangahua affleurante
-  Principales incisions, ravins supérieurs à 10 m de profondeur
-  Limite entre le versant et le canyon du Rio Pisque

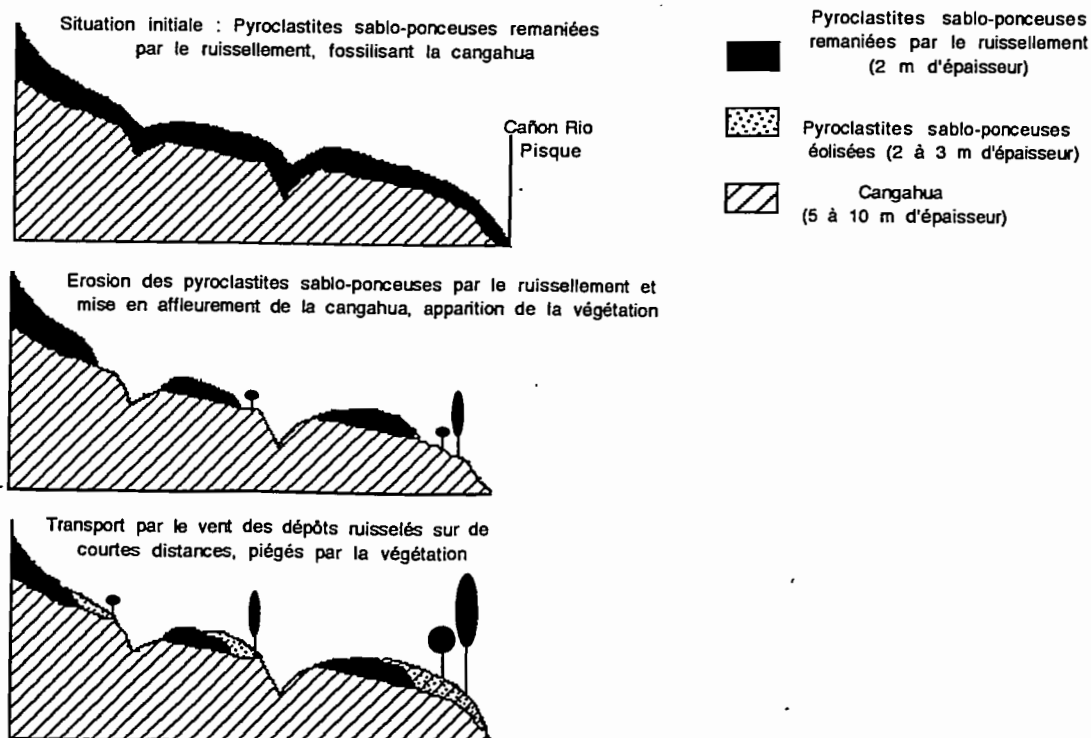
Echelle : 1/30.000

Fig. n° 3

Erosion des andosols vitriques sous l'action conjuguée du ruissellement et du vent (volcan Mojanda)



Dessin schématique du versant oriental du volcan Mojanda, profondément entaillé par le cañon du Rio Pisque. Le ruissellement décape les andosols vitriques au profit de la cangahua et le vent accumule les particules de sol contre les haies d'arbustes et d'eucalyptus



des hachures inclinées correspond à un secteur où la cangahua a été mise à nu. Aujourd'hui, l'érosion hydrique est limitée à l'action du ruissellement diffus.

L'autre partie du versant est représentée par des hachures horizontales. Elle est formée par des dépôts pyroclastiques constitués de sables fins d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur, présentant quelques intercalations de pierres ponce de taille centimétrique. Cette formation couvre la cangahua et porte des andosols vitriques. Les coupes de terrain montrent que ces dépôts sont rarement en place et qu'ils ont subi un transport par les eaux de ruissellement. Les ponce, qui sont les éléments les plus grossiers, présentent des formes émoussées, parfois bien roulées. Les flèches noires, positionnées dans le sens de la plus grande pente du versant, indiquent la présence d'un réseau assez dense de rigoles et de petites ravines. La présence d'accumulations sableuses, piégées par la végétation et apparaissant au contact entre la cangahua et les incisions des ravins, témoignent aussi de l'action active de l'érosion éolienne.

Au cours des saisons pluvieuses (de septembre à novembre et de février à mai), le ruissellement crée un chevelu plus ou moins pérenne de rigoles associées localement à des ravines qui entaillent les pyroclastites et la cangahua. Durant les deux saisons sèches (de décembre à janvier et de juin à août), l'érosion concentrée cesse et la dynamique éolienne prend le relais. Des accumulations sableuses de type rebdous et nebkas, d'ordre décimétrique et métrique, sont piégées par la végétation, essentiellement herbacée et arbustive ponctuée

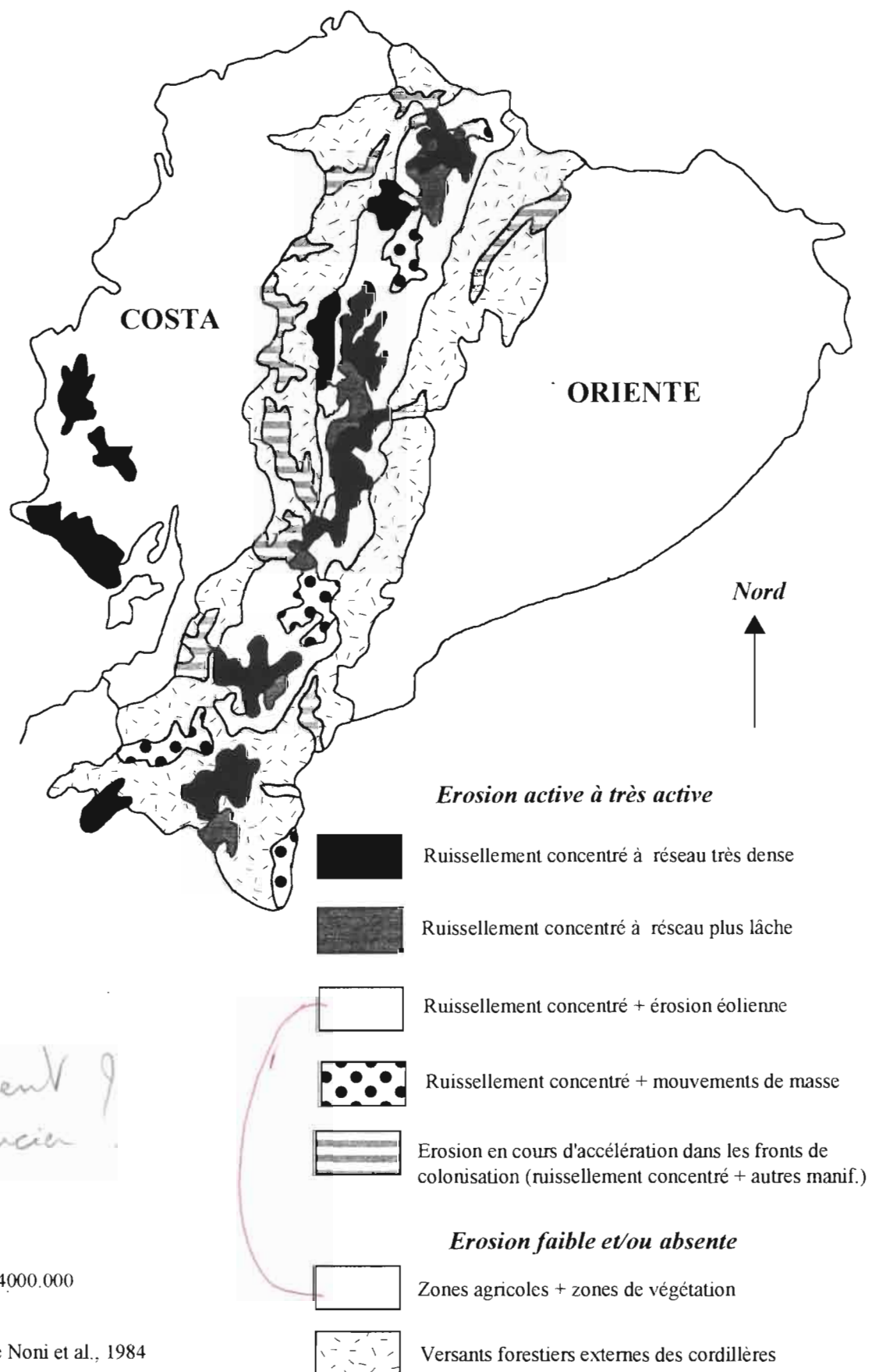
par quelques eucalyptus, en bordure des petits ravins et du grand cañon du Rio Pisque (carte n° 9 et fig. n° 3). Sur les andosols vitriques apparaissent aussi des micro-yardangs centimétriques, situés en général à une dizaine de mètres des accumulations de sable, ce qui témoigne des courtes distances parcourues par les sables éolisés.

Face à la pression du petit paysannat, les paysans sont conduits à mettre en culture (maïs et haricot) les accumulations sableuses et à y faire paître moutons et chèvres. Ce processus contribue à réactiver la dynamique car la végétation, qui fixait en partie le sable, est dégradée et ne peut plus jouer son rôle.

Pour répondre à l'attente du partenaire équatorien, j'ai rapporté à l'échelle du pays les informations dérivées des cartes au 1/200.000, complétées par des relevés de terrain, ce qui donne la carte synthétique n° 10, à l'échelle de 1/4.000.000⁴ (De Noni, Nouvelot, 1983 ; Almeida, De Noni et al., 1984). Une carte à petite échelle, accompagnée d'une légende simple et claire, est un outil préliminaire d'aide à la

⁴ Dans la pratique pour réaliser cette carte, je suis parti des unités existant sur les cartes au 1/200.000 des sols et d'utilisation des terres auxquelles j'ai rajouté mes relevés de terrain. J'ai posé sur chaque carte des calques et dessiné les unités dont la taille était suffisamment grande pour supporter une réduction d'échelle, tout en discutant la pertinence d'éliminer telle ou telle unité. A ce niveau, les critères humains ont pesé fortement dans la sélection, par exemple : la proximité de l'unité par rapport à une zone agricole active ou à une zone de défrichement appelée à se développer. Des réductions successives par photocopies m'ont permis ainsi de passer du 1/200.000 au 1/4.000.000.

Carte des principales manifestations de l'érosion en Equateur



ECHELLE : 1/4000.000

décision qu'utilisent volontiers les décideurs et les politiciens.

Cette carte souligne l'ampleur de l'érosion dans la Sierra par rapport à la Costa et à l'Oriente qui sont peu ou pas affectés. Elle souligne également qu'aux marges extérieures de la Sierra, sur les hautes terres et sur les versants tournés vers la Costa et l'Oriente, l'érosion est globalement moins étendue qu'à l'intérieur de la Sierra dans la dépression inter-andine. Sur ces marges extérieures, les seules zones affectées sont les unités de forme allongée qui correspondent au tracé des axes de communication traversant la chaîne.

Les zones les plus érodées se situent donc entre les cordillères dans la dépression inter-andine, quelle que soit la nature des substrats. Globalement, les empreintes de l'érosion semble plus denses dans la Sierra nord et centre, domaine des pyroclastites, qu'elles ne sont dans la Sierra méridionale.

En conclusion, le tableau ci-après (tableau n° 1) rappelle les principales caractéristiques des dynamiques qui affectent les versants aménagés de la Sierra :

DYNAMIQUES	SUBSTRAT, SOLS, UTILIS. DES TERRES		PENTES ET FORMES D'EROSION	
	Substrat volcanique	Roches du socle et sédimentaires		
Ruissellement concentré relayé spatial. par Ruissellement diffus	- Pyroclastites sablo-ponceuses (Andosols vitriques) sur cangahua - Maïs (2500-3000 m), Orge, Fève, pomme de terre (3200-3600m)		Pentes de 2/5 à 70% - Chevelu lâche rigoles + ravines sur pyroclas., - Chevelu plus dense, ravines entaillant pyroclast. + cangahua, Pentes de 5 à 40%) - R. diffus sur cangahua Pentes > 40% - Ravines localisées sur cangahua EVOLUTION VERS DECAPAGE GENERALISE DE LA CANGAHUA	
Ruissellement diffus relayé spatial. par Ruissellement concentré		Altérites sur roches du socle (sols ferral. et fersial.) et dépôts de sable, argile, conglomé. (sols molliques) - Maïs, localement canne à sucre et café sur les cordillères (1500-3200 m)	Pentes de 5 à 15% - R. diffus sur sommet des versants, Pentes de 20 à 70%, - Chevelu dense rigoles + ravines sur partie rectiligne des versants Pentes de 10 à 20%, - Ravinement généralisé à la base des versants EVOLUTION VERS BAD-LANDS	
Ruissellement concentré relayé spatial. par Mouvements de masse	- Pyroclastites argileuses (Andosols molliques) sur cangahua - Pâturages (2500 -3200m)	Altérites sur roches du socle et couches d'argile (sols vertiques) - Pâturages (2000 -3000m)	Pentes 10/15%-40%	
			Substrat volcanique - Paquets de sol glissés, cisail. (mouv. masse superfi./reptation) - Talus d'érosion façonnés par R. concentré + ravinement EVOLUTION VERS DECAPAGE GENERALISE DE LA CANGAHUA	Socle+ dépôts - Niches de décollement + coups de cuiller (foirage en profondeur de l'argile) - Ravinement généralisé des zones arrachées EVOLUTION VERS BAD-LANDS
Ruissellement concentré relayé temp. par Erosion éolienne	- Pyroclastites de sables fins (Andosols vitriques) sur cangahua - Maïs (2500-3000 m)/Orge, pomme de terre (3200-3600m)		Pentes de 5 à 40% (pluie<600 mm/an, zones très exposées aux vents dominants (foehn) - Chevelu lâche, rigoles + ravines (sept-nov. et fév.-mai) - Nebkas, Rebdous, petites barkanes (déc.-jan. et juin-Août) EVOLUTION VERS DECAPAGE GENERALISE DE LA CANGAHUA	

La répartition des différentes dynamiques permet donc de souligner la place des facteurs suivants :

- les facteurs d'ordre spatial : les dynamiques sont très actives dans les zones agricoles aménagées. Dans toute la Sierra, l'étage compris entre 1500 et 3000 mètres, où les productions agricoles associent maïs et pâturages, est le plus érodé. Cet étage a été mis en valeur très tôt par les sociétés pré-incaïques puis fortement sollicité à partir de la conquête espagnole. Comparativement, l'étage des hautes terres et des versants externes des cordillères, présente un réseau de ravines plus lâche. Pendant très longtemps, cet étage n'a pas été utilisé, néanmoins le développement croissant des défrichements depuis une trentaine d'années favorise une dynamique de ravinement de plus en plus accentuée.

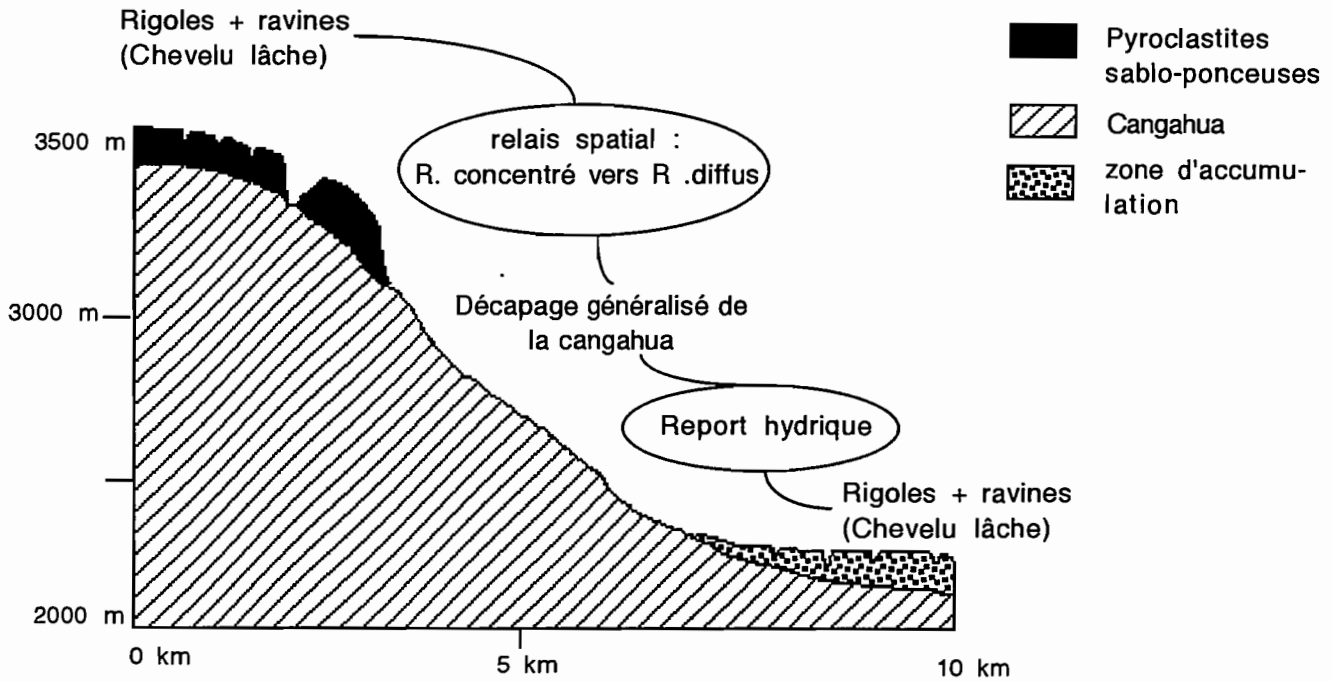
Une certaine logique spatiale intervient également dans le déroulement des dynamiques faisant intervenir l'érosion hydrique sur les versants : ruissellement concentré et diffus, mouvements de masse et ruissellement concentré ;

- les facteurs d'ordre lithologique. Les ruissellements concentré et diffus fournissent un bon exemple que nous avons illustré sur la figure n° 4. Celle-ci montre le rôle joué par ces facteurs : i) sur substrat volcanique, le haut des versants se caractérise par un réseau de rigoles et de ravines relayées par le ruissellement diffus qui affecte la cangahua. Le ruissellement concentré se manifeste à nouveau à l'aval ; ii) sur substrat sédimentaire, le ruissellement diffus agit sur le

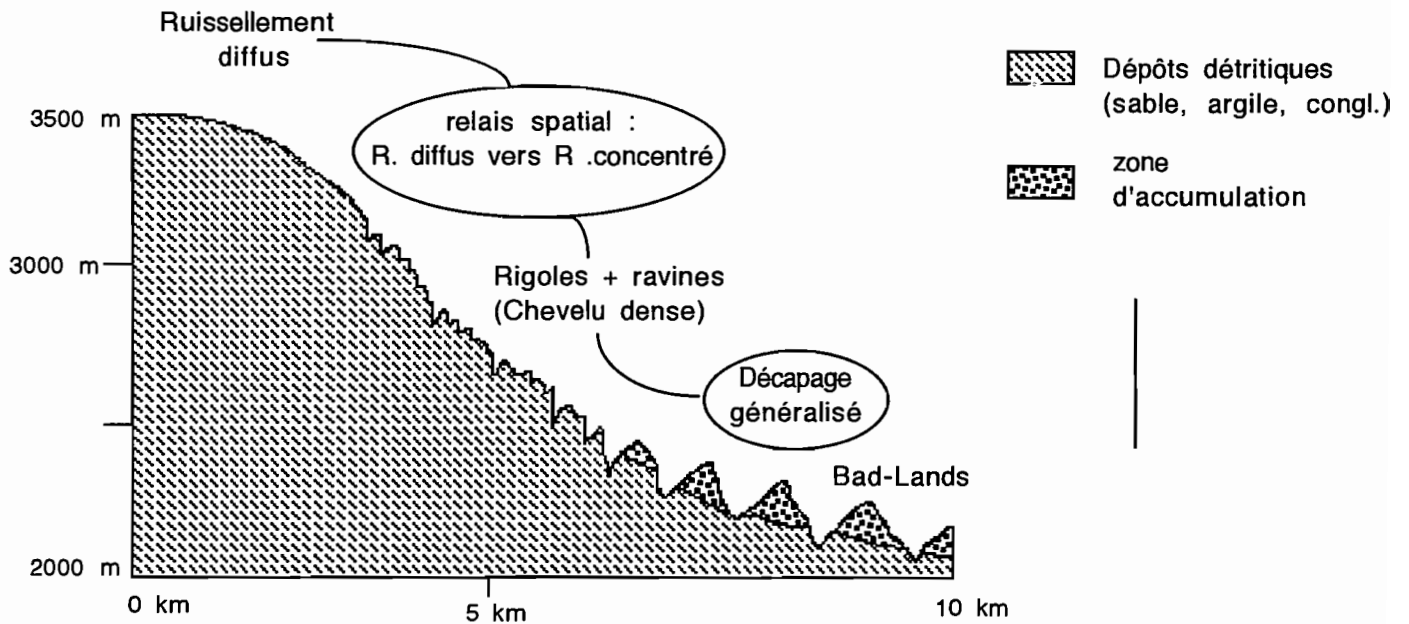
DYNAMIQUE DU RUISELLEMENT CONCENTRE ET DIFFUS SUR DEUX TYPES DE SUBSTRATS

Fig. n° 4

Substrat volcanique



Substrat sédimentaire



D'après G. De Noni, 1996

haut du versant puis lui succède le ruissellement concentré marqué un réseau dense de rigoles et de ravines puis par des bad-lands à l'aval du versant ;

- les facteurs d'ordre temporel. L'exemple le plus probant est fourni par l'érosion concentrée relayée par l'érosion éolienne. Il concerne les régions faiblement arrosées où la sécheresse sévit annuellement, durant au moins deux mois consécutifs, ce qui permet à l'érosion éolienne de prendre le relais de l'érosion concentrée.

L'importance de l'érosion au long des versants est aussi mesurable grâce à l'accumulation de dépôts en bas des pentes. Les seules données, dont je dispose, concernent les études d'alluvionnement effectuées au barrage de la rivière Paute appartenant au grand bassin hydrographique de Satiango (Province de l'Azuay). Les mesures effectués dans cet ouvrage, qui est le plus grand complexe hydroélectrique du pays, permettent d'envisager des valeurs importantes de pertes en terre, de l'ordre de $4,89.10^6$ t/an soit $943 \text{ t/km}^2/\text{an}$. Le seul bassin versant de Paute, d'une superficie de 5.186 km^2 , se subdivise en 15 sous-bassins de 60 à 1.200 km^2 dans lesquels les pertes annuelles vont de 715 à $2.500 \text{ t/km}^2/\text{an}$. Sur de

plus petits bassins, tels par exemple Gualaceo, Jadan ou Burgay, les valeurs maximales mesurées atteignent 5.000 à 6.000 t/km²/an. Globalement, ces valeurs correspondent à une érosion importante et, malgré le caractère estimatif de ce type de mesure, elles concordent avec les chiffres proposés dans les Andes par F. Fournier dans son étude sur le Climat et l'Erosion (Fournier, 1960), situant ainsi cette partie de la Sierra au même niveau que certaines régions à forte érosion de Chine, des U.S.A. ou de l'Inde.

2) L'UTILISATION DES SOLS ET LES FACTEURS ANTHROPIQUES DE L'ÉROSION ACCELEREE

L'érosion accélérée des sols agricoles s'inscrit dans un schéma qui fait intervenir la cadre physique particulier des Andes ainsi que le contexte historique et l'utilisation actuelle des sols de cette région.

En dépit de conditions naturelles difficiles et parfois extrêmes, la Sierra a servi depuis longtemps de refuge aux sociétés humaines et a joué un rôle historique majeur dans la constitution de l'état équatorien. Les contraintes physiques, loin de rebuter les hommes, les ont sécurisés par rapport aux zones tropicales côtière ou amazonienne perçues comme des secteurs répulsifs et inhospitaliers. Bien que les progrès de l'agriculture et de la médecine tropicale aient fait évoluer les mentalités au cours des ultimes décennies, la Sierra a conservé son image de région forte et son rayonnement politique sur le pays⁵.

9
crevettes

⁵ Depuis la création de la république d'Equateur, la ville de Quito, qui est située dans la Sierra, est la capitale du pays. Malgré le formidable essor des productions tropicales d'exportation dans la Costa (bananes, café, cacao et parcs à cervettes) au cours des 30 dernières années, liées à la présence de grands ports comme Guayaquil, la Sierra reste aussi peuplée que la Costa : 4,6 millions d'hab. dans la Sierra pour 4,9 millions dans la Costa. Proportionnellement, la population rurale est plus forte dans la Sierra : 50% contre 42% (INCE, 1991).

Au cours des grandes périodes qui ont jalonné l'histoire de l'Equateur, l'utilisation des terres de la Sierra a été marquée par trois périodes clés : (De Noni, 1986)⁶.

A l'époque pré-coloniale ou hispanique, existe dans la Sierra une agriculture plutôt conservatrice des ressources naturelles, en particulier des sols. Nous allons rappeler les principales caractéristiques de cette agriculture qui traduit l'adaptation des sociétés rurales à un environnement de montagne.

Puis, durant deux périodes de rupture, l'érosion des sols a pris une ampleur considérable. Il s'agit de la période coloniale au cours de laquelle a eu lieu une modification radicale des structures agraires, et de substantiels changements dans l'usage des terres et des types de cultures. La période contemporaine est la seconde phase de rupture, en raison du développement du minifundio et son extension dans les cordillères.

Afin d'illustrer l'évolution de l'utilisation du sol au cours des 3 périodes évoquées, la zone de Tupigachi, dans la partie nord du bassin de Quito, région de Cayambe, a été retenue comme représentative. Une coupe, de direction NW-SE, englobant le versant oriental du volcan de Mojanda et une partie du bassin de Cayambe jusqu'au village de Tupigachi, permet de mettre en

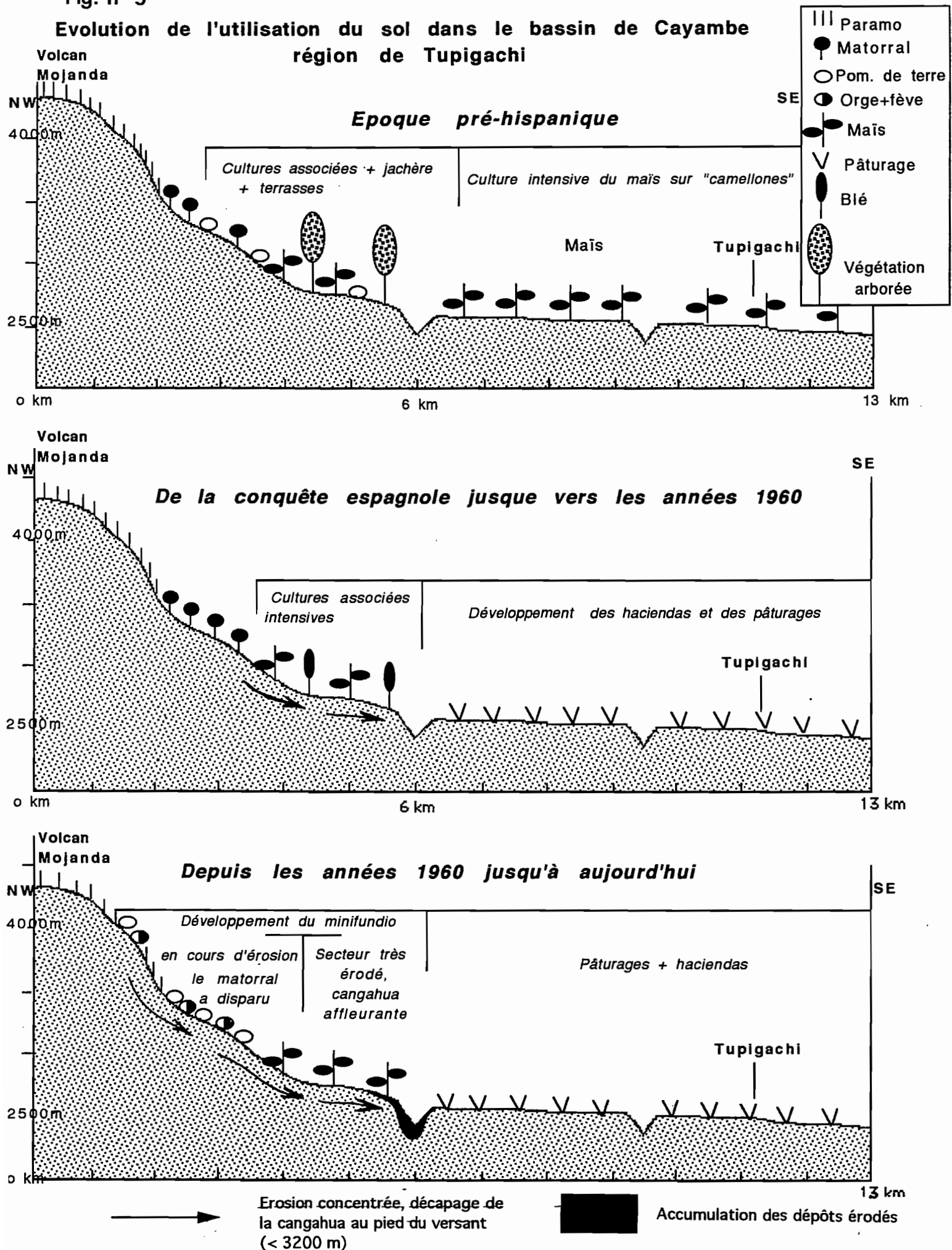
⁶ Les faits retracés ici, concernant ces 3 périodes ainsi que les citations reproduites, ont été consultés dans les principaux ouvrages de synthèse qui analysent l'histoire du pays et des Andes, en particulier : Ayala (1985), Barsky (1980,84), Bonifaz (1979, 82), Chiriboga (1986), Deler (1981), Deler, Gomez, Portais (1983), Dollfus (1981), Donkin (1979), Gondard et al. (1988), Knapp (1988), Murra (1978), Oberem (1981), Pareja-Diezcanseco (1979).

évidence les trois étapes de l'évolution (fig. n° 5). Ce choix se justifie par l'importance de ce secteur dans l'histoire du pays et par l'existence de sources bibliographiques majeures dues, en particulier, aux travaux de Athens (1980), Larrain Barros (1980) et Knapp (1988). Leurs recherches s'appuient sur des sources bibliographiques anciennes se trouvant essentiellement dans les bibliothèques espagnoles de Madrid et de Séville. Ils font référence à une collection relativement importante de textes traitant de la découverte, de la conquête et de la colonisation des Andes et de l'Amérique latine. La plupart des textes sont anonymes et datent du XVI^{ème} et du XVII^{ème} siècle. Parmi les textes où figurent des noms d'auteurs, ce sont les noms de P. Cieza de Leon, Fr. Paz Maldonado, P. Rodriguez de Aguayo et D. Rodriguez Docampo qui reviennent le plus souvent. Sur la base de ces textes, les auteurs ont également réalisé des observations de terrain, originales et inédites.

Avant l'invasion du pays par les incas d'abord puis par les espagnols, cette région était peuplée par une confédération très puissante, les "Quitus-Caras". Les auteurs estiment que la population s'élevait à l'époque (500 à 1500 après Jésus-Christ) à environ 35000 personnes. Ceci témoigne déjà d'une pression démographique non négligeable si l'on songe que la population actuelle atteint 60000 habitants pour le même espace (INCE, 1991). Aujourd'hui, cette région, qui est l'une des principales zones d'élevage et de production laitière du pays, continue à occuper une place de choix dans l'économie du pays.

Fig. n° 5

Evolution de l'utilisation du sol dans le bassin de Cayambe région de Tupigachi



L'agriculture pré-coloniale

Très tôt les hommes se sont installés dans la Sierra. Des ateliers de taille d'outils d'obsidienne (Bonifaz, 1979) indiquent un âge estimé à plus ou moins 10000-15000 ans avant Jésus-Christ (régions du volcan Ilalo et de Cayambe-Cangahua). Néanmoins, c'est durant les 1000 ans qui précèdent la conquête espagnole (période dite de "l'intégration", de 500 à 1500 après Jésus-Christ), que l'agriculture a connu un développement spectaculaire (Pareja-Diezcanseco, 1979). La "Sierra" devient le lieu privilégié d'évolution des sociétés d'agriculteurs qui augmentent et diversifient leurs productions par une remarquable utilisation des pentes et des ressources naturelles.

En Equateur, comparativement à ce qui s'est passé au Pérou ou en Bolivie, l'influence des Incas dans ce processus a été moins déterminante. Fort éloignés de leurs bases méridionales situées sur les bords du lac Titicaca, ceux-ci n'ont exercé une domination réelle sur le pays que durant la période comprise entre 1450, date à laquelle ils colonisent le royaume "Cañari", et 1534, correspondant à la conquête de Quito par l'espagnol S. de Benalcazar. En arrivant dans les Andes équatoriales, les incas s'affrontent à des sociétés indigènes qui avaient déjà fait des progrès considérables en agriculture et qui utilisaient

des méthodes très voisines des leurs. Parmi ces sociétés, on peut citer, tout particulièrement, la confédération des "Quitus-Caras" déjà citée (Provinces actuelles de Carchi, Imbabura, Pichincha et Cotopaxi), les "Puruhaes" (Province de Chimborazo) et les "Cañaris" (Provinces de Cañar et Azuay). Les grands traits de cette agriculture précoloniale, soulignés par les historiens, étaient les suivants :

- Des productions agricoles diversifiées, avec rotations et associations de cultures. Dans un milieu contraignant et avec une population nombreuse, les agriculteurs de cette époque ont su mettre en place une agriculture de montagne prospère. L'historien Cieza de León (1553) fait remarquer " qu'il y avait dans ce royaume, au temps des Incas, très peu de terres qui, paraissant fertiles, étaient désertes". ^{Bien} au contraire, tout était très peuplé comme le constatèrent les premiers chrétiens qui y entrèrent..... Ils transformaient les terres stériles en zones fertiles dans de nombreux endroits".

Sur la coupe de la figure 5, le terme "camellones", qui est utilisé, correspond à une technique mise au point par ces sociétés et dont les vestiges sont encore visibles aujourd'hui. Dans les fonds de bassin humides et marécageux avaient été construites des "camellones", levées de terre séparées par des canaux où circulait l'eau. Les cultures se pratiquaient sur les levées au sol enrichi chaque année par l'apport de terre fine provenant des canaux. Knapp (1988) souligne que la pratique des camellones suggère une agriculture intensive répondant aux besoins d'une population déjà importante : il estime, en

effet, que 100 à 150 journées par homme et par an étaient nécessaires pour l'entretien de ces ouvrages.

Si ces sociétés ont su utiliser les bas-fonds, elles ont pris aussi rapidement conscience de l'existence d'une gamme étendue de micro-climats, se succédant sur de courtes distances. Les groupes sociaux ont appris à utiliser l'étagement des milieux en altitude. Oberem (1981), à la suite de Murra (1978), utilise le terme de "micro-verticalité" : chaque étage écologique étant utilisé pour une culture spécifique, le maïs entre 2000 et 3000 m et la pomme de terre au-dessus de 3200 m (voir fig. n° 5). Plusieurs variétés d'une même espèce étaient semées "pour garantir la récolte, certaines espèces supportant mieux le froid, d'autres la grêle et d'autres la sécheresse ou les parasites" (Ramón et López, 1981). Enfin, l'étage le plus haut était utilisé comme pâturage d'altitude, l'élevage des lamas, animaux reconnus dès cette époque pour leur résistance au milieu, se développa ; les lamas furent utilisés à la fois comme animal de trait et de boucherie".

Les sociétés avaient vraisemblablement compris l'intérêt des rotations et associations de cultures pour préserver la richesse des sols. Pour maintenir de bons rendements, le maïs, alors considéré comme la culture principale, objet de rites religieux voués au dieu "Soleil", était souvent associé à d'autres cultures, haricots et quinoa (*Chenopodium quinoa*) qui sont dans les deux cas d'excellents engrais verts. La rotation des cultures était également de règle. Après deux ou trois

récoltes, les terres agricoles étaient mises en période de jachère, longue parfois de dix ans. R.A. Donkin (1979) rapporte que, dans l'étage froid (altitude > 3200 m), l'association de tubercules - pommes de terre, oca (*Oxalis tuberosa*) et Ullucu (*Ullucus tuberosus*) - était remplacée par d'autres variétés de quinoa et par la canahua (*Chenopodium pallidicaule*). Quant aux zones forestières, "les moyas", elles étaient l'objet d'une législation rigoureuse pour la coupe du bois.

- Le contrôle de l'eau et de l'érosion. Ce contrôle était assuré principalement par l'édification de terrasses de culture ou "andenes". Prescott (1847) souligne : "... sur pentes faibles, les andenes pouvaient atteindre cinquante, cent voire deux cents pieds de large..... ils se rétrécissaient considérablement à trois ou quatre pieds de large sur les pentes raides et parfois moins que cela dans les secteurs les plus escarpés... les talus étaient composés par des pierres sèches qui s'ajustaient les unes aux autres à la perfection".

Donkin (1979) confirme par ses recherches la maîtrise de cette technique par les sociétés locales. Il rappelle le texte de F. Pizarro : "tous les terrains montagneux sont modelés en forme d'escaliers de pierre". Grâce aux "andenes", il était possible de cultiver les versants en contrôlant les pertes en terre et d'apporter de l'eau là où cela était nécessaire, les "andenes" étaient alors dotés d'un réseau de canaux d'irrigation. Ces derniers, qui étaient alimentés par des rivières, des lacs, des sources thermales, avaient donné lieu à des travaux parfois gigantesques : "ils exploitent au maximum

l'eau des rivières, irriguant ainsi un grand nombre de terres et les travaux de creusement des canaux étaient les plus grandioses et admirables qui existaient sur ce continent parce qu'ils avaient été réalisés sans outil spécialisé" (Barnabé Cobo, 1956). "Les canaux pouvaient mesurer jusqu'à 120 lieues de long, environ 600 km" (J. Murra, 1978).

Les travaux de Knapp (1988) soulignent que l'association maïs-pommes de terre sur le versant ainsi que, plus haut, les cultures de pommes de terre étaient réalisées sur des terrasses de type "andenes" (coupe 1 de la fig. n° 5) ;

- L'utilisation des engrais. Une attention particulière était portée à la fertilité des sols. "La taille du maïs à la récolte dépendait de l'emploi du guano, transporté dans la Sierra à dos de lama, mais aussi de l'utilisation d'excréments humains séchés et pulvérisés" (Cieza de León, 1553). Pour amender les champs, les agriculteurs de l'époque pouvaient aussi utiliser des têtes de poissons séchés, par ailleurs, ils n'hésitaient pas à charrier des volumes considérables de terre pour enrichir les sols : "certaines montagnes étaient si rocheuses que les Incas se virent obligés, après avoir construit les terrasses, de les doter d'une couche épaisse de terre avant de pouvoir les cultiver" (Prescott, 1847).

L'agriculture coloniale

La conquête espagnole bouleverse profondément l'organisation agricole et sociale indigène, en provoquant :

- une forte diminution de la population indigène. Ce phénomène est attesté par les recensements de population effectués à l'occasion du paiement du tribut auquel étaient soumis les indigènes par les espagnols. Dans les villes de Quito, Cuenca, Loja, Zamora et Quijos, la population indigène diminue fortement : Deler (1981) estime qu'elle est passé vraisemblablement de 80000 personnes en 1557-1561 à 30000 en 1591-1608 . Plus précisément, à Tupigachi-Cayambe (fig. n° 5) où les "Quitus-Caras" opposèrent une farouche résistance, Larrain-Barros (1980) estime, pour la période indiquée précédemment, que la population a été divisée par 4, passant de 35000 personnes à moins de 10000. A Latacunga, à une centaine de kilomètres au sud de Quito, la population de 2000 personnes en 1663 ne serait plus que 700 en 1758, et à Chimbo, petite ville située au sud-ouest de Latacunga, elle serait passée de 1200 personnes en 1596 à 800 en 1650 (Deler, 1981).

Les historiens s'accordent pour expliquer cette évolution par les affrontements guerriers, les effets des épidémies

importées d'Europe et les mauvaises conditions de travail qui ont causé de nombreuses victimes : "à partir du XVII^e siècle, la crise démographique qui affecte les groupes indigènes est notable. La cruelle spoliation occasionnée par les Espagnols et l'introduction de maladies inconnues alors en Amérique ont décimé les indigènes" (Perez, 1947). Face à une opposition très affaiblie, les "conquistadors" ont imposé rapidement un nouveau schéma d'organisation de l'espace : "la baisse très forte de la population indigène et l'affaiblissement des communautés permettent aux espagnols d'augmenter considérablement leur domination sur la terre" (Chiriboga, 1986) ;

- L'asservissement des populations indigènes. Pour affirmer leur domination, les Espagnols regroupèrent de manière forcée les indigènes en un même lieu. C'est le système de "l'encomienda" qui conduit progressivement à la mise en place de grands domaines agricoles de type seigneurial, les "haciendas", concentrés dans les bassins et les vallées andines (1500-3000 m). Dans ce système, les indigènes, assujettis à "un maître", constituaient ainsi une main-d'oeuvre servile et aisément contrôlable : "en même temps que les espagnols étendent leur domination spatiale, ils regroupent, comme du bétail, sur les terres conquises et devenues propriétés privées des familles d'indigènes pour travailler les champs et servir les maîtres" (Rubio Orbe, 1987). L'organisation ethno-culturelle indigène, basée sur l'utilisation "micro-verticale" des versants et sur une dévotion

quasi mystique pour la "Pachamama", la terre-mère, est totalement anéantie.

Sur la coupe 2 de la figure 5, il apparaît que le maïs, remplacé par les pâturages dans le bassin, se trouve refoulé sur le versant. Les arbres ont disparu des pentes et l'érosion se développe.

- La mise en place de l'agriculture "castillane". Le but initial des conquistadors n'était pas de conquérir des terres agricoles. Leur mission initiale était d'exploiter les ressources minières afin d'enrichir la couronne d'Espagne. On recherchait principalement les gisements aurifères dans ce nouveau monde, présumé très riche, nommé "el Dorado". Après quelques tentatives d'exploitation de l'or, peu fructueuses dans l'ensemble, dans la Sierra centrale (Cuenca, Gualaceo) et dans les zones de piedmont (Zaruma, Zamora et Macas), l'activité minière fut progressivement délaissée au profit de l'agriculture. Des compensations avantageuses étaient proposées à ceux qui voulaient bien quitter l'Espagne pour coloniser ces nouvelles terres. A. Gimeno (1974) relate l'exemple suivant : "les personnes, qui avaient été reconnues aptes pour le service des armes et qui étaient volontaires pour une affectation de 5 ans dans la république de l'Equateur, recevront à la fin de leur mission 10 fanègues (1 fanègue = 64.6 ares) de terre en propriété perpétuelle, une paire de boeufs et une vache". En supplantant les traditions locales ancestrales, l'agriculture castillane s'est imposée radicalement. Ses principaux apports se sont opérés dans les trois domaines suivants :

- *l'introduction, sur de vastes superficies de nouvelles cultures, provenant d'Espagne*, notamment : arbres fruitiers (agrumes, pommes, pêches, abricots, vigne), cultures maraîchères (choux, oignons, carottes, salades, petits pois...etc) et céréales (blé, orge et avoine).

- *le développement de l'élevage*. L'activité pastorale se développa d'une manière spectaculaire grâce à l'introduction d'animaux inconnus jusqu'alors. Les nouveaux cheptels (bovins, ovins, porcins, chevalins) augmentèrent rapidement : au début du XVII^e siècle, environ 2.000.000 de têtes de moutons existent alors entre Ibarra et Alausi. Outre la production de viande et de lait, l'élevage donna naissance à une activité textile florissante (les "obrajes").

- *l'utilisation de nouvelles pratiques agricoles*. Parmi celles-ci, l'une des premières est l'utilisation systématique de la traction animale pour le travail du sol. Les labours relativement profonds étaient réalisés aisément par une seule personne en un temps minimum. Cette nouvelle technique de culture s'opposait radicalement aux pratiques communautaires indigènes, manuelles et "à ras du sol". Avant l'arrivée des espagnols : "labourer la terre était la plus grosse tâche à accomplir, ce travail se réalisait dans le cadre d'un système totalement communautaire avec des groupes d'hommes qui soulevaient les mottes de terre et de femmes qui

étaient chargées de les écraser au rythme des chansons" (Prescott, 1847) "l'emploi de la taclla (bâton en bois incurvé) permettait de soulever les mottes de terre puis de les écraser..... la structure du sol était peu altérée, sinon sur les 15 premiers centimètres" (Dollfus, 1981).

L'agriculture récente

Les effets de la conquête espagnole ont été durables jusqu'à la première vague de réforme agraire dans les années 1960. Cette réforme est le fait marquant de la période récente, elle est survenue alors qu'une forte croissance de la population survient.

Jusqu'à la réforme, les terres étaient organisées en grands domaines, les "haciendas ou latifundios". Elles étaient travaillées par des paysans pauvres qui formaient une importante main-d'oeuvre servile et qui ne possédaient que de toutes petites parcelles louées ou prêtées par les maîtres d'haciendas. Par comparaison avec l'hacienda, ce type de paysannat est appelé "minifundio".

La gestion des terres et des hommes était donc contrôlée par un petit groupe d'individus : on estimait, il y a encore 30 ans, que les exploitations supérieures à 20 ha, bien que ne

représentant que 10 % du nombre total d'exploitations, englobaient plus de 80 % des terres cultivées. Parmi celles-ci, 60 % environ correspondaient à d'immenses domaines supérieurs à 500 ha : des volcans entiers, dont quelques-uns dépassent 5000 m d'altitude, pouvaient se trouver englobés dans les limites de l'hacienda. La coupe 2 de la figure 5 permet de souligner les possessions de l'hacienda au fond du bassin et sur les versants du volcan Mojanda.

L'utilisation des sols était largement extensive. L'essentiel de la production se trouvait concentré sur les terres fertiles du bassin interandin (entre 1500 et 3000 m), sur les interfluves et les terrasses alluviales où l'on pratiquait l'élevage bovin et localement la culture céréalière (blé par exemple). On estimait que 80 % des terres appartenant à des haciendas de plus de 100 ha n'étaient pas cultivées. Il s'agissait principalement des terres situées au-dessus de 3000-3200 m sur des pentes vigoureuses (40-70 %), entrecoupées par des gorges profondes ("quebradas"). Ces portions de versants étaient précédemment bien couvertes par la végétation "naturelle".

A partir des années 1960, les mutations profondes vont faire évoluer ce système. Le mécontentement social, aggravé par une forte croissance démographique (la population a été multipliée par dix en un siècle), provoqua la promulgation d'une loi de réforme agraire qui se mit en place en deux fois, en 1964 puis en 1974 (Barsky, 1980 et 1984 ; Costales, 1971). L'Etat ne s'opposa pas à ce processus dans sa globalité, les gouvernants de l'époque préférèrent se tourner vers d'autres centres d'intérêt (cultures d'exportation sur la Côte

et pétrole amazonien) plutôt que de s'enliser dans un conflit social difficile à gérer.

La réforme agraire permit d'abolir l'état de servitude (le "huasipungo") auquel était soumise l'abondante main-d'œuvre des haciendas et contraignit les grands propriétaires terriens à renoncer à leurs privilèges féodaux et à faciliter la cession de terres au petit paysannat.

Le "huasipungero" devenait donc un homme libre et propriétaire d'un terrain mais dans des conditions particulières qui, à terme, ne l'avantagèrent pas. En effet, les "hacendados" bloquèrent l'attribution de bonnes terres malgré la présence de zones sous utilisées et orientèrent les cessions de terres vers les zones situées au-dessus 3000-3200 m d'altitude, provoquant ainsi un transfert massif de population sur les versants puis sur les hautes terres. Le processus majeur de mutation était en cours et dès son départ, il confinait le minifundio à la marginalité : d'un point de vue agronomique d'abord car la nature était plus contraignante à cette altitude que dans les zones plus basses et plus fertiles où le petit paysan avait acquis une expérience de travail du sol, d'un point de vue socio-économique ensuite si l'on considère que ces hautes terres, difficiles d'accès, étaient déconnectées des circuits commerciaux traditionnels (Farell et Da Ros, 1983).

La délocalisation du minifundio en altitude a contribué à modifier profondément les caractéristiques initiales de la végétation naturelle ainsi que le mode de fonctionnement de l'écosystème d'altitude. Cette évolution a donné lieu à la création d'un damier, très dense actuellement, composé de

parcelles de cultures consacrées principalement à l'autosubsistance, la vente au marché n'étant envisagée qu'exceptionnellement pour écouler des surplus de récoltes. L'élevage est peu répandu : son développement est limité tant par le manque de capitaux nécessaires au paysan pour acheter des bêtes que par l'exiguïté des parcelles. Dans les minifundios les mieux nantis, l'élevage, lorsqu'il existe, est pratiqué sur les terres de parcours en indivision. Les surfaces cultivées sont de petite taille, la parcelle unitaire dépasse rarement 1 ha. Les exploitations sont relativement morcelées : un propriétaire possède normalement plusieurs parcelles, la surface totale des parcelles par famille est inférieure en général à 20 ha. On peut trouver, cependant, quelques familles mieux nanties dont les terres sont comprises entre 20 et 40 ha. Leur nombre semblerait en progression (voir tableau n° 2, ci-après).

Il n'y a aucune limite de pente pour cultiver, mais seule l'absence de sol constitue une limite. On constate, en effet, que le minifundio continue son expansion y compris sur des versants découpés par un réseau dense de profondes gorges, les pentes des versants atteignant fréquemment 70 % voire 100 % (De Noni, Viennot, 1986).

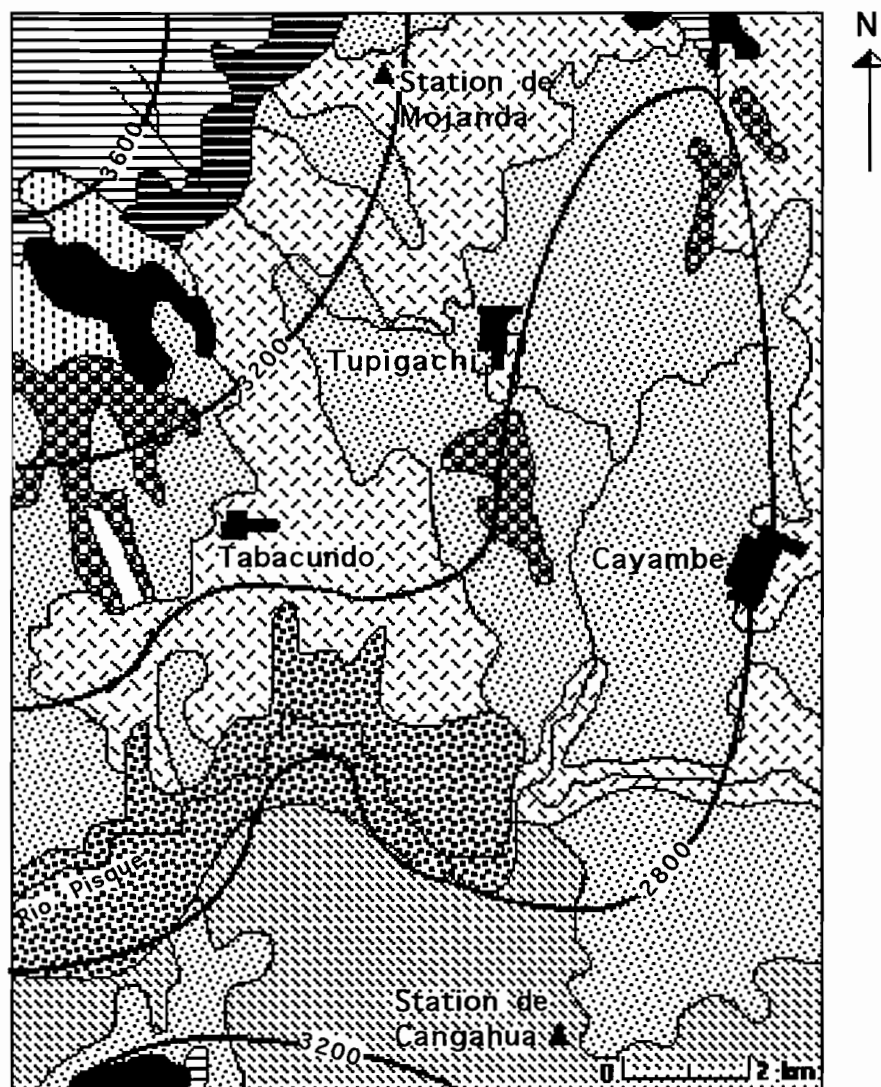
Cette évolution du minifundio s'accompagne d'une érosion accélérée :

- à l'échelle du versant, comme le montre la coupe 3 de la figure 5 présentant la région de Tupigachi-Cayambe, l'hacienda ne possède plus que le fond du bassin où l'on continue à pratiquer l'élevage. Le minifundio occupe le versant du volcan Mojanda : le pied du versant, en monoculture de maïs, est anciennement cultivé et montre des signes importants d'érosion (affleurements de cangahua). La partie médiane du versant, au-dessus de 3200 m, est occupée par des parcelles d'orge, de pommes de terre et de fève qui ont remplacé totalement la végétation arbustive du matorral. La partie supérieure du versant, au-delà de 3600 m, voit se poursuivre les défrichements. Ces derniers se sont effectués aux dépens du paramo et portent quelques parcelles de cultures (orge, fève, pomme de terre également).

- à l'échelle locale. Nous nous appuyerons sur la carte n° 11 où sont envisagés le secteur de Tupigachi ainsi que le bassin de Cayambe. La carte⁷, qui a été réalisée en utilisant d'anciennes cartes topographiques et des photographies aériennes, montre les transformations agraires intervenues dans cette région

⁷ Les cartes utilisées sont les premières cartes topographiques réalisées en Equateur par l'Institut Géographique Militaire avec l'assistance d'ingénieurs géopographes espagnols. Elles datent des années 1930-40 et se distinguent par la qualité de leurs informations (échelle 1/50.000): outre les courbes de niveaux, elles contiennent des données sur l'utilisation des sols, la végétation et les zones dégradées. Pour le reste de la période, on a eu recours à l'interprétation stéréoscopique de photographies aériennes des années 1960 et 1980, à l'échelle 1/60000.

Carte n° 11 Utilisation des sols dans le bassin de Cayambe
à la suite des modifications agraires intervenues
entre 1938 et 1988



Zones sans modification depuis 1938

-  Terroirs riches conservés par les haciendas (Elevage bovin sur mollisols).
-  Végétation herbacée ("Paramo")
-  Végétation arbustive ("Matorral")
-  Eucalyptus
-  Canyon du Rio Pisque

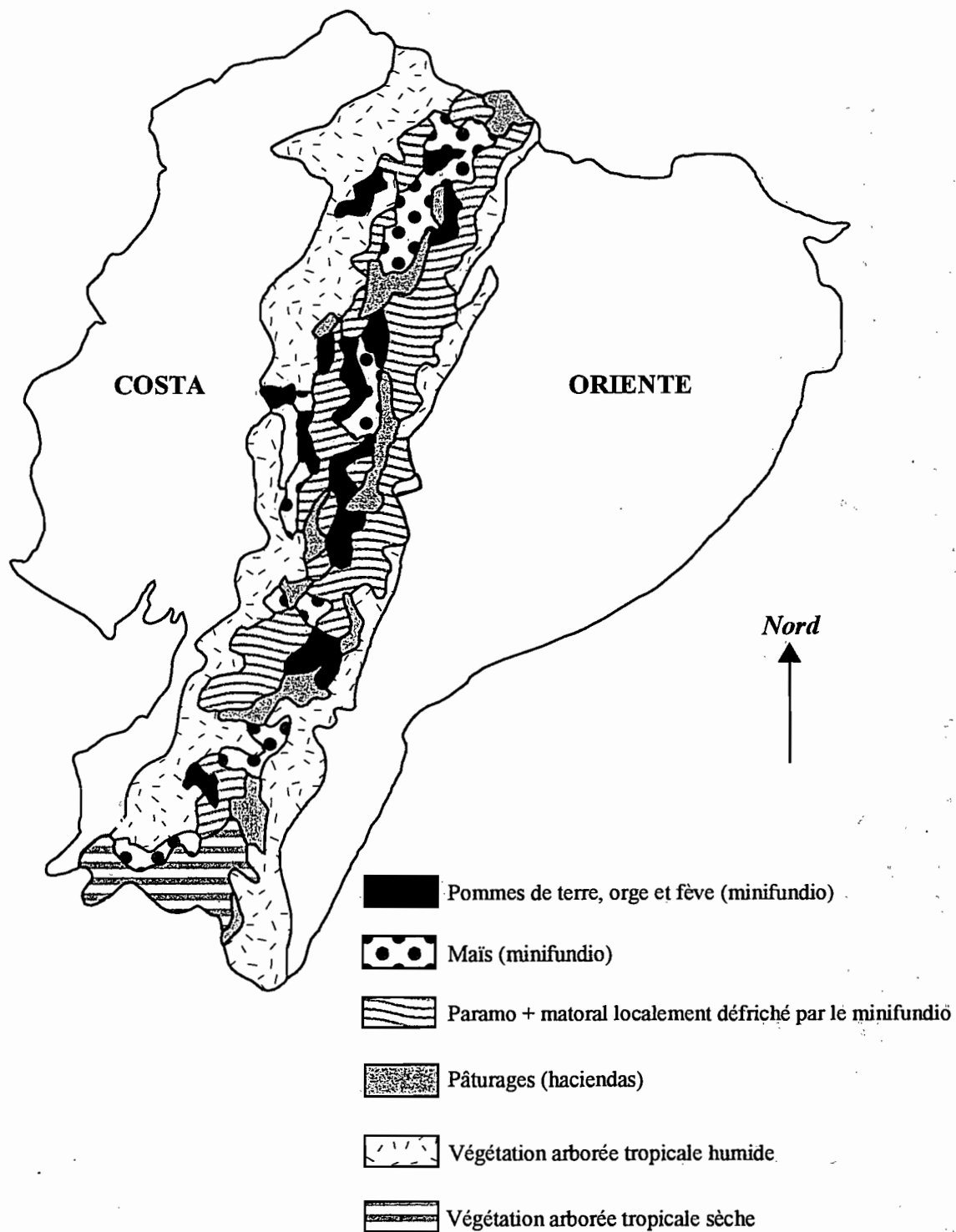
Zones modifiées entre 1938 et 1988

-  Zone dense de minifundio (andosols) cédée par les haciendas (orge, fève, pommes de terre...).
-  Terroirs pauvres (maïs+végét. naturelle) de minifundio abandonnés par les haciendas ("cangahua").
-  Paramo mis en culture par le minifundio
-  Matorral mis en culture par le minifundio
-  Courbe de niveau en mètre, au-delà de 2800m les pentes sont supérieures à 20%.

entre 1938 et 1988 (De Noni et al., 1996). La légende met en relief les conséquences spatiales des mutations agricoles sur les versants et les hautes terres. A cette échelle, on note, comme précédemment, que le minifundio occupe massivement, à partir de 3000-3200 m, les terroirs de versants cédés par les haciendas durant la réforme agraire, celles-ci se cantonnant sur les bonnes terres du bassin (2800-3000 m). On remarque, enfin, que l'expansion du minifundio s'est effectuée en altitude, jusqu'à 3600 m, aux dépens des formations végétales "naturelles", arbustives (matorral) et herbacées (paramo) ;

- à l'échelle régionale de la Sierra. La carte n° 12 des grands types d'utilisation actuelle des sols dans la Sierra confirme l'ampleur des transformations à l'échelle de toute la région (Gondard, 1982). Entre 1500 et 3000 m, la culture principale est le maïs associé fréquemment au haricot grimpant et plus localement à la fève. Plus haut sur le versant, le minifundio a remplacé le maïs par une production diversifiée et mieux adaptée aux conditions climatiques. Il s'agit de l'orge, la pomme de terre, la fève, le lupin, la quinoa et localement l'oignon. Le matorral ne forme plus une bande continue et le contact entre la formation qui le surmonte, le paramo, et les cultures se fait le plus souvent directement. Dans l'étage du paramo, les cultures sont peu développées et la végétation herbacée (*Stipa ichu*) demeure très couvrante. Néanmoins, les principaux dangers résident, localement, dans la pratique de

Principaux types d'utilisation du sol dans la Sierra de l'Equateur



ECHELLE : 1/4.000.000

SOURCE : adaptation de la carte d'utilisation du sol réalisée par Gondard, Atlas JA, 1982

l'élevage et des brûlis fréquents du paramo pour améliorer l'appétence de l'herbe. Cet élevage, qui reste extensif pour l'instant, concerne les ovins et les caprins, parfois des lamas, et peut atteindre 4200-4.400 m. Au delà de 4200-4400 m, la végétation disparaît pour laisser place à la roche puis aux neiges pérennes. Le croquis de la figure n° 6 présente l'étagement de la végétation sur une coupe qui traverse, d'est en ouest, les volcans Cotopaxi et Iliniza.

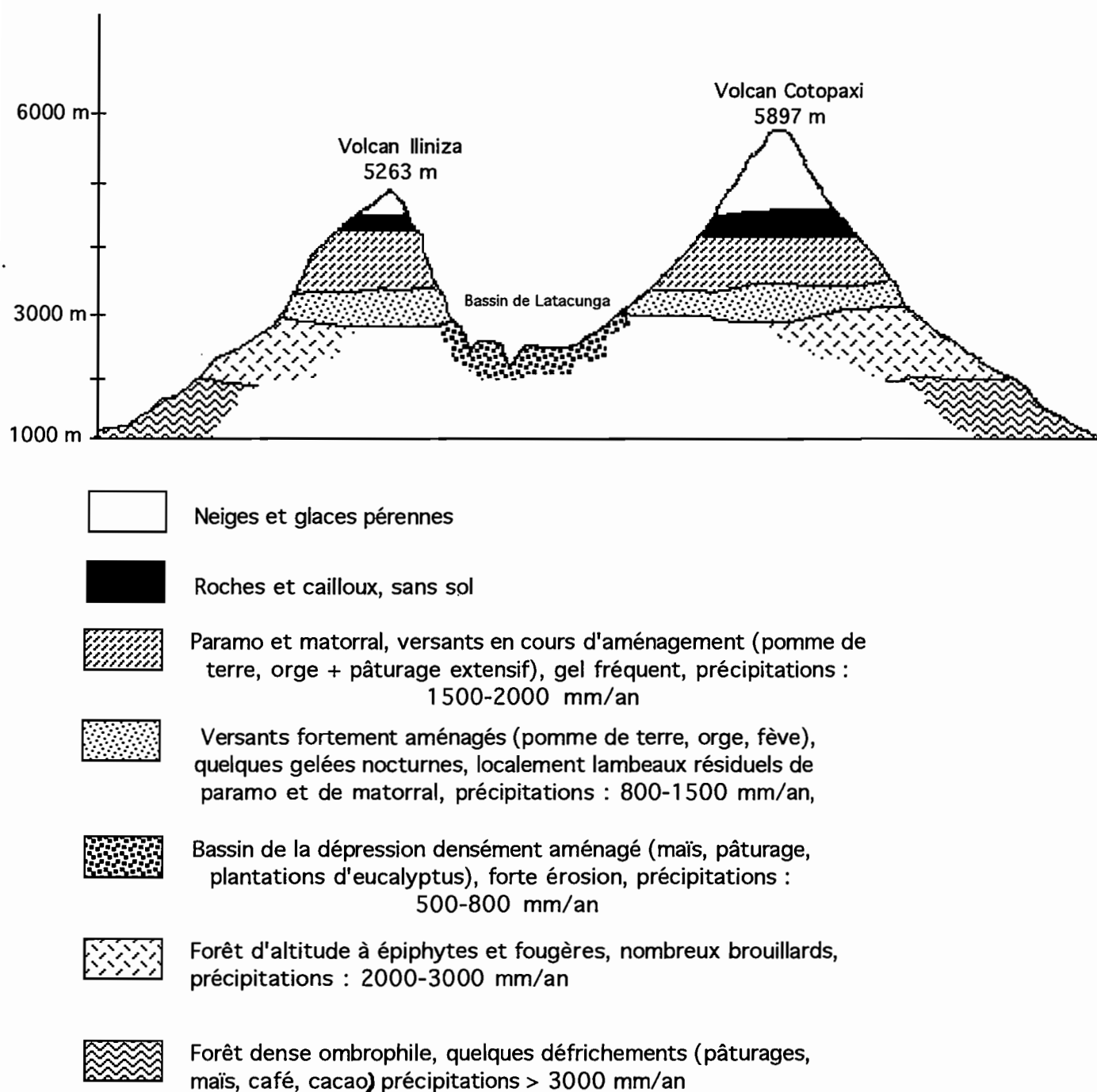
On constate donc, actuellement, dans la Sierra une situation paradoxale caractérisée par des versants très cultivés, indépendamment des pentes et des contraintes climatiques. Ces versants portent une forte densité de population comprises entre 80 et 150 habitants par km². A l'opposé, existent des bassins aux terres relativement planes et enherbées servant de pâturage extensif aux troupeaux bovins des haciendas⁸.

Le paradoxe est d'autant plus fort si on l'on compare les surfaces occupées respectivement par le minifundio et les haciendas. Les données correspondantes, issues des recensements agricoles réalisés par le Ministère équatorien de l'Agriculture et de l'élevage (MAG), ont permis d'élaborer le tableau suivant (Vos, 1988 ; De Noni, 1994) :

⁸ Le nombre de têtes par hectare est passé de 1.1 en 1972 à 0.7 en 1985 alors que, pendant la même période, les haciendas ont augmenté la superficie des pâturages dans les fonds de bassin encore non utilisés. Les paysans du minifundio dénoncent régulièrement cette évolution qui n'est pas logique en disant qu'il s'agit d'un gel des terres par les haciendas afin d'éviter une extension du minifundio dans les terres non utilisées du bassin.

Fig. n° 6

ETAGEMENT DE LA VEGETATION DANS LA SIERRA PYROCLASTIQUE



(D'après G. De Noni, 1997)

Tableau n° 2 (recensements agricoles, MAG 1954-1985).

LA STRUCTURE AGRAIRE EN EQUATEUR DE 1954 A 1985:
NOMBRE D'EXPLOITATIONS ET SUPERFICIES OCCUPEES EN %.

Taille en ha	1954		1974		1985	
	Nombre	Superficie	Nombre	Superficie	Nombre	Superficie
0 - 20	89.86	16.63	85.31	18.54	83.5	20.4
20 - 100	8.06	18.15	12.48	33.52	15.3	44.4
> 100	2.08	64.39	2.13	47.94	1.3	35.2

De ce tableau, ressort l'inégalité très forte qui existe dans la distribution des exploitation : le minifundio n'occupant, dans le meilleur des cas en 1985, que 20 % des terres agricoles alors qu'il regroupe plus de 80 % des unités de production. On remarque aussi une forte augmentation des exploitations comprises entre 20 et 100 ha qui pourrait illustrer l'accession du petit paysannat à des exploitations moyennes. Mais, l'absence d'information sur la répartition au sein du groupe 20-100 ha ne permet guère de préciser l'évolution récente de manière plus satisfaisante.

En résumé, l'érosion accélérée des sols est importante dans les zones aménagées de la Sierra. Son importance est liée au contexte physique de la Sierra qui est une montagne tropicale naturellement dynamique. Elle est

associée aussi au facteur socio-économique, au poids de la démographie et aux modifications de l'utilisation de l'espace. Il convient maintenant d'envisager des solutions pour tenter de lutter contre ce phénomène. L'étude va être conduite dans le cadre de grands bassins représentatifs au sein desquels ont été choisis des sites expérimentaux.

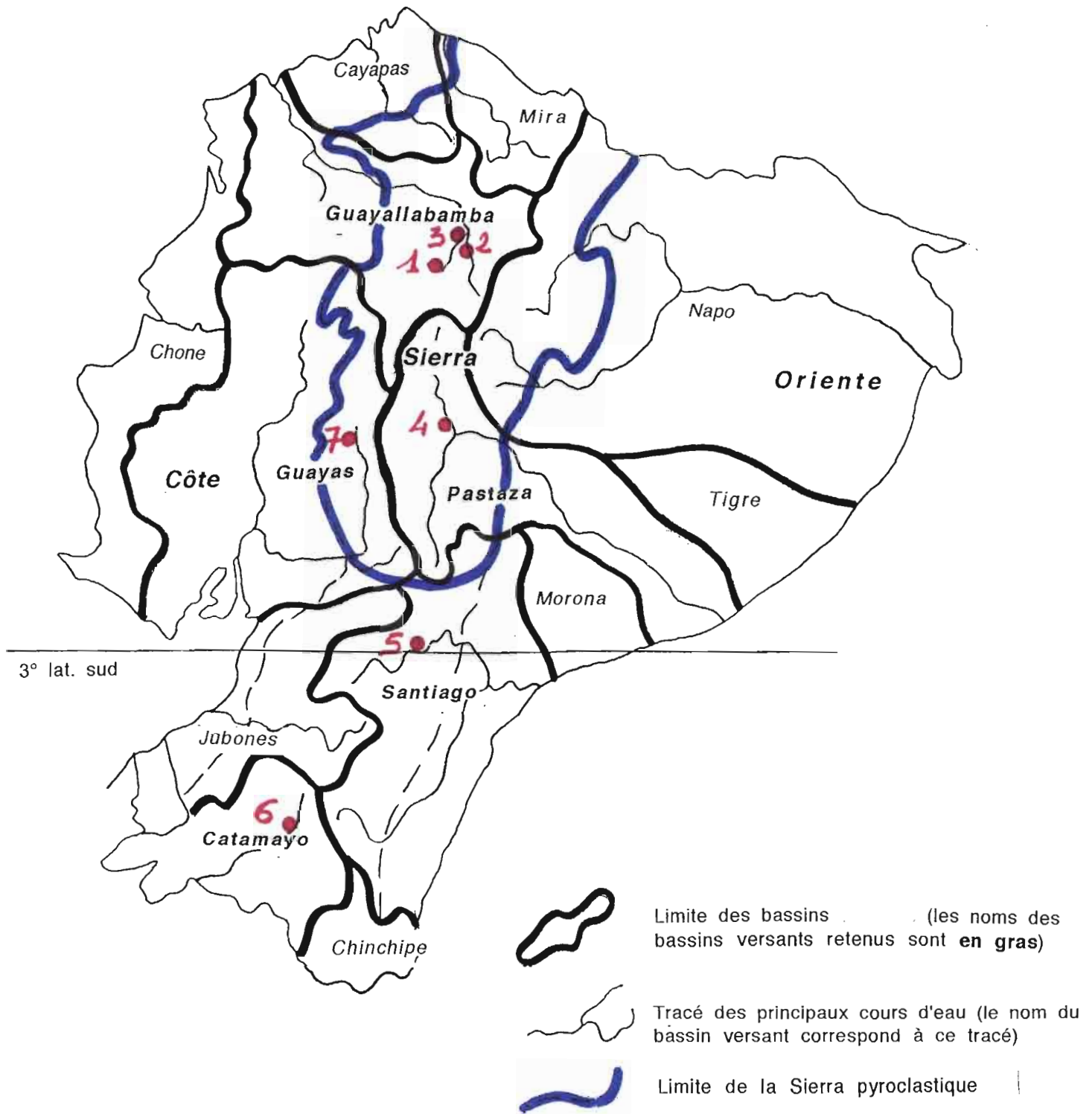
3) LES GRANDS BASSINS REPRESENTATIFS ET LEURS SITES EXPERIMENTAUX

En raison des caractères physiques spécifiques du pays et de la demande précise du gouvernement équatorien pour des solutions d'aménagements anti-érosifs, notre but a été d'étudier les modalités de l'érosion dans des secteurs considérés comme représentatifs.

Cinq grands bassins, de superficies comprises entre 8000 et 12.000 km², ont été choisis (carte n° 13). Quatre d'entre eux se situent à l'intérieur de la Sierra qui est la région considérée comme la plus touchée : bassins de Guayllabamba et de Pastaza dans la Sierra nord et centre et bassins de Santiago et de Catamayo dans la Sierra méridionale. Le cinquième bassin de Guayas est situé aux marges extérieures de la Sierra, au pied de la cordillère occidentale.

En choisissant ces bassins, il ne s'agissait pas pour nous d'étudier l'ensemble des flux de terre et d'eau qui caractérise leur dynamique. Certes, si ce type d'approche est intéressant pour évaluer un bilan global de l'érosion (pertes en eau et en terre), nous avons préféré choisir au sein de ces grands bassins des sites considérés comme représentatifs et correspondant à différentes pentes, à des altitudes variées, à des spécificités climatiques, lithologiques, pédologiques et à divers modes d'utilisation de l'espace. 7 sites comprenant 26 stations de mesures de l'érosion ont donc été étudiées. Chaque station de mesure présente plusieurs parcelles expérimentales

Grands bassins de l'Equateur



Sites expérimentaux en rouge :

- Bv Guayllabamba : 1 Tumbaco, 2 Cangahua, 3 Mojanda,
- BV Pastaza : 4 Riobamba
- BV Santiago : 5 Jadan
- BV Catamayo : 6 Vega Grande
- BV Guayas : 7 Ventanas

D'après P. Pourrut (Atlas JA, 1982)

Echelle : 1/4.000.000

sur lesquelles le ruissellement et l'érosion ont été mesurées sous pluies naturelles et sous pluies simulées.

Hudson a réalisé dans le bulletin n° 68 de la FAO (1993) une synthèse exhaustive des principales méthodes utilisées par la recherche pour mesurer sur le terrain le ruissellement et l'érosion. Il souligne que les courants actuels de la recherche utilisent essentiellement 3 types de méthodes qui se distinguent par les échelles d'approche envisagées : l'échelle kilométrique pour les bassins versants, l'échelle décamétrique ou hectométrique pour les parcelles expérimentales et l'échelle métrique pour les simulations de pluies. Concernant les bassins versants, Hudson estime qu'ils constituent un excellent support pour mesurer l'érosion des terres à l'échelle d'une région mais qu'ils ne sont pas assez précis pour permettre d'évaluer le phénomène à l'échelle de la parcelle paysanne. Dans ce dernier cas, il préconise l'emploi des parcelles expérimentales et de la simulation de pluie. Hudson précise que la taille moyenne des parcelles expérimentales utilisées dans le monde est de l'ordre de 100 m² et qu'elles sont situées généralement dans des stations expérimentales qui ne représentent pas toujours les situations pédologiques où se produit l'érosion. A son avis, la qualité des mesures, par l'emploi d'appareils très précis et par un suivi très régulier des observations, est recherchée avant tout. Il souligne aussi que la plupart des équipes, utilisant l'une ou l'autre de ces approches, tentent de reproduire la méthode américaine de Wischmeier (1978, 81), avec des adaptations et des améliorations plus ou moins satisfaisantes selon les cas.

Pour l'Equateur, nous nous sommes situés à l'échelle de la parcelle paysanne et nous avons donc choisi d'utiliser les parcelles de ruissellement et la simulation de pluie ce qui nous rapproche de ces grands courants de la recherche. Par contre pour pouvoir répondre à la demande du partenaire, nous nous en distinguons sur d'autres points : i) nous avons installé des parcelles de 100 m² mais aussi des parcelles beaucoup plus grandes atteignant 1000 m² ; ii) nous avons fait le choix d'être moins précis sur la qualité des mesures en installant les parcelles chez les paysans dans des conditions où le contrôle des observations est plus difficile ; iii) nous n'avons pas cherché à reproduire le modèle américain de Wisfmeier, si nous avons choisi ces méthodes c'est parce qu'elles permettaient d'évaluer et de comparer l'action de l'érosion en fonction de différents modes de cultures, traditionnels et améliorés. *Cela n'aurait rien enlevé à tes brâtes de dire que tu as pris cette décision sur les conseils de Reese (C.R. Dillion 1975) - le n'est qu'après que tu as découvert le livre de Hudson !*

Nous avons envisagé de regrouper les cinq grands types de bassins selon la nature du substrat. Les bassins de Guayllabamba et de Pastaza sont considérés comme représentatifs du domaine des pyroclastites ; les bassins de Santiago, Catamayo et de Guyas représentant le domaine des roches du socle et des dépôts détritiques sédimentaires.

Le tableau suivant regroupe les principales caractéristiques des grands bassins et des sites expérimentaux. En règle générale, il y a un site expérimental par grand bassin cependant, le bassin de Guayllabamba en comporte 3.

Tableau n° 3 :

Présentation des bassins et
des sites expérimentaux

			Erosion	Sites Pentes	Altitude Pluie	Cultures	Sols
SIERRA VOLCANIQUE NORD ET CENTRE	B. V Guayllabamba Pyroclas. sablon- ponceuses à argilo- limoneuses (1 à 3 m d'épaisseur sur la cangahua)	DEPRESSION éros. très généralisée	Cangahua à faible profondeur Mouv. de masse relayés par érosion concentrée	Tumbaco 20%	2600 m 700 mm	Maïs + eucalyp.	Sol mollique tronqué, (l'horizon argileux a disparu) 0,3 à 0,4 m d'épaisseur, reposant sur la cangahua
				Cangahua 18%	2800 m 550 mm	Maïs + fève + haricot	Andosol induré. Les paysans pulvérisent la cangahua pour cultiver, épaisseur mini- male pour le labour, 0,2 à 0,3 m d'épaisseur
	B. V Pastaza Pyro. sables >3200m sans cangahua	CORDILLERES érosion lâche sans cangahua	Erosion concentr. local. M.masse Erosion concentr. local. E. éolien.	Mojanda 40%	3300 m 900 mm	Orge + pomme de terre + fève	Andosol hydraté saturé 0,5 à 0,8 d'épaisseur, en prof., cendres noires argilo-limo. très épais.
				Riobamba 35%	3250 m 700 mm	Orge + pomme de terre + oignons	Andosol vitrique, 0,3 à 0,5 m d'épaisseur, Sables fins (1 m) sur matériau morainique
SIERRA SUD SANS PYRO	Bv Santiago Dépôts sédi. argiles, sables cong., épais	DEPRESSION érosion généralisée	Erosion concentr., forts ruis. sup. et hypo.	Jadan 22%	2700 m 700 mm	Maïs + pâtu- rages	Ranker d'érosion, 0,2 m maxi. d'épaisseur, reposant sur des argilites, nombreux cailloux
	Bv Catamayo Altérites peu épais., roche du-socle		Ruiss. diffus relayé par Erosion concentr., chevelu dense rig. + ravines	Vega Grande 25%	1500 m 600 mm	Maïs + canne à sucre	Sol vertique peu épais (0,2 - 0,3 m d'épaisseur), avec qq cailloux, développés sur altérites colluvionnées
HORS SIERRA	BV Guayas Ancien cône de déjection matériau argil. très altéré	PIEDMONT éros. lâche		Ventanas 20%	220 m 1800 mm	Maïs, riz, soja	Sol vertique épais, (> 1 m de profondeur) sur cônes de déjection très altérés, localement fin placage de cendres en surface

3.1. Les grands bassins de Guyallabamba et de Pastaza et leurs sites expérimentaux

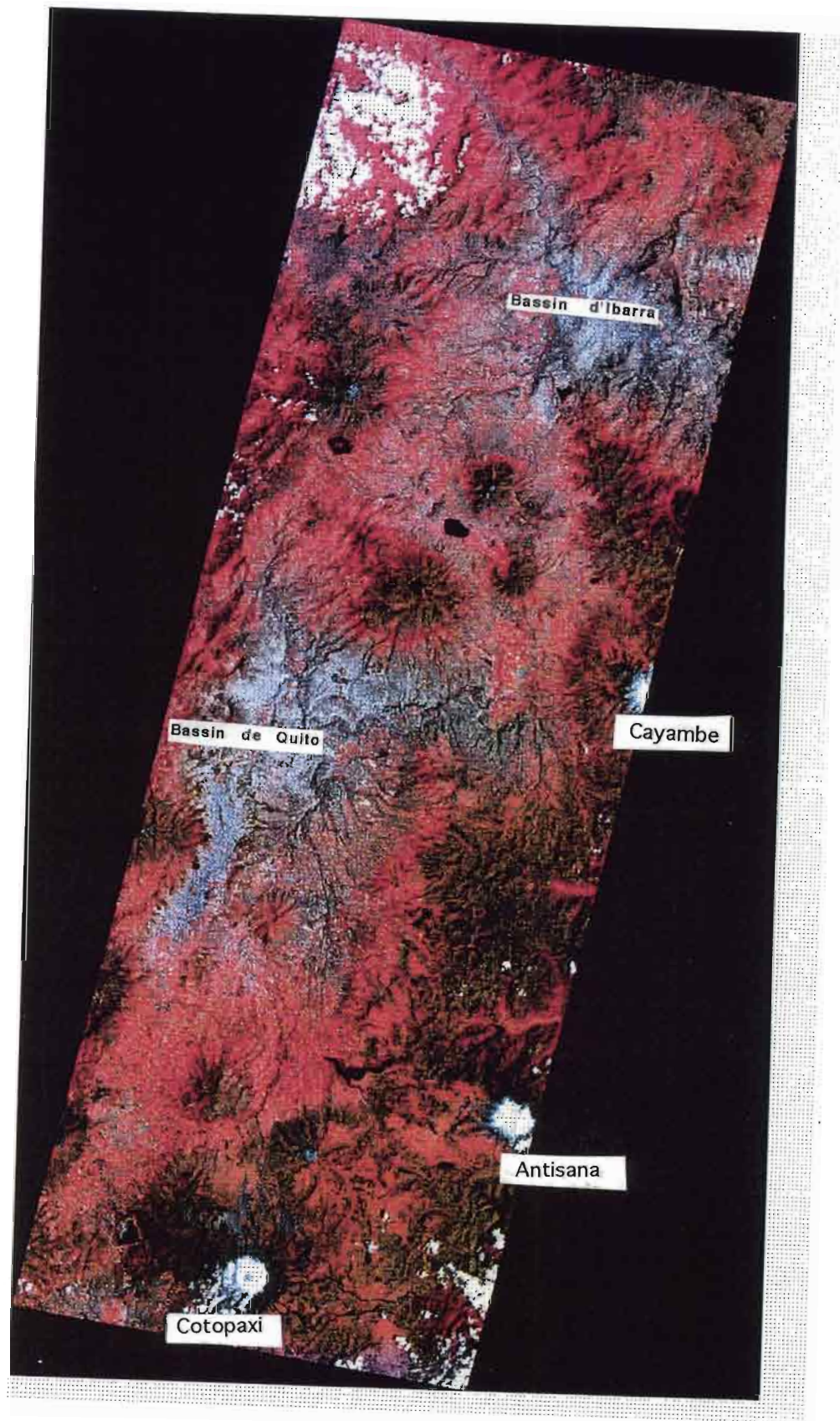
Les bassins se situent soit dans les cordillères, soit dans la dépression et parfois incluent des éléments des uns et des autres. La mosaïque de trois images Spot (fig. n° 7) montre une partie du grand bassin de Guayllabamba où apparaissent les dépressions où se situent les villes de Quito et d'Ibarra en bleu, et le domaine des cordillères en rouge.

Les cordillères à hauts volcans

Les cordillères de la Sierra volcanique se caractérisent par des dénivelées considérables : de l'ordre de 3000 à 3500 m du côté extérieur et de 1500 à 2000 m au-dessus de la dépression. Les lignes de crêtes des cordillères se situent en moyenne à une altitude de 4000-4200 m et portent quelques grands volcans qui dépassent 5000 m (carte n° 3). Trois de ces volcans (Cayambe, Antisana et Cotopaxi, aux sommets enneigés) sont présents sur la mosaïque de la figure n° 7.

Les cordillères sont formées par trois types de paysages, d'est en ouest (fig. n° 8 et 9) :

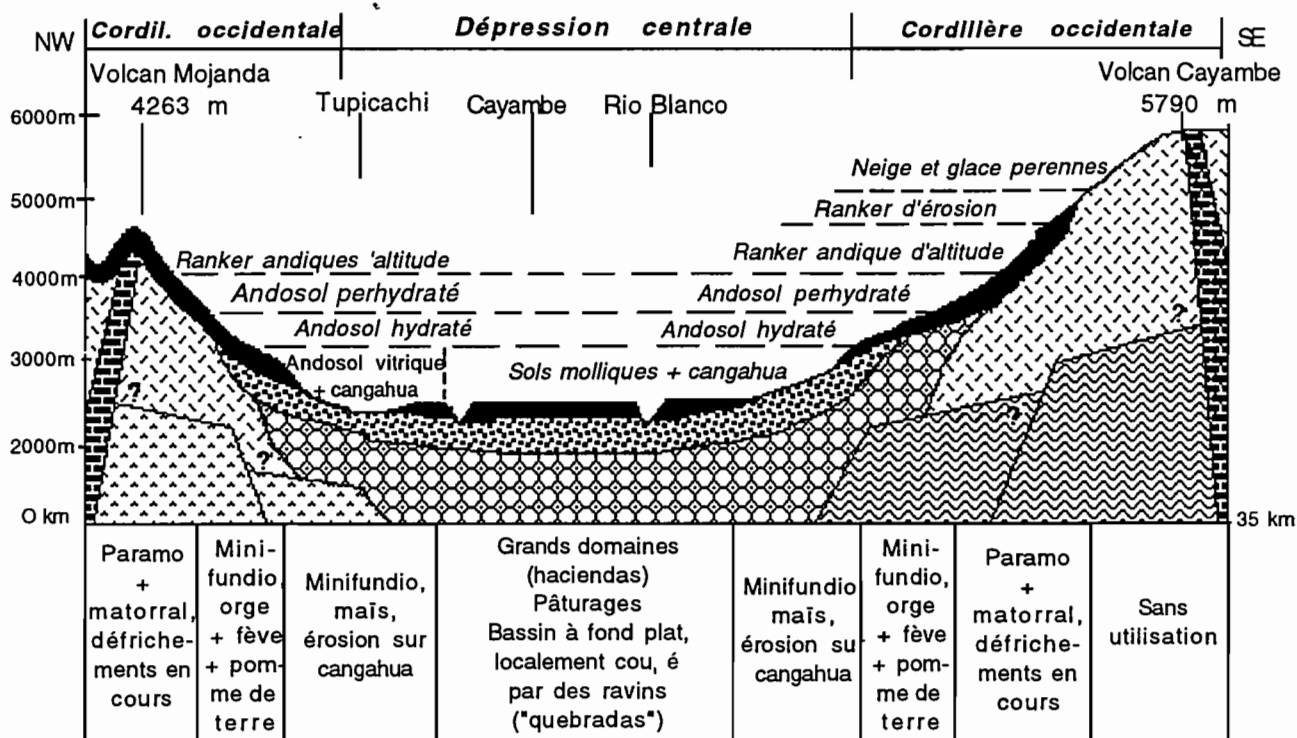
Fig. n° 7



Composition colorée, en fausses couleurs, de la Sierra pyroclastique et des bassins de Quito et Ibarra, à partir de la mosaïque de 3 images Spot (1995)

Fig. n° 8

Coupe de cordillère à cordillère, traversant le bassin de Cayambe

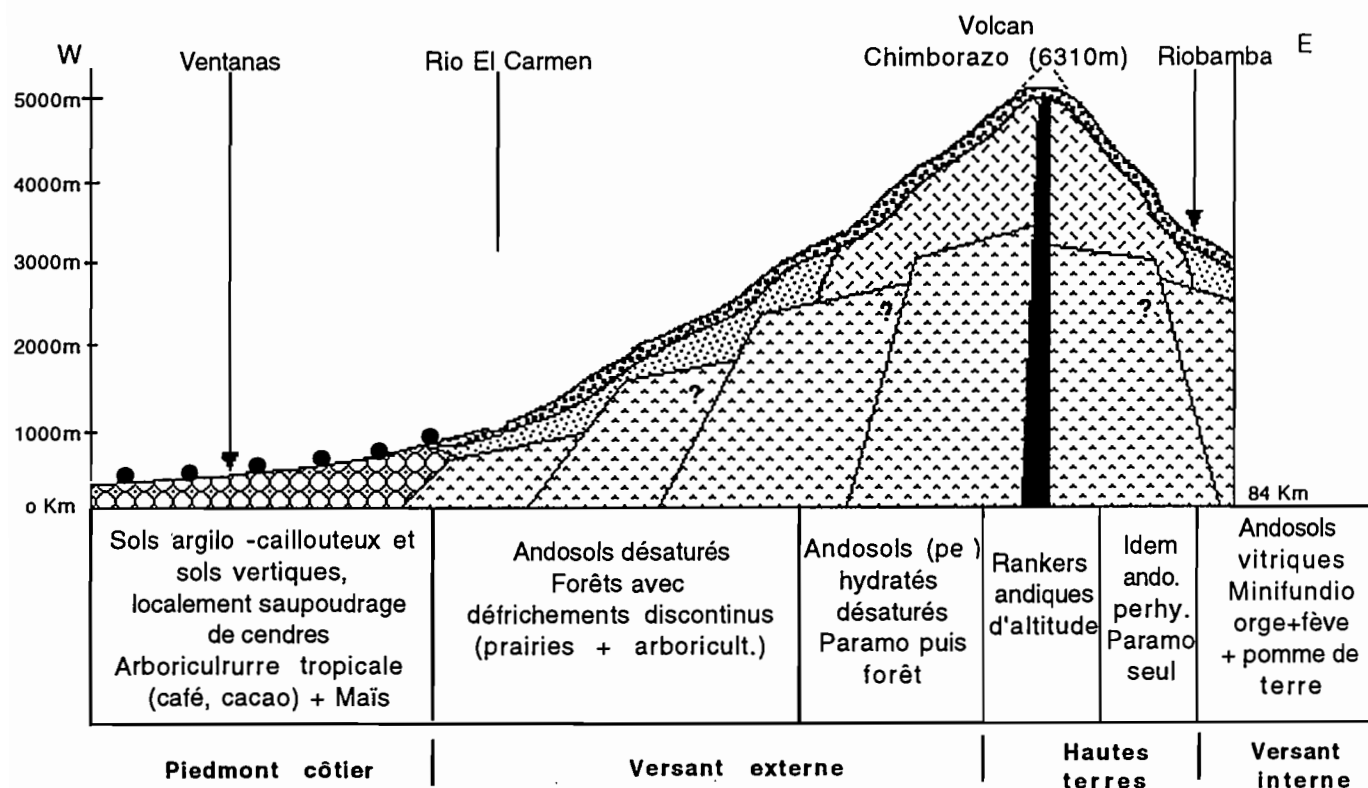


- Socle métamorphique de la cordillère orientale
- Socle volcano-sédimentaire de la cordillère occidentale
- Edifice volcanique (andésite, brèches, cendres)
- Cheminée volcanique (neck pour le volcan Mojanda)
- Dépôts de remplissage + pyroclastites et lahars
- Pyroclastites récentes (cendre essentiellement)
- Cangahua interstratifiée avec des couches de pierre ponce

d'après G. De Noni, 1996

Fig. n° 9

**Coupe traversant le volcan Chimborazo,
depuis le versant interne oriental jusqu'au piedmont côtier**

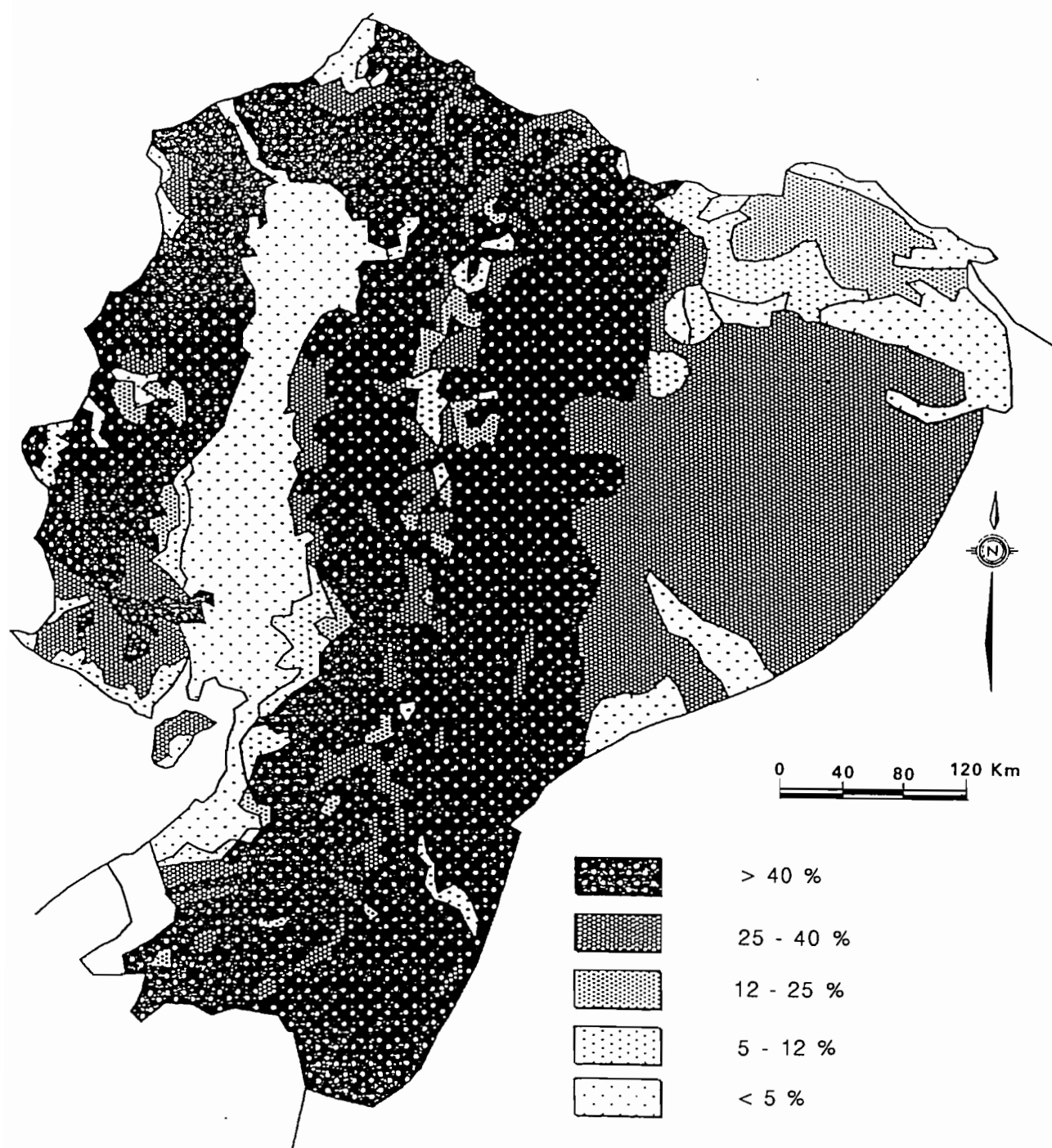


- Socle volcano-sédimentaire, localement batholites de granite
- Cheminée de lave
- Cône du Chimborazo (andésite, cendres, brèches)
- Dépôts détritiques volcaniques (lahars)+pyroclastites et coulées
- Pyroclastites récentes
- Dépôts caillouteux et conglomérats
- Cônes de déjection récents, localement couverts par des cendres

d'après G. De Noni, 1996

- entre 3000-3200 m et 3600-3800 m d'altitude, les versants internes sont de longs versants rectilignes, de 40 à 70% de pente, situées au-dessus des bassins de la dépression,
- au-dessus de 3600-3800 m, les hautes terres offrent de grosses croupes convexes aux pentes comprises entre 20 et 40% jusqu'à 4000-4200 m d'altitude. Cette altitude est dépassée lorsque les hautes terres portent un volcan. Dans ce cas, la neige et la glace sont pérennes à partir de 4600-4800 m d'altitude,
- et entre les hautes terres et les piedmonts côtiers et amazoniens (500-600 m d'altitude) se développent les versants externes, longs versants rectilignes qui descendent en pente régulière (40-70%) avant de se raccorder aux premiers cônes de déjection situés au pied de la chaîne.

Dans l'ensemble, **les pentes** sont fortes. La carte des pentes de l'Equateur, à l'échelle de 1/4.000.000 (carte n° 14), réalisée à partir des cartes à 1/200.000 mentionnées antérieurement et des prospections de terrain, illustre bien cette situation. La légende traduit la distribution spatiale des pentes selon les classes suivantes, en pourcentage : < 5, 5-12, 12-25, 25-40, > 40. Cette carte montre la prédominance des pentes voisines ou supérieures à 40 % dans les cordillères. A une échelle plus fine, celle du versant, que ne peut traduire la petite échelle de la carte, la situation est plus complexe car il existe sur les



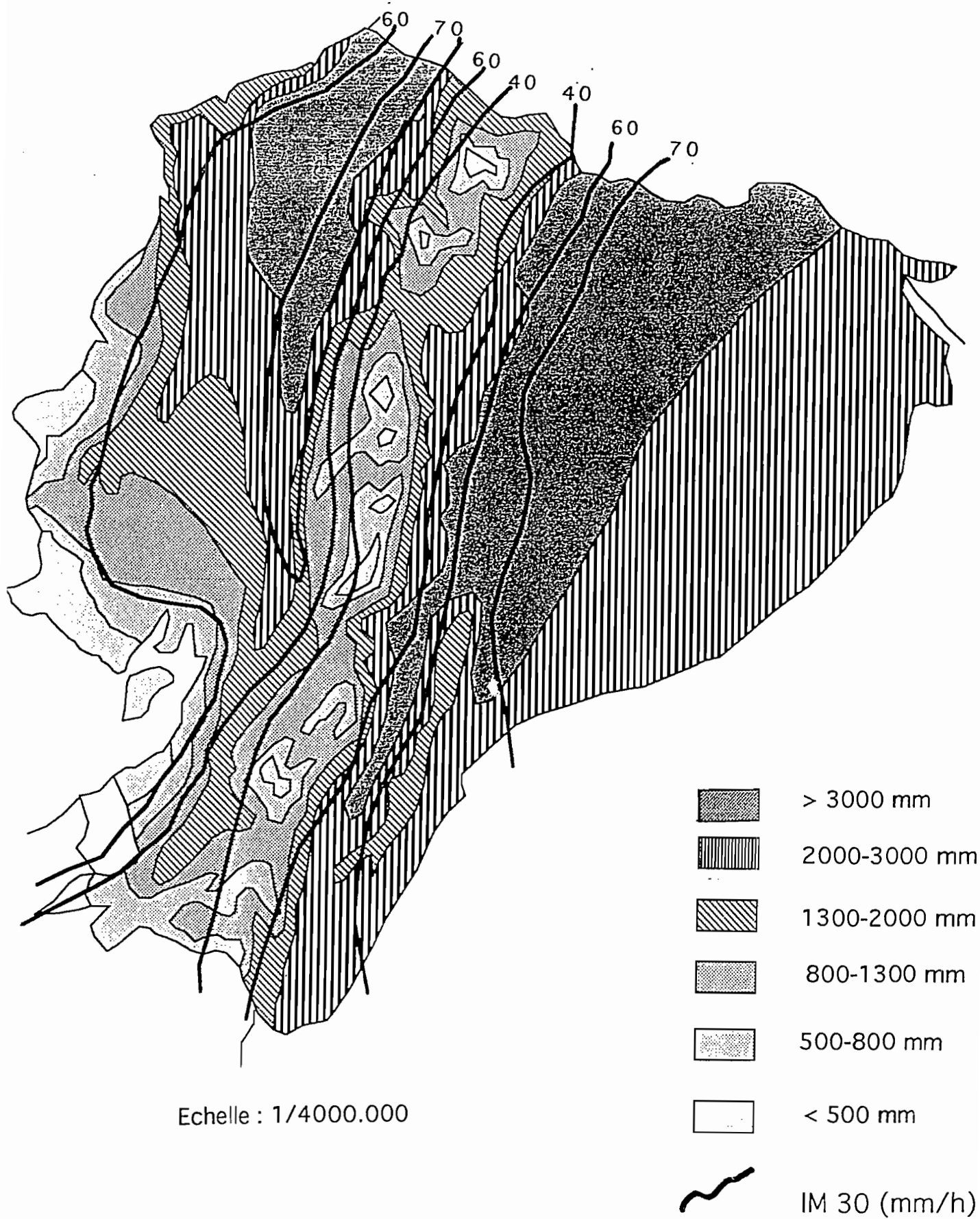
versants internes et externes des cordillères des pentes supérieures à 70 % et localement à 100 %.

En raison des fortes altitudes et de la situation des cordillères, **les précipitations** sont très élevées (voir carte n° 15). On distingue néanmoins les nuances suivantes :

- les plus fortes hauteurs de pluies, de l'ordre de 2000 à 4000 mm par an, se déversent sur les versants externes, occidentaux et orientaux, des cordillères qui forment le premier écran aux pénétrations des masses d'air océaniques. Les précipitations sont maximales (3000 à 4000 mm/an) entre 1300-1500 m et 2000-2500 m d'altitude. (Pourrut, 1983, 1994). Sur la cordillère orientale, elles sont réparties de façon à peu près uniforme tout au long de l'année mais une légère baisse est enregistrée de décembre à février. Sur la cordillère occidentale, les précipitations ont lieu durant une unique saison comprise entre les mois de décembre et avril. Sur la carte n° 15, ont été dessinées les isolignes représentant les valeurs de l'intensité maximale de pluie durant 30 minutes (IM 30 en mm/h), valeur habituellement utilisée pour qualifier l'érosivité des pluies (Wischmeier, Smith, 1978, 1981)⁹. Les variations de l'IM 30 suivent

⁹ A ce stade préliminaire de la recherche et à la suite des travaux des chercheurs américains habituellement utilisés, on avait tenté d'apprécier les valeurs de IM30 pour évaluer la sensibilité des milieux de la Sierra à l'agressivité des pluies. Roose (1981) avait trouvé pour l'Afrique de l'Ouest une relation simple entre l'indice d'agressivité annuel moyen et la hauteur moyenne annuelle de la pluie. En procédant de la sorte, une relation significative a été obtenue, elle s'appuie sur les données de 24 postes pluviographiques. Les valeurs correspondantes permis de tracer sur la carte n°15 des isolignes illustrant les variations de l'IM30 (De Noni, Nouvelot, 1983, 85, 86). Plus avant dans le chapitre 2, grâce aux données obtenues sur les parcelles de ruissellement, ces valeurs seront discutées et précisées.

Pluviométrie annuelle en mm (période 1965-1978)
et Isolignes d'intensité maximale en mm/h durant
30 mn et de fréquence médiane



globalement celles de la pluviométrie. Les IM 30 les plus forts, de 60 à 70 mm/h, se situent bien dans les zones les plus arrosées des versants externes ;

- lorsqu'on s'élève, les totaux pluviométriques diminuent sensiblement, ils se situent entre 2000 et 3000 mm par année, entre 3600-3800 et 4000 m d'altitude. Ils diminuent encore lorsqu'on franchit les hautes terres et qu'on atteint les versants internes. Les totaux se stabilisent vers 3200 m, à cette altitude, les hauteurs d'eau tombées sont environ de 1300-1500 mm par an. Les intensités de pluie IM suivent également ces variations et sont comprises entre 40 et 60 mm/h.

Sur les hautes terres et les versants internes, les effets du gel sont sensibles également au-dessus de 3200 m d'altitude. L'exposition des versants et l'altitude sont des facteurs qui conditionnent l'action du gel. Les températures maximales dépassent rarement 20 °C et les minimales ont sans exception des valeurs inférieures à 0° C. Les moyennes annuelles, quoique très variables, fluctuent le plus souvent entre 4 et 8 °C (Pourrut, 1994).

Dans les cordillères volcaniques, **la répartition des sols** est fortement dépendante des différents paramètres du milieu physique (voir carte n° 4), notamment :

- de la présence d'un épais manteau de pyroclastites aux dépens desquelles se développent les andosols,
- de la pluviométrie élevée qui favorise une altération poussée des matériaux d'origine, et permet le développement d'andosols riches en allophanes¹⁰ (Colmet-Daage, 1967 et 1969 ; Quantin, 1992 ; Duchaufour, 1995)
- et de l'altitude qui guide la répartition de différents types de sols sur les versants, un étagement des sols apparaissant depuis les hautes terres froides jusqu'au pied des versants où règnent d'autres conditions climatiques.

La coupe de la figure n° 8 permet d'apprécier l'organisation des andosols sur les hautes terres et les versants internes des Sierra. Cette coupe, de direction NW-SE, traverse la dépression centrale dans le bassin de Quito depuis le volcan Mojanda qui est situé sur la cordillère occidentale jusqu'au volcan Cayambe dans la cordillère orientale. Des hautes terres vers les versants internes, on distingue :

- au-dessus de 4500 m d'altitude, les rankers d'érosion (Orthents)¹¹ qui, dans l'exemple choisi, ne se

¹⁰ Dans les montagnes humides, les verres volcaniques s'altèrent en donnant un minéral, l'allophane. Celle-ci est un silicate d'alumine comme l'argile mais elle s'en distingue parce que sa structure est amorphe et non pas organisée en feuillets. Elle favorise la formation de microagrégats très fongés qui présentent une densité apparente faible (0,5 - 1).

¹¹ Pour chaque type de sol, on utilise la classification française. En outre, on indique entre paraphèses son équivalent dans la classification américaine des sols (Soil Taxonomy) dont les unités sont désignées à l'aide de racines grecques et latines et qui est la classification utilisée habituellement par nos partenaires équatoriens. Ici, le suffixe "ent" rappelle l'ordre des "Entisols" qui sont des sols peu évolués sans horizon diagnostic (Duchaufour, 1995).

rencontre que sur les versants du volcan Cayambe dont l'altitude est supérieure à celle du volcan Mojanda. Les effets du gel et de processus associés ont provoqué le décapage des dépôts de pyroclastites. Les sols reposent sans transition sur les roches métamorphiques du socle en place ou remaniés. Les sols sont composés d'un mince horizon noir, épais d'une quinzaine de centimètres, discontinu, riche en matière organique et localement d'aspect tourbeux ;

- entre 3800-4000 m et 4500 m d'altitude les rankers andiques d'altitude (Cryaquands) sont caractéristiques du milieu des hautes terres. Ils se sont développés dans les conditions climatiques humides et froides qui règnent dans ce milieu, dans un paysage aux topographies molles hérité des périodes de glaciations quaternaires puis recouvert, sur 0,50 à 1 m d'épaisseur environ, par des couches de pyroclastites peu évoluées. Epais de 20 à 25 cm, ces sols sont de couleur noire, riches en verre et en matière organique peu humifiée, à aspect de tourbe, ils montrent fréquemment un lacis conséquent de racines. Bien que ces sols soient sans structure définie et que la porosité soit très fine, ils sont bien drainants et passent en quelques heures d'un aspect détrempé à un aspect sec ("thixotropie")¹².

Ces sols paraissent stables d'autant plus qu'ils sont bien protégés par une végétation herbacée naturelle très dense, appelée "paramo" (voir carte n° 12 et fig. n° 6). Néanmoins, cette stabilité n'est qu'apparente car elle est menacée par le

¹² Terme utilisé pour désigner la propriété de certains matériaux de passer de l'état solide à l'état liquide. Cette propriété est particulière aux allophanes qui passent de l'un à l'autre état avec une faible variation d'humidité ou un choc.

développement des fronts pionniers en altitude. L'ouverture de chemins, le passage d'engins ou d'animaux, les feux fréquents, qui sont allumés pour se débarrasser des herbes devenues trop ligneuses et favoriser le développement de jeunes repousses plus appétantes pour les bêtes, les fragilisent considérablement.

- entre 3500 et 3800 m d'altitude, les andosols désaturés perhydratés (Hydrudands) présentent un haut degré d'hydratation (Colmet-Daage, 1967, 1969). Ils renferment, sur plus de 1 m d'épaisseur, des taux de matière organique et de débris végétaux non décomposés importants. Le taux de saturation est excessivement bas puisqu'il ne dépasse pas 10 %, avec une moyenne de seulement 5 %, tandis que la capacité d'échange est supérieure à 20 cmol.kg^{-1} ¹³. L'acidité reste modérée : 5.5 en moyenne.

Par rapport aux matériaux volcaniques qui leur ont donné naissance, ces sols, sont pauvres en verres. Ces derniers se sont altérés, par hydrolyse, en allophanes amorphes associés à des acides humiques. Les rayons "X" ont permis de déterminer la présence de minéraux primaires altérés et de quartz fins, d'allophanes alumineuses, de gibbsite et d'halloysite. Le rapport silice/alumine ou Ki est de 1.4 à 1.0 ce qui confirme la présence de gibbsite en quantité importante. La capacité de rétention d'eau est exceptionnelle et dépasse 100 %.

Comme les rankers andiques, ces sols portent une dense couverture herbacée du paramo. A leur limite inférieure,

¹³ Centième de mole par kg, ce qui correspond au milliéquivalent pour 100 g de sol sec qui est l'autre mode d'expression utilisée pour évaluer la capacité d'échange.

apparaît un autre type de végétation naturelle constitué d'arbustes en formation très serrée, le "matorral" (voir carte n° 12 et fig. n° 6).

Le développement en altitude des productions agricoles, en particulier l'extension rapide des pâturages, menace également les sols de cet étage. On observe localement à leurs dépens la présence de larges zones modelées en terrassettes centimétriques (micro-talus de 20 à 40 cm de hauteur).

- entre 3200 et 3500 m d'altitude, les andosols désaturés hydratés (Melanudands) sont riches aussi en allophanes et se distinguent des sols précédents par un degré d'hydratation moindre (moins de 50 % d'eau). Les sols présentent en surface un horizon humifère brun-foncé, de structure fine, peu décomposé, d'une dizaine de centimètres passant progressivement à un horizon B massif, beige clair, de texture limoneuse.

Ils sont légèrement thixotropiques. Ils contiennent de la gibbsite et de l'halloysite en présence d'allophanes et de phyllites résiduelles (Ki compris entre 2.1 et 1.4). La capacité d'échange est forte ($> 50 \text{ cmol.kg}^{-1}$) tandis que la somme des bases est faible, avec un pH s'élevant à 5.5. Ces sols andiques hydratés sont relativement bien pourvus en potasse. Les carences en phosphore sont fréquentes, cet élément entre dans les structures des argiles où il est inaccessible.

Les andosols de cet étage sont fortement anthropisés. La végétation "naturelle", essentiellement formée par le matorral, a beaucoup régressé. Elle est remplacée par le damier de petites parcelles contiguës du "minifundio". Les

cultures principales sont l'orge, la fève et la pomme de terre (voir carte n° 12 et fig. n° 6).

Sur les parcelles où le défrichement ne remonte qu'à quelques années en arrière, les effets de l'érosion, bien que spectaculaires, sont facilement gommées par les opérations culturales. Cette érosion réparable masque cependant le décapage millimétrique qui fait insidieusement disparaître la fertilité stockée dans la matière organique. Néanmoins ailleurs, où les défrichements sont plus anciens et remontent à une trentaine d'années, l'érosion a tracé des ravines sur les versants et provoqué, localement, le déplacement des populations.

- entre 3200 et 3500 m d'altitude également, les andosols vitriques (Vitrudands) qui, comme les sols précédents, sont fortement anthropisés. Ces sols sont moins évolués que les précédents, en raison principalement de leur proximité par rapport à des volcans qui sont restés actifs tardivement et de leur situation dans un environnement climatique plus sec, sous le vent des grands volcans. La coupe de la figure n° 10 permet d'apprécier la présence de ces sols sous le vent du versant oriental du volcan Chimborazo. Par comparaison, sur le versant occidental plus arrosé, se sont développés à la même altitude des andosols hydratés. Ces sols, d'épaisseur moyenne (de l'ordre de 0,50 m), sont de couleur claire, non structurés, pauvres en matière organique et ($< 1\%$ et C/N de l'ordre de 12) et riches en éléments structuraux généralement grossiers : sables, ponces millimétriques, verres et minéraux lourds. Dans les zones aménagées où a disparu la

végétation "naturelle", ces sols sont très sensibles à l'érosion concentrée.

Dans les cordillères volcaniques, les zones les plus fortement anthropisées et affectées par l'érosion se trouvent sur les andosols désaturés hydratés et sur les andosols vitriques, entre 3200 et 3500 m. Deux sites correspondant à ces situations ont été choisis : le site de Mojanda sur andosol hydraté dans le grand bassin de Guyallabamba et le site de Riobamba sur andosol vitrique dans le grand bassin de Pastaza.

Les caractéristiques de ces deux sites sont les suivantes :

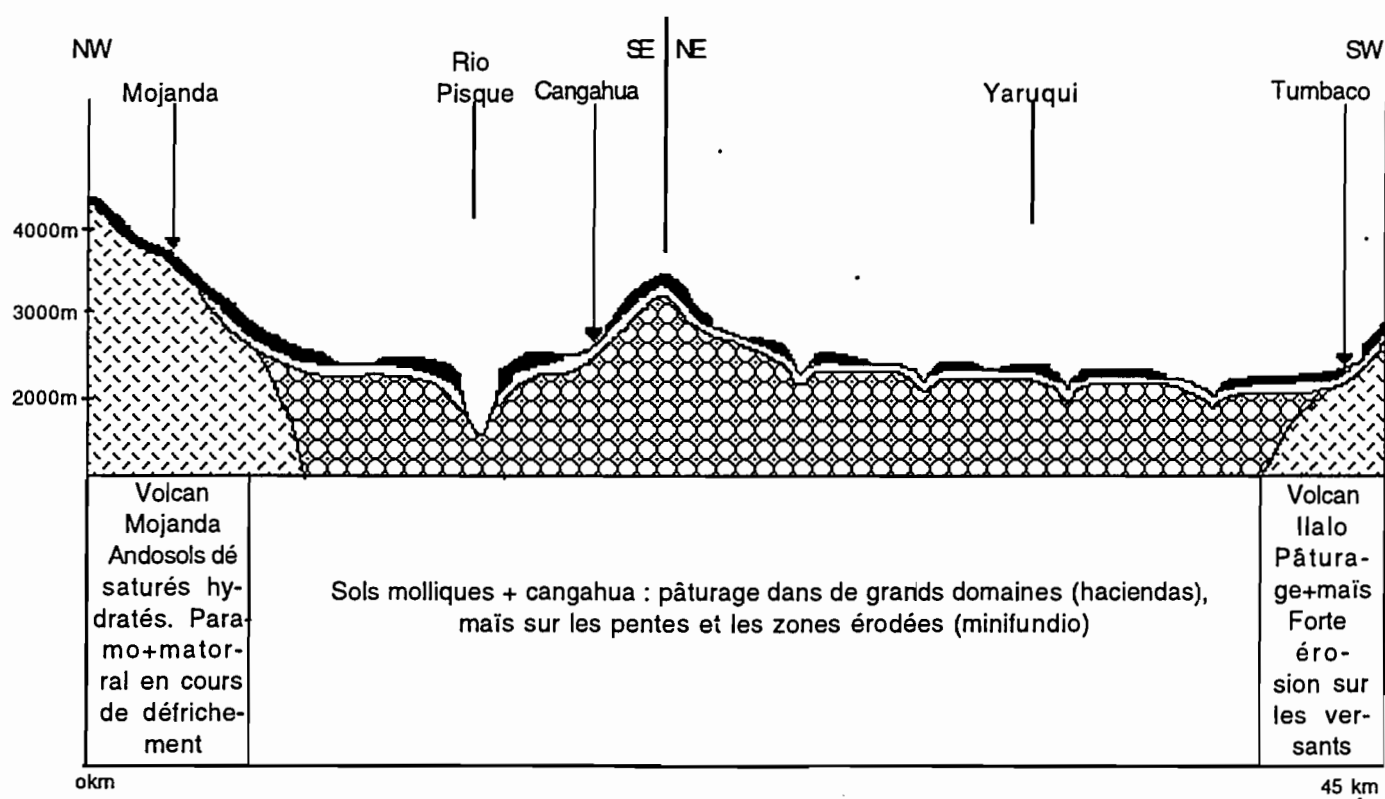
LE SITE DE MOJANDA

Le site de Mojanda est perché sur le versant oriental du volcan Mojanda, à mi-chemin entre le pied du versant et le sommet de cet édifice. Le modelé, qui résulte de la superposition de plusieurs dizaines de mètres de pyroclastites (cendres noires argilo-limoneuses avec quelques intercalations de pierres ponce), est relativement régulier dans son ensemble. La station de mesures a été installée à 3300 m, sur un versant de 40 % de pente (voir coupe de la fig. n° 10).

Les sols, de 0,5 à 0,8 m d'épaisseur, sont des andosols hydratés désaturés (tab. n° 4). Ils sont caractérisés par la superposition d'un horizon organique noir, limono-argileux et

Fig. n° 10

Coupe dans le bassin de Quito où sont situées les stations de :
Tumbaco, Cangahua et Mojanda



-  Edifices volcaniques de Mojanda et Ilalo (andésites, cendres, brèches)
-  Pyroclastites récentes
-  Dépôts de remplissage + cendres + lahars
-  Andosol induré (Cangahua)

d'après G. De Noni, 1996

Tab. n° 4

Résultats analytiques des sols des stations de Mojanda et Riobamba

Mojanda

	%		C/N	%		
	C tot.	N tot.		Hum. tot.	Ac. hum.	Humine
extérieur	3,5	0,3	14,0	—	—	—
P. améliorée	3,2	0,2	13,8	1,8	1,0	1,5
P. témoin cultivé	3,2	0,2	15,3	1,8	1,0	1,5
P. témoin non cultivé	2,9	0,1	22,7	1,6	0,9	1,3

	cmol/kg						%
	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
extérieur	7,0	1,0	0,4	0,1	8,4	16,9	50
P. améliorée	6,3	0,9	0,4	0,1	7,7	19,4	39
P. témoin cultivé	4,6	0,7	0,4	0,1	5,7	15,6	37
P. témoin non cultivé	5,9	0,8	0,3	0,1	7,1	15,0	47

	%	%					Ph eau	Ph KCl
	P2O5	A	Lf	Lg	Sf	Sg		
extérieur	0,20	14,8	23,9	15,7	24,0	13,5	5,8	4,9
P. améliorée	0,20	14,5	26,7	15,7	25,6	12,6	5,6	4,8
P. témoin cultivé	0,20	14,5	28,6	15,6	25,6	12,2	5,4	4,7
P. témoin non cultivé	0,20	14,0	26,5	14,9	26,8	13,4	5,6	4,8

Riobamba

	%		C/N	%		
	C tot.	N tot.		Hum. tot.	Ac. hum.	Humine
extérieur	1,6	0,1	13,8	0,8	0,3	0,8
P. améliorée	1,7	0,1	13,5	0,8	0,3	0,8
P. témoin cultivé	1,5	0,1	13,8	0,8	0,4	0,7
P. témoin non cultivé	1,4	0,1	12,4	0,6	0,3	0,7

	cmol/kg						%
	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
extérieur	4,2	0,8	0,2	0,1	5,2	8,0	65
P. améliorée	4,9	1,0	0,3	0,1	6,2	8,6	72
P. témoin cultivé	6,0	0,7	0,1	0,1	7,0	10,4	68
P. témoin non cultivé	4,8	1,0	0,1	0,1	6,0	8,4	72

	%	%					Ph eau	Ph KCl
	P2O5	A	Lf	Lg	Sf	Sg		
extérieur	0,09	1,9	16,7	17,7	41,0	20,7	6,5	5,5
P. améliorée	0,09	2,1	16,1	18,4	40,3	20,9	6,6	5,6
P. témoin cultivé	0,09	3,9	18,3	17,1	39,2	20,1	6,6	5,6
P. témoin non cultivé	0,09	2,1	16,0	17,4	41,8	21,0	6,4	5,5

friable, de structure fine surtout visible sur les 2 premiers cm après déshydratation et d'un horizon plus clair, gris sombre à l'état sec et plus argileux. Ces 2 horizons sont poreux et remarquablement prospectés par les racines, ils provoquent une réaction au fluorure de sodium (NaF) qui traduit la présence d'allophanes¹⁴. On passe progressivement, au-delà de 0,5 - 0,6 m, à une cendre grise renfermant quelques éléments de ponce millimétrique peu altérés. Ces sols sont faiblement acides et quasi saturés, avec une capacité d'échange proche de 20 cmol.kg. Le calcium et parfois le magnésium sont dominants, le potassium est présent, la carence en phosphore est manifeste, celui qui existe se trouve sous une forme inassimilable (voir tab. n° 4).

A cause de sa position à 3300 m d'altitude, le climat de la station de Mojanda est relativement froid. Les températures moyennes annuelles sont inférieure à 12°C et des maximums ne dépassant guère 20°C. Les gelées sont fréquentes pendant les 2 saisons sèches (juin à août et décembre à janvier) et chaque fois que le ciel reste dégagé plus d'une semaine. Les hauteurs moyennes de pluies augmentent globalement avec l'altitude, à la station elles atteignent 900 mm par an. Les chutes de grêles sont assez fréquentes.

La région de Mojanda est située en plein minifundio récent. Au cours des trois décennies passées, le paysage s'est fortement modifié passant du paysage ouvert lié aux grandes haciendas, au minifundio bocager. Actuellement, l'utilisation, de plus en plus courante du tracteur, tend à faire disparaître les

¹⁴ Test mis au point en Nouvelle-Zélande par Fieldes et Perrot (1960). Au contact de cette solution, l'agrégat de sol vire au rose s'il contient de l'allophane.

aménagements précédents qui, bien que n'étant pas prévus à l'origine pour la lutte anti-érosive, permettaient de dissiper une grande partie de l'énergie du ruissellement. Dans ce milieu, les paysans cultivent l'orge, la pomme de terre et la fève associés à un pâturage extensif.

En raison de l'allongement des cycles culturels dus au froid et à l'absence d'une véritable saison sèche dans l'année, le calendrier cultural est d'une grande souplesse et il n'est pas rare de voir, à la même époque, des champs d'orge à tous les stades de maturité. Ceci explique que les parcelles et les sols puissent rester nus à n'importe quel moment ce qui augmente d'autant les risques d'érosion.

LE SITE DE RIOBAMBA

Le site de Riobamba est localisé sous le vent du grand volcan Chimborazo (6310 m), précisément sur le tiers inférieur du versant méridional de cet édifice, à 3250 m d'altitude (voir coupe de la fig. n° 9). Le versant présente un profil rectiligne et régulier, de pente forte, qui atteint à la station 35%.

Le versant porte, sur 1 mètre d'épaisseur environ, des pyroclastites sablo-ponceuses auxquelles succède en profondeur un matériau plus hétérogène, composé de gros blocs pris dans une matrice fine, d'origine vraisemblablement morainique semble-t-il. Sur ces formations, s'est développé un andosol vitrique. Celui-ci se caractérise par une faible différenciation des horizons ; au sommet existe un horizon

gris, épais de 0,15 à 0,20 m, faiblement humifère, à peine structuré, riche en restes végétaux mal décomposés et non incorporés à la matière minérale. En dessous, existe un horizon un peu plus sombre, pauvre en matière organique, d'une quarantaine de centimètres d'épaisseur. La réaction au fluorure de sodium est faible et tardive ce qui traduit une faible quantité d'allophane. La texture est à dominante de limons et de sables fins, à caractère battant (voir tab n° 4).

Sur ce versant, les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 700 mm, sans mois suffisamment sec pour avoir une incidence sur les cultures. Les plus fortes précipitations se situent en octobre puis en mars avril, la saison humide se caractérisant par la présence de longues périodes de brouillards et de crachins. Les températures moyennes annuelles sont légèrement supérieures à 10°C sans que les maximums dépassent 20°C. Comme à Mojanda, le risque de gelée, qui peut intervenir à n'importe quel moment de l'année, est fort, particulièrement entre juin et août et de décembre à janvier ce qui coïncide avec les 2 saisons sèches. Le versant aménagé par le minifundio porte des cultures de pomme de terre, d'orge et de fève, avec localement quelques parcelles d'oignons. Les calendriers cultureux ne suivent pas de règle précise et sont très contraignants pour les sols : la jachère n'est pas pratiquée et les cultures se succèdent dans le temps sans véritable période de repos pour le sol.

Sur le site du versant et à proximité de la station, les parcelles cultivées montrent de nombreuses griffes d'érosion d'échelle centimétrique ainsi que des atterrissements sableux

décimétriques au bas des parcelles. Localement en bordure de champs, existent des haies ou des obstacles qui ont favorisé la formation de petites accumulations sableuses d'échelle centimétrique et décimétrique.

La dépression pyroclastique

La dépression est comprise entre 2500 et 3000 m d'altitude. Elle forme un long couloir logé entre les deux cordillères dont la largeur maximale n'excède pas 40 km, . Elle est constituée par une enfilade de bassins d'effondrement (Sauer, 1965), d'orientation méridienne. Dans les grands bassins hydrographiques de Guayllabamba et de Pastaza, les principales dépressions - Tulcan, Ibarra, Quito, Latacunga et Riobamba (carte n° 2) - ont été le lieu d'accumulations d'importants dépôts pyroclastiques qui se sont mis en place à partir du tertiaire, à l'époque du soulèvement des Andes et des premières grandes éruptions volcaniques.

Comparée aux cordillères, la dépression est globalement plus accessible et moins accidentée. Néanmoins dans le détail, en raison de l'existence de modelés d'accumulation et de formes de dissection, sa topographie est irrégulière. Ainsi, les pentes

supérieures à 25 % sont très largement dominantes. Les fonds plats (pentes $<12\%$), très localisés, se trouvent principalement au nord de la Sierra dans les bassins de Quito et de Latacunga (voir carte n° 14).

Du fait de sa position sous les vents dominants en provenance soit de l'Atlantique soit du Pacifique, la dépression est bien moins arrosée que les cordillères. Le total annuel de pluie est de 500 à 800 mm. Il peut être, cependant, plus faible encore (< 500 mm) et la sécheresse est renforcée dans les zones les plus basses telle la vallée de Chota aux marges nord du bassin de Ibarra, ainsi que dans les zones affectés par les effets du foehn. Ainsi sur le site de Quito, l'écran constitué par le volcan Pichincha divise la ville en deux secteurs distincts : au sud, elle reçoit environ 1200 mm de pluie par an tandis qu'au nord, à une vingtaine de kilomètres seulement, les totaux de pluie sont réduits de moitié. Les précipitations peuvent dépasser ces valeurs et atteindre localement 1500 mm par an dans les grandes vallées ouvertes aux entrées d'air océanique, comme par exemple la petite région de Baños située à la bordure orientale du bassin de Latacunga, près de la ville de Ambato.

Bien que les totaux de pluie soient globalement assez faibles, le climat de la dépression est rythmé par deux saisons des pluies et deux saisons sèches. La première saison humide, la plus marquée, intervient de février à mai, elle est alimentée par une humidité en provenance de l'océan océanique ; la seconde, plus courte, se place en fin d'année, de septembre à novembre, elle résulte de l'existence de masses d'air issues du

bassin amazonien. Elle est surnommée "veranillo del niño", petit été de Noël.

Comme pour les cordillères, les intensités de pluie, et notamment l'IM 30, suivent les variations des hauteurs pluviométriques. Dans la dépression, les valeurs de l'IM 30 sont globalement inférieures à 40 mm/h (voir carte n° 15).

Les sols de la dépression volcanique sont bien entendu des andosols qui, par rapport à ceux des cordillères, sont moins riches en allophanes et se caractérisent par une moindre altération des pyroclastites. On ne possède pas de données précises sur la quantité d'allophanes présentes dans ces sols. Les évaluations qualitatives, obtenues directement sur le terrain grâce à l'utilisation du fluorure de sodium (NaF), montrent que les réactions de la solution à la présence d'allophanes sont beaucoup plus lentes et la tonalité de rose moins soutenue que sur les andosols des cordillères.

La coupe de la figure n° 8 montre l'organisation des sols dans la partie de la dépression comprise entre les volcans de Mojanda et de Cayambe. Elle laisse voir les fonds de bassin aux topographies quasi planes qui correspondent globalement à la surface des derniers niveaux de remplissage. Les pentes sont comprises entre 0 et 12 %. Les fonds sont occupés par de grandes propriétés d'élevage ("haciendas"), la région de Cayambe est réputée en Equateur pour sa production laitière associée à la fabrication de fromages et de yaourts. Les secteurs situés au contact entre les fonds de bassins et les versants internes, offrent des pentes plus fortes (12-25 %) et

des paysages de glacis-terrasses et de cônes de déjections. Un élevage, relativement prospère, se développe dans le cadre d'exploitations moyennes ("fincas", de 20 à 50 ha), plus petites que les haciendas. Quand les pentes augmentent pour atteindre et dépasser 25%, on passe au domaine des versants internes portant de petites exploitations de type "minifundio" (voir cartes n° 12 et 14, fig. n° 6).

En fonction de la texture originelle des pyroclastites, existent dans les fonds de bassins :

- des sols molliques (Hapludolls et Argiudolls) de couleur brun sombre, avec un complexe saturé. Ils sont bien pourvus en matière organique structurée et disposent d'une bonne quantité d'argiles 2/1 dans l'horizon B (présence de montmorillonites) et quelques halloysites. Ils sont moyennement profonds, de l'ordre de 0,80 m et sont développés sur de faibles pentes (0-12 %). Ils se sont formés sur une couche de cendre noire, sablo-limoneuse, de 1 à 2 mètres d'épaisseur dans laquelle s'intercalent de petits lits plus sableux.

Ces sols portent essentiellement des pâturages et ne montrent pas de signe évident d'érosion ;

- des andosols vitriques (Vitrudands) identiques à ceux observés sur les cordillères. Ce sont également des sols peu évolués en raison de la jeunesse des pyroclastites aux dépens desquelles ils se sont formés. C'est le cas tant dans les grands bassins de Guayllabamba que dans

celui de Pastaza au pied des volcans Imbabura, Cotacachi, Cotopaxi, Chimborazo ou Tungurahua (carte n° 3).

Ces sols sont développés sur des pyroclastites de 2 à 3 m d'épaisseur, avec alternance de couches de ponces très blanches. Ils sont de couleur claire, non structurés, et riches en éléments structuraux généralement grossiers : sables, ponces millimétriques, verres et minéraux lourds. Ils sont moins épais que les sols molliques et ne dépassent guère 0,50 m. Les teneurs en matière organique sont faibles (< à 1% et C/N de l'ordre de 12) mais la capacité d'échange est élevée (50 à 100 cmol.kg⁻¹). On admet habituellement que les andosols jeunes et peu évolués comme les andosols vitriques ont un complexe saturé (Duchaufour, 1995).

Hors du domaine des haciendas où les prairies bénéficient d'une irrigation permanente, ces sols sont insuffisamment protégés par une végétation rare, fragile et à faible vitesse de croissance. Ils sont particulièrement sensibles à la surexploitation voire au pâturage par les caprins qui favorisent le déclenchement du ruissellement concentré.

Dans la zone de contact entre les fonds de bassins et les versants internes, les pentes portent des sols molliques et des sols vitriques, néanmoins apparaissent des spécificités. Il s'agit, principalement, du remaniement des profils des sols qui montrent des horizons tronqués, l'horizon B très argileux des sols molliques est parfois fortement aminci, voire totalement absent. Sur les versants les plus dégradés, existent aussi des andosols à horizons indurés (Durudands, Durustands), sols peu

évolués et peu profonds qui témoignent d'une érosion active. En fait, ces sols résultent du décapage des sols molliques et des andosols vitriques et montrent un mince horizon meuble de surface, de 0,20 à 0,30 m d'épaisseur, sablo-limoneux, reposant sur des horizons indurés. Ce type de sol, riche en verre et particulièrement pauvre en matière organique, est appelé "cangahua" (Custode, De Noni et al., 1992). Nous avons déjà fait référence à cette induration au long de la présentation qui précède. La présence d'horizons indurés pose un certain nombre de questions qui seront abordées à la fin de ce chapitre.

La présence de la cangahua sur les versants est un bon indicateur physique de l'érosion que connaissent les zones aménagées de la Sierra. C'est également un indicateur socio-économique qui traduit les problèmes rencontrés par le paysannat pour subsister. En effet, en raison de la stérilité en l'état de la cangahua, on assiste dans les régions où cette formation affleure à un abandon progressif des activités agricoles et à l'exode des ruraux (De Noni et al. 1983, 1986 et 1994).

En raison de l'importance de la cangahua dans la dynamique érosive des versants volcaniques aménagés de la dépression, deux sites, où elle existe, ont été retenus. Les deux sites sont situés dans le grands bassins de Guayllabamba : l'un à Tumbaco

et l'autre à Cangahua^{1.5}. Ils présentent les caractéristiques suivantes :

LE SITE DE TUMBACO

Le site de Tumbaco se situe à une trentaine de km à l'est de Quito, au lieu dit "La Tola". Son altitude est de 2600 m et la pente moyenne de 20%. La coupe de la fig. n° 10 montre sa situation précise au pied du versant sud du volcan Ilalo. Dans cette région, les formations du fond de la dépression portent des pyroclastites récentes elles-mêmes situées au-dessus de la cangahua. Lorsque les pyroclastites sont érodées, la cangahua affleure. Le sol et la cangahua font effervescence à l'acide d'où une capacité d'échange de ce sol supérieure à 20 cmol.kg⁻¹ et la mise en évidence du calcium comme élément échangeable dominant. Le pH est neutre ou légèrement alcalin (voir tab. n° 5).

→ CaCO₃

Le sol est un andosol mollique tronqué où l'horizon argileux a disparu. Il présente une texture meuble sablo-limoneuse, de 0,30 à 0,40 m d'épaisseur, reposant sur la cangahua. Comme la plupart des andosols molliques, ce sol a perdu son horizon argileux en raison de la forte susceptibilité de ce matériau au

^{1.5} On aurait pu trouver aussi une situation de cangahua dans le bassin versant de Pastaza. La mesure du ruissellement et de l'érosion sur les stations nécessite un suivi très rigoureux et régulier, or plus un site est éloigné, plus le rythme régulier des visites est difficile à maintenir et plus les risques d'erreurs sont élevés. J'ai donc préféré choisir des sites dans le bassin versant de Guayllabamba qui était plus facilement accessible depuis notre base de Quito que les autres bassins versants)

Tab. n°5

**Résultats analytiques des sols des stations
de Tumbaco et Cangahua**

TUMBACO

	%		C/N	%		
	C tot	N tot		Hum tot	Ac hum	Humine
extérieur	1,5	0,13	12,3	0,54	0,23	0,93
P. améliorée	1,3	0,13	10,7	0,55	0,24	0,81
P. témoin cultivée	0,7	0,08	8,9	0,28	0,12	0,44
P. témoin non cultivée	0,7	0,08	9,4	0,26	0,13	0,41

	Cmol/kg						%
	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
extérieur	12,3	6,4	1,07	tr	19,8	20,4	97
P. améliorée	10,7	8,9	1,10	tr	20,7	19,5	-
P. témoin cultivée	11,5	9,6	1,02	tr	22,1	21,5	-
P. témoin non cultivée	17,0	8,7	1,12	tr	26,8	20,6	-

	‰	%					pHeau	pHKCl
	P2O5	A	Lf	Lg	Sf	Sg		
extérieur	0,14	23,3	22,5	15,3	25,9	6,3	7,1	6,3
P. améliorée	0,14	24,3	21,7	15,2	28,4	6,7	6,5	5,8
P. témoin cultivée	0,11	18,2	28,0	16,3	27,7	5,6	7,3	6,3
P. témoin non cultivée	0,14	17,0	26,9	17,3	28,4	6,0	7,5	6,5

Cangahua

	%		C/N
	C tot	N tot.	
extérieur	1,4	0,13	11,6
P. améliorée	1,6	0,1	11,8
P. témoin non cultivée	1,6	0,13	12,1
P. témoin cultivée	1,7	0,14	11,8

	Cmol/kg						%
	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
extérieur	7,7	5,1	0,74	tr.	13,5	16,0	84,0
P. améliorée	9,4	8,3	0,65	0,1	18,4	31,1	59,4
P. témoin non cultivée	10,2	9,2	0,70	0,1	20,2	34,1	59
P. témoin cultivée	9,7	9,0	0,77	0,1	19,6	17,7	100

	‰	%					pHeau	pHKCl
	P2O5	A	Lf	Lg	Sf	Sg		
extérieur		11,2	17,4	13,1	38,0	15,6	7,4	6,3
P. améliorée	0,2	14,7	15,9	12,7	39,7	15,2	6,4	5,8
P. témoin non cultivée	0,15	12,2	13,8	4,4	37,6	29,6	7,2	6,7
P. témoin cultivée	0,16	13,9	14,6	13,4	40,5	15,8	6,7	6,1

fluage sur la cangahua. L'horizon sablo-limoneux, qui sert de support aux cultures, n'offre guère de résistance au ruissellement concentré. En raison de la faible profondeur à laquelle se trouve la cangahua, les incisions ne dépassent pas la taille des griffures et des rigoles, d'échelle centimétrique. L'évolution tend naturellement vers un décapage généralisé de la cangahua. Ce phénomène est moins visible sur les parcelles cultivées parce que les agriculteurs fragmentent et pulvérisent la cangahua et l'incorpore au sol lorsque ce dernier atteint une épaisseur inférieure à 0,20 m. Hors des parcelles de cultures, par étapes successives de larges surfaces de cangahua, d'échelle hectométrique sont décapées. Bien que l'érosion concentrée soit peu active sur la cangahua, ces secteurs posent un problème important. En raison de leur faible perméabilité et de leur forte induration, le ruissellement diffus, seule dynamique vraiment active, transporte des quantités d'eau importantes qui sont reportées dans les zones plus basses. Ces reports hydriques sont fréquemment à l'origine d'une reprise de l'érosion concentrée, particulièrement néfaste dans les sols arables situés plus à l'aval.

Le climat est rythmé par l'alternance dans l'année de 2 saisons humides et de 2 saisons sèches. Les moyennes des précipitations sont de l'ordre de 700 mm. La saison sèche est accompagnée de vents chauds et secs, de type foehn, qui soufflent de 11 h à 17 h en provoquant une déshydratation accélérée des sols et de la végétation. La température moyenne

annuelle de 17°C traduit une moyenne des minimums de 10°C et une moyenne des maximums de 25°C.

Le site est occupé par des communautés indigènes, organisées en minifundio, qui cultivent essentiellement le maïs sur de toutes petites propriétés au parcellaire éclaté. Sur les zones où affleure la cangahua associée à des placages résiduels de sol, d'échelle décimétrique, quelques essais de plantations d'eucalyptus sont menés pour lutter contre les reports hydriques. Cependant, l'érosion des placages de sol et l'action du ruissellement diffus sur la cangahua continuent à se manifester en raison de la faible protection fournie par l'eucalyptus. Pourtant, on peut noter le développement spontané de la prairie à kikuyu (*Penisetum clandestinum*) sur la cangahua dont le rôle protecteur paraît efficace sur les zones érodées.

LE SITE DE CANGAHUA

Il est localisé face au volcan Mojanda, au pied des premières pentes qui constituent les versants internes de la cordillère orientale. La coupe de la fig. n° 10 montre qu'il se situe un peu au-dessus de la zone de glacis-terrasse évoquée précédemment. La station est située à 2800 m d'altitude sur une pente de l'ordre de 18 %.

Ce site porte bien son nom, car les pyroclastites récentes ont disparu par érosion et la cangahua affleure largement. Ce site est plus dégradé encore que celui de Tumbaco, il n'y a plus guère de dépôt ni de sol sur la cangahua. Malgré cela, les paysans, qui n'ont pas émigré, utilisent certaines techniques pour travailler la cangahua non cultivable dans son état induré. Pour parvenir à cela, il faut défoncer la cangahua, la pulvériser pour la rendre meuble et ajouter un amendement à base de fiente de poulet et de sciure de bois. Le sol du site résulte donc de ces différentes opérations dues à l'action anthropique. Compte tenu du caractère difficile pour mener à bien ces opérations, les paysans cherchent à atteindre une épaisseur minimale pour le labour, de l'ordre 0,2 à 0,3 m. Le matériau obtenu est très fin, riche en sables fins et en limons, il offre un aspect farineux et a un pH proche de 7 (voir tab. n° 5). Il est aussi remarquablement susceptible à l'érosion. Dans les zones non reprises pour la culture, les surfaces de cangahua constituent un réel danger pour les zones situées plus bas en raison, comme à Tumbaco, des reports hydriques qu'elles favorisent.

Le climat présente les mêmes caractéristiques qu'à Tumbaco. Néanmoins, le site de Cangahua est un peu moins arrosé (550 mm par an) en raison de sa position sous le vent de la cordillère orientale. Durant les mois de juin, juillet et août, sous l'action des vents secs et chauds alors que l'insolation est maximale, le sol dispose d'une humidité insuffisante pour permettre les cultures annuelles. Une année sur trois, ce phénomène intervient également en décembre et janvier

lorsque la petite saison sèche se prolonge ou lorsque les pluies précédant cette période ont été réduites.

Un minifundio ancien, constitué de cultures de subsistance où prédomine le maïs associé à la fève et au haricot grimpant, occupe le secteur. La végétation commune est le pâturage à kikuyu, les bois d'eucalyptus et les arbustes à épineux ("Chilca"). Globalement, la végétation protège peu le sol, elle est ouverte par suite de la faible pluviométrie, de l'action du bétail et des besoins humains en bois d'oeuvre et de chauffage.

en latin
SSP.

3.2. Les grands bassins de Santiago et Catamayo et leurs sites expérimentaux

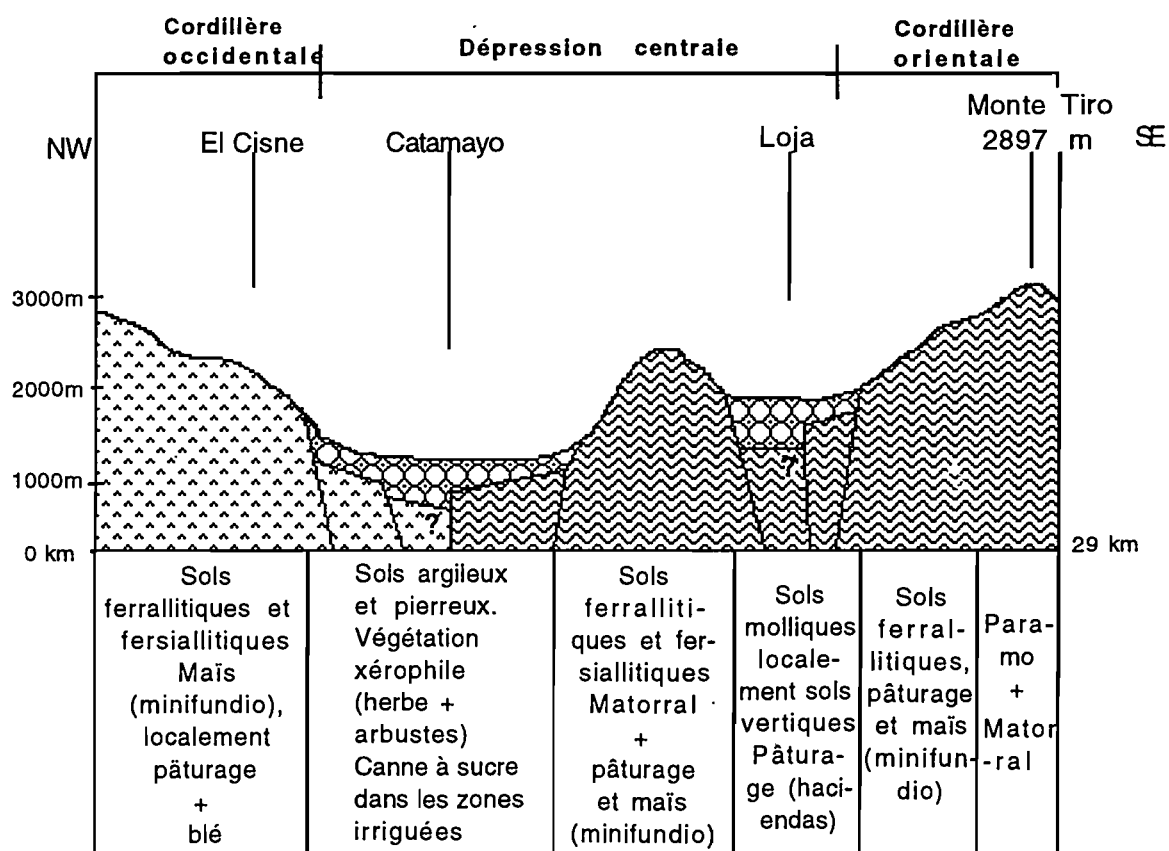
Comme dans le reste de la Sierra, la Sierra méridionale est composée de deux milieux principaux : les cordillères et la dépression. Si les caractéristiques topographiques, climatiques et d'utilisation de l'espace de la Sierra méridionale ne sont suffisamment tranchées dans l'ensemble de la Sierra de l'Equateur pour entraîner des différences significatives, il existe cependant des spécificités dans cette partie de la Sierra en raison de la lithologie, des formations superficielles et des sols .

Les cordillères du socle

Dans les cordillères méridionales, les lignes de crêtes sont moins élevées, les altitudes s'abaissent de quelques centaines de mètres à mesure que l'on se dirige vers l'extrémité sud de la Sierra. Dans la région de Cuenca, les sommets ne dépassent guère 3500-4000 m et atteignent à peine 3000 m dans la région de Loja comme le montre la coupe de la fig. n° 11. Les pentes des versants sont toujours fortes, voisines ou

Fig. n° 11

Coupe de cordillère à cordillère, traversant les bassins de Catamayo et de Loja



Socle métamorphique de la cordillère orientale



Socle volcano-sédimentaire de la cordillère occidentale



Dépôts de remplissage de bassin (argile, sable, conglomérats)

supérieures de 40% (carte n° 14). Les précipitations sont comprises entre 1500 et 2000 mm, elles sont responsables d'une intense altération géochimique des roches du socle. Le socle de la cordillère occidentale est constitué par un complexe de roches volcaniques (crétacé) tandis que celui de la cordillère orientale est formé de roches métamorphiques paléozoïques. Comme dans le reste de la Sierra, les valeurs de l'IM 30 sont estimées entre 40 et 60 mm/h (voir carte n° 15).

Pour illustrer l'organisation des sols dans ces secteurs, nous nous appuyerons sur la coupe de la figure n° 11 qui traverse le bassin de Loja selon une direction NW-SE. Sur les deux cordillères, dont l'altitude est d'environ 3000 m, l'étagement des sols permet de distinguer :

- en zone humide, sur les hautes terres et les versants externes, tant à l'ouest qu'à l'est, le processus de ferrallitisation est général. Ce dernier semble plus poussé sur les roches volcaniques de la cordillère occidentale moins riches en quartz que ne le sont les roches métamorphiques de la cordillère orientale. Sur les pentes les plus fortes (40-70 %), des rankers d'érosion (Orthents) sont associés à des sols ferrallitiques humifères d'altitude (Dystropepts). Dans ce cas, les sols affectés par l'érosion sont peu profonds, de l'ordre de 0,50 m d'épaisseur, ils renferment une fraction grossière (> 2 mm) importante. Sur les versants moins pentus et moins soumis à l'ablation, les altérations sont plus épaisses (de 1 à 3 mètres environ dans les parties supérieures des profils visibles dans les coupes de terrain). Les

altérations drainantes sont rouge vif ou violacé tandis que celles à drainage réduit sont beige claire à tâches. Ces sols sont couverts par des forêts d'altitude qui font place, à mesure que s'accroît l'altitude, au paramo et au matorral. Par rapport aux cordillères volcaniques du nord, le matorral, appelé ici "chaparral", occupe une surface plus importante que le paramo. Les précipitations étant également réparties toute l'année, le chaparral et le paramo sont parcourus par un réseau relativement dense de ruisseaux pérennes. Les sols semblent résistants à l'érosion car la végétation "naturelle", qui leurs confèrent une bonne protection, est peu touchée par l'emprise humaine, à l'exception de quelques rares secteurs où on observe de petites parcelles d'orge, de fève et de pommes de terre.

- en zone plus sèche, sur les versants internes des cordillères (2500-3000 m), mieux abrités des pénétrations d'air océanique que les hautes terres, les pentes les plus fortes portent des sols érodés peu évolués (Orthents). Ces derniers sont associés à des sols ferrallitiques dans les zones où le bilan morphogénèse-pédogénèse est plus favorable à cette dernière. À mesure que baissent l'altitude et les précipitations et qu'apparaît une saison sèche marquée durant l'année, on passe à des sols fersiallitiques. Ils présentent en général une couleur rougeâtre et une texture argileuse à argilo-sableuse selon l'origine du substrat. Sur la coupe de la figure n° 11, ce type de sol existe sur le petit massif, soulevé et faillé, qui domine de part et d'autre les bassins de Loja et de Catamayo.

Les profils sont rarement complets car les sols ont été tronqués par l'érosion, en particulier dans les zones où les défrichements ont remplacé le matorral. La dynamique principale est le ruissellement concentré, son action toujours localisée se traduit par un chevelu plus ou moins dense de griffures et de rigoles d'échelle centimétrique. L'érosion se manifeste principalement dans les secteurs occupés par un damier de petites parcelles organisées en minifundio où les paysans pratiquent l'association pâturage-maïs. L'emprise reste cependant moindre qu'elle n'est dans la Sierra pyroclastique (voir carte n° 12).

La dépression sédimentaire

La dépression montre également un abaissement progressif des altitudes qui passent du nord au sud de 2600-2800 m à 1500 m. Les grands bassins de Cuenca et de Loja ont été remplis, à partir du tertiaire, par des dépôts détritiques très épais (argiles, sables, conglomérats). Localement apparaissent des roches plus résistantes (argilites, grés) qui forment des reliefs monoclinaux. Dans la partie sud, dans les petits bassins et dans les vallées, les dépôts détritiques sont peu épais et lorsqu'ils ont été décapés, apparaissent des altérites d'environ 0,50 m d'épaisseur.

La largeur des bassins entre les cordillères est moindre qu'elle n'est ailleurs, elle ne dépasse pas 10-15 km. Dans l'ensemble, **la topographie** est organisée en deux classes de pente prédominantes : 0-12% dans les fonds de bassins notamment dans les régions de Cuenca et de Loja, principaux bassins de la Sierra méridionale, et 12-25% dans les zones de raccordement (cônes de déjection, glacis-terrasses) situées entre les fonds de bassin et les versants internes.

Les totaux annuels de **précipitations** sont compris dans l'ensemble entre 500 et 800 mm. Néanmoins comme nous l'avons remarqué dans la Sierra du nord et du centre, existent également des différences locales. Dans la vallée de Nabon-Ona et dans le petit bassin de Catamayo, les précipitations sont inférieures à 500 mm de pluie par an ; dans les vallées de Chunchi et de Santa Isabelle, elles sont supérieures à 1200 mm de pluie par an.

Concernant l'organisation **des sols**, la coupe de la figure n° 11 permet de distinguer deux types d'associations :

- d'une part, les sols ferrallitiques et fersiallitiques : les premiers occupent plutôt les parties les plus hautes tandis que les seconds se situent sur les glacis sablo-caillouteux disséqués. Sur les altérites du socle, les sols sont en général peu épais et très exposés à l'érosion (rankers d'érosion, < 0,40 m d'épaisseur) ;

• d'autre part, les sols molliques et les sols vertiques (Argiustolls, Ustropepts) qui occupent les fonds de bassins et sont développés sur les matériaux de remplissage. Dans l'ensemble, les sols sont moyennement épais, de l'ordre de 0,50 m. Les sols vertiques offrent une teneur en argiles gonflantes, essentiellement de la montmorillonite, plus élevée que les sols molliques mais en contrepartie leur fraction organique est plus réduite (1 à 2 %). Dans l'ensemble, ces sols renferment une charge caillouteuse importante. Dans les secteurs où l'érosion a provoqué l'amincissement des horizons, existent des rankers d'érosion (0,20 à 0,40 m d'épaisseur).

C'est sur ce complexe de sols que se localise l'essentiel des activités agricoles (voir carte n° 12 et fig. n° 12). Sur les secteurs les plus plans, en fond de bassin, les haciendas ont profité des sols molliques et vertiques pour développer les pâturages. Ces secteurs ne présentent aucune trace d'érosion marquante.

Par contre, à mesure que la pente s'élève et qu'apparaît une structure agraire de minifundio, avec association pâturage-maïs ou quasi monoculture du maïs, les traces d'érosion des sols s'intensifient. Ce phénomène est relativement marqué aussi bien en bordure des bassins de grande taille comme ceux de Cuenca et Loja que dans les dépressions plus étroites comme celles de Saraguro et Nabon. Le ruissellement diffus relayé par le ruissellement concentré est actif dans les zones de cultures. Le chevelu de rigoles et de ravines, d'échelles centimétrique et décimétrique, est dense également. Dans les zones d'élevage, les mouvements de masse relayés par le ruissellement concentré constituent la dynamique majeure.

Quelle que soit l'utilisation de l'espace, l'évolution des versants conduit à un ravinement généralisé de type bad-lands (fig. n° 4).

En direction du sud de la Sierra méridionale, les manifestations de dégradations s'amplifient, on observe de plus en plus de sols érodés aux dépens des altérites du socle. Les phénomènes d'érosion accélérée concernent à la fois les sols cultivés mal protégés par le maïs et les zones irriguées où la maîtrise de l'eau est insuffisante comme c'est le cas dans le bassin de Catamayo et dans les petites vallées de la région Loja-Macara (coupe de la fig. n° 11).

Par comparaison avec la Sierra du nord et du centre, les zones aménagées de la Sierra méridionale affectées par l'érosion accélérée sont réparties de manière plus lâche. Outre les facteurs du milieu physique qui peuvent expliquer cette différence, il faut rappeler que les plus fortes densités de population se trouvent dans la Sierra volcanique : plus de 50 habitants par km^{-2} en moyenne avec des secteurs compris entre 80 et 150 habitants par km^{-2} , tandis que la Sierra méridionale offre seulement des densités comprises entre 25 et 50 habitants par km^{-2} . (Delaunay, 1990).

Le choix des sites expérimentaux s'est porté sur les versants aménagés de la dépression méridionale, là où l'érosion accélérée est active et plus marquée que sur les cordillères. Deux sites ont ainsi été retenus : Jadan dans le bassin versant

de Santiago et Vega Grande dans le bassin versant de Catamayo. Ils présentent les caractéristiques suivantes :

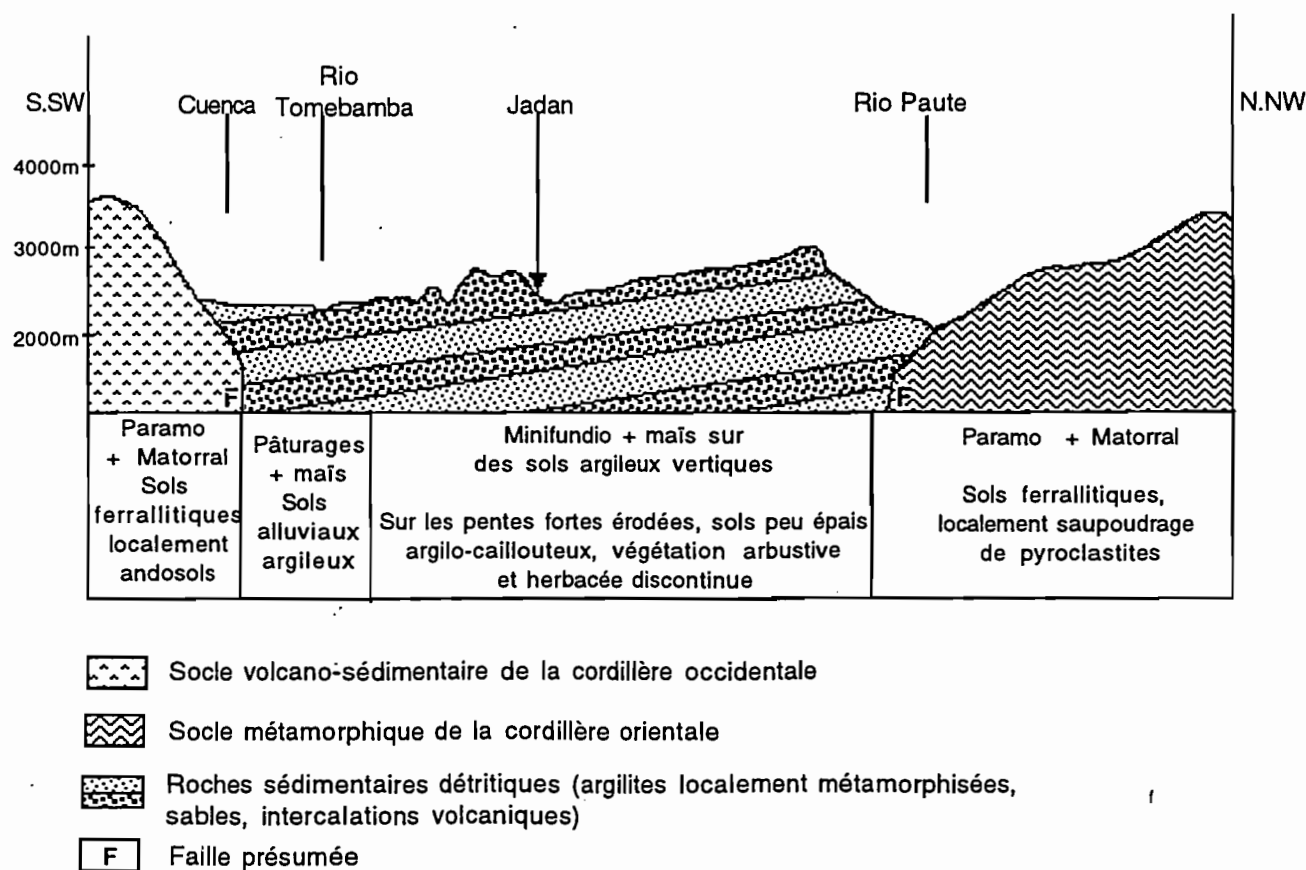
LE SITE DE JADAN

Jadan se situe au NE du bassin de Cuenca, sur la rive gauche de la rivière Paute qui draine le principal sous-bassin du bassin de Santiago. L'état équatorien a installé un énorme barrage hydroélectrique sur le Paute qui constitue la principale source d'électricité du pays. Ce barrage enregistre une sédimentation croissante qui traduit une érosion importante dans la zone d'impluvium où se situe précisément la station de Jadan.

La situation du site est indiquée sur la coupe de la figure n° 12. La coupe traverse le bassin de Cuenca selon une direction NNW-SS. Ce secteur offre les principales caractéristiques qui distinguent la Sierra méridionale du reste de la Sierra : l'existence de sols autres que les andosols en raison de l'absence de pyroclastites récentes, un relief plus modeste caractérisé par une dépression de faible largeur et des cordillères dont l'altitude est toujours inférieure à 4000 m. Sur le site, la station est installée sur le versant occidental d'un relief résiduel culminant à 2900 m et développé dans les dépôts détritiques du bassin (argilites métamorphisées, argiles et sables) qui ont été basculés et offrent un pendage vers le SW.

Fig. n° 12

Coupe du site de la station de Jadan, dans le bassin de Cuenca



La station proprement dite est située à 2700 m d'altitude sur un versant d'argilites, à faciès de schistes peu résistants, la pente générale est de l'ordre de 22 %. Les sols, peu épais dans l'ensemble (de 0,20 à 0,40 m), sont des rankers d'érosion, caractérisés par la présence d'un mince horizon brun sablo-limono-argileux (0-0,10 m) renfermant jusqu'à 30 % d'éléments caillouteux centimétriques, puis lui succède un horizon clair très riche en fragments d'argilites schisteuses mêlées à une terre fine limono-argileuse (voir tab. n° 6). Les altérites, épaisses d'une vingtaine de centimètres, sont présentes à faible profondeur, entre 0,40 et 0,60 m, puis apparaissent les argilites faiblement désagrégées. Les orages violents provoquent un fort ruissellement concentré caractérisé par un chevelu dense de rigoles d'échelle centimétrique. Des ravines d'échelle décimétrique, incisant le sol jusqu'au substrat, existent aussi localement. Une zone totalement ravinée en bad-lands, d'échelle hectométrique, est également présente sur le site.

Le climat est de rythme équatorial et présente deux saisons humides et deux saisons sèches. La pluviométrie, de l'ordre de 700 mm par an, est identique à celle du site de Tumbaco. Le site est occupé par le minifundio organisé en champs de petite taille (moins de 5 ha). La possibilité d'irrigation a favorisé une utilisation diversifiée de l'espace agricole et des productions qui associent :

tab.. n° 6

Résultats analytiques des sols des stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas

Jadan

	%		C/N
	C tot.	N tot.	
extérieur	1,2	0,2	7,3
P. améliorée	0,9	0,2	5,4
P. témoin cultivé	0,7	0,2	4,7
P. témoin non cultivé	0,7	0,2	4,5

	cmol/kg						%
	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
extérieur	20,5	8,5	0,3	tr.	29,3	30,0	98
P. améliorée	14,4	5,6	0,1	tr.	20,1	28,0	72
P. témoin cultivé	10,9	4,8	0,1	tr.	15,8	29,0	54
P. témoin non cultivé	24,2	9,0	0,1	tr.	33,3	21,2	100

	%	%					Ph eau	Ph KCl
	P2O5	A	Lf	Lg	Sf	Sg		
extérieur	0,15	26,8	25,0	2,6	1,0	44,1	7,1	5,8
P. améliorée	0,18	23,3	27,8	3,8	1,3	38,3	7,1	5,9
P. témoin cultivé	0,16	28,2	28,7	3,2	1,4	34,6	7,1	5,6
P. témoin non cultivé	0,12	26,8	31,9	3,6	1,5	34,6	7,1	5,5

Vega Grande

	%		C/N
	C tot.	N tot.	
P. améliorée	2,5	0,2	11,6
P. témoin cultivé	2,5	0,2	9,5

	cmol/kg						%
	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
P. améliorée	29,4	5,3	0,4	0,7	35,1	45,8	76,6
P. témoin cultivé	26,9	6,6	0,2	1,2	33,7	42,2	79,8

	%	%					Ph eau	Ph KCl
	P2O5	A	Lf	Lg	Sf	Sg		
P. améliorée	0,09	31,0	34,1	12,3	12,7	6,8	6,3	5,3
P. témoin cultivé	0,15	23,2	28,3	14,0	15,2	13,6	6,5	5,1

Ventanas

	%		C/N
	C tot.	N tot.	
extérieur	2,8	0,3	9,5
P. améliorée	2,7	0,3	9,5
P. témoin cultivé	2,8	0,3	9,9
P. témoin non cultivé	2,7	0,3	9,7

	cmol/kg						%
	Ca	Mg	K	Na	S	T	V
extérieur	10,5	2,1	0,9	tr.	13,5	26,2	98
P. améliorée	9,8	1,8	0,7	tr.	12,3	23,6	72
P. témoin cultivé	12,0	2,1	0,8	tr.	14,9	25,0	54
P. témoin non cultivé	13,5	2,5	0,9	tr.	16,9	26,6	100

	%	%					Ph eau	Ph KCl
	P2O5	A	Lf	Lg	Sf	Sg		
extérieur	0,45	20,0	50,6	21,0	10,6	10,1	6,1	5,4
P. améliorée	0,43	18,8	48,8	22,5	11,5	11,2	6,1	5,4
P. témoin cultivé	0,67	21,0	50,8	21,8	10,3	9,7	6,2	5,8
P. témoin non cultivé	0,68	21,2	51,9	22,9	10,1	8,7	6,4	5,5

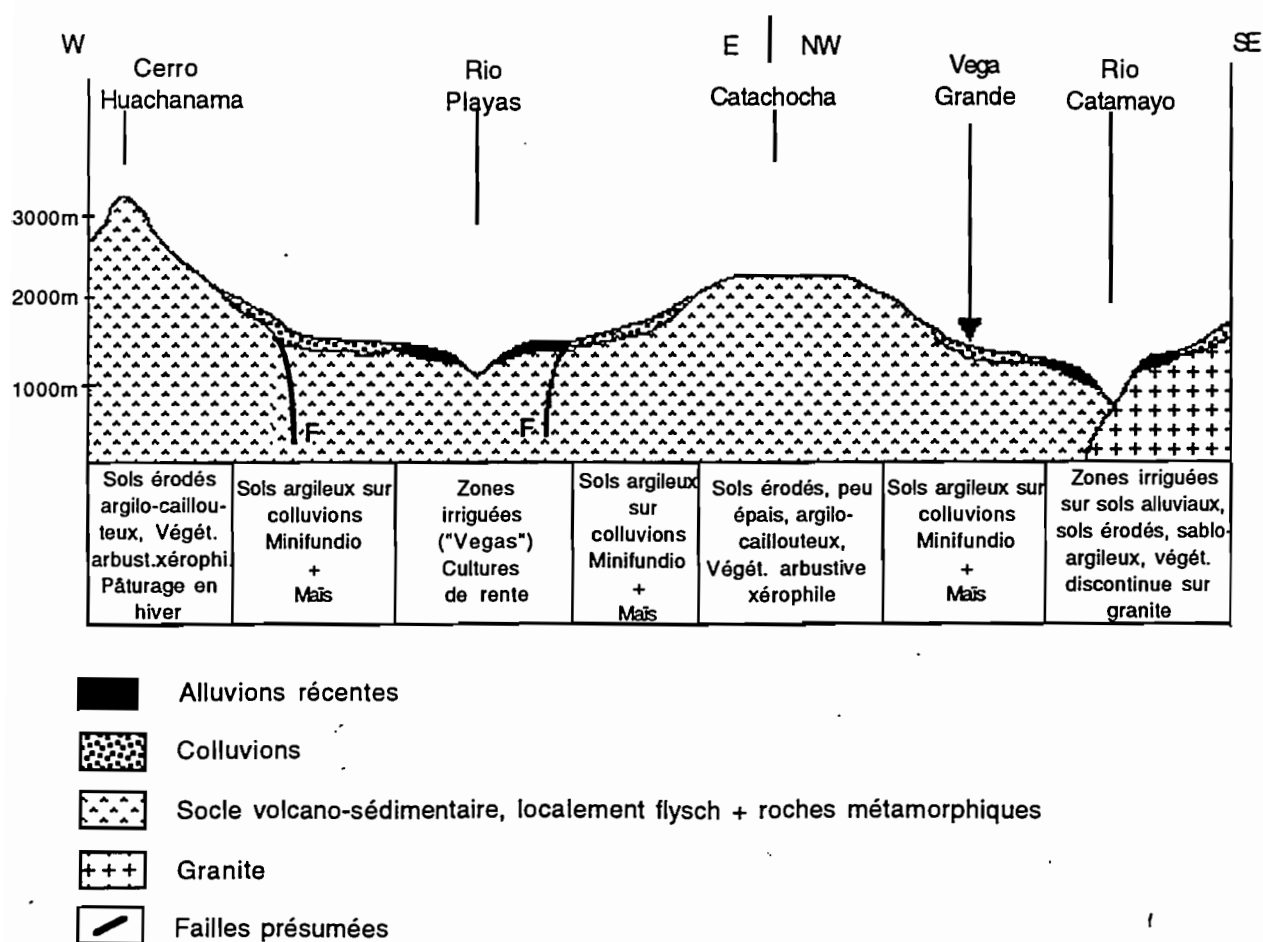
- la canne à sucre et les légumes produits à proximité et en contrebas du site, dans la zone alluviale,
- un élevage extensif, présent sur le sommet du versant souvent associé à des zones érodées où subsistent des lambeaux de végétation,
- et le maïs cultivé sur les versants dans les secteurs où l'épaisseur du sol est encore suffisante.

LE SITE DE VEGA GRANDE

Ce site est situé sur la rive occidentale de la rivière Catamayo, sur un versant de 22% de pente et de faible altitude (1500 m). Il est représentatif de la topographie de cette partie de la Sierra où les altitudes sont les plus basses. La coupe de la figure n° 13, qui traverse la vallée de la rivière Playas puis le petit bassin de Catamayo, illustre cet aspect : les points bas sont inférieurs à 2000 m, voire localement à 1500 m, quant aux points les plus hauts, ils avoisinent 3000 m d'altitude. Le versant s'est formé sur le vieux complexe volcanique qui constitue le socle de la cordillère occidentale. En raison d'une pluviométrie annuelle faible, les altérites sont peu épaisses, de l'ordre de 0,20 à 0,3 m. Sur le site, les altérites sont remaniées et forment des dépôts colluviaux de 0,60 à 0,80 m d'épaisseur. Le sol développé sur ce matériau est un sol vertique, peu épais (0,20 à 0,30 m d'épaisseur) et de texture argileuse. Il présente de nombreux éléments grossiers de toutes tailles, une structure finement grenue, de couleur

Fig. n° 13

**Coupe du site de la station de Vega Grande,
dans le bassin versant de Catamayo**



d'après G. De Noni, 1996

brun rouge, avec des fentes en surface qui se poursuivent dans le profil selon des directions verticales ou obliques.

Le pH est faiblement acide, la capacité d'échange supérieure à 40 cmol.kg^{-1} et le taux de matière organique inférieur à 1% (voir tab. n° 6). Ces sols sont associés dans le paysage à des zones dénudées qui évoluent progressivement en bad-lands.

En raison de son altitude assez basse, le climat du site est chaud (25°C pour les moyennes mensuelles). Les totaux pluviométriques sont de l'ordre de 600 mm en moyenne par an. Les versants du type de celui de Vega Grande sont voués à la culture du maïs et sont occupés par un parcellaire en petits damiers caractéristiques du minifundio. Ici aussi, l'introduction du tracteur fait reculer le bocage, facilitant ainsi l'action du ruissellement concentré qui est la dynamique dominante sur les versants aménagés. Des cultures de rente, la canne à sucre en particulier, se trouvent dans les zones alluviales irriguées (les "Vegas" signalées sur la coupe de la fig. n° 13).

3.3. Le grand bassin de Guayas, un site expérimental de piedmont

A des fins comparatives, un site a été choisi à l'extérieur de la Sierra dans une zone du piedmont côtier, du grand bassin de Guayas et soumise à des conditions typiquement tropicales. Les hydrologues équatoriens ont mesuré dans les sous-bassins de Chanchan et Chimbo, une érosion importante comprise entre 1000 et $3000 \text{ t}^{-1}.\text{km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

Bien que Ventanas se situe à une latitude proche du site de Riobamba, une dénivellation de plus de 3000 m séparent ces deux sites, comme le montre la coupe de la figure n° 9. Ventanas se trouve sur un ancien cône de déjection entaillé par un réseau de vallées à fond plat, sans écoulement en saison sèche et marécageuses en saison humide. Ce cône est modelé en larges collines, de 30 à 40 m de haut). En surface, existent quelques placages fins de cendres, émis certainement par le Chimborazo et épargnés par l'érosion. La station de mesures propement dite est installée à 2200 m d'altitude sur le versant convexe de l'une des collines dont la pente est de 20 %.

Le climat est tropical chaud avec des pluies moyennes annuelles de l'ordre de 1800 mm, bien plus importantes en conséquence que sur toutes les autres stations de la Sierra. Ces pluies débutent fin décembre et atteignent un maximum entre janvier et avril inclus, puis elles décroissent rapidement en mai - juin et sont minimales de juillet à novembre. Les températures moyennes annuelles sont de 25°C avec de faibles différences inter-mensuelles (4°C°).

Les sols sont vertiques et développés à partir des dépôts constitutifs des cônes de déjection. Les matériaux sont très altérés sur une dizaine de mètres et très argileux. Il est impossible d'identifier les matériaux d'origine si ce n'est la présence localement de quelques galets fantômes. De couleur brun-sombre, les sols sont bien pourvus en matière organique, très riches en argiles (50 %) et en limons (20 %) et saturés à 50 %. Les bases échangeables sont : le calcium, 10 cmol.kg⁻

¹ ; le magnésium, 2 cmol/kg et le potassium, près de 1 cmol.kg⁻¹. La réaction est faiblement acide : pH un peu supérieur à 6 (voir tab. n° 6).

Ces sols présentent en surface des fentes de retrait typiques des sols vertiques et montrent jusqu'à 0,10-0,15 m de profondeur des agrégats polyédriques et grumeleux moyens. Puis vient progressivement un horizon brun puis beige de 0,50 m d'épaisseur caractérisé par une structure polyédrique grossière à surstructure en gros prismes et à forte macroposité de saison sèche. Enfin un matériau argileux, de couleur beige à gris brun, laisse entrevoir quelques tâches d'hydromorphie et des billes noires millimétriques.

Le site se trouve dans le domaine de grandes cultures mécanisées (bananes, riz irrigué, soja) soumises aux prix des marchés internationaux. Existe aussi une petite agriculture qui dégage de faibles excédents. Cette dernière, essentiellement de subsistance, est surtout développée sur les versants des collines et produit du maïs et du riz pluvial. Comme dans la Sierra, l'érosion accélérée des sols progresse et fait chuter la fertilité des sols. Le ruissellement concentré est la dynamique dominante. Le chevelu de rigoles est dense en général, il laisse voir des ravines de 0,50 m de profondeur.

Le choix des sites expérimentaux placés dans de grands bassins représentatifs montre que les situations sur andosols se distinguent des autres situations. L'ampleur des dépôts pyroclastiques dans la Sierra est importante par rapport aux autres types de substrat. Les andosols, qui occupent les 2/3 environ de la surface de la Sierra, ont été observés dans toutes les situations climatiques, topographiques et d'altitude qui caractérisent la partie volcanique de cette région : versants externes humides et hautes terres froides des cordillères, versants à climat tempéré et sec de la dépression.

Le comportement des andosols face à l'érosion constitue un autre critère de distinction. Dans les zones aménagées, l'érosion accélérée est généralisée sur les andosols. Selon la localisation, ces derniers sont affectés par l'une ou l'autre des trois dynamiques principales que nous avons reconnues. L'un des traits marquants d'évolution des dynamiques est le décapage sur les versants de larges surfaces indurées de cangahua.

Les andosols, qui passent généralement pour des sols stables et fertiles, demandent donc une double réflexion quant à : i) leur susceptibilité à l'érosion, ii) la présence d'horizons indurés.

3.4. Mise au point sur les andosols

La notion d'andosol est apparue tardivement dans le vocabulaire des pédologues. Pendant longtemps, ces sols ont été regroupés sous le vocable "sols de cendres volcaniques" et décrits sous des noms aussi variés que : sols peu évolués humifères, sols de toundra, sols de prairies, sols bruns forestiers etc. (Quantin, 1982). Le Grand Groupe des andosols a été créé pour la première fois dans la classification américaine des sols, il y a une quarantaine d'années (Thorp et Smith, 1949 ; USDA, 1960-75), à la suite d'une mission de chercheurs américains au Japon (les mots "an do" signifient "sol noir" en japonais). Après la conférence de Tokyo sur les sols de cendres volcaniques (FAO-UNESCO, 1964), les andosols ont été reconnus parmi les 26 unités supérieures de la carte des sols du monde (FAO-UNESCO, 1968). La classification française des sols adopte pour sa part le groupe des andosols en 1967 (CPS). A l'origine, la définition des andosols est appliquée aux caractéristiques des sols noirs volcaniques observés au Japon : développement d'un horizon humifère épais, gris foncé à noir, à partir de matériaux volcaniques pyroclastiques très riches en constituants vitreux, présence de substances amorphes alumino-silicatés (allophanes), densité apparente faible (< 1). Les andosols se caractérisent également par une forte porosité, un bon drainage, une structure stable, des taux élevés de matière organique et une forte capacité de rétention d'eau due aux propriétés hygroscopiques des allophanes. En raison de ces caractéristiques physiques et biologiques favorables, les

andosols sont catalogués comme des sols très fertiles et faiblement susceptibles à l'érosion (Sieffermann, 1969).

Au cours des dernières années, la connaissance des andosols a progressé grâce aux travaux d'équipes basées au Japon (Shoji, 1988, 85 ; Wada, 1977, 1980), en Nouvelle-Zélande (Fieldes, Perrot, 1966 ; Leamy, 1979, 1987), aux îles Hawaï (1960, 1975, 1990) et travaillant sous les tropiques (Colmet-Daage 1970, 1974, Quantin, 1990, 92). Parmi les nouvelles connaissances intéressant notre problématique andine, il est important d'insister sur la remise en cause récente des notions de stabilité et de fertilité des andosols, par le biais : i) du comportement physique des andosols à l'état sec, ii) et de l'extension de l'appellation "andosols" à des sols différents des sols noirs observés au Japon.

Bien que correctement drainé en apparence, l'andosol est pourtant fréquemment gorgé d'eau. L'eau peut occuper jusqu'à 80% du volume d'un andosol en climat humide (Colmet-Daage, Quantin, 1992). Au toucher, le sol est onctueux et n'adhère pas aux doigts, donnant l'apparence d'une texture limoneuse. L'agrégat de sol résiste sous la pression des doigts jusqu'à une certaine limite puis donne brusquement l'impression d'éclater en libérant de l'eau qui forme avec le sol une masse fluide non collante. Sans cette pression artificielle, la structure est très stable et l'excès d'eau retenue constitue un important réservoir hydrique pour les plantes. En général, les andosols "humides" ne sont guère sensibles à l'érosion et favorisent le développement d'une végétation "naturelle" abondante.

En revanche lorsque l'andosol est cultivé, son humidité diminue et son comportement physique se modifie radicalement. A l'état sec, il perd sa consistance et devient facilement friable et pulvérulent en raison d'un processus de déshydratation irréversible. Colmet-Daage (1970), Quantin (1992), Albrecht (1992) ont observé ce processus sur des andosols des Antilles, du Nicaragua, d'Equateur et des Nouvelles-Hébrides. Au laboratoire, des essais menés pendant plusieurs mois par Colmet-Daage pour réhumecter un échantillon d'andosol séché à l'air n'ont pas abouti. Pour celui-ci, la présence de fortes quantités d'eau dans l'andosol permet le maintien d'une structure distendue qui s'effondre lorsque survient une dessiccation poussée à l'air. Pour Quantin (1992), le retournement et l'ameublissement par le labour d'une tranche de sol, de 0,20 à 0,30 m d'épaisseur, est suffisant pour provoquer la dessiccation du sol et sa déshydratation irréversible. La texture se comporte alors comme un pseudo-sable très sensible à l'érosion. D'autres travaux montrent que ce processus peut agir négativement sur la fertilité chimique du sol. Par exemple, Sherman (1967) a remarqué une diminution sensible de la valeur de la capacité d'échange mesurée sur andosol séché à l'air par rapport à celle mesurée sur andosol humide, de l'ordre de 30 à 90%.

Globalement, ces observations vont dans le même sens que celles que nous avons réalisées dans la Sierra. Les andosols des versants et des hautes terres des cordillères, situés sous végétation naturelles, ne sont visiblement pas affectés par l'érosion. Lorsqu'ils sont cultivés, l'érosion est plus lâche que sur les andosols aménagés de la dépression. En raison de leur

position "au vent" et de la présence d'une humidité bien répartie toute l'année, leur capacité de rétention d'eau est élevée et leur résistance à la déshydratation forte. Dans la dépression, en climat plus sec, les sols (andosols vitriques, molliques et certains andosols hydratés) ont une capacité de rétention d'eau moindre et sont très affectés par l'érosion.

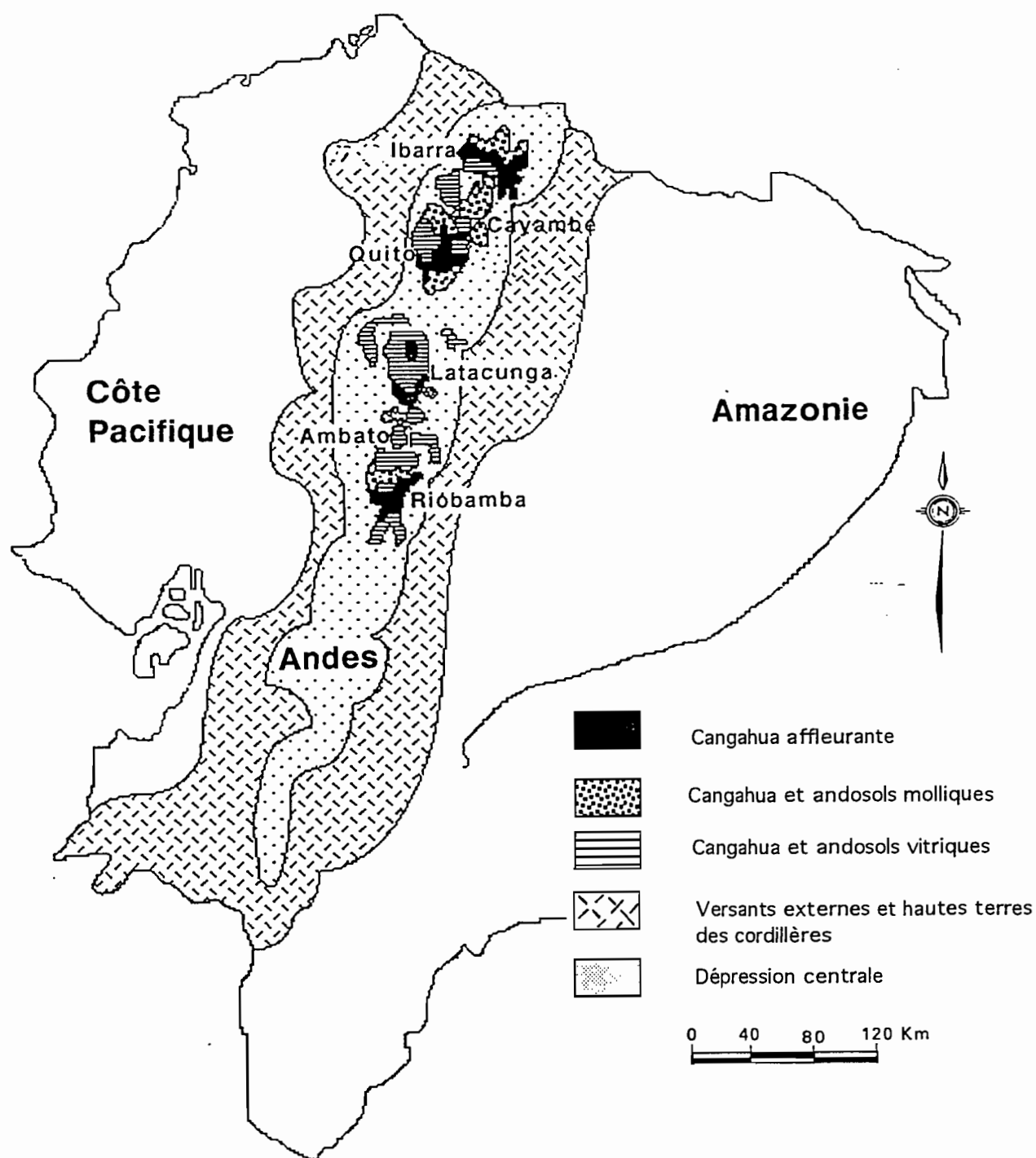
La cangahua

Les recherches récentes ont contribué à élargir considérablement la notion d'andosol. Depuis 5 ans environ, sont apparues notamment des recherches concernant les sols volcaniques à horizons indurés. Ils ont été reconnus au Pérou (Nimlos, Zamora, 1992), en Colombie (Faivre, Gaviria, 1994), au Nicaragua (Prat, Quantin, 1992), au Mexique (Quantin et al., 1992), en Equateur (De Noni et al. 1992, Zebrowski, 1992) et au Japon (Yamada et al., 1994). Selon les pays, ils bénéficient d'appellations locales variées : "sillar" au Pérou, "cancagua" en Colombie, "talpetate" au Nicaragua, "tepetate" au Mexique, "cangahua" en Equateur, "masa, kora ou nigatsuchi" au Japon. Dans la plupart des cas, ces sols sont formés d'un horizon de surface meuble et peu épais (0,20 à 0,30 m), reposant sur des horizons durs et compacts dont l'origine n'est pas clairement précisée pour l'instant. L'érosion anthropique fait affleurer ces horizons, laissant à nues de vastes surfaces stériles. Le décapage généralisé de ces sols constitue une contrainte sérieuse au développement agricole car les régions affectées par ce phénomène sont en général peuplées. Des travaux ont été

entrepris dans les différents pays pour tenter de réhabiliter ces sols pour l'agriculture. Dans tous les cas, les aménagements sont nécessaires pour contrôler les reports hydriques qui sont très importants en raison de l'imperméabilité de ces sols et de leur susceptibilité élevée au ruissellement diffus.

En Equateur, la cangahua, qui est l'une des composantes principales des sols dégradés de la Sierra pyroclastique, s'inscrit bien dans ce schéma. Son extension est estimée à 3000 km² environ ; elle occupe donc environ 20% des zones situées entre 2200 et 3000 m d'altitude. Cet étage est caractérisé par un climat subaride (400 à 600 mm de pluie/an). La cangahua disparaît en altitude lorsque le climat devient plus humide (> 3000-3200 m) et que débute le domaine des andosols hydratés. Elle affleure sur tous types de topographies et existe localement sur les fonds de bassins qui ont été délaissés par les hacienda (carte n°16). Son épaisseur est importante, plusieurs dizaines de mètres en moyenne, localement les bancs indurés alternent avec des pyroclastites sablo-ponceuses qui laissent voir les vestiges de paléosols (De Noni, Derruau, 1979).

La proportion de hornblendes est importante parmi les minéraux lourds, le taux d'éléments fins (argiles et limons) est en général supérieur à 50% ce qui peut laisser supposer que cet horizon dérive, dans la plupart des cas, d'un matériau



Extension de la cangahua dans la Sierra pyroclastique

pyroclastique fin et homogène, de nature andésitique ou dacitique.

Tableau n° 7: Texture et minéraux lourds de la cangahua en %

Lieux de prélèvem.	Argiles +limons	Sables	Hiperstène	Augite	Hornblende
Otavallo	72	28	27	7	66
Tumbaco	81	19	23	8	69
Cangahua	59,1	40,9	33	11	56

Les valeurs de carbonate de calcium sont également élevées ce qui pose le problème de l'existence de cet horizon induré (Colmet-Daage, 1967-69 ; De Noni et al., 1994). L'origine du durcissement est-elle pédologique ou géologique ? Pour les "talpetates" du Nicaragua (Prat, 1992) et les "tepetates" du Mexique (Quantin, 1992 ; Zebrowski, 1992), les travaux actuels privilégient la thèse géologique, les matériaux volcaniques (tufs, cinérites ou pyroclastites ?) s'étant durcis au moment de leur dépôt. Au Japon, Yamada et al. (1994) admettent que la dessiccation à l'air des sols de type "nigatsuchi" serait à l'origine de l'induration des horizons tandis que les sols de type "kora" se seraient cimentés par un processus de consolidation à chaud des cendres volcaniques. En Equateur, la question reste entière. La thèse géologique est certainement probable sans pour autant exclure le rôle de la pédogenèse en raison des quantités importantes de carbonate de calcium dont

le lessivage est favorisé par le climat à saisons contrastées de la dépression. Néanmoins sans exclure totalement l'origine géologique du durcissement, on peut penser que l'origine de la cangahua est fortement conditionnée par le facteur climatique dans la mesure où cette formation est placée dans un contexte géographique précis. Il n'existe pas pour l'instant d'interprétation plus poussée. A la suite de nos travaux, un programme de recherche s'est mis en place il y a quelques mois en Equateur pour préciser l'origine de cette formation.

Dans son état et sans aménagement, la cangahua est stérile et impropre à l'agriculture. Les contraintes physiques sont importantes en raison de la compacité et de la dureté permanente (densités apparentes, respectivement de 1.7 g/cm³ et de 1.45 g/cm³). La dureté, qui augmente avec la présence de calcaire, est maximale à l'état sec : les valeurs de résistance à la pénétration sont élevées, de l'ordre 100 et 200 kg/cm² (Zebrowski, 1992). La porosité totale (25-30 %) et la capacité de rétention d'eau (<20-30 %) sont faibles et limitent la vitesse de la conductivité hydraulique qui est lente, de 5 à 15 mm/h au champ (De Noni et al., 1994).

Les propriétés chimiques de la cangahua sont également peu favorables à la croissance des plantes. En effet, cet horizon est fortement carencé en matière organique, < 0.3 %, en azote, < 0.04 pour 1000, et en phosphore total et assimilable, <3 ppm (De Noni et al., 1994). En revanche, la capacité d'échange cationique est en général élevée, de 15 à

25 mé/100g, ainsi que les teneurs en base échangeables : calcium (9.5 - 14 mé/100g), magnésium (4.5 - 11 mé/100g) et potassium (0.8-1.9 mé/100g). Les pH varient de neutre à légèrement basique, l'alcalinité augmentant avec la teneur en calcaire (Custode, De Noni et al. 1992).

La réhabilitation agricole de la cangahua est possible à condition de la rendre meuble et de l'amender pour compenser les déficiences chimiques. En Equateur, hormis quelques travaux mécanisés subventionnés par l'état, la méthode manuelle au pic et à la pioche est la plus employée. La surface de cangahua est d'abord défoncée puis les blocs résultant de cette opération sont pulvérisés progressivement (De Noni et al., 1992). Le matériau obtenu est très fin et sensible à l'érosion, un aménagement anti-érosif de la parcelle réhabilitée est donc à prévoir impérativement dans toutes entreprises de réhabilitation de la cangahua. Au Mexique, où les recherches sont plus avancées dans le domaine de la réhabilitation agricole du tepetate, les enquêtes agro-économiques montrent que le tepetate réhabilité constitue une ressource en terre agricole nécessaire pour les petites exploitations inférieures à 10 ha/famille et importante pour celles comprises entre 10 et 20 ha/famille (Quantin, 1992 Zebrowski, 1992). La productivité du maïs est faible la première année (< 1 t/ha). Il faut attendre la 4ème ou la 5ème année pour atteindre des rendements corrects équivalents à ceux obtenus sur un "vrai" sol (3 à 4 t/ha). A partir de la 6ème année, le coût du travail consenti par le paysan pour réhabiliter sa parcelle est amorti. Ces recherches soulignent

également que le succès de telles opérations dépend de l'aide de l'état aux petits paysans en raison du coût élevé des opérations de réhabilitation (travaux de défonçage essentiellement mécanisés au Mexique et recours à une fertilisation accrue en phosphore).

CHAPITRE DEUX

***APPROCHE EXPERIMENTALE
DES FACTEURS DE L'ÉROSION ACCELEREE
SOUS PLUIES NATURELLES ET SIMULEES***

Dans ce chapitre sont étudiés les facteurs explicatifs de l'érosion accélérée sur des stations de mesures installées sur les sites de chacun des 5 grands bassins représentatifs. Les mesures ont été effectuées sur des parcelles de ruissellement et à l'aide de simulations de pluies. L'objectif est appliqué et vise à suivre le déclenchement et le fonctionnement des processus en fonction des modes de cultures, des calendriers culturels et du choix des végétaux afin de pouvoir envisager une lutte anti-érosive efficace qui est la demande principale des responsables de l'agriculture équatorienne.

1. INTERET DES STATIONS DE MESURES : PARCELLES DE RUISSELLEMENT ET SIMULATIONS DE PLUIES

Notre objectif étant d'abord appliqué, nous n'avons pas cherché à multiplier les mesures de matériel transporté en nous situant à l'échelle de bassins versants situés dans les grands bassins mais nous avons préféré étudier le comportement des sols sous l'impact de différents types d'aménagements à l'échelle de la parcelle paysanne. Naturellement, les mesures réalisées sont de bons révélateurs du fonctionnement des bassins versants mais ce n'était le but initial.

Pour pouvoir atteindre cet objectif à l'échelle de la parcelle paysanne, nous avons réalisé des mesures de l'érosion en nous appuyant :

- sur un réseau de 26 parcelles de ruissellement de surface comprises entre 100 et 1000 m²,
- et sur l'utilisation d'un simulateur de pluie de conception ORSTOM (Asseline, Valentin, 1978), qui arrose une micro-parcelle de 1 m².

A. Hent

La parcelle de ruissellement est une portion de terrain limitée artificiellement sur le terrain où il est possible de suivre l'action de l'érosion accélérée sur le sol cultivé et de relier cette dernière aux principaux facteurs physiques et agronomiques. Notre choix pour les parcelles de ruissellement paraît rejoindre les travaux américains. Notre objectif est en fait très différent. Rappelons que les chercheurs américains ont largement utilisé les parcelles de ruissellement pour répondre à la grave crise érosive qui a affecté les Etats-Unis dans les années 1930-1940. A partir de plusieurs milliers de données provenant de 45 stations de recherche des Etats-Unis, Wischmeier et Smith ¹⁹⁵⁸ (1978, 81) ont mis au point par des traitements statistiques une équation de prévision ^{de l'érosion} ~~de l'érosion~~.

Cette équation fait intervenir 5 facteurs : R, l'érosivité des climats ; K, l'érodibilité des sols ; SL, la longueur et l'inclinaison de la pente ; C, les techniques culturales et P, les pratiques anti-érosives. Cette équation permet donc de distinguer de manière commode l'effet de chacun des facteurs : par exemple, une influence majeure est attribuée à l'énergie de

la pluie qui donne de bonnes relations avec l'érosion en nappe, pour le moins telle qu'elle intervient aux Etats-Unis. Néanmoins, si cette équation permet de distinguer les différents facteurs intervenant dans le déclenchement de l'érosion, elle ne tient pas compte de *des multiples interactions* de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion, ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente (Roose, 1994). Globalement, cette équation est adaptée à l'étude de l'érosion en nappe alors que nous souhaitons, dans notre cas, appréhender les effets de l'érosion concentrée. *Sur fortes pentes 20-40%.*

Notre approche se situe dans le droit fil d'anciens travaux lancés en Afrique par Fournier (1960), qui soulignait : "... Chaque champ (parcelle expérimentale) est représentatif d'une condition bien définie du milieu naturel : association d'un degré de pente, d'une nature de sol et d'un état de surface soit naturel soit créé par l'homme. Ces mesures associées à celles de la pluviosité et du ruissellement pendant le même temps, expriment la grandeur de l'érosion créée par ces deux facteurs dans un milieu naturel donné..... on conçoit immédiatement tout l'intérêt que revêtent des données chiffrées tirées de cette investigation scientifique : elles doivent permettre de serrer de très près le problème posé".

Concernant la dynamique, mes travaux retrouvent aussi les recherches récentes menées sur l'érosion concentrée par Roose (1981, 1994), Lal (1976, 1982) et Poesen, 1987 et 1989-90). Ces derniers montrent que l'érosion croît avec l'inclinaison de

la pente, en général de façon exponentielle, selon une dynamique bien établie. Le ruissellement déplace en chaque point du versant une masse d'eau qui libère une énergie susceptible de détruire les états de surface préexistants et d'inciser le sol. Par ordre d'importance, cette énergie est proportionnelle :

- en premier lieu, au carré de la vitesse (énergie = $1/2 MV^2$), elle-même dépendante de l'inclinaison de la pente. Hjulström (1935) montre dans ses travaux que l'on passe de l'érosion à nappe au ruissellement concentré lorsque la vitesse de l'eau sur le versant dépasse 0,25 m par seconde, quelle que soit l'inclinaison de la pente, *As-tu mesuré les vitesses de l'eau ?*

- et à la masse d'eau de la lame ruisselée. Il est quasi impossible d'évaluer cette masse car il est très difficile de mesurer sur le terrain la hauteur de la lame d'eau qui circule sur le versant (Nouvelot, 1992 ; Hudson, 1957). On considère, en général, que les sols situés sur des versants, a fortiori les sols de montagne, infiltrent mieux l'eau que les sols de plaine parce que les fines particules désagrégées par la pluie sont exportées en partie par le ruissellement et participent dans une moindre mesure au colmatage des pores du sol et à leur encroûtement (Lal, 1976 ; Roose, 1973).

ok Notre choix des parcelles est donc clair. Nous n'avons jamais envisagé d'utiliser nos résultats pour quantifier l'érosion de tel ou tel bassin versant mais pour parvenir à évaluer le

x R_i

comportement d'une parcelle et comparer celle-ci aux autres parcelles aménagées. Les mesures obtenues ne sont donc significatives que des parcelles où elles ont été effectuées. En ce sens, nous rejoignons pleinement les mises en garde de Tricart (1965, 1978) concernant les risques liés au transfert d'échelles à partir des seules parcelles de ruissellement.

Pour compléter l'apport des parcelles de ruissellement aux expérimentations, il nous est apparu utile de développer également un volet de simulations de pluies pour préciser le comportement du sol qui est, dans notre thématique, l'indicateur majeur de fragilité du milieu. Sur la parcelle de ruissellement, il est impossible d'isoler le comportement du sol, les résultats associant systématiquement les effets sol-pente-mode de culture-type de plante.

La simulation de pluies a pris un large essor au cours des 15 dernières années, cette approche permet, grâce à un dispositif adapté, de reproduire expérimentalement l'impact des gouttes de pluie sur le sol. Il est ainsi possible d'effectuer une analyse fine des phénomènes de détachabilité ("splash") et d'évaluer le devenir de l'eau à la surface du sol par infiltration et par ruissellement.

Avant la mise au point du simulateur de pluie, la technique la plus utilisée était celle de Pioger (Valentin, 1985). Elle consistait à remplir d'eau un petit cylindre fiché dans le sol et à mesurer la vitesse d'abaissement du niveau de l'eau dans le

sol. Le principal défaut de la méthode était d'ignorer l'impact des gouttes de pluie sur le sol et leur action sur l'évolution des états de surface du sol. En ce sens, la simulation de pluies, en reproduisant expérimentalement des pluies d'intensités proches des pluies naturelles et en assurant le contrôle des paramètres correspondants, (durée et hauteurs des pluies en particulier), représente un réel progrès .

Il existe plusieurs types d'appareils pour simuler les pluies. On peut distinguer deux modèles principaux (Valentin, 1985) :

Roose 1978 C.R. Smith
USA

- l'un utilise des dispositifs producteurs de gouttes. Les appareils les plus simples produisent des gouttes de même taille et il est possible, grâce à l'adjonction d'un ventilateur, de créer des gouttes plus fines et mieux réparties sur la surface du sol. D'autres appareils permettent de produire des gouttes de tailles différentes par l'utilisation d'embouts de diamètres variés, de tubes capillaires ou d'aiguilles hypodermiques. Mais ce type d'appareil fournit des gouttes d'eau dont il est difficile d'évaluer l'énergie cinétique par rapport aux pluies naturelles. En effet dans ce type d'appareil, la hauteur de chute des gouttes est limitée en général à quelques décimètres alors que dans la nature les gouttes nécessitent, en fonction de leur grosseur, une hauteur comprise entre 5 et 10 m pour atteindre leur vitesse limite dans l'air ;

• l'autre, l'emploi de l'eau sous pression et des gicleurs ce qui permet de reproduire une énergie cinétique proche de celle des pluies naturelles. Ce type de dispositif peut arroser des surfaces de grande dimension. Le plus grand simulateur jamais construit est de type Swanson (Roose, 1981 ; Collinet, 1988). Il est pourvu de dix bras tournant autour d'un axe fixe, à 3,50 m au-dessus du sol, et il arrose une surface de 200 m². Chaque bras était composé de 30 gicleurs qui nécessitent de grandes quantités d'eau (de 4 à 25 m³ par heure). La construction d'un appareil plus petit, plus maniable et aussi moins onéreux s'est révélée nécessaire afin de pouvoir exploiter cette technique et multiplier les sites de mesures dans des conditions plus faciles. Ceci a été à l'origine de la création d'un mini simulateur de pluie de type ORSTOM et de l'amélioration des techniques infiltrométriques évoquées antérieurement (Asseline, Valentin, 1978). C'est ce type d'appareil que nous avons utilisé dans la Sierra de l'Equateur (Asseline, De Noni, Viennot et al., 1993).

Noni

Dans le tableau ci-après, ont été récapitulés les apports majeurs des parcelles de ruissellement et de la simulation de pluie :

Tableau n° 8 : Principales caractéristiques des parcelles de ruissellement et des simulations de pluie.

on peut avoir les parcelles rifs → Erosibilité du sol/pente

Type d'expérimentation	Pluie/ durée de l'expérimentation	Surface	Effets testés et facteurs étudiés	Processus étudiés
Parcelles de ruissel.	naturelles au mini. 3 ans de mesures	de 50 à 1000 m ²	Il est impossible d'étudier l'effet d'un seul facteur. Les résultats traduisent les effets cumulés des facteurs : sol + pente + pluie + végétation	Energie du ruissel. Erosion nappe et concentrée
Simul. de pluies	artificielles mesures instantanées	1 m ²	Il est possible d'étudier l'effet d'un seul facteur : par ex., comportement du sol à la pluie simulée ou effet d'un couvert végétal. Par contre, l'effet "pente" ne peut être pris en compte du fait de la petite taille de la parcelle	Energie de la pluie, naissance du ruissel.

- Energie limitée à la balance
- Mais la pente intervient sur la charge sol et

Globalement, ces deux approches sont très intéressantes car elles permettent d'apprécier l'effet des différents facteurs de l'érosion, soit de manière groupée soit de manière individuelle. On constate que les parcelles de ruissellement prennent en compte le facteur pente, très important en montagne, ce qui n'est pas possible avec la simulation de pluie qui est appliquée sur une micro-parcelle où ce facteur n'intervient pas. En revanche, la simulation de pluie permet d'isoler certains facteurs, notamment le sol dont l'effet est essentiel dans la dynamique des phénomènes, or cette prise en compte n'est pas possible avec les parcelles de ruissellement. Par exemple pour une parcelle de ruissellement sur sol nu, qui est le cas le plus simple où interviennent trois facteurs - pente, sol et pluie -, il n'est pas possible à partir des mesures effectuées de dissocier

les effets de chacun de ces facteurs.

$$K = \frac{E}{R \times SL \times 1.24}$$

En définitive, ces deux approches sont très complémentaires dans la mesure où l'on peut apprécier l'action des deux processus majeurs de l'érosion : sur les parcelles de ruissellement, l'énergie du ruissellement qui provoque le décapage du sol en griffes, rigoles et ravines ; sur les micro-parcelles de simulation de pluie, l'énergie des gouttes de pluies qui participe à la fermeture du sol et à la naissance du ruissellement.

2) APPORT DE L'EXPERIMENTATION PAR LES PARCELLES DE RUISELLEMENT

2.1. Dispositif et protocole

Sur chaque site, existe une station de mesure de l'érosion accélérée. Dans notre recherche, la station est installée dans une parcelle paysanne. La participation du propriétaire de la parcelle est souhaitée afin d'être le plus proche possible des comportements du terrain.

Sur chaque site, les stations sont formées de parcelles de ruissellement. Ces dernières sont de forme rectangulaire et délimitées sur le terrain par des planches de bois fichées dans le sol. Des bacs de tôle, munis de partiteurs, sont situés au

pied des parcelles et servent à mesurer le ruissellement et les pertes en terre. Chaque site est pourvu d'un pluviographe afin de pouvoir mesurer la pluie et ses intensités.

Une station est composée de plusieurs types de parcelles : un couple de deux parcelles où sont reproduits les modes de travail du sol et de cultures, et les calendriers culturaux traditionnellement pratiqués ; et selon les stations, une ou deux parcelles, où sont testées des méthodes de lutte anti-érosives. Les premières sont appelées "parcelles témoins" et les secondes "parcelles améliorées". L'objectif est d'évaluer sur chaque type de parcelle les facteurs explicatifs, physiques et agronomiques, de l'érosion puis de comparer les comportements des différentes parcelles afin de pouvoir évaluer l'efficacité des méthodes testées sur les parcelles améliorées.

Les caractéristiques du couple de parcelles témoins sont les suivantes :

- l'une (parcelle témoin cultivée), de 100 m² (20 X 5 m) de surface, est travaillée et gérée selon les pratiques culturelles locales. Les travaux sont réalisés conjointement avec les paysans du site, depuis le semis jusqu'à la récolte ;

- l'autre (parcelle témoin non cultivée), également de 100 m² (20 X 5 m) de surface, est labourée et ratissée et ne porte ni végétation ni culture (témoin non cultivé). L'intérêt de cette seconde parcelle témoin est de pouvoir préciser l'action du sol et de la pente en éliminant les effets dus à la culture et au travail du sol.

Le couple de parcelles témoins est présent sur tous les sites. Le dispositif des stations est complété par des parcelles améliorées. Tout en conservant le type de culture locale et les principales opérations culturales utilisées traditionnellement, des méthodes de lutte anti-érosive ont été introduites sur ces parcelles. Ces dernières concernent essentiellement des améliorations portant sur le travail du sol et la mise en place de petits ouvrages pour dissiper l'énergie du ruissellement. L'installation de ces méthodes a nécessité une surface de parcelle plus grande que celle des parcelles témoins. Après plusieurs essais, nous avons opté finalement pour une surface de 1000 m², soit 50 m x 20 m. Le chapitre trois du présent document étant consacré aux problèmes spécifiques de lutte anti-érosive, nous avons reporté dans ce chapitre la présentation du dispositif de ces parcelles ainsi que les résultats correspondants à tous les sites.

Page
1985
C.R. Division

2.2. Les résultats des parcelles de ruissellement témoins

Les résultats globaux sont exprimés dans plusieurs types de tableaux :

- des tableaux analytiques par station, hors texte, en annexe 1, où figurent, pour chaque type de parcelles, les valeurs moyennes mensuelles de ruissellement et d'érosion¹ ;
- et des tableaux synthétiques dans le texte. Le tableau n° 9 reprend par station et par année les valeurs moyennes annuelles de ruissellement et d'érosion, et le tableau n°10 résume les valeurs moyennes de ruissellement² et les

¹ La pluie est exprimée en millimètres (mm). Pour le ruissellement, on a fait figurer les volumes d'eau ruisselés en litres par hectares (l/ha) et les coefficients de ruissellement notés KR%. L'érosion est exprimé en kilogrammes par hectares (kg/ha) telle qu'elle a été mesurée sur le terrain.

² Dans les tableaux, les coefficients de ruissellement sont notés, KR%. Néanmoins pour pouvoir distinguer dans le texte, on a adopté les écritures suivantes : KRm pour une moyenne mensuelle, KRa pour une moyenne annuelle et KRM pour la moyenne des valeurs annuelles sur toute la période. Lorsqu'on fait référence à la valeur maximale de KRm, ce qui est le cas le plus fréquent, on a écrit : KRm.max.

Donc pour le ruiss. on a adopté KRm. N'oubliez pas que KRa
et KRm.max. 155 et L'ér. en mm plutôt
qu'en litres

Tab. n° 9

Erosion et ruissellement, par années, pour la période 1986-1991

Parcelles témoin cultivé et non cultivé.

*3 chiffres significatifs
pas plus.
t/ha est bien arr. (voir).*

Station de TUMBACO		TEMOIN CULTIVE			TEMOIN NON CULTIVE		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
86-87	688,3	251470	3,7	25019	453834	8,6	69934
87-88	706,5	311964	4,4	43528	1083326	15,3	107090
88-89	627,1	541766	8,6	7246	1866462	29,8	77193
89-90	625,7	391706	6,3	5753	1507601	24,1	94270
90-91	777,4	591680	7,6	15200	1467640	18,9	130939
Moy sur 5 ans	685,0	417717	6,1	19349	1275773	18,6	95885

Station de CANGAHUA		TEMOIN CULTIVE			TEMOIN NON CULTIVE		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
86-87	452,3	73118	1,6	3658	269088	5,9	56154
87-88	435,7	84582	1,9	7303	485533	11,1	88801
88-89	691,5	754	0,0	11	133110	1,9	14431
89-90	488,6	252	0,0	35	94660	1,9	13876
90-91	609,6	166463	2,7	4125	360993	5,9	79162
Moy sur 5 ans	535,5	65034	1,2	3027	268677	5,0	50485

Station de MOJANDA		TEMOIN CULTIVE			TEMOIN NON CULTIVE		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
86-87	668,9	63322	0,9	1185	135881	2,0	5642
87-88	886,2	91596	1,0	1761	743238	8,4	137020
88-89	1265,2	87569	0,7	442	1290206	10,2	115316
89-90	814,6	9603	0,1	87	900380	11,1	166261
90-91	943,6	16089	0,2	574	954162	10,1	233545
Moy sur 5 ans	915,7	53536	0,6	810	804773	8,8	131557

Station de RIOBAMBA		TEMOIN CULTIVE			TEMOIN NON CULTIVE		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
86-87	702,1	60615	0,9	1644	1636365	23,3	66623
87-88	751,0	1165166	15,5	52554	1598444	21,3	179546
88-89	997,1	576185	5,8	8163	934130	9,4	19777
89-90	501,2	234993	4,7	9635	365211	7,3	48502
90-91	560,4	176668	3,2	7179	613606	11,0	122229
Moy sur 5 ans	702,4	442726	6,3	15435	1029592	14,7	87335

Station de JADAN		TEMOIN CULTIVE			TEMOIN NON CULTIVE		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
1989	307,6	130747	0,1	15804	419416	0,3	44547
1990	428,9	416345	10,7	7232	788709	20,5	149740
1991	483,9	84726	1,01	28366	352125	4,7	98681
Moy. 1989-91	406,8	210606	4	17134	520083	8,5	97726

Station de VEGA GRANDE		TEMOIN CULTIVE			TEMOIN NON CULTIVE		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
1989	638,5	21837	0,3	27933	654145	10,2	82696
Moy. 1 an	638,5	21837	0,3	27933	654145	10,2	82696

Station de VENTANAS		TEMOIN CULTIVE			TEMOIN NON CULTIVE		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
89	2249,5	4117654	18,3	18560	2119419	9,4	52074
90	1569,2	637447	4,1	5755	1915815	12,2	58865
91	1439,7	1780536	12,4	26796	2237614	15,5	71535
Moy sur 3 ans	1752,8	2178546	12,4	17037	2090949	11,9	60825

NOTA : La moyenne de la station de Tumbaco a été réajusté à 87173 kg en éliminant un événement de 1986 faussé par l'introduction sur la parcelle "témoin non cultivé" d'eau servant à l'irrigation

résultats d'érosion³ pour toute la période d'expérimentation.

La durée de la période d'expérimentation est variable selon les stations. Les séries de données les plus longues, soit une durée de cinq ans comprise entre 1986 et 1991, correspondent aux quatre stations (Tumbaco, Cangahua, Mojanda Riobamba) qui sont situées dans les bassins versants de Guyallabamba et de Pastaza, sur sols andiques (De Noni, Trujillo et Viennot, 1989-90). Les autres stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas ont été installées plus tardivement et ne couvrent que les années 1989-91 et parfois de façon incomplète. Les résultats obtenus sur ces sites sont sans nul doute moins fiables que les résultats fournis par les quatre autres stations. Outre la période plus courte d'observations, l'éloignement des sites par rapport à notre base de travail de Quito (entre 400 et 800 km) a contribué également à cet état des choses ~~comme nous l'avons déjà souligné~~. Il n'a pas été possible, ~~comme on l'aurait souhaité~~, de contrôler régulièrement les relevés effectués par les équipes locales de terrain et d'intervenir au moment précis où cela aurait été nécessaire. Dans l'analyse des données ci-après, on fera principalement référence aux résultats des stations des bassins versants de Guyallabamba et de Pastaza⁴.

³L'érosion est exprimée en tonnes (t) par hectare (ha) et par an. A la suite d'une pluie érosive, le bac de sédimentation contient un certain volume d'eau ruisselé. Les particules de sol les plus lourdes se sont déposées sur le fond du bac, les plus légères continuent de flotter en suspension dans l'eau. On mesure d'abord le volume d'eau ruisselé en vidant progressivement le bac et on prend une série d'échantillons afin d'évaluer le poids des sédiments en suspension. Une fois le bac vidé, on peut alors peser les sédiments déposés sur le fond.

⁴Néanmoins, grâce aux simulations de pluies dont l'analyse est proposée plus loin dans ce chapitre, on a pu effectuer les mêmes tests sur toutes les stations et obtenir ainsi des données complémentaires sur les stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas ce qui n'avait pas été possible sur les parcelles de ruissellement.

Tableau n° 10 : Valeurs moyennes par station des coefficients de ruissellement (KRM %) et de l'érosion (Er. t.ha⁻¹) pour toute la période d'expérimentation (1986-91)

		Stations/Sols	Témoin cultivé		Témoin non cultivé	
			KRM %	Er. t.ha ⁻¹	KRM %	Er. t.ha ⁻¹
avec dépôts pyroclastiques	BV Guayalla- bamba	Tumbaco/sol mollique	6,1	19,3	18,6	87,2
		Cangahua/andosol induré	1,2	3	5	50,5
		Mojanda/ intergrade sol mollique-ando. hydraté	0,6	0,8	8,8	131,6
	BV Pastaza	Riobamba/ sol vitrique	6,3	15,4	14,7	87,3
sans dépôts pyroclastiques	BV Santiago	Jadan/ranker d'érosion	4	17	8,5	97,7
	BV Catamayo	Vega Grande	0,3	27,9	10,2	82,7
	BV Guayas	Ventanas	12,4	17	11,9	60,8

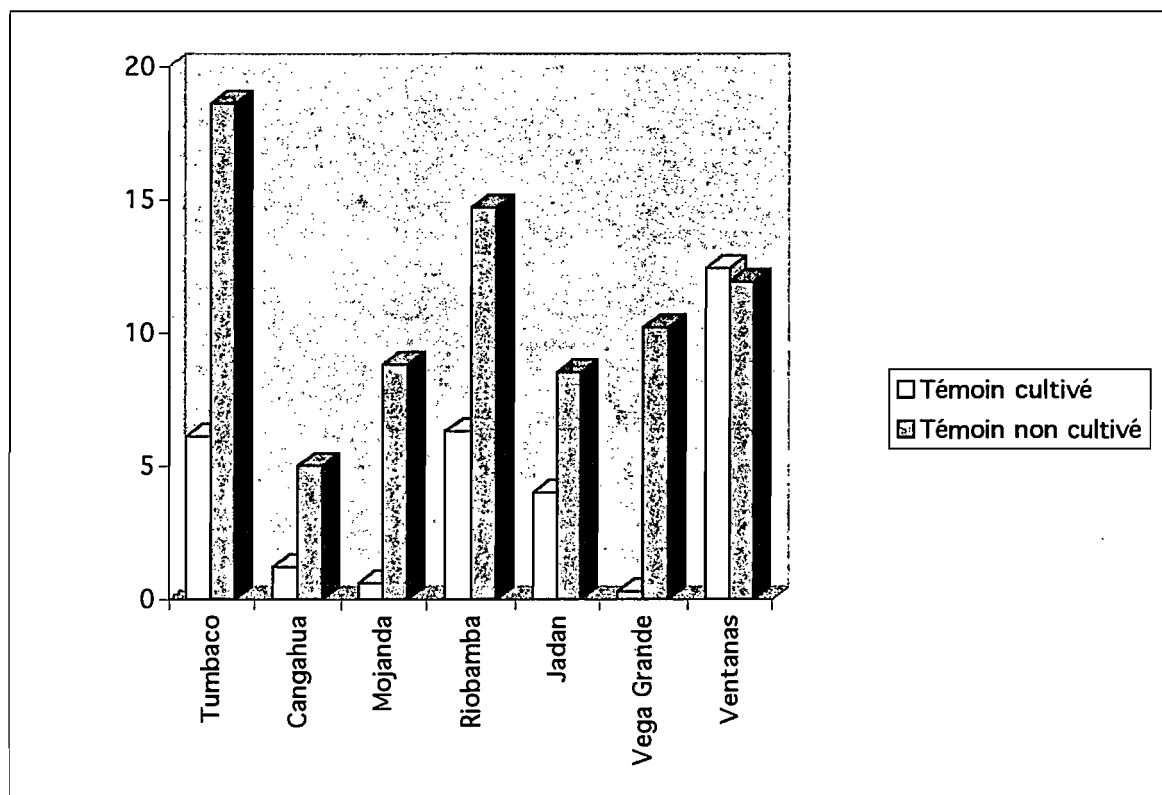
très faibles

faibles

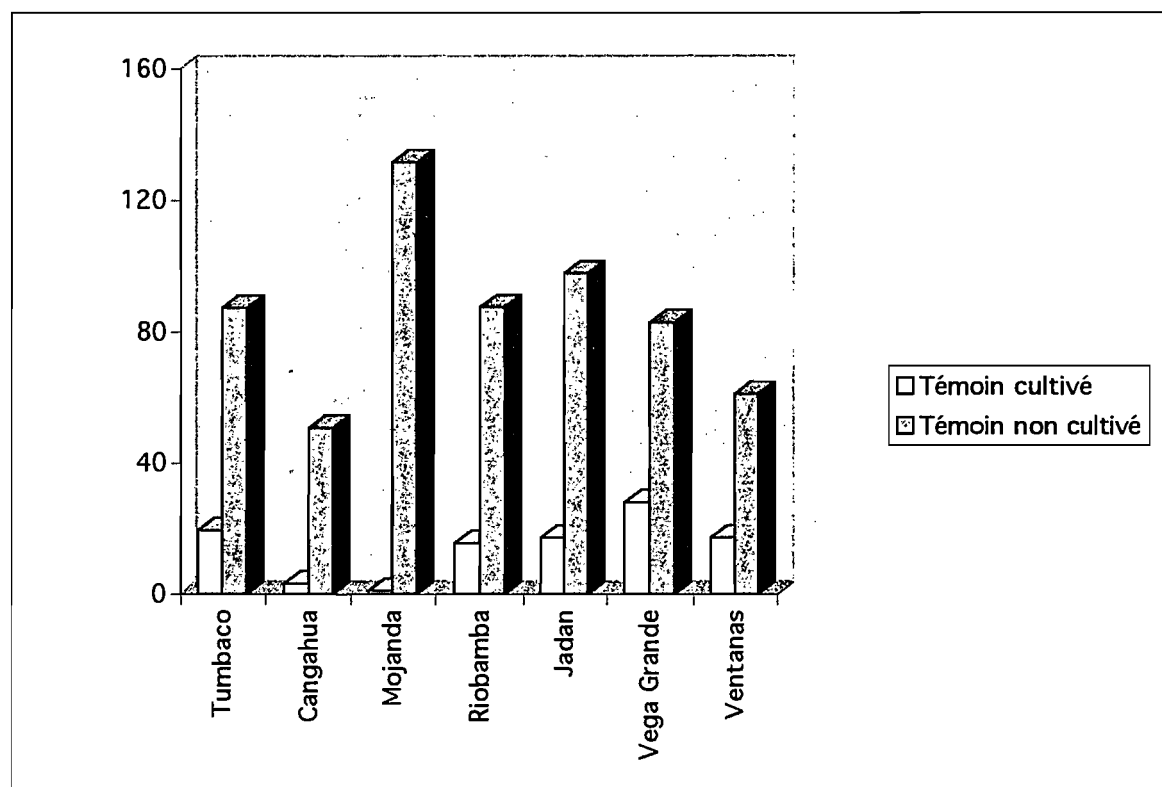
Les valeurs exprimées dans ce tableau ont été représentées graphiquement sous la forme de deux histogrammes : l'un pour les coefficients de ruissellement (KRM %), l'autre pour l'érosion (voir fig. n° 14). Pour toutes les stations, les pertes en eau et en terre sont plus fortes sur les parcelles témoins non cultivées si ce n'est à Ventanas où les valeurs de la parcelle témoin cultivée sont légèrement supérieures à celles de la parcelle témoin non cultivée. Il est intéressant de noter également que le ruissellement n'implique pas toujours de façon directe des pertes en terre de même ampleur. Par exemple, le ruissellement mesuré à Tumbaco, qui est la valeur la plus élevée, ne correspond pas aux pertes en terre les plus fortes ; à l'opposé, l'érosion mesurée à Mojanda, qui est la

Fig. n°14

Coefficients annuels moyens de ruissellement



Pertes en terre annuelles moyennes



Pourquoi refuser le facteur C de Wisch

valeur la plus élevée, ne correspond pas au ruissellement le plus important.

Pour tenter d'expliquer ces variations, nous allons étudier le rôle de chacun des facteurs explicatifs majeurs de l'érosion : la végétation, le sol, la pente et les précipitations.

le facteur végétation

Ce facteur a été étudié sur les parcelles témoins cultivées qui sont les seules à reproduire l'effet du couvert végétal cultivé associé à un type de travail du sol. La lecture des deux histogrammes de la figure n° 14 illustre clairement l'influence de ce facteur. La situation des parcelles témoins cultivées se distingue en effet de celle des parcelles témoins non cultivées par des pertes en eau et en sol moins élevées. Sur ces parcelles, l'érosion ne dépasse pas 30 t/ha et les coefficients de ruissellement sont inférieurs dans l'ensemble à 10 %. Seule se distingue la station de Ventanas avec un coefficient de ruissellement légèrement plus élevé sur la parcelle non cultivée : 11,9 % contre 12,4 % en situation cultivée.

Pour tenter d'évaluer l'importance de l'érosion dans ces conditions, les stations ont été classées en utilisant les

données de la classification mise au point par la F.A.O. afin d'évaluer à l'échelle mondiale la dégradation des sols :

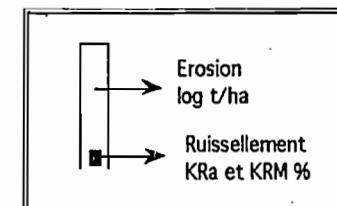
<i>Erosion en t.ha⁻¹</i>	<i>Impact</i>	<i>Stations</i>
< 10	léger	Cangahua, Mojanda
10-50	modéré	Riobamba, Tumbaco,
	à fort	Vega Grande, Ventanas, Jadan

Néanmoins, Il est difficile de porter un jugement à partir d'une telle classification qui repose en partie sur un jugement personnel. A Cangahua, une érosion de 3 t.ha⁻¹ est encore trop importante pour un sol qui est peu épais, à peine une vingtaine de centimètres en moyenne, et qui repose sans transition sur la cangahua indurée et stérile pour l'agriculture. A Ventanas où il pleut 3 à 4 fois plus qu'à Cangahua et où le sol atteint 1 mètre de profondeur, une érosion moyenne de 17 t.ha⁻¹ y est comparativement moins dramatique (Nahal, 1975 ; CTFT, 1979).

Ce qui ressort également à l'examen de ces données, plus peut-être que leurs grandeurs respectives, c'est l'irrégularité des quantités de terre déplacée d'une année sur l'autre quelles que soient les stations. Les d'histogrammes des figures n° 15 et 16, construits à partir des données du tableau n° 9, illustrent cet aspect. Par exemple, la parcelle témoin cultivée de la station de Tumbaco révèle des variations importantes des valeurs d'érosion d'une année sur l'autre : 25 t.ha⁻¹ en 1986-87, 43,5 t.ha⁻¹ en 1987-88, 7,2 et 5,7 t.ha⁻¹ respectivement

Fig. n°15

Erosion log t/ha - Ruissellement moyen annuel KRa et KRM %
86-91



Parcelle témoin cultivée

Parcelle témoin non cultivée

Parcelle témoin cultivée

Parcelle témoin non cultivée

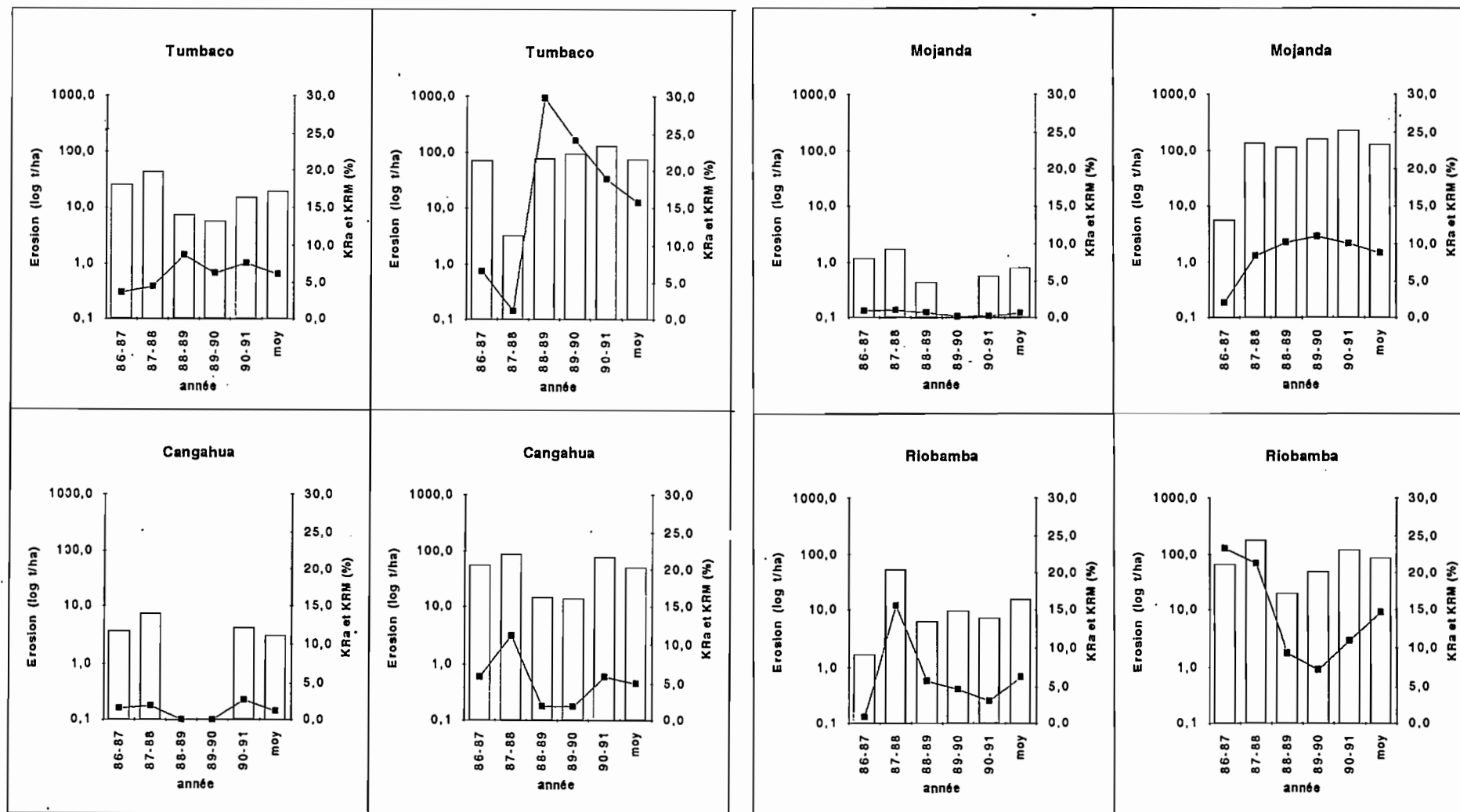
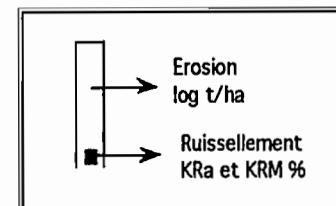
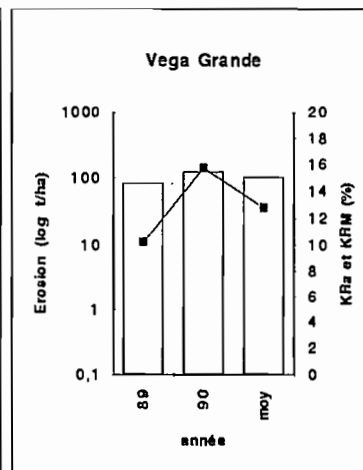
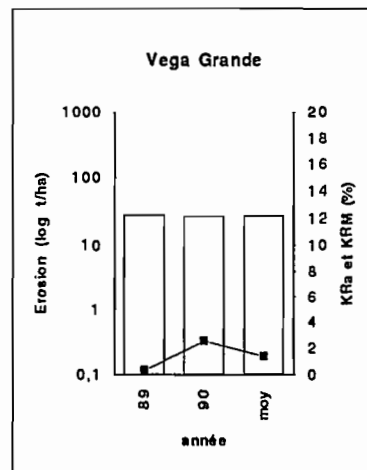


Fig. n°16

Erosion log t/ha - Ruissellement moyen annuel KRa et KRM%

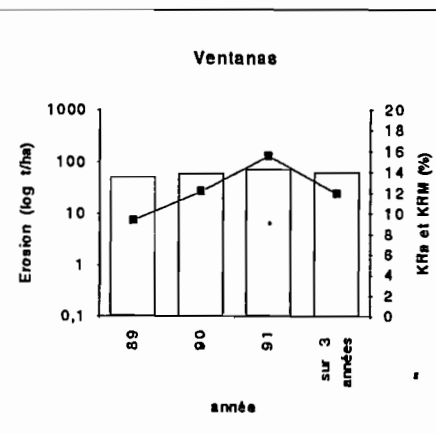
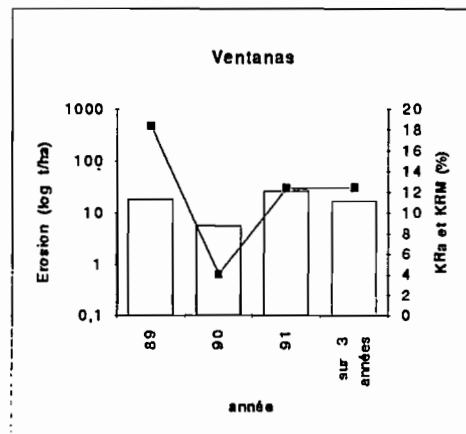
Parcelle témoin cultivée

Parcelle témoin non cultivée



Parcelle témoin cultivée

Parcelle témoin non cultivée



en 1988-89 et en 1989-90, et $15,2 \text{ t.ha}^{-1}$ en 1990-91. Les coefficients de ruissellement indiquent également des variations inter-annuelles notables. D'autres facteurs interviennent qui seront vus plus loin.

Pour illustrer dans le détail l'influence due à la culture et aux pratiques culturales, une analyse des stations de Tumbaco et de Riobamba a été réalisée à l'échelle de la décade. Pour chacune, a été établie une nouvelle série d'histogrammes en utilisant les données contenues dans le tableau n° 9 et dans les tableaux de l'annexe 1. Par station et par année, existent deux types de graphes (fig. n° 17 à fig. n° 22) : un graphe, en tête de page, qui exprime la répartition décadaire et annuelle des pluies et deux autres graphes, un pour la parcelle cultivée et un autre à titre comparatif pour la parcelle non cultivée où sont portées en abscisse les périodes décadaires et sur une double ordonnée, à gauche les volumes d'eau ruisselée ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) et à droite l'érosion en t.ha^{-1} .

A Tumbaco, la parcelle cultivée supporte chaque année un semis de maïs. Les graphes montrent les périodes de l'année où le sol est le plus vulnérable à l'érosion : i) sol mal couvert, en partie nu, de juin à octobre, période allant de la fin de la récolte jusqu'au semis, ii) sol plus ou moins bien couvert, de novembre à février, période de croissance de la plante, iii) sol bien couvert, de mars à mai, période précédant la récolte durant laquelle la plante arrive progressivement à maturité et protège bien le sol. En 1989-90 (fig. n° 19), il n'y a pas de

Fig. n° 17

TUMBACO 1987-88

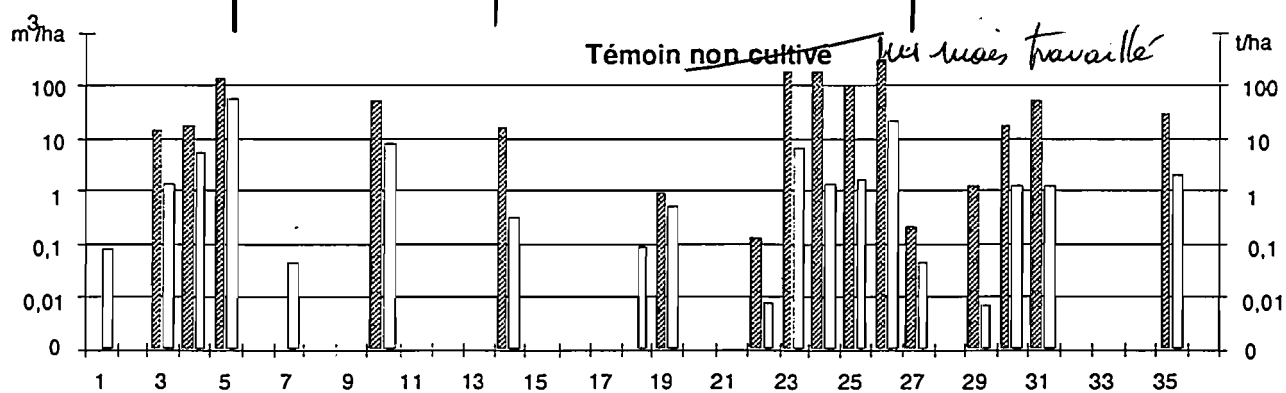
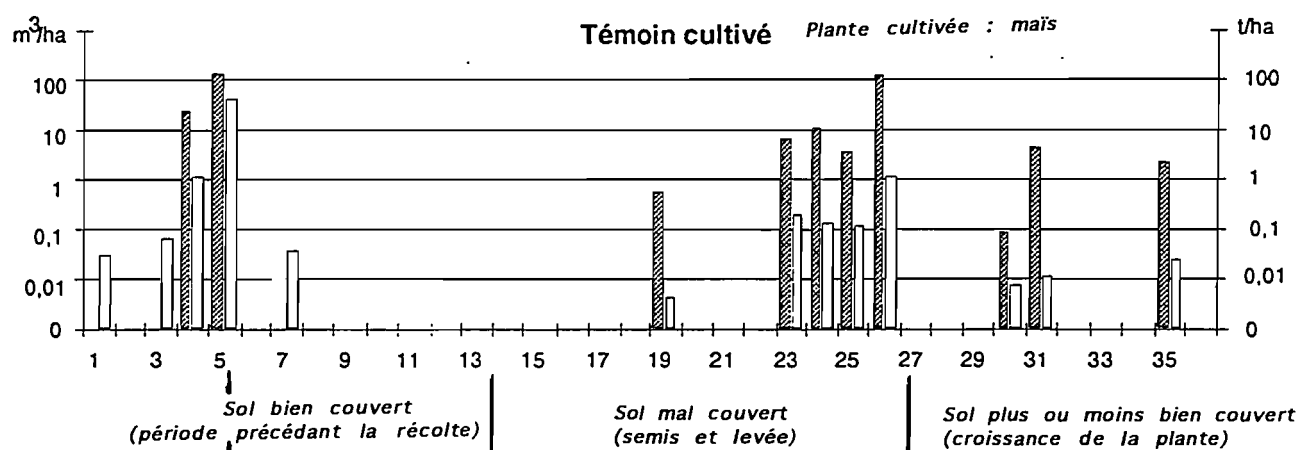
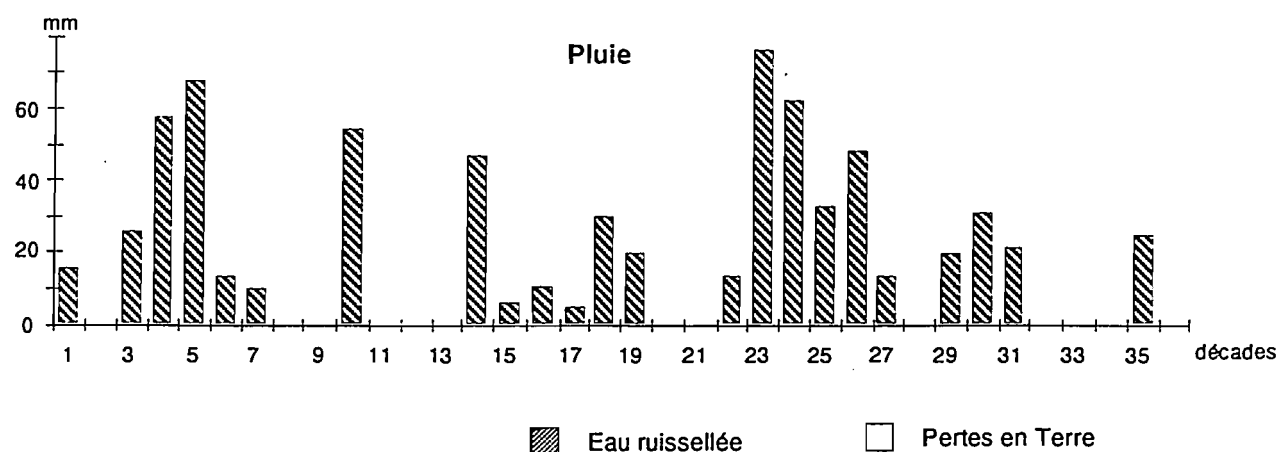


Fig. n°18

TUMBACO 1988-89

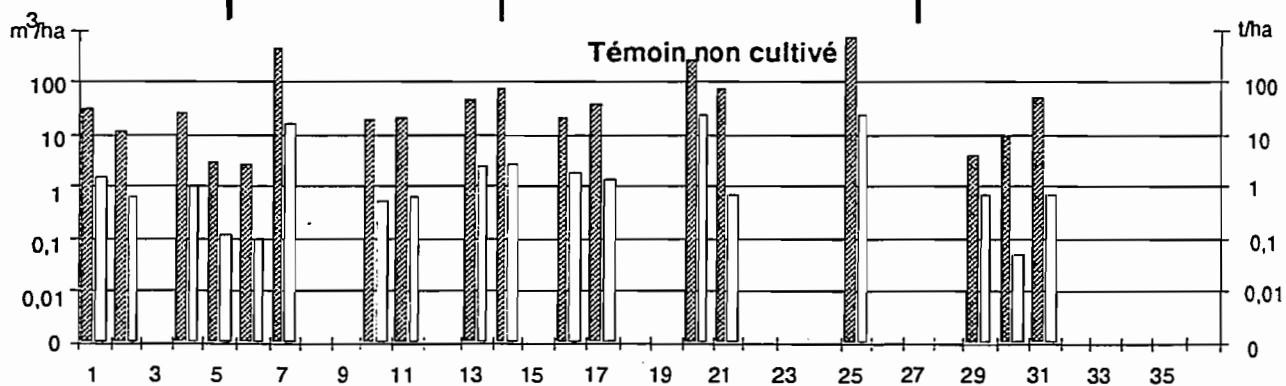
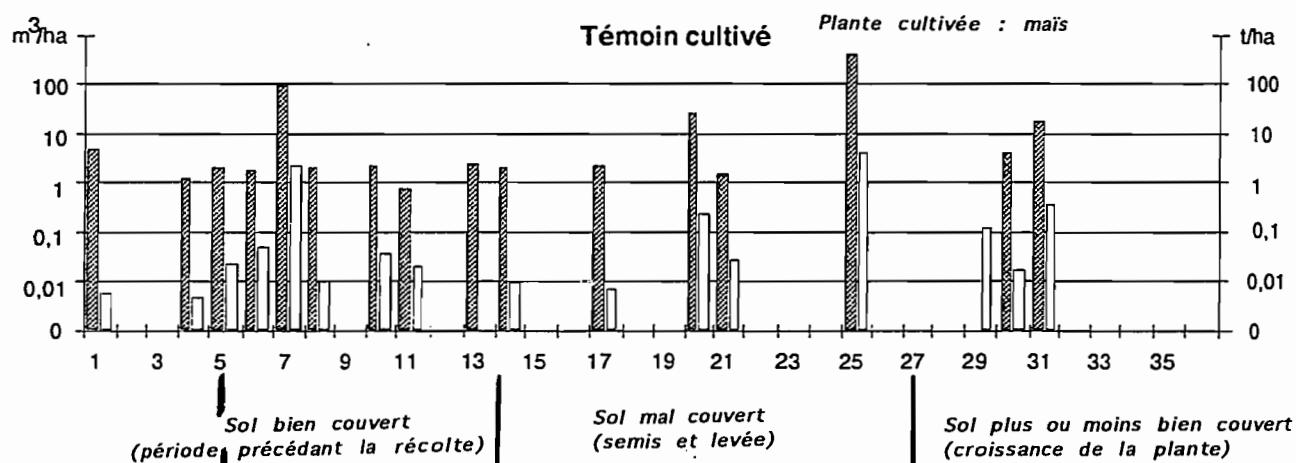
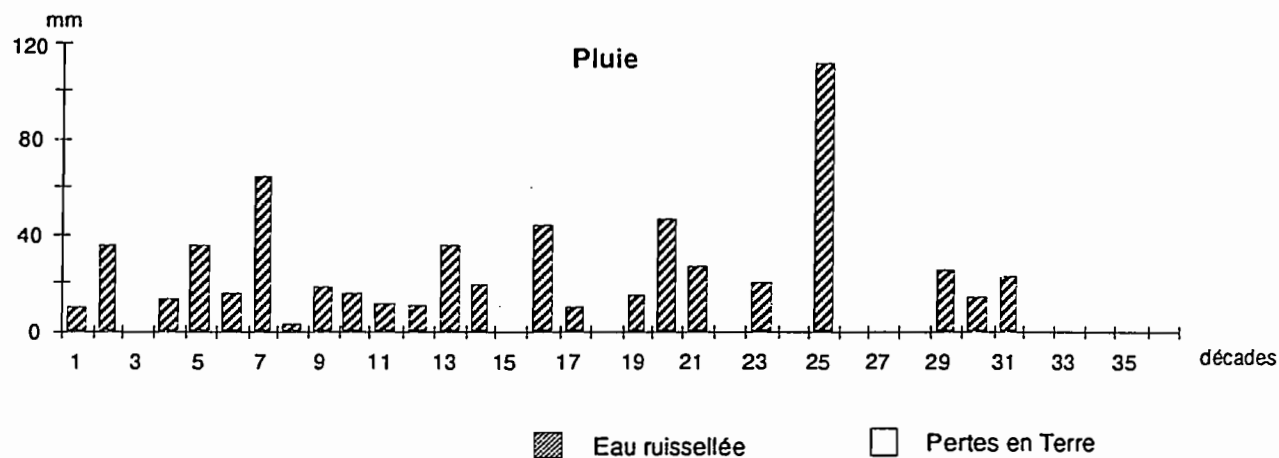
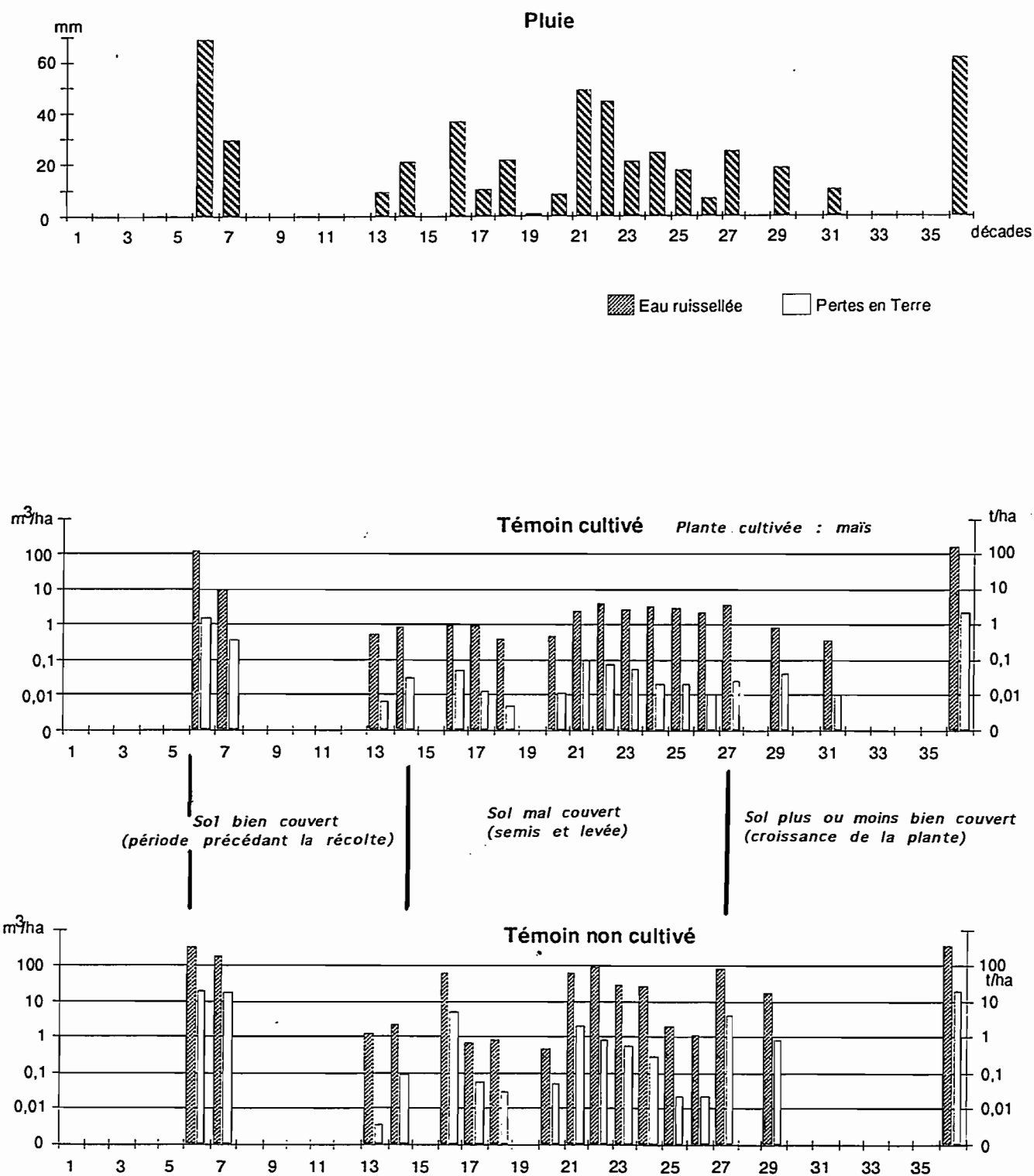


Fig. n°19

TUMBACO 1989-90



pluie et donc pas de ruissellement et d'érosion entre la 7^e et la 13^e décade (mars et avril), l'incidence du couvert n'intervenant donc pas dans ce cas. En 1988-89 par contre (fig. n° 18), il a plu au cours de cette même décade et c'est sur la parcelle cultivée, où le sol est mieux protégé, que les pertes en terre et en eau ont été les plus faibles. Ce comportement de la parcelle cultivée est encore plus significatif si on passe à l'année 1987-88 (fig. n° 17). Durant cette année et lors de la même période allant de la 7^{ème} à la 13^{ème} décade, il y a eu que peu de précipitation malgré une pluie importante dans la dixième décade au cours de laquelle se produisent de fortes pertes en eau et en terre sur la parcelle non cultivée ; comparativement, il n'y a pas d'érosion sur la parcelle cultivée.

Sur l'exemple de la station de Riobamba, les mêmes commentaires peuvent être effectués. La culture choisie sur cette station est la pomme de terre et le calendrier cultural, tel qu'il est pratiqué par les petits paysans du minifundio, a été suivi. Contrairement à Tumbaco où les paysans laissent reposer le sol entre la récolte et le semis, en général de juillet à septembre, ici dans cet étage d'altitude où les précipitations sont plus abondantes, les semis se succèdent sans période de repos pour le sol.

Fig. n°20

RIOBAMBA 1987-88

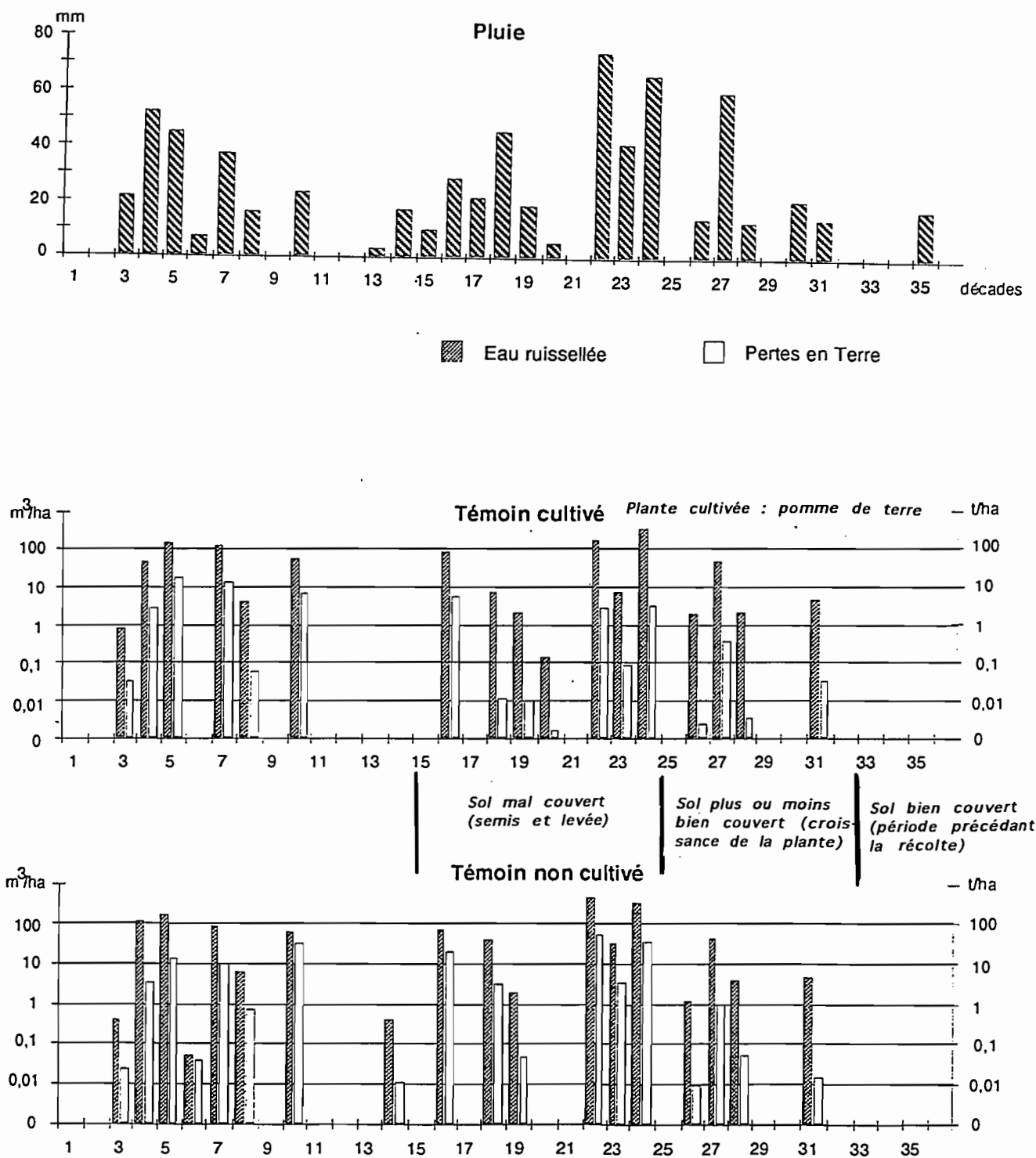


Fig. n°21

RIOBAMBA 1988-89

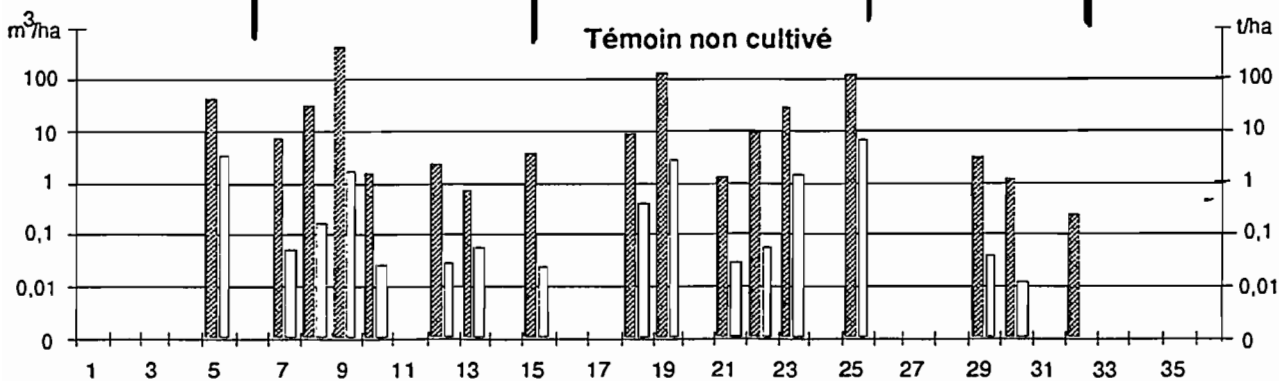
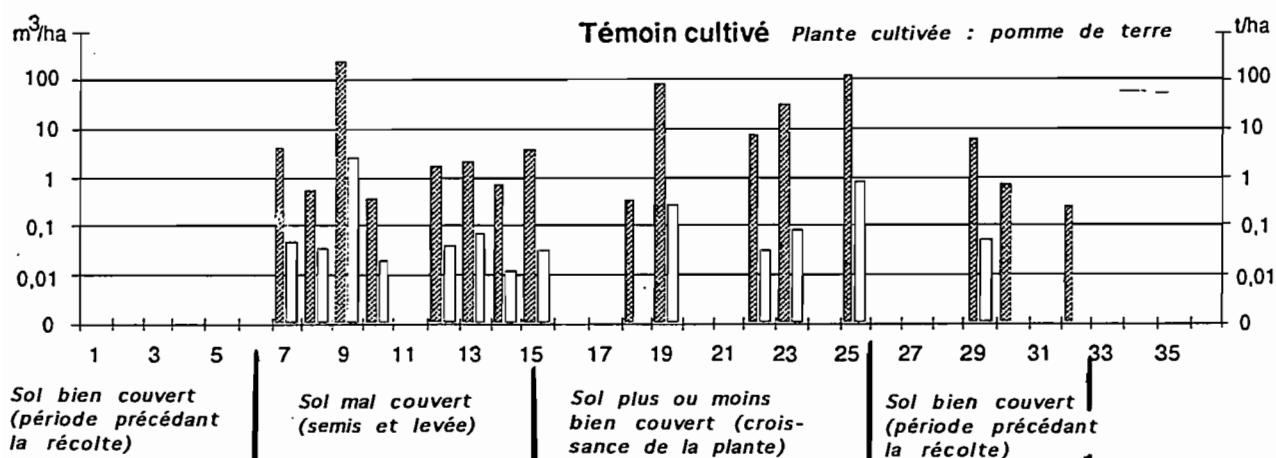
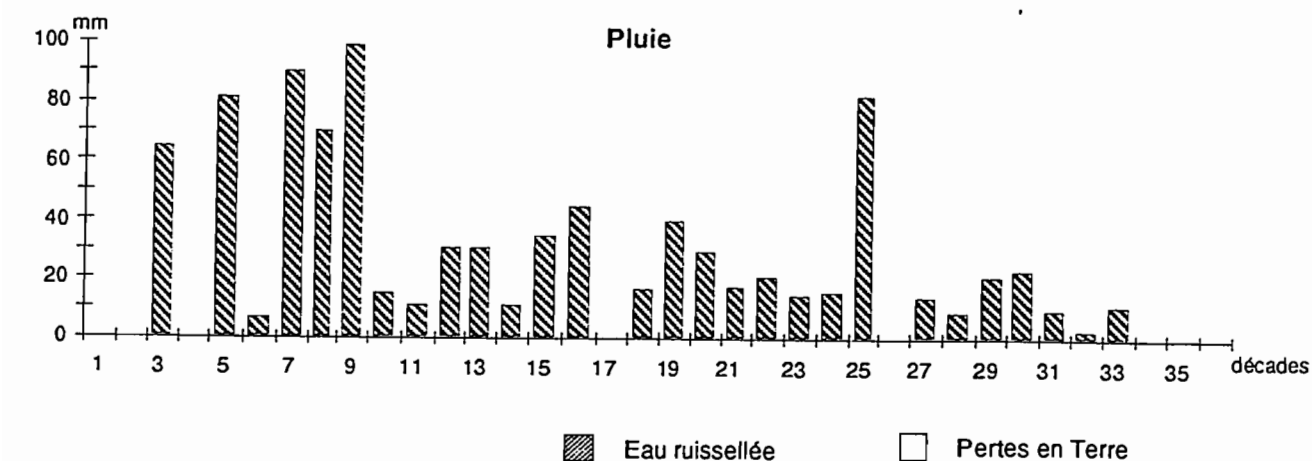
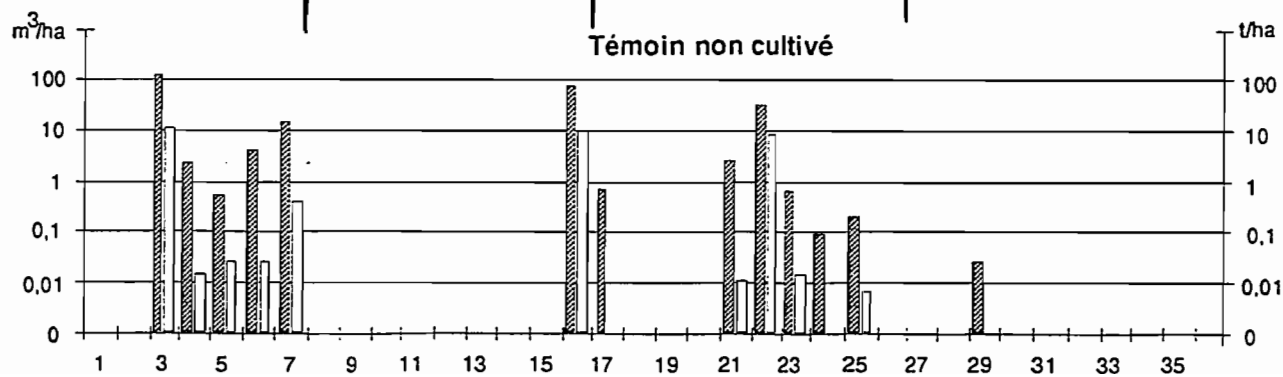
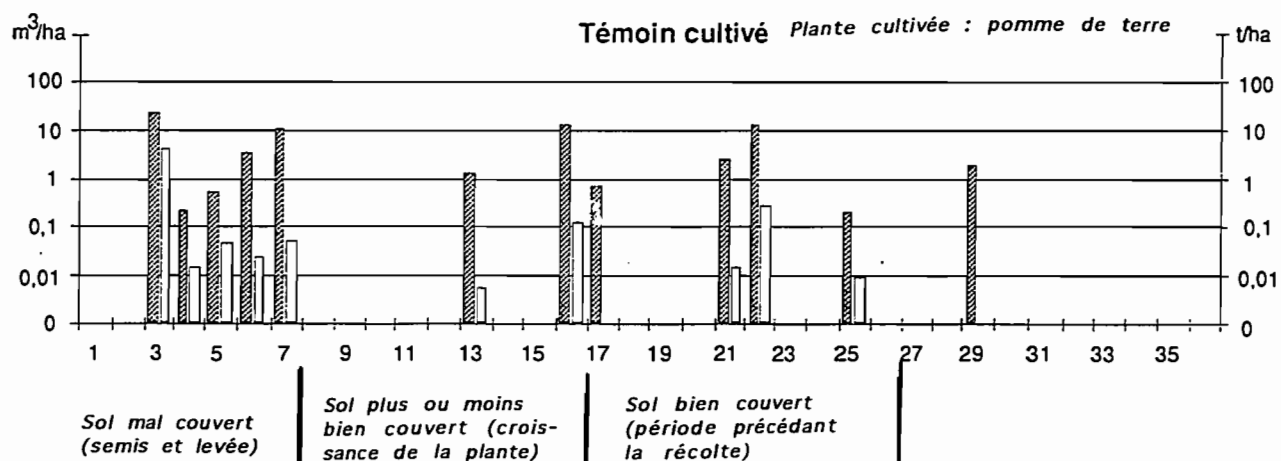
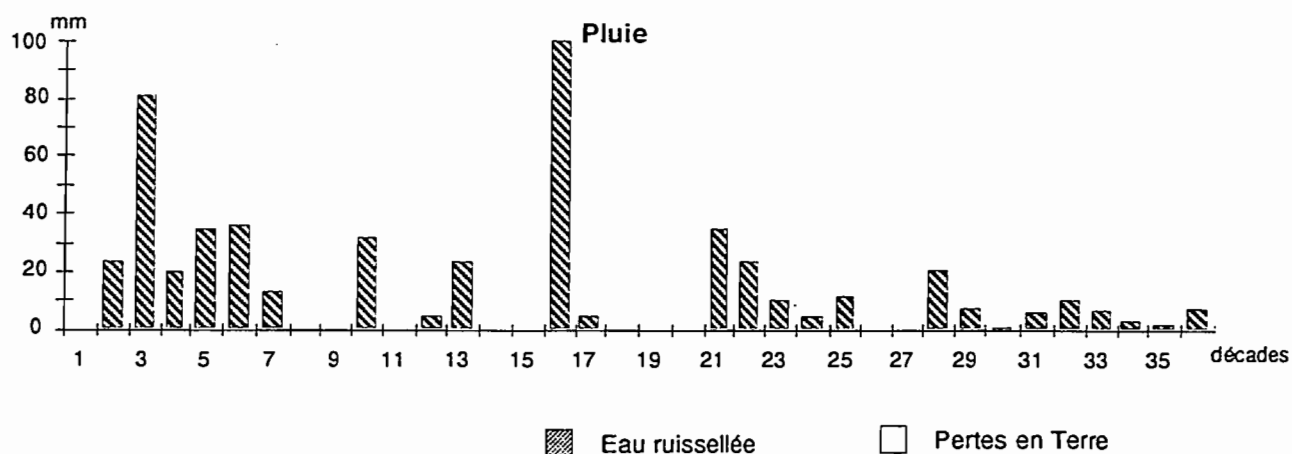


Fig. n°22

RIOBAMBA 1989-90



Ainsi pour les trois périodes choisies, les calendriers culturels sont les suivants :

Années	sol mal couvert : semis et levées de la plante	sol + ou -bien couvert : croissance de la plante	sol bien couvert : période précédant la récolte
1987-88	Juin-Août	Septembre-Novembre	Décembre-Février
1988-89	Mars-Mai	Juin-Août	Septembre-Novembre
1989-90	Décembre-Février	Mars-Mai	Juin-Août

Pour l'année 1989-90 (fig. n° 22), entre décembre 1989 et février 1990 (jusqu'à la 7^e décade), les pluies sont bien réparties et produisent sur un sol mal couvert une érosion également bien répartie. Les pluies s'estompent par la suite jusqu'à la 15^e décade, néanmoins la pluie de la 13^e décade a provoqué de l'érosion sur la parcelle cultivée qui reste encore mal couverte à cette période. Puis à partir de la 21^e décade, le sol est mieux couvert et la parcelle cultivée s'érode moins vite que son homologue non cultivée. En revanche, si l'on examine maintenant les données de l'année antérieure, 1988-89 (fig. n° 21), on note que la période, comprise entre la 7^e et la 15^e décade, est plus arrosée et plus érosive aussi, l'évolution est favorisée par un sol mal couvert. Par la suite, on observe, comme pour l'autre année, des effets de l'érosion plus discontinus sur la parcelle cultivée à mesure que s'étoffe le couvert de la plante. Le début du graphe, entre la 1^e et la 7^e

décade, qui correspond en fait à la fin de l'année culturale 1987-88, période précédant la récolte où le sol est bien couvert, montre que la parcelle cultivée résiste bien à l'érosion notamment par rapport à la pluie de la 5^e décade. Pour l'année 1987-88 (fig. n° 20), les pertes en eau sont proches sur les deux parcelles, par contre l'érosion est plus faible sur la parcelle cultivée durant les décades 26 et 28.

Ces quelques exemples montrent de façon classique l'influence du couvert de la plante associé au travail du sol sur l'évolution des phénomènes. Ils montrent donc que les risques d'érosion accélérée sont très élevés durant les périodes où le sol est mal couvert. Ils montrent aussi, outre l'irrégularité inter-annuelle des quantités de terre déplacée déjà signalée, la variabilité temporelle des manifestations d'un cycle cultural à l'autre d'où l'absence d'une époque érosive bien marquée. Ils indiquent, enfin, que le choix des dates de semis est très aléatoire et que le déroulement des calendriers culturaux est fluctuant d'une station à l'autre.

l'effet du sol

Pour apprécier cet effet, seules sont prises en compte les parcelles témoins non cultivées. Par comparaison avec les parcelles témoins cultivées, les pertes en eau et en terre sont plus importantes (voir tab. n° 9 et 10). En rapportant les valeurs de ruissellement et d'érosion des parcelles témoins non cultivées à celles des parcelles témoins cultivées, il ressort que les rapports les plus élevés se trouvent à Mojanda où on constate qu'il y a plus de 14 fois d'eau perdue et plus de 160 fois de terre érodée sur le témoin non cultivé. Puis viennent la station de Cangahua avec 16 fois plus d'érosion et les stations de Tumbaco et de Riobamba avec 5 à 6 fois plus d'érosion. Les stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas ont un comportement moins tranché entre ces deux situations avec des rapports de l'ordre de 3. De la même façon que pour les parcelles cultivées, l'érosion des parcelles non cultivées se caractérise d'une année sur l'autre par l'irrégularité de ses quantités et la variabilité temporelle de ses manifestations.

A partir de ces données, plusieurs régressions ont été calculées pour déterminer les corrélations entre les valeurs moyennes de ruissellement et d'érosion (tab. n° 10) et les données caractérisant les principaux constituants du sol : matière organique, texture et densité apparente (voir tab. n° 4, 5 et 6). N'ayant obtenu aucune relation satisfaisante

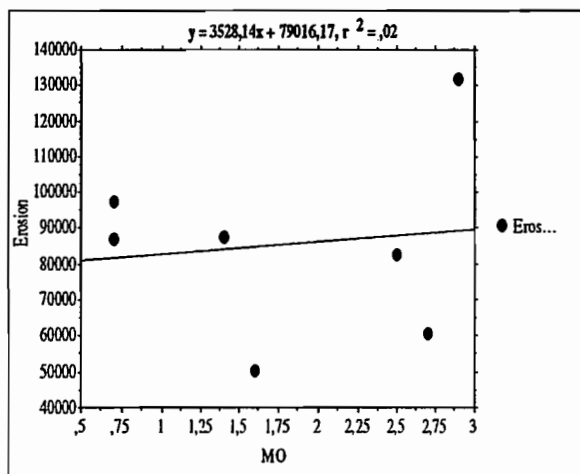
entre l'érosion et l'un ou l'autre de ces constituants, nous nous sommes inspirés des travaux de Bryan (1969) qui a établi plusieurs corrélations significatives à partir d'associations de classes texturales. Celui-ci est arrivé à de bons résultats en utilisant les associations suivantes : sable fin + limon fin / argile + (10 x matière organique) ; sable / limon + argile + matière organique ; 1,5 limon fin + 0,75 limon grossier / argile + (10 x matière organique).

Le résultat est une nouvelle fois décevant car, en procédant de la sorte, on n'a pu faire apparaître de relation fonctionnelle significative entre les constituants du sol et les valeurs de l'érosion et du ruissellement. A titre d'exemple, pour les sept stations, la figure n° 23 montre quelques unes de nos tentatives pour corréler l'érosion et respectivement les pourcentages moyens de matière organique, d'argile, de limon et de sable.

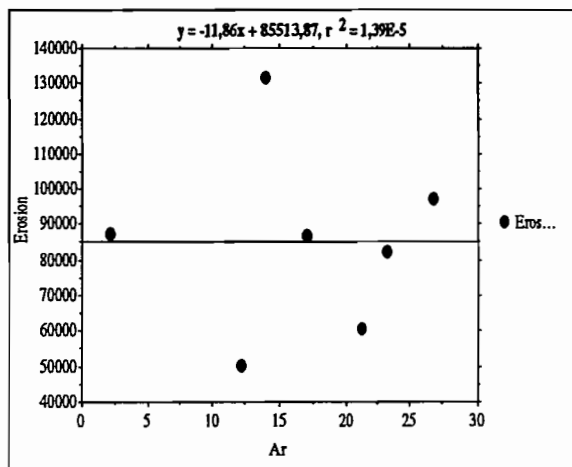
Force est de reconnaître qu'il est difficile, pour ne pas dire illusoire, d'isoler le comportement du sol sur une parcelle de ce type. Le fait d'avoir éliminé l'effet végétation/culture ne suffit pas car il subsiste les effets introduits par la pente et le climat. Il est très difficile de distinguer la part prise dans la dynamique entre les rigoles qui incisent le sol et les effets dus à la battance du sol. Le manque de résultat à ce niveau nous conduira à développer la simulation de pluie qui est exposé dans le point 3 suivant. Cette expérimentation a permis d'isoler et d'évaluer le seul comportement du sol.

Fig. n°23

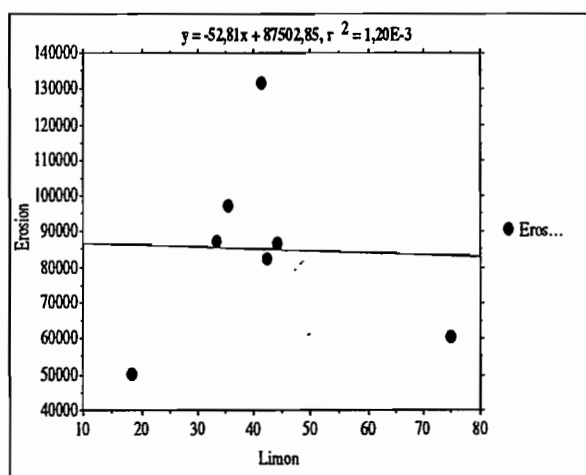
Erosion = f(MO)



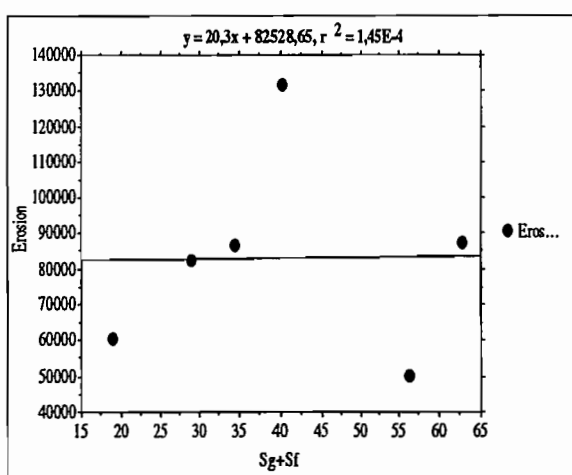
Erosion = f(argile)



Erosion = f(limon)



Erosion = f(sable)



L'absence de relation nous a conduits à nous intéresser aux constituants des sédiments érodés prélevés dans les bacs de sédimentation. Roose (1981, 1994), Collinet (1988) Casenave et Valentin (1989) montrent dans leurs travaux qu'il existe une sélection texturale dans les sédiments érodés lorsque l'érosion est en nappe. L'énergie des pluies provoque par détachabilité l'érosion des particules fines, argiles et matière organique, qui se retrouvent ainsi en quantité majoritaire dans les sédiments érodés. Par contre, l'érosion linéaire n'est pas sélective, le ruissellement arrachant les particules de sol sous forme d'agrégats (Bolline, 1982 ; Poesen, 1990 ; Roose, 1994). Son action est particulièrement efficace sur les pentes. > 20% ~

Sur quelle épaisseur ?

Pour évaluer si l'érosion a une action sélective ou non sur les constituants physico-chimiques du sol, on a comparé les analyses des sols en place^{*} avec celles des sédiments érodés des stations de Tumbaco, Cangahua, Mojanda et Riobamba. Les échantillons ont été prélevés dans l'horizon de surface en place (0-5 cm de profondeur) ; pour limiter l'effet de variabilité spatiale, l'échantillonnage sur les parcelles a été réalisé par le prélèvement et le regroupement de 18 sous-échantillons. Un échantillon témoin composite a été également prélevé hors des parcelles sur le sol "in situ". Les résultats ont été récapitulés pour toute la période dans le tableau n° 11. De la même façon, des échantillons composites ont été constitués pour les sédiments érodés en intégrant les charges de fond et les sédiments en suspension.

Tab. n° 11

Comparaison sols en place et sédiments érodés par parcelles et par stations (Résultats analytiques)

TUMBACO	Améliorée sol	T cultivée sol	T non cultivée sol	Moy sol	Améliorée sédiment	T cultivée sédiment	T non cultivée sédiment	Moy sédiment	sedim - sol	En dehors sol
arg+limons %	46,20	46,86	46,02	46,36	37,20	46,23	38,38	40,60	-5,78	46,83
argiles %	24,33	18,69	19,32	21,11	23,17	24,70	21,02	22,86	1,86	23,30
limons fins %	21,87	27,18	26,70	26,26	14,03	21,63	17,38	17,64	-7,61	23,64
limons gros. %	14,71	15,49	17,64	15,81	13,68	13,91	13,04	13,60	-2,41	15,43
sables fins %	27,99	27,69	27,40	27,66	34,69	26,68	31,80	31,03	3,37	28,04
sables gros. %	6,42	5,74	5,69	5,95	11,07	10,28	13,01	11,46	6,60	6,75
C total %	1,35	0,73	0,65	0,91	0,73	0,60	0,66	0,66	-0,24	1,49
N total %	0,12	0,07	0,07	0,09	0,10	0,07	0,07	0,08	-0,01	0,13
C/N	11,20	10,42	9,76	10,46	7,46	8,67	9,21	9,41	-2,06	12,26
Ca me/100g	10,05	11,70	12,80	11,52	11,90	11,00	12,36	11,76	0,23	11,65
Mg me/100g	6,49	5,87	5,00	5,72	3,94	6,23	5,91	5,36	-0,36	6,81
K me/100g	1,05	0,69	0,69	0,81	0,92	0,87	0,68	0,86	0,05	0,87
somme	17,58	19,06	18,49	18,04	16,76	18,20	18,93	17,96	-0,08	18,33
CIC me/100g	19,60	20,60	21,60	20,53	20,00	17,40	18,66	18,65	-1,88	20,20
S/C %	90,20	88,10	86,65	88,28	83,80	100,00	100,00	96,98	8,70	0,86

CANGAHUA	Améliorée sol	T cultivée sol	T non cultivée sol	Moy sol	Améliorée sédiment	T cultivée sédiment	T non cultivée sédiment	Moy sédiment	sedim - sol	En dehors sol
arg+limons %	31,77	27,13	29,37	29,42	31,34	24,10	30,77	28,73	-0,69	29,68
argiles %	16,74	11,98	13,32	14,00	14,23	10,08	14,09	12,90	-1,21	11,19
limons fins %	15,03	15,17	16,05	15,41	17,11	14,04	16,68	15,94	0,63	17,39
limons gros. %	12,69	13,60	13,99	13,39	12,28	8,71	11,62	11,17	-2,22	13,07
sables fins %	38,18	38,35	39,67	37,73	37,39	39,09	36,02	37,60	-0,23	38,03
sables gros. %	14,38	15,40	13,32	14,36	16,03	22,18	15,43	17,54	3,18	16,64
C total %	1,47	1,37	1,33	1,39	1,62	1,45	1,35	1,44	0,05	1,45
N total %	0,14	0,13	0,13	0,13	0,16	0,16	0,13	0,14	0,01	0,13
C/N	10,93	10,60	10,80	10,78	10,05	10,05	10,35	10,16	-0,63	11,70
Ca.meq/100g	7,60	11,05	7,60	8,75	14,13	14,80	9,90	12,94	4,19	7,65
Mg.meq/100g	4,68	5,66	6,23	5,49	4,47	5,09	6,97	5,51	0,02	4,76
K.meq/100g	1,85	0,60	0,65	0,96	1,05	0,91	0,95	0,97	0,00	0,74
Somme	13,83	17,31	14,48	15,20	19,64	20,79	17,82	19,41	4,21	13,15
CIC meq/100g	16,19	17,40	16,90	16,16	16,65	16,10	17,60	16,72	0,66	16,00
S/CIC %	90,63	100,65	91,30	94,16	100,00	100,00	100,00	100,00	5,84	81,80

MOJANDA	Améliorée sol	T cultivée sol	T non cultivée sol	Moy sol	Améliorée sédiment	T cultivée sédiment	T non cultivée sédiment	Moy sédiment	sedim - sol	En dehors sol
arg+limons %	41,41	42,87	41,40	41,82	34,91	31,66	39,48	35,31	-6,51	38,94
argiles %	15,31	14,96	14,64	14,94	13,11	13,36	15,64	14,00	-0,94	14,72
limons fins %	26,10	27,71	26,86	26,89	21,80	18,21	23,94	21,31	-5,67	24,22
limons gros. %	15,10	16,67	14,30	15,02	14,68	16,36	15,36	15,01	-0,01	15,68
sables fins %	25,22	23,95	25,81	24,99	26,22	26,71	26,96	26,96	0,87	26,02
sables gros. %	11,91	11,86	12,44	12,04	17,93	13,08	15,60	15,60	3,66	10,98
C total %	3,08	3,14	2,82	3,01	2,83	3,27	3,11	3,07	0,06	3,52
N total %	0,23	0,24	0,21	0,23	0,24	0,27	0,23	0,26	0,02	0,26
C/N	13,26	13,36	13,30	13,30	11,95	12,30	13,46	12,67	-0,73	14,00
Ca.meq/100g	6,16	5,55	6,20	5,98	12,23	14,10	6,45	10,93	4,95	7,00
Mg.meq/100g	1,16	0,82	0,99	0,98	1,11	1,16	1,23	1,16	0,18	0,98
K.meq/100g	0,34	0,39	0,29	0,34	0,50	0,61	0,39	0,46	0,13	0,36
Somme	7,66	6,76	7,47	7,29	13,83	16,76	8,07	12,66	5,26	8,34
CIC meq/100g	17,60	16,60	16,00	16,03	16,00	16,20	16,00	16,07	0,03	16,90
S/CIC %	43,75	43,80	49,80	45,72	86,93	97,30	60,40	78,21	32,49	0,49

RIOBAMBA	Améliorée sol	T cultivée sol	T non cultivée sol	Moy sol	Améliorée sédiment	T cultivée sédiment	T non cultivée sédiment	Moy sédiment	sedim - sol	En dehors sol
arg+limons %	17,92	21,00	18,65	19,16	39,34	26,36	18,85	28,22	9,06	19,05
argiles %	2,83	4,41	4,04	3,79	7,07	4,86	4,90	5,61	1,82	3,17
limons fins %	14,99	16,60	14,51	15,37	32,27	21,61	14,05	22,61	7,24	15,88
limons gros. %	18,17	16,88	17,26	17,37	19,20	20,94	19,59	19,91	2,64	18,72
sables fins %	41,25	38,91	41,21	40,45	24,60	33,27	38,80	32,18	-8,27	40,21
sables gros. %	18,61	19,41	20,12	19,38	9,80	14,86	18,78	14,48	-4,90	19,85
C total %	1,70	1,66	1,41	1,55	3,17	1,88	1,41	2,16	0,60	1,69
N total %	0,14	0,12	0,12	0,13	0,26	0,16	0,12	0,18	0,06	0,12
C/N	12,65	12,76	12,00	12,43	12,30	11,45	12,10	11,95	-0,48	13,76
Ca me/100g	4,70	5,95	4,85	5,17	10,85	6,90	5,95	7,90	2,73	4,85
Mg me/100g	0,98	1,07	0,98	1,01	2,38	1,48	1,16	1,67	0,66	1,07
K me/100g	0,21	0,26	0,18	0,21	0,80	0,49	0,41	0,56	0,35	0,16
S meq/100g	5,89	7,28	6,01	6,39	14,02	8,87	7,61	10,13	3,74	6,07
CIC me/100g	8,40	9,85	7,70	8,65	16,80	11,60	10,30	12,87	4,22	8,00
S/C %	70,00	74,25	78,65	74,30	83,70	77,90	72,75	78,12	3,82	0,76

Afin de pouvoir comparer plus commodément les données contenues dans le tableau 11, un graphe par station (Fig. n° 24 à fig. n° 27) a été établi : les caractéristiques physico-chimiques du sol sont en abscisse, les teneurs correspondantes en ordonnées et les sols en place et les sédiments érodés ont été distingué par des carrés respectivement noirs et blancs. Les graphes montrent que l'érosion n'est pas sélective, les fluctuations n'étant pas assez marquées pour être interprétables. En faisant abstraction de la variabilité des prélèvements et des analyses, on peut donc conclure à la similitude de ces deux types d'échantillons en ce qui concerne l'analyse mécanique, le carbone, l'azote et la plupart des propriétés d'échange.

Ce résultat n'est pas surprenant compte tenu de la qualité médiocre des régressions entre l'érosion et les classes texturales. Comme on pouvait s'y attendre, le ruissellement concentré a une action forte sur l'érosion des sols en montagne.

Fig. n° 24

RESULTATS ANALYTIQUES

Comparaison sol en place - sédiments érodés

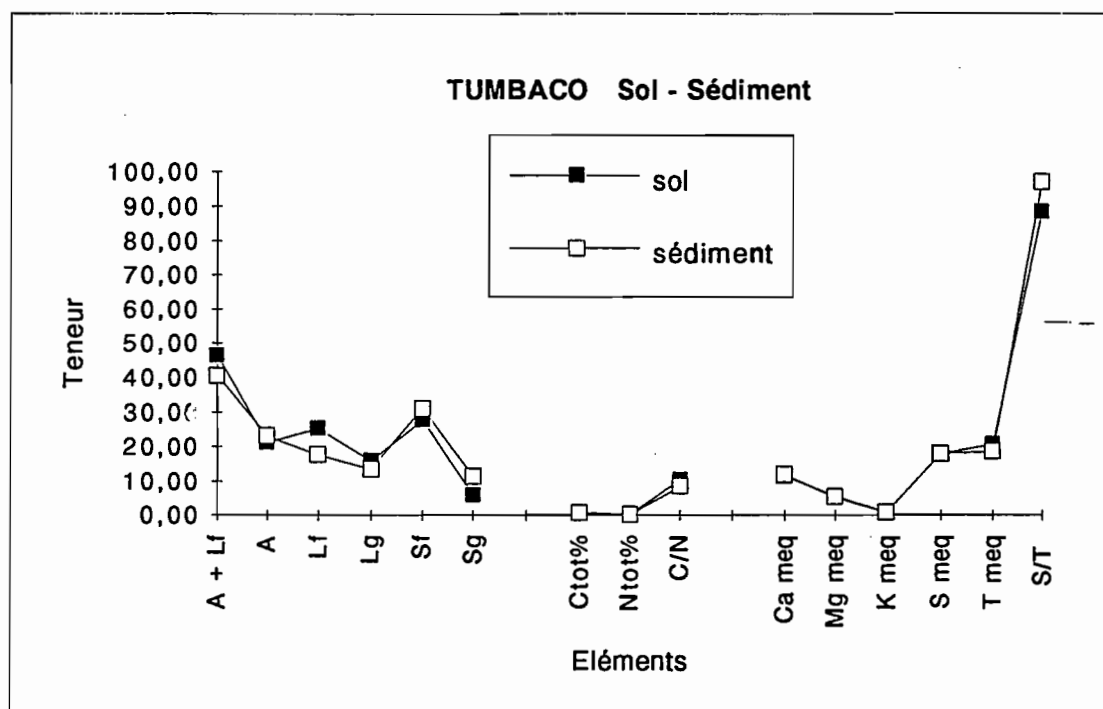


Fig. n°25

RESULTATS ANALYTIQUES

Comparaison sol en place - sédiments érodés

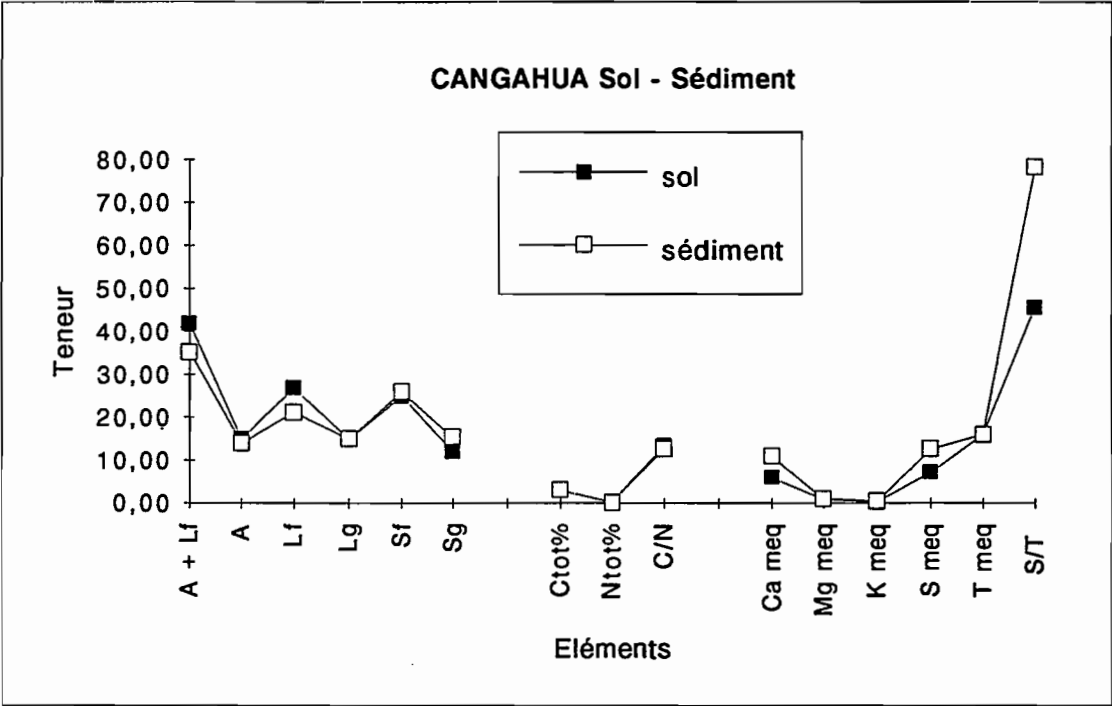


Fig. n°26

RESULTATS ANALYTIQUES

Comparaisons sol en place - sédiments érodés

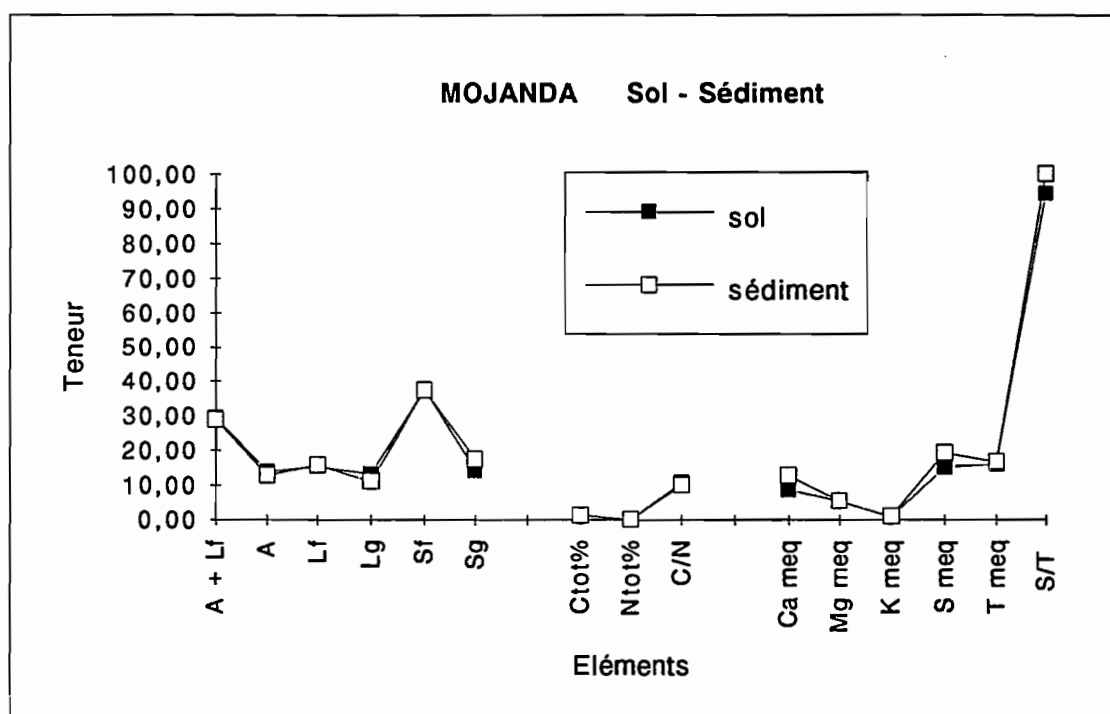
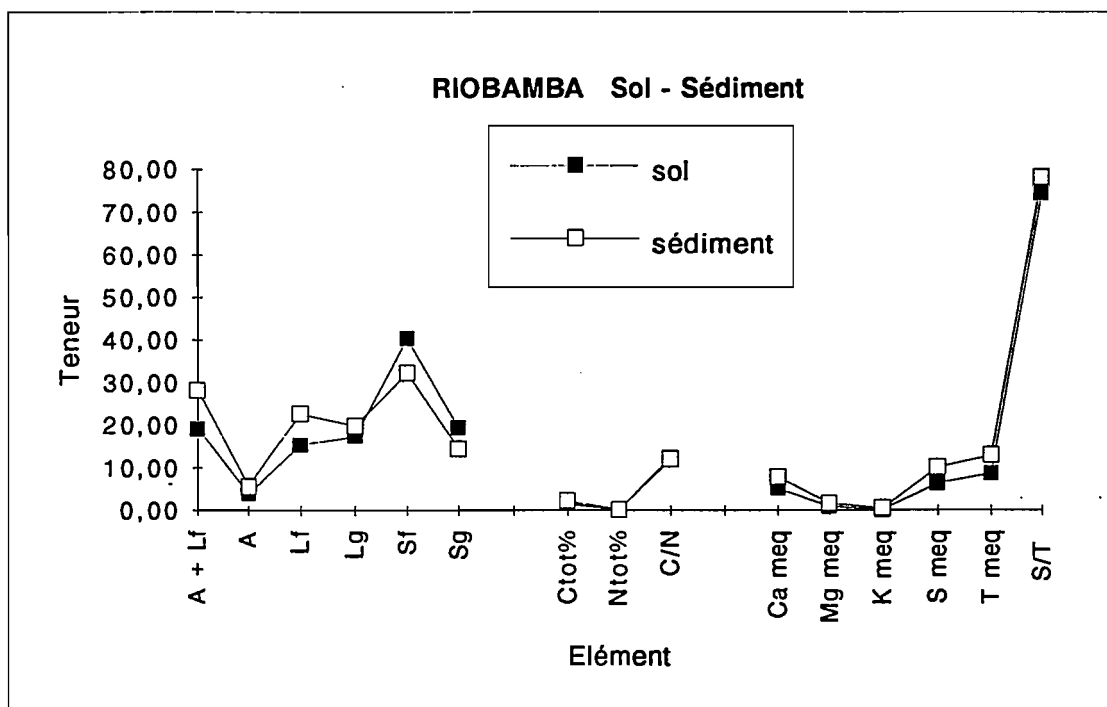


Fig. n°27

RESULTATS ANALYTIQUES

Comparaison sol en place - sédiments érodés



l'effet de la pente

En procédant de la même façon que pour le sol, des régressions ont été calculées pour définir s'il existait une corrélation entre les valeurs globales d'érosion des sept stations et l'inclinaison de leurs pentes. Les résultats sont présentés sur la figure n.° 28.

On constate qu'existe une dépendance fonctionnelle entre les deux variables, l'érosion croissant de façon linéaire avec l'inclinaison de la pente. Plus de 60 % des variations de l'érosion s'expliquent par les variations de l'inclinaison de pente ($r=0,78$, significatif au seuil de 1 %). Si on ne prend en compte que les stations de Tumbaco, Cangahua, Mojanda et Riobamba où les données d'érosion sont les plus nombreuses et les plus complètes, ce pourcentage s'élève à près de 70 %.

Par contre, les relations sont faibles entre la pente et les moyennes de ruissellement. Elles s'améliorent et deviennent positives et significatives au seuil de 1 % si on utilise les valeurs correspondant aux prélèvements unitaires⁵ (voir fig.

⁵ Pour calculer les régressions concernant l'érosion et le ruissellement, il a été possible d'envisager les données de base unitaires où chaque donnée est caractérisée par une date de prélèvement, une quantité d'érosion et un ruissellement. Ceci est valable également pour les variables concernant les pluies qui sont étudiées dans le paragraphe qui suit. Par contre, pour les régressions se rapportant à la pente ou aux constituants du sol, on n'a pu utiliser que les moyennes : en effet à chaque prélèvement unitaire, si les variations de l'érosion et du ruissellement sont mesurables, la pente quant à elle ne varie pas et les modifications éventuelles des constituants du sol "in situ" ne sont pas perceptibles

Fig. n°28

$$Erosion = f(pente)$$

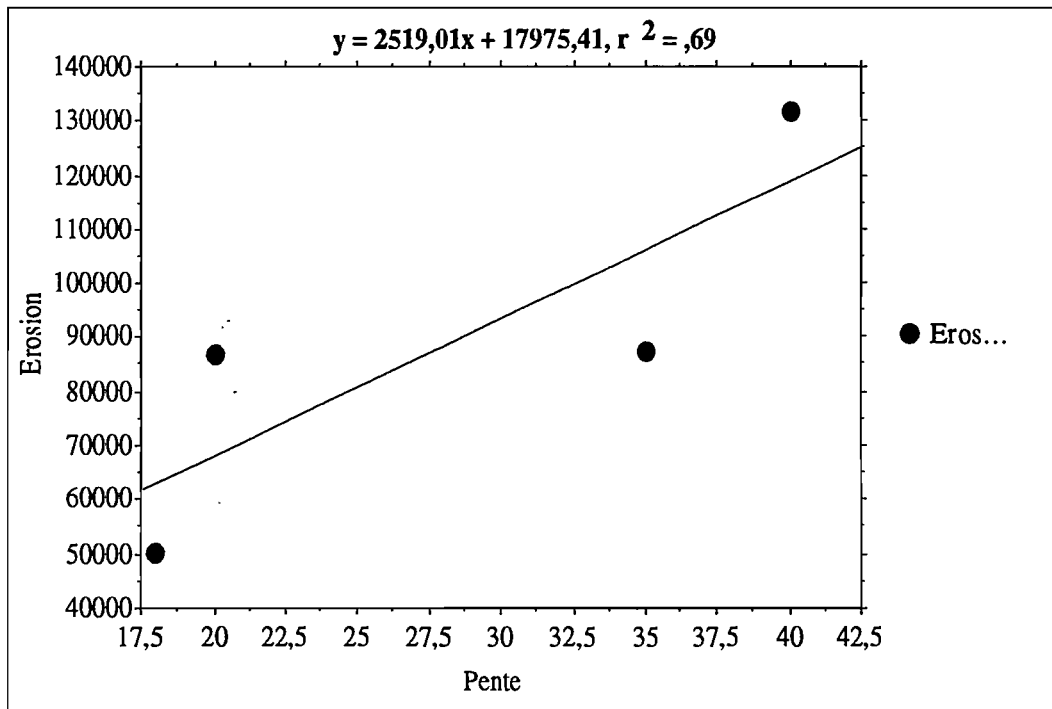
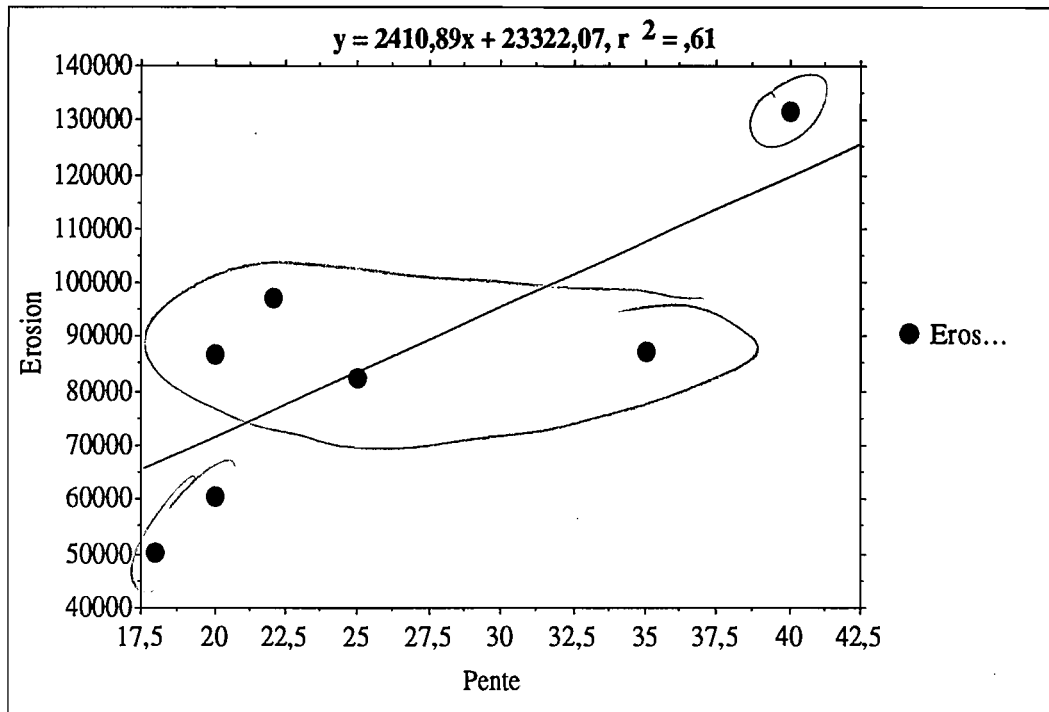
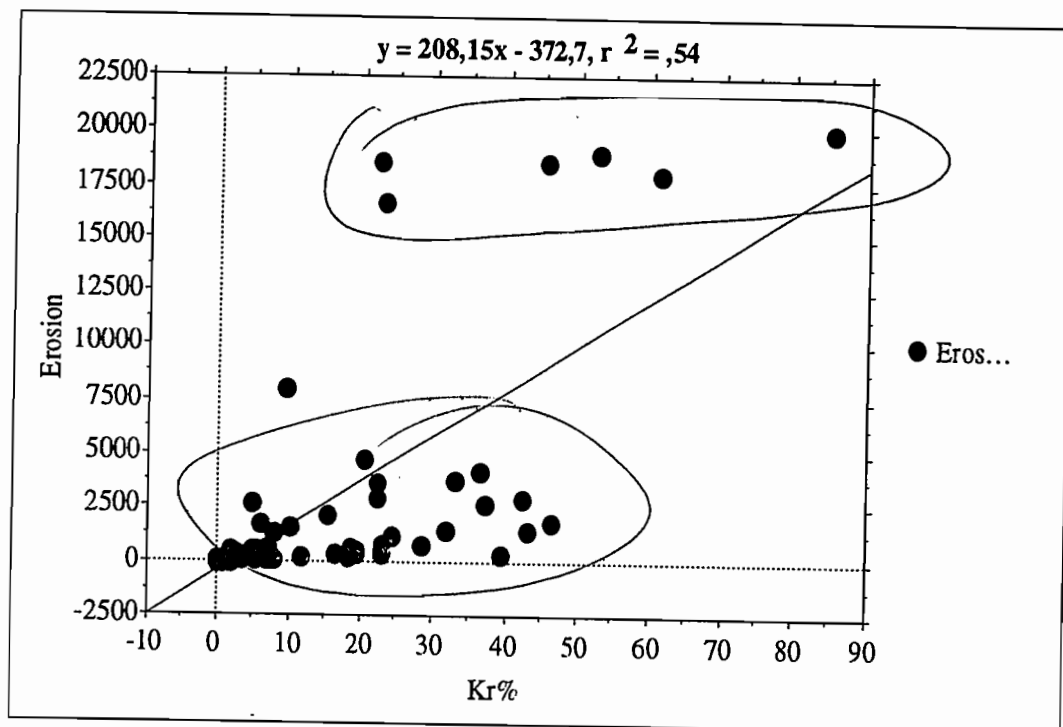


Fig. n°29

TUMBACO

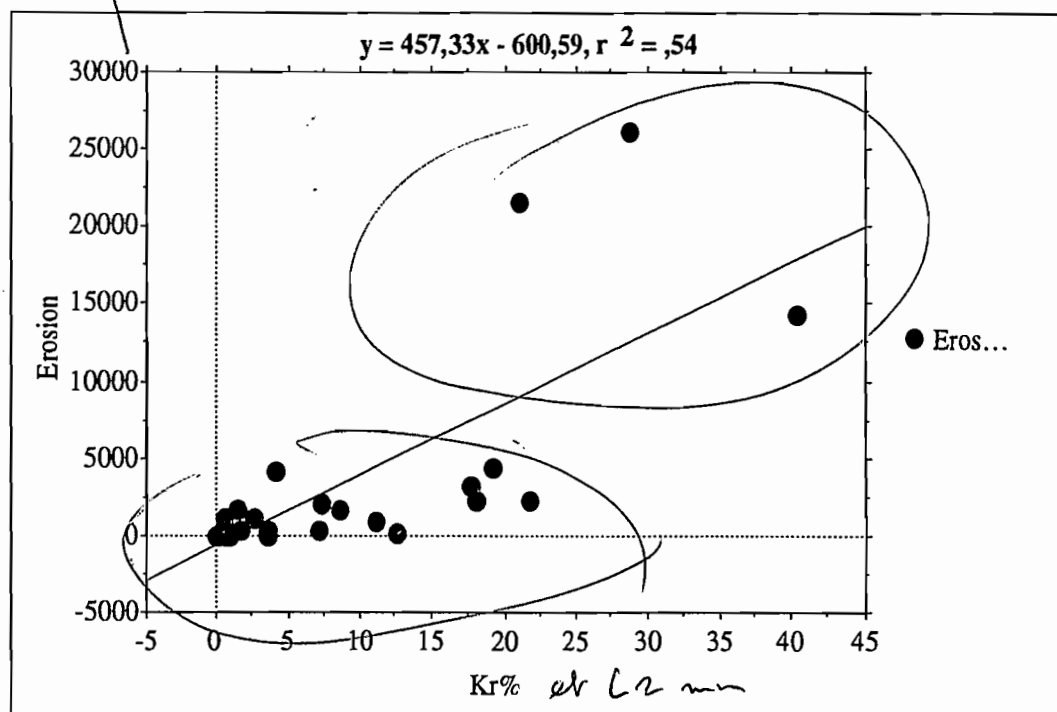
Erosion = f(ruissellement)



2 populations
par suite
de la
régression

CANGAHUA

Unités
kg/ha ?
Erosion = f(ruissellement)

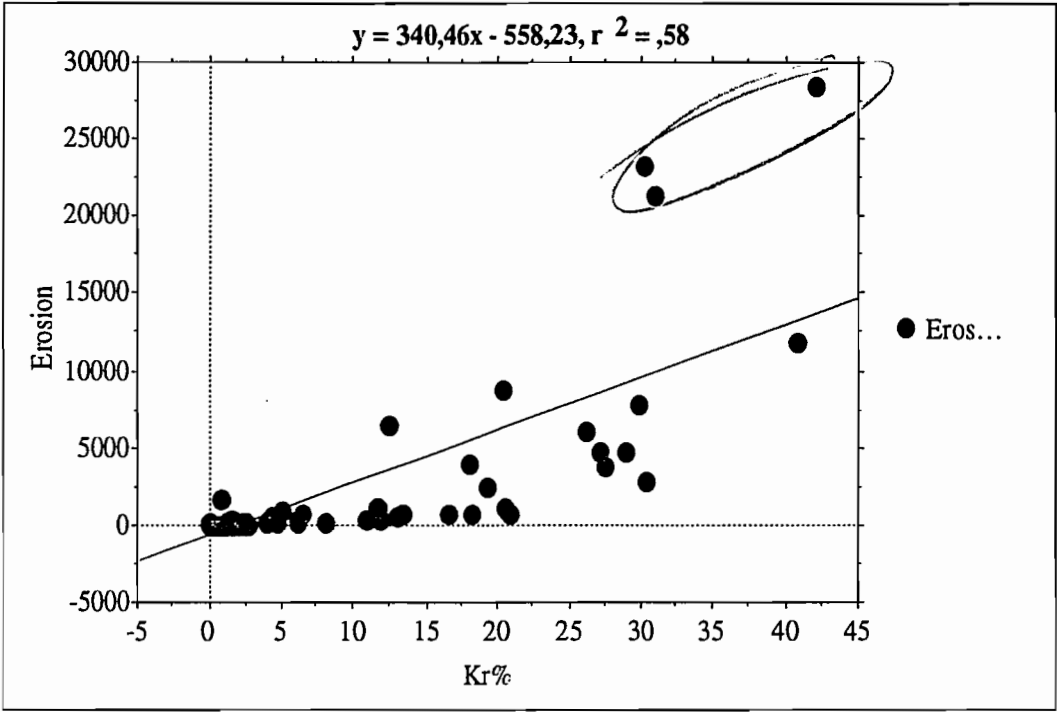


2 populations

Fig. n°30

MOJANDA

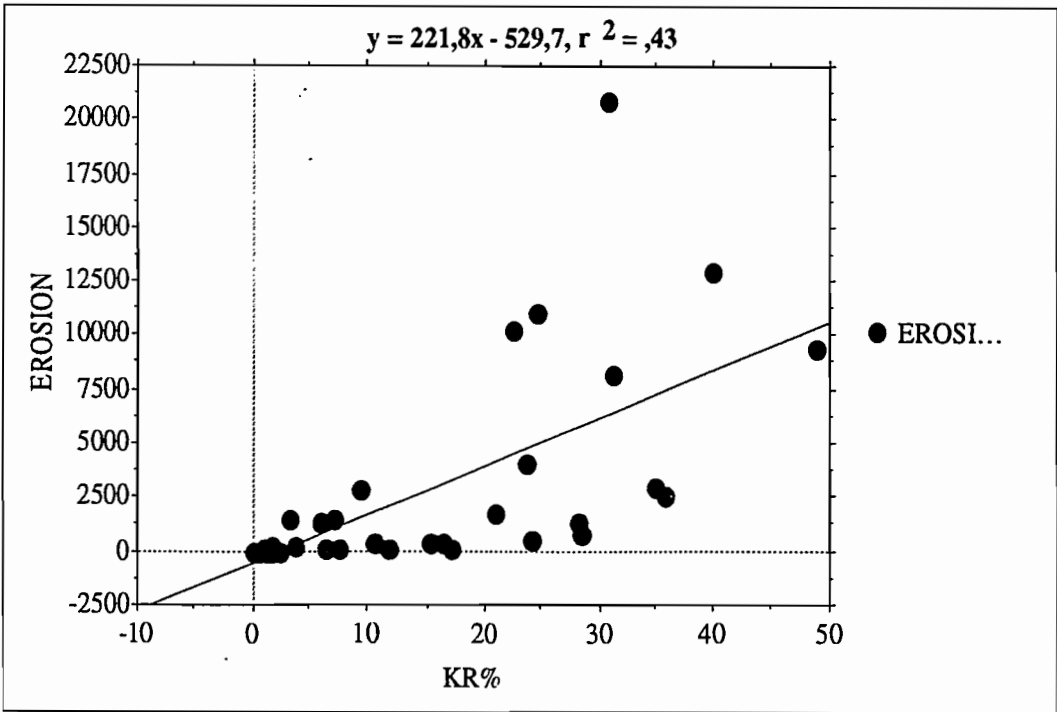
Erosion = f(ruissellement)



Wiene

RIOBAMBA

Erosion = f(ruissellement)



n° 29 et 30). Dans ce cas, les résultats expliquent, selon les stations, entre 43 et 58 % de la variance ($0,58 < r^2 > 0,43$). Ces résultats, partiellement explicatifs, rejoignent les observations faites précédemment sur l'histogramme de la figure n° 14 où nous avons noté que, dans certains cas, les fortes érosions ne correspondent pas toujours aux forts ruissellements.

Il est difficile, en effet, d'apprécier l'effet des volumes d'eau ruisselés en montagne. Sur faibles pentes, le sol, qui est devenu battant ou saturé, ruisselle et le ruissellement croît en s'accompagnant, en général, d'une augmentation de l'érosion. Sur fortes pentes, la dynamique semble différente. Les travaux de Fournier (1960), ^{Roose 1973} Lal (1982), Poesen (1987, 1989-90), ¹⁹⁷³ Roose (1994) montrent que, sur fortes pentes, le ruissellement incise la croûte de battance et ouvre le sol ce qui permet une certaine infiltrabilité de l'eau dans le sol. Il reste néanmoins suffisamment d'eau en surface pour arracher et transporter les particules de sol.

Nous n'avons pas envisagé la longueur de la pente. En effet, si l'influence de l'inclinaison de la pente sur l'érosion est bien connue, il n'en est pas de même pour sa longueur dont l'influence n'est pas clairement établie. Par exemple, Roose dans ses travaux (1994, pp. 112-114) n'a pas trouvé de relation entre l'érosion et la longueur de pente.

Dans l'optique appliquée de notre recherche, nous n'avons pas pris en compte la longueur de pente bien que ce paramètre soit en général utilisé pour situer sur le versant les ouvrages de conservation. Notre travail conjoint avec le paysan a montré que ce dernier est très sensible à la perte de terrain cultivable due à l'installation d'ouvrages de conservation, un compromis devant être trouvé entre le souhait du paysan et la logique technique. Cet aspect est développé dans le chapitre 3 consacré à la conservation des sols.

l'effet des précipitations

Depuis près de cinquante ans, avec les travaux notamment de l'école américaine (Ellison, 1945 ; Wischmeier et Smith, 1978, 1981 ; Hudson, 1983) puis ceux de l'école française (Fournier, 1960 ; Roose, 1973, 77, 81 ; Boiffin, 1976 ; Casenave et Valentin, 1989), il est admis, pour certains d'entre eux au moins, que les précipitations agissent plus par leur intensité que par leur abondance. La pluie, par son

intensité et l'énergie qu'elle libère au contact du sol, provoque un effet mécanique de détachabilité des particules du sol. L'importance de ce processus est donc primordiale puisque les matériaux fins ainsi produits peuvent être entraînés par le ruissellement.

La situation de nos stations andines se place dans ce schéma :

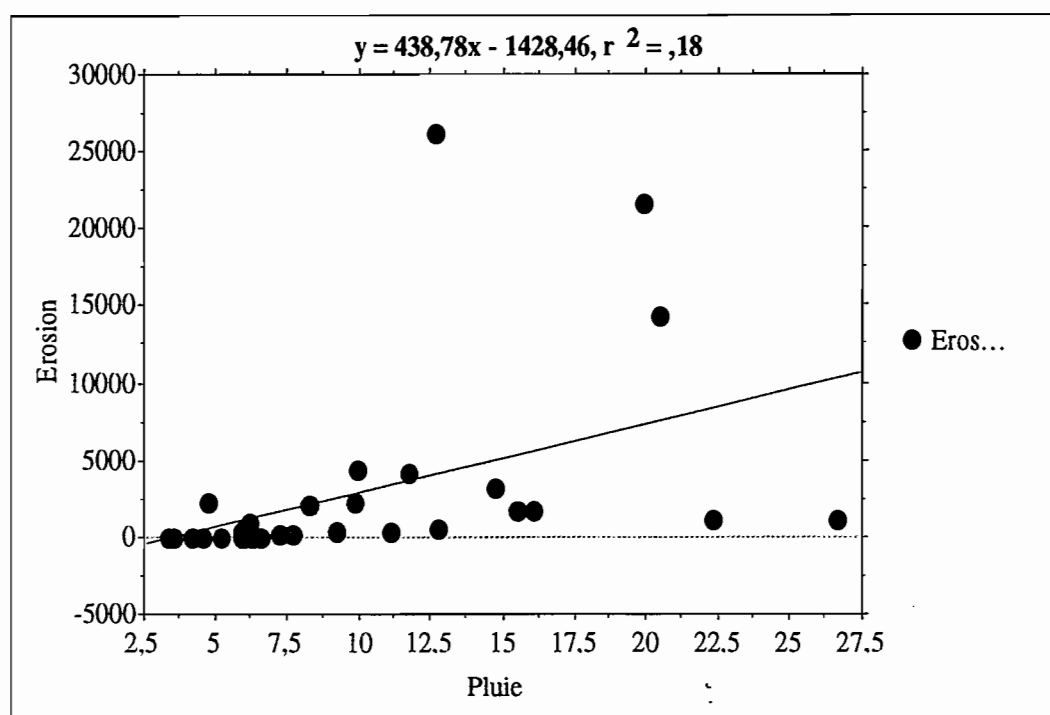
- les tentatives de régressions pour évaluer l'existence éventuelle de relation fonctionnelle entre l'érosion et la pluie ont donné des coefficients de corrélation linéaire très faibles pour toutes les stations. Sur la figure n° 31, figurent, à titre d'exemple, les cas de 2 stations où les variables utilisées, qui correspondent à des prélèvements unitaires de terre, expliquent moins de 20 % de la variance : Cangahua, dans la dépression, avec un $r^2 = 0,18$ et Mojanda, sur la cordillère occidentale, avec un $r^2 = 0,14$. On comprend ainsi pourquoi, grâce à l'exemple de la station de Cangahua, que l'érosion, qui est pour la période 1987-88 de l'ordre de 90 t/ha pour une hauteur pluviométrique annuelle de 435,7 mm, n'est plus que de 15 t/ha pour les deux périodes suivantes, 1988-89 et 1989-90, alors que la pluviométrie annuelle est plus élevée, respectivement 691,5 mm et 488,6 mm pour ces deux périodes ;

- en revanche, les tentatives de régressions pour établir d'éventuelles relations fonctionnelles, entre l'érosion et

Fig. n°31

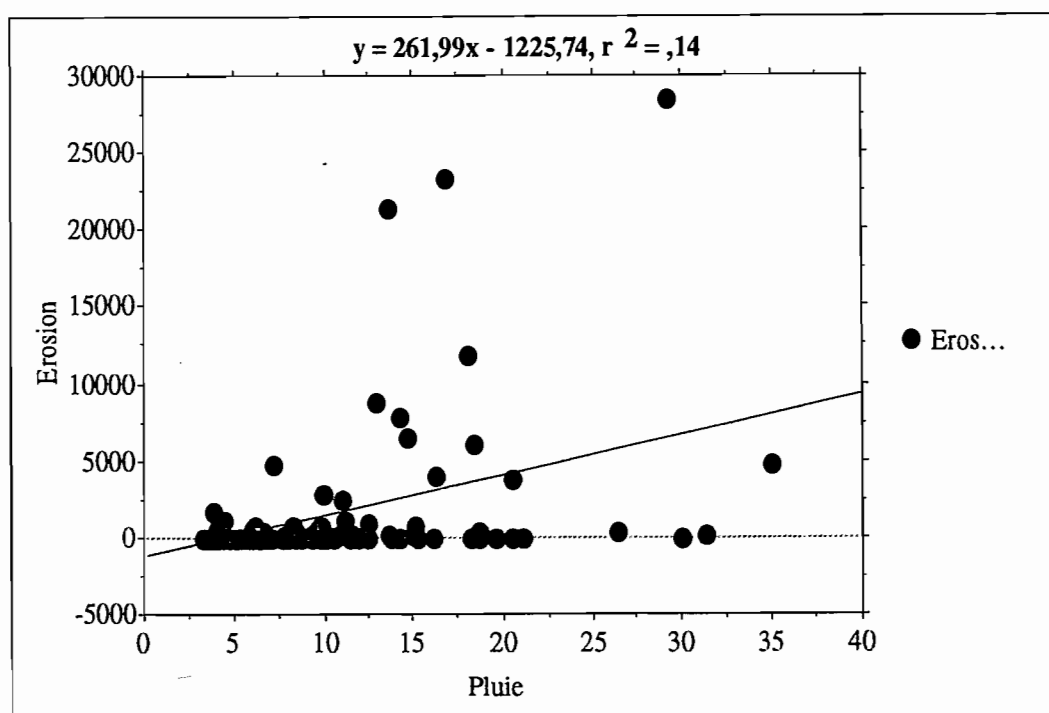
CANGAHUA

Erosion = f(pluie)



MOJANDA

Erosion = f(pluie)



l'intensité maximale de pluie durant 15 minutes (IM 15) et durant 30 minutes (IM 30), ont abouti à des coefficients de corrélation linéaires bien plus probants : les résultats expliquent, en effet, selon les stations entre 50 et 70 % de la variance ($0,72 < r^2 > 0,50$) et les variables sont corrélées significativement au seuil de 1 % dans tous les cas étudiés. Les graphes correspondant à ces cas se trouvent sur les figures n° 32 à 35.

De façon plus précise, on constate en analysant ces graphes que les régressions sont meilleures dans tous les cas avec l'IM 15 sauf cependant à Tumbaco ($r^2 = 0,69$ pour IM 15 et IM 30). Ceci constitue un point intéressant car on considère, en général, à la suite des travaux de Wischmeier et Smith (1978, 81) aux Etats-Unis et de Roose (1981) en Afrique de l'Ouest que l'IM 30 règle la battance et la naissance du ruissellement. A la lumière de ce résultat et pour les stations considérées, il semble donc que l'IM 15⁶ est plus significatif pour déclencher l'érosion sur les pentes de la Sierra andine (De Noni et al., 1989, 90). Lal (1976) admet aussi que l'influence de l'IM 30 n'est pas forcément significative partout et propose de

⁶ Un aspect d'ordre métrologique mérite d'être précisé. Comme l'IM30 constitue la référence standard, on ne cherche pas forcément à utiliser des appareils plus précis permettant d'apprécier des intervalles de temps inférieurs à 30 minutes. En Equateur, on a pu avoir accès à des pluviographes de rotation journalière ou mensuelle dont l'échelle de temps plus étalée, de l'ordre de 16 mm/h, a permis un découpage plus précis des enregistrements pluviographiques, ce que ne permettent pas tous les pluviographes. Il a été ainsi possible de dégager l'IM15 ; avec plus de temps et des objectifs de recherche moins finalisés, on aurait certainement pu, de la même façon, ressortir l'influence d'intensité encore inférieure comme l'IM5 par exemple.

bonnes corrélations soit avec l'IM 15, soit avec l'intensité maximale durant 7 minutes (IM 7).

Ces graphes permettent d'apprécier, par ailleurs, les seuils à partir desquels l'intensité de la pluie, soit par l'action de l'IM 15 soit par l'IM 30, déclenche le ruissellement et l'érosion des sols. Par station et par graphe, on note les seuils suivants :

Stations / Seuils sensibles de déclenchement de l'érosion

	IM 15 mm/h	IM 30 mm/h
Tumbaco	30	20
Cangahua	20	18
Mojanda	25	15
Riobamba	20	17

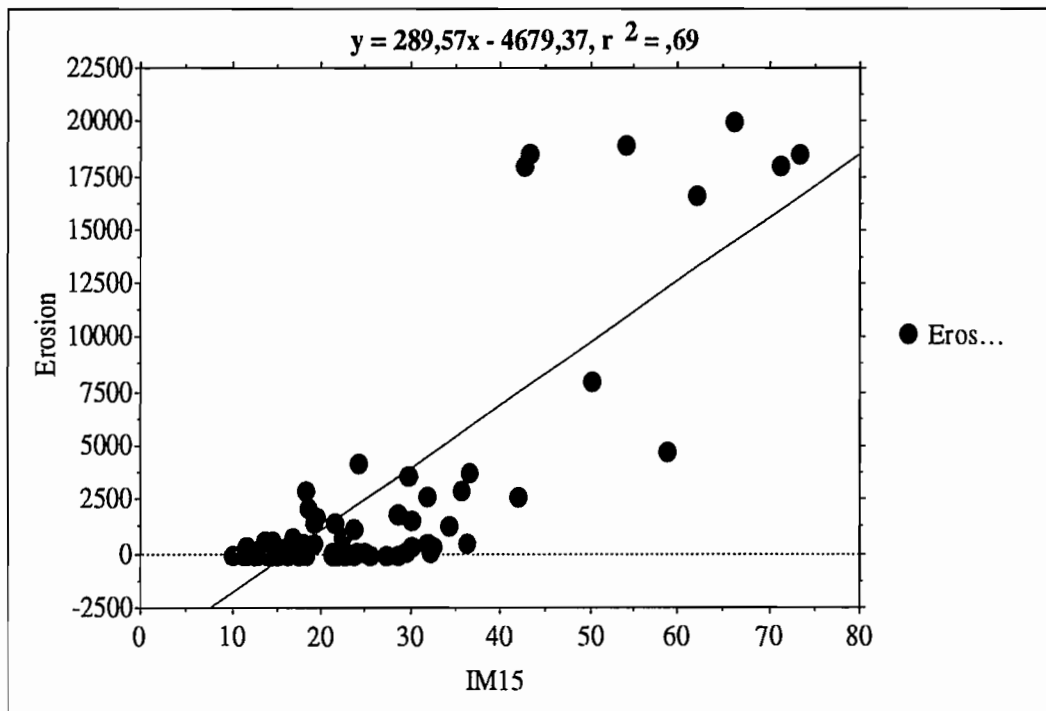
Autrement dit, des pluies inférieures à 20-30 mm/h durant 15 minutes et à 15-20 mm/h durant 30 minutes ne provoquent qu'une érosion faible. Ce sont les pluies qui dépassent ces seuils qui doivent être prises en compte pour lutter efficacement contre l'érosion⁷ En annexe 2, ont été placés quatre tableaux récapitulant les données disponibles sur les intensités. Chaque série se rapporte à une station et est

⁷ Il faut noter également que la grêle est très fréquente dans ce milieu tropical de montagne tempérée par l'altitude. On a observé sur le terrain que celle-ci a un impact à ne pas négliger sur l'érosion accélérée mais son action n'est pas quantifiable par les appareils classiques de mesure comme les pluviographes, elle est d'ailleurs d'un autre type.

Fig. n° 32

TUMBACO

Erosion = f(IM 15)



Erosion = f(IM 30)

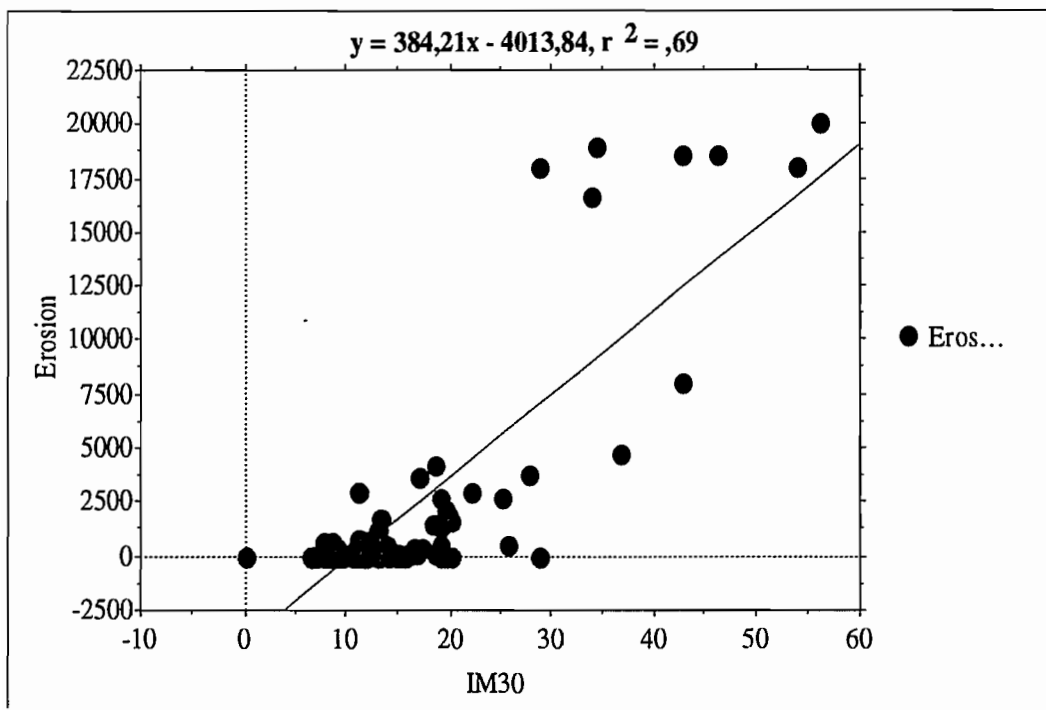
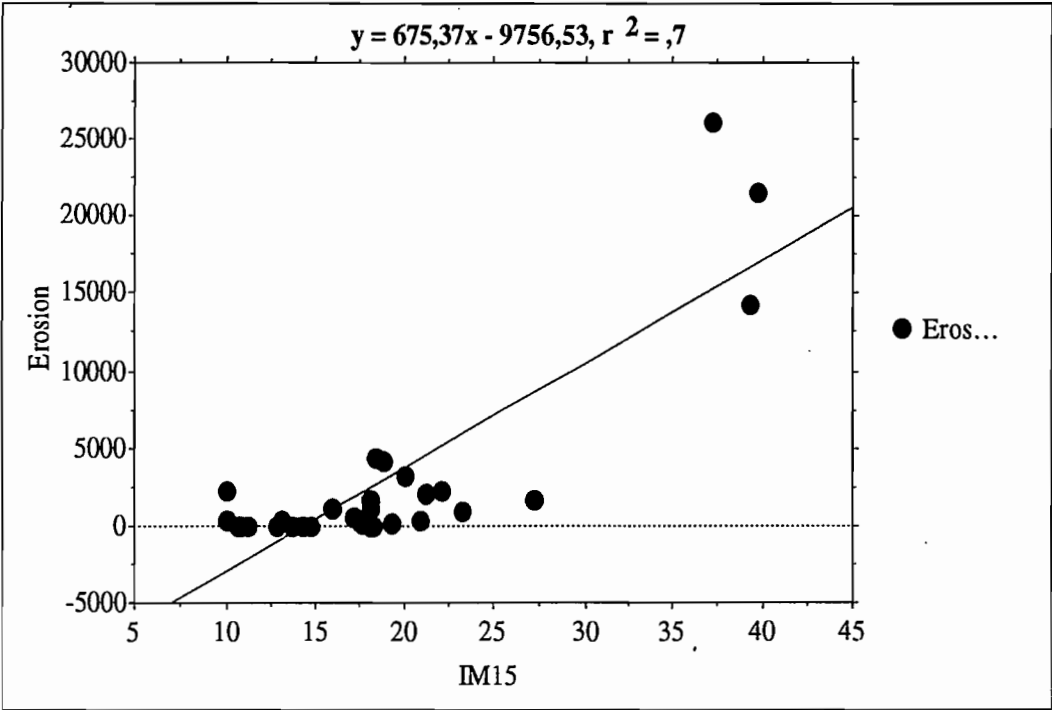


Fig. n°33

CANGAHUA

Erosion = f(IM 15)



Erosion = f(IM 30)

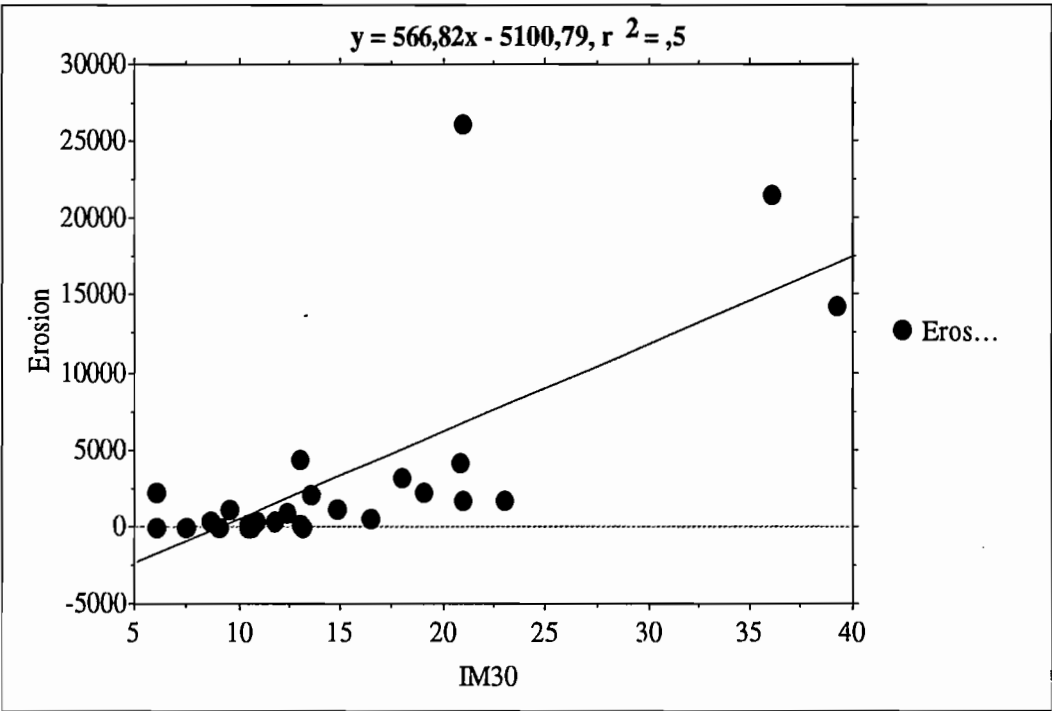
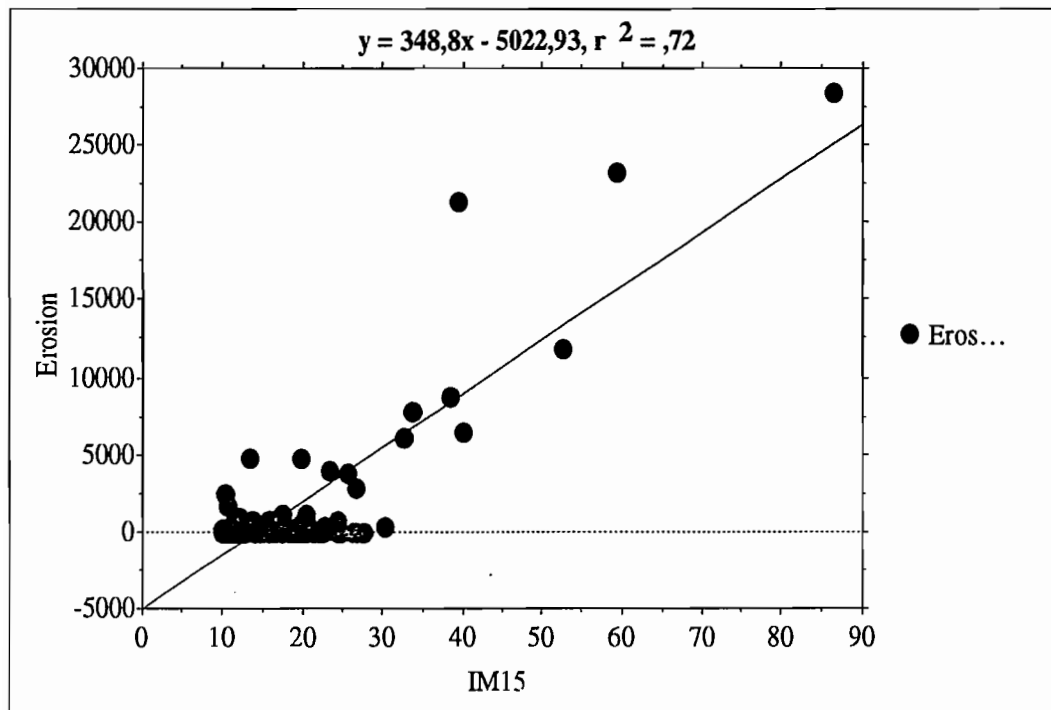


Fig. n°34

MOJANDA

Erosion = f(IM 15)



Erosion = f(IM 30)

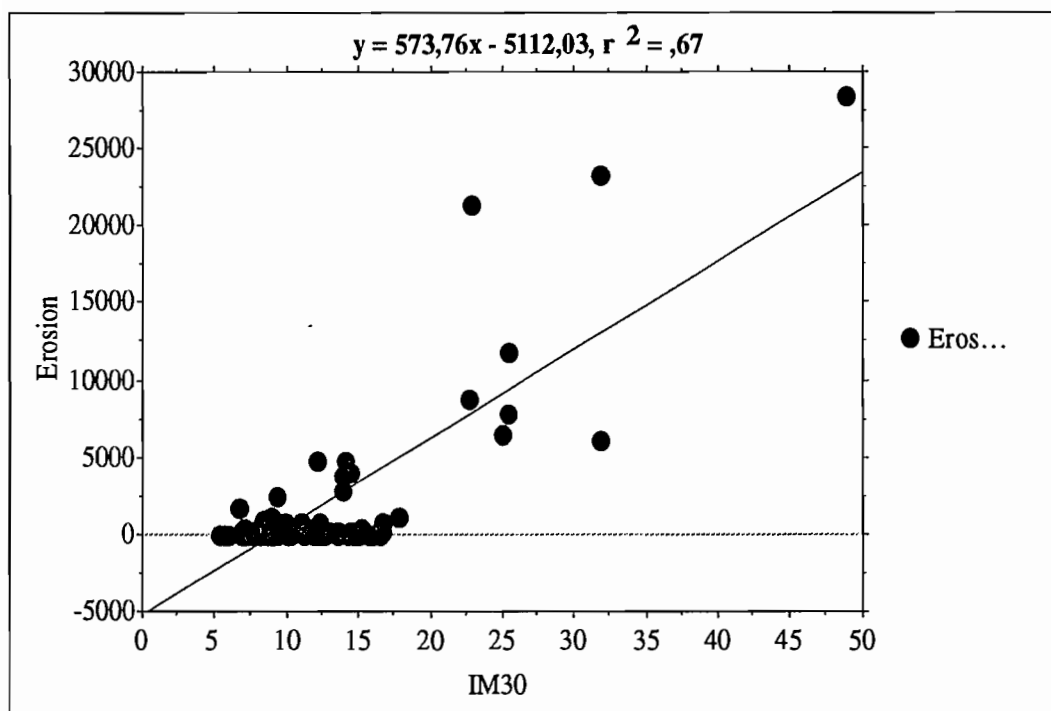
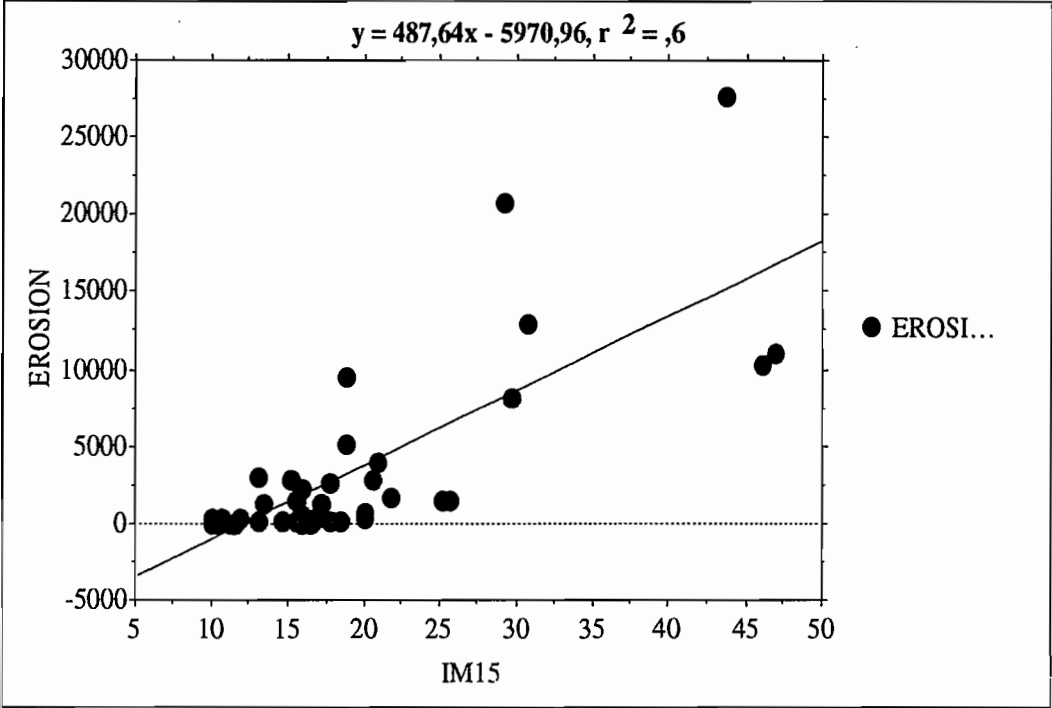


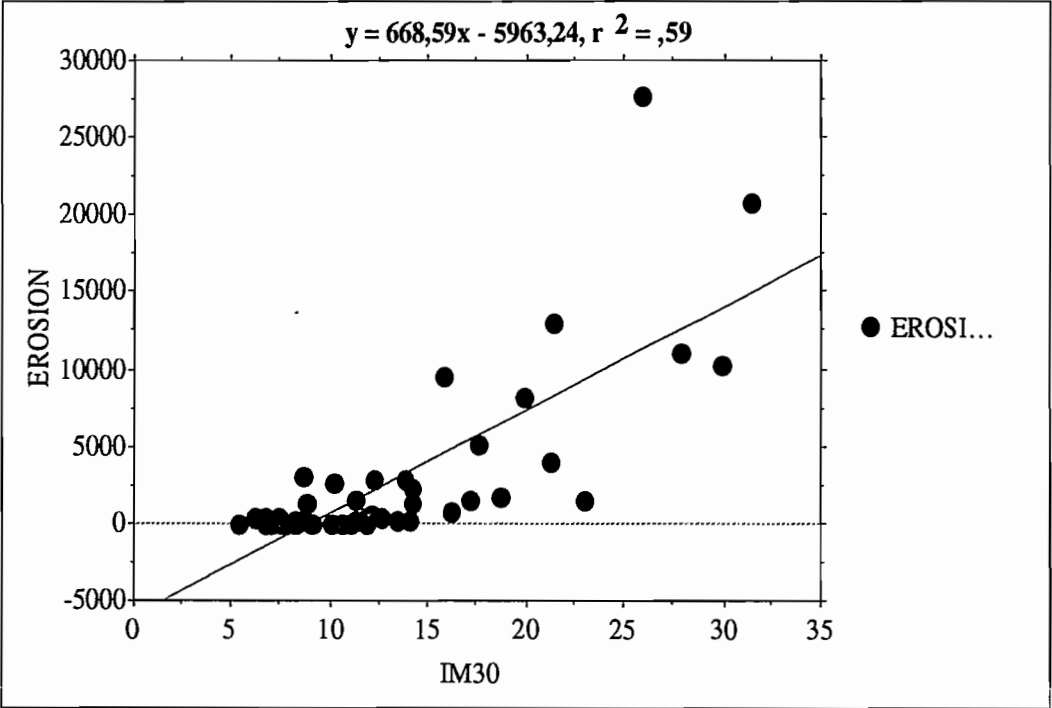
Fig. n°35

RIOBAMBA

Erosion = f(IM 15)



Erosion = f(IM 30)



rangée, par classe d'intensité de pluie en mm/h (0-1, 1-5, 5-10 > 75 mm/h), les effectifs correspondant aux intensités maximales en 15 minutes (IM 15) et en 30 minutes (IM 30) pour la période 1986-90. A la lecture de ces derniers, on remarque que les intensités supérieures à ces seuils sont quantitativement faibles. En effet, plus de 80 % des effectifs se rapportant, soit à IM 15 soit à IM 30, sont compris entre 0 et 10 mm/h et ceci pour toutes les stations (CTFT, 1966, 1970).

Il ressort de ce constat que seules quelques pluies sont responsables de la plus grande partie des pertes en terre. A titre d'exemple, un autre tableau (n° 12) figure les rapports en %, entre l'érosion due aux 5 pluies les plus érosives et l'érosion annuelle pour les stations de Tumbaco et de Mojanda. Quelles que soient les parcelles considérées dans ce tableau, les rapports moyens sur 5 années sont compris entre 69 et 79 % à Mojanda et entre 78 et 96 % à Tumbaco.

Pour pouvoir évaluer le degré d'agressivité des pluies, une tentative de comparaison a été tentée avec les intensités d'autres milieux. Pour cela, l'indice d'érosivité de Wischmeier et Smith (1978, 81), qui a été utilisé dans un grand nombre de milieux, a été envisagé. Cet indice, qui se calcule en multipliant l'intensité maximale de la pluie en 30 minutes par son énergie cinétique (valeur déterminée automatiquement à partir du tableau mis au point par Wischmeier et Smith, 1978)⁸

⁸ Nous avons utilisé dans ce cas l'IM30 et non pas l'IM15 car les autres indices disponibles et servant de comparaison ont tous été calculés avec l'IM30.

Tab. n° 12

EROSION PROVOQUEE PAR LES 5 PLUIES LES PLUS EROSIVES, (kg/ha)

STATION DE TUMBACO				P. AMELIOREE			P. TEMOIN CULTIVEE			P. TEMOIN NON CULTIVEE		
date	P en mm	somme des 5 pluies	5 pluie/P	Erosion annuelle	Erosion 5 pluies	rapport %	Erosion annuelle	Erosion 5 pluies	rapport %	Erosion annuelle	Erosion 5 pluies	rapport %
86-87	688,3	178,9	26,0	19806	19437	98,1	25019	24209	96,8	69934	62220	89,0
87-88	706,5	172,0	24,3	469	373	79,5	43528	42782	98,3	107155	84776	79,1
88-89	627,1	217,5	34,7	581	460	79,2	7246	6683	92,2	77193	62164	80,5
89-90	625,7	258,2	41,3	861	778	90,4	5753	5324	92,5	94270	85511	90,7
90-91	777,4	145,2	18,7	656	475	72,4	15147	13858	91,5	128242	79049	61,6
Moy. sur 5 ans	685,0	194,4	28,4	4474	4304	96,2	19339	18571	96,0	95359	74744	78,4

STATION DE MOJANDA				P. AMELIOREE 1			P. AMELIOREE 2			P. TEMOIN CULTIVEE			P. TEMOIN NON CULTIVEE		
date	P en mm	somme des 5 pluies	5 pluie/P	Erosion annuelle	Erosion 5 pluies	rapport %	Erosion annuelle	Erosion 5 pluies	rapport %	Erosion annuelle	Erosion 5 pluies	rapport %	Erosion annuelle	Erosion 5 pluies	rapport %
86-87	669	144	21,5	358	226	63,1	377	276	73,2	1185	860	72,6	5642	4546	80,6
87-88	886	189	21,3	368	152	41,3	241	140	58,1	1761	1350	76,7	137020	116000	84,7
88-89	1265	252	19,9	104	41	39,4	82	58	70,7	442	178	40,3	115316	103526	89,8
89-90	815	152	18,7	123	83	67,5	39	32	82,1	87	79	90,8	166261	143168	86,1
90-91	944	135	14,3	1061	971	91,5	174	118	67,8	574	474	82,6	233545	154187	66,0
Moy. sur 5 ans	916	174	19,0	403	295	73,2	182	125	68,7	810	588	72,6	131557	104285	79,3

RUSA ou R^{antér.}
Europe

Les valeurs de cet indice sont de : 90 à Tumbaco, de 60 à Cangahua, de 110 à Mojanda et à Riobamba. Comparativement, dans d'autres milieux, elles sont comprises entre (Roose, 1994) :

- 20 à 650 aux Etats-Unis (Wischmeier, Smith, 1978),
- 20 à 150, en zone tempérée (France et Europe de l'Ouest : Pihan, 1970 ; Bolline, 1982),
- 50 à 350, en milieu méditerranéen (Masson en Tunisie, Kalmann et Heusch au Maroc, Arabi en Algérie),
- 100 à 450 en zones tropicale sèche et 500 à 1200 en zone tropicale humide (Roose, 1981).

Les indices obtenus, à partir de nos quatre stations, se situent parmi les valeurs les plus faibles qui correspondent à la zone tempérée. Ce constat concorde assez bien avec nos observations sur la relative faiblesse des intensités des pluies andines et corrélativement sur l'absence de sélectivité dans les matériaux décapés par l'érosion.

L'étude des différents facteurs explicatifs de l'érosion montre qu'il est complexe de définir, en zone de montagne, de bonnes corrélations concernant le ruissellement. Par contre, il est

possible d'obtenir de bons résultats concernant les pertes en terre. Les relations érosion-pente ont révélé l'existence d'une régression simple ($\text{érosion} = f(\text{pente})$) qui explique plus de 60 % des variations de l'érosion.

On a tenté d'améliorer cette régression simple pour expliquer les 40 % restants de la variance. A cet effet, plusieurs régressions multiples ont été calculées qui font intervenir, sans à priori, toutes les variables dont nous disposons : texture du sol, matière organique et densités apparentes. De ces différents calculs, il ressort que la meilleure corrélation multiple s'établit avec l'argile (voir tab. n° 13) : on passe en effet de $\text{érosion} = f(\text{pente})$ avec $r^2 = 0,61$ et $r = 0,78$ à $\text{érosion} = f(\text{pente} ; \text{argile})$ avec $r^2 = 0,81$ et $r = 0,9$.

Il est apparu intéressant de tenter d'améliorer encore ce résultat en incluant une troisième variable. De tous les calculs effectués, c'est celui intégrant la variable "densité apparente" qui donne le résultat le plus probant. On arrive, en effet, à la régression multiple suivante : $\text{érosion} = f(\text{pente} ; \text{argile} ; \text{densité apparente})$ où $r^2 = 0,92$ et $r = 0,96$. Les coefficients de pente sont positifs pour les variables "pente et argile" et négatifs pour la variable "densité apparente" (voir tab. n° 14). Autrement dit, on peut distinguer les effets de l'érosion sur les sept stations considérées en fonction de ces trois variables : plus la pente est forte, plus le taux d'argile est élevé dans le sol et plus la densité apparente de celui-ci est faible, plus l'érosion sera importante.

Tab. n° 13

$$\text{Erosion} = f(\text{pente} ; \text{argile})$$

Stepwise Regression Y 1:Erosion 3 X variables

STEP NO. 2 VARIABLE ENTERED: X 2: Ar

R:	R-squared:	Adj. R-squared:	RMS Residual:
,9	,81	,71	14043,4

Analysis of Variance Table

Source	DF:	Sum Squares:	Mean Square:	F-test:
REGRESSION	2	3,32E9	1,66E9	8,41
RESIDUAL	4	788868168,41	197217042,1	
TOTAL	6	4,11E9		

$$\text{Erosion} = f(\text{pente} ; \text{MO})$$

Stepwise Regression Y 1:Erosion 2 X variables

(Last Step) STEP NO. 2 VARIABLE ENTERED: X 2: MO

R:	R-squared:	Adj. R-squared:	RMS Residual:
,8	,65	,47	19070,14

Analysis of Variance Table

Source	DF:	Sum Squares:	Mean Square:	F-test:
REGRESSION	2	2,65E9	1,33E9	3,64
RESIDUAL	4	1,45E9	363670301,29	
TOTAL	6	4,11E9		

$$\text{Erosion} = f(\text{pente} ; \text{limon})$$

Stepwise Regression Y 1:Erosion 2 X variables

(Last Step) STEP NO. 2 VARIABLE ENTERED: X 2: Limon

R:	R-squared:	Adj. R-squared:	RMS Residual:
,78	,61	,41	20022,21

Analysis of Variance Table

Source	DF:	Sum Squares:	Mean Square:	F-test:
REGRESSION	2	2,5E9	1,25E9	3,12
RESIDUAL	4	1,6E9	400889092,17	
TOTAL	6	4,11E9		

$$\text{Erosion} = f(\text{pente} ; \text{sable})$$

Stepwise Regression Y 1:Erosion 2 X variables

(Last Step) STEP NO. 2 VARIABLE ENTERED: X 2: Sg+Sf

R:	R-squared:	Adj. R-squared:	RMS Residual:
,82	,68	,52	18194,1

Analysis of Variance Table

Source	DF:	Sum Squares:	Mean Square:	F-test:
REGRESSION	2	2,78E9	1,39E9	4,2
RESIDUAL	4	1,32E9	331025426,73	
TOTAL	6	4,11E9		

Tab. n° 14

$$Erosion = f(pente ; argile ; DA)$$

Stepwise Regression Y 1:Erosion 3 X variables

STEP NO. 1 VARIABLE ENTERED: X 1: Pente

R:	R-squared:	Adj. R-squared:	RMS Residual:
,78	,61	,53	17941,67

Analysis of Variance Table

Source	DF:	Sum Squares:	Mean Square:	F-test:
REGRESSION	1	2,5E9	2,5E9	7,75
RESIDUAL	5	1,61E9	321903605,68	
TOTAL	6	4,11E9		

Stepwise Regression Y 1:Erosion 3 X variables

STEP NO. 2 VARIABLE ENTERED: X 2: Ar

R:	R-squared:	Adj. R-squared:	RMS Residual:
,9	,81	,71	14043,4

Analysis of Variance Table

Source	DF:	Sum Squares:	Mean Square:	F-test:
REGRESSION	2	3,32E9	1,66E9	8,41
RESIDUAL	4	788868168,41	197217042,1	
TOTAL	6	4,11E9		

Stepwise Regression Y 1:Erosion 3 X variables

(Last Step) STEP NO. 3 VARIABLE ENTERED: X 3: DA

R:	R-squared:	Adj. R-squared:	RMS Residual:
,96	,92	,84	10582,18

Analysis of Variance Table

Source	DF:	Sum Squares:	Mean Square:	F-test:
REGRESSION	3	3,77E9	1,26E9	11,22
RESIDUAL	3	335947621,74	111982540,58	
TOTAL	6	4,11E9		

En premier lieu, la part majeure prise par la pente dans ce calcul traduit l'importance de son influence sur ce type de milieu : plus la pente s'incline, plus l'énergie du ruissellement augmente et plus l'érosion est forte. D'après les travaux de Zingg (1940), Lal (1976) Hudson (1983), Roose (1994), l'érosion croît avec l'inclinaison de la pente car l'énergie cinétique du ruissellement augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 15 % ce qui est bien le cas des sept stations étudiées.

Les deux autres variables, se rapportant au sol et à sa teneur en "argile" et à sa "densité apparente", trouvent également une place cohérente dans cette régression multiple. En effet, si on revient sur notre hypothèse d'explication concernant le manque de sélectivité dans les sédiments érodés, on peut conclure que le sol est essentiellement décapé par l'érosion sous forme d'agrégats. On peut donc penser que la part prise par l'argile dans la régression multiple souligne son rôle en tant qu'agent agrégeant les particules de sol. En outre plus un agrégat est léger, plus sa sensibilité à la flottaison est élevée et plus il est entraînable par le ruissellement, c'est ce qu'exprime la place tenue par la troisième variable "densité apparente" dans la régression multiple.

D'un point de vue appliqué à la lutte anti-érosive, il est clair que l'intervention sur le facteur pente est un point primordial à considérer pour essayer de diminuer et de dissiper l'énergie du ruissellement. Cette énergie est libérée par la fonction de

transfert du ruissellement, autrement dit par la circulation de l'eau sur le versant.

Néanmoins avant que cette eau ne se mette en mouvement, certaines conditions doivent être réunies pour qu'apparaisse le ruissellement. Ces conditions sont régies par la fonction de production du ruissellement qui s'opère au niveau du sol et qui traduit le comportement du sol à la pluie. Dans le domaine de la lutte anti-érosive, il est donc utile également d'agir sur la naissance du ruissellement de telle façon à retarder son apparition et à diminuer son débit. Les parcelles de ruissellement n'ayant pas permis d'appréhender le comportement du sol au sens strict, sinon mêlé à d'autres variables, on a eu recours à la simulation de pluies pour préciser cet aspect.

3) APPORT DE L'EXPERIMENTATION PAR LES PLUIES SIMULEES

A partir des parcelles de ruissellement, il n'a pas été possible d'apprécier le comportement du sol que par le biais de régressions où l'érosion et les IM 15 et IM 30 sont bien corrélées linéairement. Bien que l'agressivité des pluies andines soit estimée faibles dans l'ensemble, il est apparu que l'action de quelques pluies pouvaient mobiliser des particules de sol entraînaibles par le ruissellement. Néanmoins, il n'a pas été possible de préciser le comportement des sols de chacune des stations.

L'appréciation de ce comportement est utile parce qu'il participe directement à la fonction de production du ruissellement et qu'en intervenant à ce niveau, on peut espérer modifier la dynamique du ruissellement. Globalement, le sol se situe au centre du système qui règle le bilan infiltration/ruissellement de l'eau de pluie : un sol montre un refus à infiltrer quand il est engorgé et saturé d'eau ou quand il est battant. Lorsque ces conditions sont réunies, l'intensité de la pluie dépasse l'intensité d'infiltration de l'eau dans le sol, le ruissellement se produit et son action peut se déclencher alors sur le versant.

Pour pouvoir caractériser la susceptibilité des sols des sept stations à la naissance du ruissellement, le choix de l'expérimentation s'est tourné vers la simulation de pluie".

3.1. Dispositif et protocole

Le simulateur de pluie de type ORSTOM est constitué d'une tour pyramidale de 4 mètres de hauteur qui peut recevoir une bâche pour éviter les effets du vent durant les essais. Au sommet de cette tour, se trouve un gicleur calibré, monté sur un bras mobile permettant d'arroser une aire d'environ 4 m². Un dispositif a été prévu pour maintenir, quelle que soit la pente, l'axe d'oscillation du gicleur au-dessus du centre d'une micro parcelle de 1 m², matérialisée par un cadre métallique qui limite la zone d'étude. Les intensités peuvent varier de 15 à 140 mm/h, en fonction du réglage choisi. L'ensemble est facilement transportable dans un véhicule léger et nécessite environ 2 heures à 4 personnes pour monter l'appareil et préparer le premier essai. Une quantité d'eau d'environ 500 litres est nécessaire pour réaliser un essai d'une heure (voir fig. N° 36 + photo).

Cet appareil offre donc des avantages intéressants : l'obtention d'énergies cinétiques proches de celles des pluies naturelles, une gamme étendue d'intensités et la possibilité de faire varier celles-ci au cours des simulations.

Néanmoins, il convient de redire que cette approche ne constitue qu'un complément aux observations réalisées sur les parcelles et qu'elle n'est adaptée que partiellement à un milieu de montagne où la pente est l'un des paramètres



Le simulateur de pluie utilisé est de type ORSTOM. Il est formé d'une tour pyramidale de 4 mètres de haut au sommet de laquelle se trouve le système d'aspersion. L'appareil est placé au centre d'une petite parcelle expérimentale de 1 m² de surface. Une quantité d'eau, de l'ordre de 500 litres, est nécessaire pour un essai d'une heure.

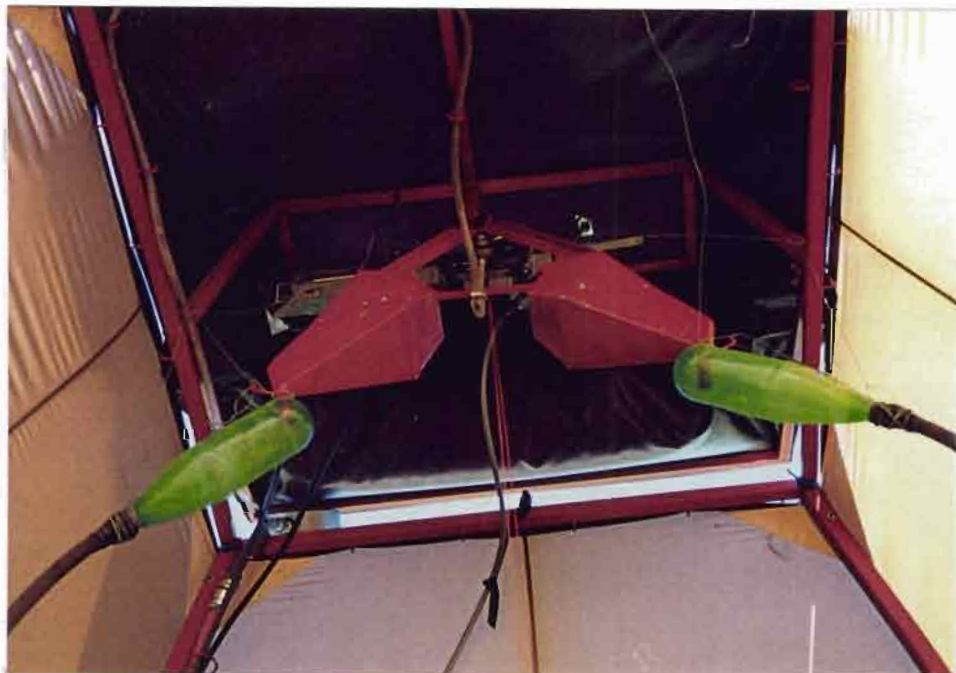
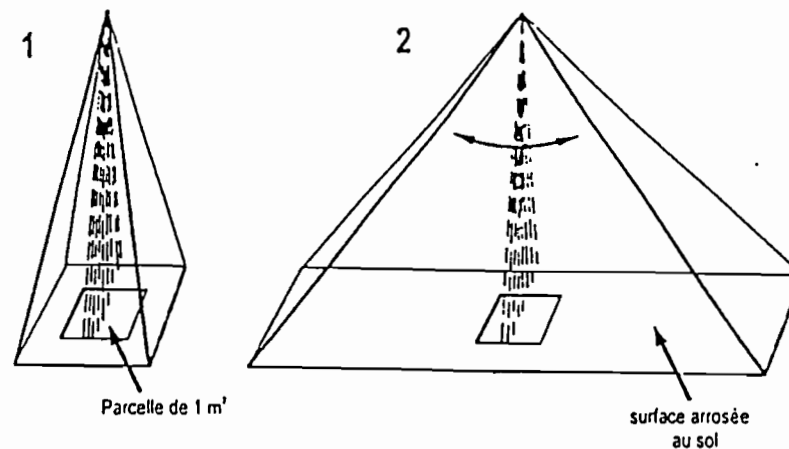
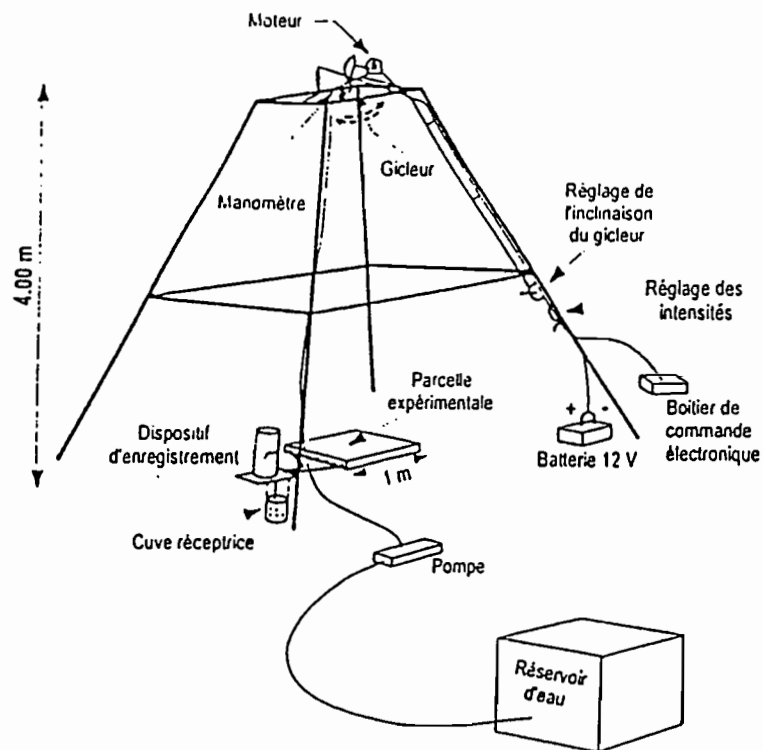


Photo rapprochée du système d'aspersion du simulateur de pluie. Il est formé d'un gicleur calibré (centre de la photo), monté sur un bras mobile, l'énergie étant fournie par une batterie de 12 volts. Les intensités, dont l'énergie cinétique est proche des pluies naturelles, peuvent varier de 15 à 140 mm.h⁻¹ selon l'angle de balancement du gicleur. Les 2 boîtes rouges permettent de récupérer l'eau lorsque le gicleur arrive en fin de balancement

Fig. n°36

La simulation de pluie : dispositif et principes de fonctionnement (d'après Asseline et al., 1978 et 93)



Angle de balancement du gicleur :

- 1 - minimum : surface arrosée au sol minimum → intensité de la pluie maximum
- 2 - maximum : surface arrosée au sol maximum → intensité de la pluie minimum

environnementaux majeurs. Sur une placette de 1 m², on ne peut reproduire qu'une partie des phénomènes mis en cause. En conséquence, l'interprétation des résultats est focalisée essentiellement sur la fonction de production du ruissellement et l'érosion n'est appréhendée qu'en terme de susceptibilité au détachement des particules de sol. (voir tab. n° 8).

Les simulations de pluies ont été effectuées sur toutes les stations, soit directement sur les deux parcelles de ruissellement témoins soit juste à proximité de celles-ci. Au total et en incluant les répétitions, plusieurs centaines de pluies ont été simulées, se répartissant de la façon suivante :

- 84 pluies sur la station de Tumbaco sur 15 micro parcelles et 143 pluies sur 27 micro parcelles de cangahua situées à quelques centaines de mètres à l'ouest de cette station,
- 70 pluies sur la station de Mojanda, sur 20 micro parcelles,
- 119 pluies sur la station de Riobamba, sur 32 micro parcelles,
- 148 pluies sur la station de Jadan, sur 33 micro parcelles,
- 143 sur la station de Vega Grande, sur 34 micro parcelles,
- et 104 pluies sur la station de Ventanas, sur 24 micro parcelles,

En fonction des objectifs appliqués de notre recherche à la lutte anti-érosive, trois conditions principales ont été prises en compte pour définir les conditions de l'expérimentation et

des protocoles communs à toutes les stations. Elles concernent respectivement le choix :

- de situations culturelles locales reproductibles sur 1 m²,
- d'intensités et de durée de pluie prenant en compte les résultats obtenus sur les parcelles de ruissellement,
- et d'une séquence pluviométrique permettant de faire varier les états hydriques des sols.

Les situations culturelles

On a retenu des situations représentatives des sites et des stations et reproductibles sur 1 m² ce qui donne les 3 cas suivants :

- le "labour ancien" qui correspond à l'état du sol sur la parcelle de ruissellement témoin cultivée. Le labour initial a été "raffaîchi" légèrement jusqu'à 20 cm de profondeur à l'aide de la houe locale qui est l'outil couramment utilisé pour ce type de travail qui donne au sol un aspect motteux moyen à grossier ;
- le "premier labour" qui reproduit les conditions d'un labour récent sur défriche. Dans tous les cas, le sol était couvert initialement soit par du pâturage soit par de la végétation herbacée. Après sarclage, le labour avec l'enfouissement des résidus est réalisé manuellement jusqu'à 20 cm de profondeur ce qui donne un état de surface motteux grossier ;

- et le "sol nu" qui correspond à l'état du sol sur la parcelle témoin non cultivée. Les mottes ont été brisées et réduites au cours du temps à des agrégats inférieurs à 1 cm et la surface du sol a été ratissée dans le sens de la pente.

Les intensités de pluie

On s'est basé, pour le choix et la durée intensités, sur l'analyse des pluies naturelles observées sur les stations de Tumbaco, Cangahua, Mojanda et Riobamba qui fournissaient des séries de données plus complètes que les autres stations. Compte tenu des régressions linéaires significatives établies entre l'érosion et les intensités IM 15 et 30, ces deux types d'intensités ont été introduits dans le protocole. Par ailleurs, deux critères essentiels ont été pris en compte pour mener à bien les essais. Le choix d'une intensité supérieure au seuil déterminé graphiquement à partir des données des parcelles de ruissellement afin d'envisager les conséquences sur la fermeture du sol. L'application d'une même hauteur d'eau sur le sol, quelle que soit l'intensité, permet de comparer les essais entre eux. On a donc choisi d'appliquer une hauteur d'eau de

15 mm par essai ce qui donne : pour l'IM 30, une intensité de 30 mm.h^{-1} durant 30 minutes et pour l'IM 15, une intensité de 60 mm.h^{-1} durant 15 minutes.

Enfin, dans l'optique de tester les limites supérieures de résistance du sol en fonction des différentes situations envisagées dans le protocole, une intensité encore plus forte, correspondant à une intensité maximale durant 10 minutes (IM 10), a été introduite. Pour une hauteur d'eau de 15 mm, l'IM 10 est équivalente à 90 mm.h^{-1} durant 10 minutes.

L'état d'humidité du sol

Enfin, on a adopté une séquence pluviométrique permettant de reproduire le rôle tenu par l'état d'humidité du sol. Pour cela, chaque intensité a été répétée au moins trois fois pour toutes les situations - sur sol sec, sur sol humide et très humide. Une première pluie a été effectuée sur un sol qui n'a pas reçu de pluie depuis au moins 10 jours et dans quelques cas rares depuis 6 à 5 jours. Cet état reproduit un sol se trouvant dans des conditions sèches, relativement proches de celles rencontrées en période estivale lors des orages d'été. Selon les stations, l'état d'humidité du sol au champ est comprise entre 10 et 20 %.

Une seconde pluie est simulée une heure environ après la précédente (de 15 à 30 mn) et qui reproduit un état d'humidité à saturation du sol tel que ce phénomène peut se produire

lorsque la période pluvieuse est déjà bien avancée (humidités comprises entre 15 et 25 %).

Et une troisième pluie intervient, enfin, après une période de ressuyage qui dure en moyenne 24 heures, avec des périodes extrêmes comprises entre 19 et 30 heures. Elle conduit à un état d'humidité du sol comparable à un début de période pluvieuse (humidités comprises entre 25 et 30 %).

Seule la station de Ventanas sort de ce schéma avec des humidités plus fortes que sur les autres stations (voir tableau en annexe 3).

Lorsque les essais comportent ainsi 3 pluies, ce qui est le cas le plus courant, la pluie n° 2 représente l'état d'humidité maximal. Dans quelques autres cas, plus de 3 pluies ont été réalisées pour tester les limites de résistance du matériau à leurs énergies. Dans ces essais, les pluies postérieures à la pluie n° 3 (on a simulé jusqu'à 10 pluies consécutives) sont réalisées toutes les heures en moyenne. Dans ce cas, l'état d'humidité maximal ne correspond plus à la pluie n° 2 mais à la dernière pluie.

Dans la pratique pour évaluer l'état d'humectation du sol, des échantillons de sol sont prélevés, avant chaque simulation, sur 10 cm de profondeur environ. Ensuite, ils sont séchés à l'étuve à une température de 105°C, au moins pendant 24 heures.

Les données retenues

Elles correspondent aux processus majeurs qui interviennent au cours d'une averse simulée et qui se décomposent en 4 phases bien distinctes (Collinet, 1988 ; Lafforgue, 1977 ; fig. n° 37).

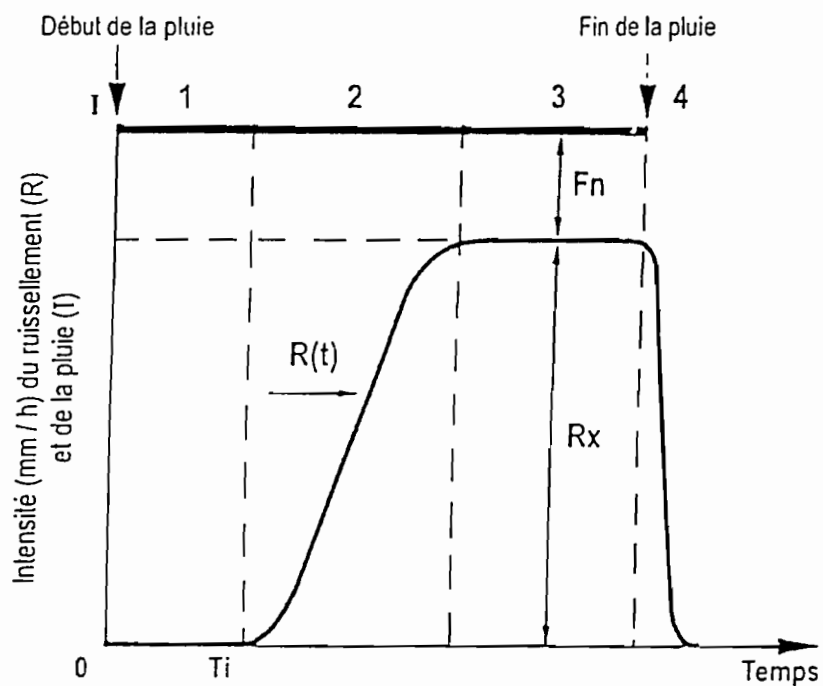
La première est une phase d'imbibition qui exprime la hauteur de la pluie qui tombe sur la parcelle sans provoquer de ruissellement. Elle se produit en début d'essai et sa hauteur est variable selon les sites. Elle exprime un double processus : un processus majeur qui traduit l'infiltration d'une grande partie de l'eau de pluie dans le sol et un autre processus, variable selon les sites, qui dépend de la capacité de l'eau à pouvoir s'accumuler dans les petites dépressions superficielles (flaques) dont la taille est fonction de la rugosité ou du microrelief de la microparcelle. En tous points de la parcelle, hormis ici ou là où les petites dépressions de surface, si elles existent, peuvent retenir un peu d'eau, la capacité d'infiltration du sol est supérieure à l'intensité de pluie. Néanmoins au fur et à mesure que la surface du sol s'humecte, l'eau de pluie qui parvient au sol finit par ne plus pouvoir être absorbée, il y a refus à l'infiltration et c'est le début du ruissellement.

*le seuil
c'est
au ruissellement*

La seconde phase est une phase à régime transitoire correspondant à l'augmentation progressive du ruissellement, en filets et en nappes, et à la diminution corrélative de la

Fig. n°37

Hydrogramme théorique de ruissellement pour une pluie d'intensité constante (d'après Lafforgue, 1977)



- 1 - Phase d'inhibition
- 2 - Phase de transition
- 3 - Phase d'écoulement permanent
- 4 - Phase de vidange

- I : intensité de la pluie
- R_x : intensité du ruissellement à régime constant
- F_n : intensité de l'infiltration à régime constant
- $R(t)$: courbe de ruissellement en fonction du temps

capacité d'infiltration du sol. L'humidité du sol augmente, l'impact des gouttes de pluie pulvérise les agrégats, les pores du sol se colmatent et les flaques débordent hors des microdépressions superficielles.

La troisième phase est celle du régime permanent, elle est atteinte à condition que l'essai dure suffisamment longtemps, elle traduit un équilibre entre le ruissellement et l'infiltration. L'intensité de ruissellement se stabilise à son niveau le plus élevé jusqu'à la fin de l'averse tandis que l'intensité d'infiltration est minimale.

Une phase de vidange survient enfin lorsqu'on arrête l'essai et que la pluie cesse. Le ruissellement, tout en se poursuivant, diminue fortement d'intensité avant de s'arrêter définitivement. L'eau qui ruisselle provient de la vidange des petites dépressions superficielles (détention superficielle récupérable). La partie de l'eau, qui ne peut s'évacuer, finit par s'infiltrer dans le sol.

Durant ces phases et en fonction des objectifs poursuivis, les variables explicatives suivantes ont été retenues :

- la pluie d'imbibition (P_i), exprimée en mm. Elle correspond à la phase d'imbibition de l'eau de pluie par le sol. Elle se situe systématiquement en début d'essai et exprime la hauteur d'eau qui s'infiltre dans le sol sans produire d'écoulement superficiel,

Non

P_i = la pluie nécessaire avant pour avoir le ruissellement
= infiltration + stockage.

- le ruissellement. Il est mesuré au cours des essais, à partir de prélèvements d'eau effectués à des pas de temps réguliers à l'exutoire de la microparcelle, et exprimé en une intensité exprimée en mm.h^{-1} . Seule sera utilisée ici l'intensité maximale qui caractérise la valeur la plus forte du ruissellement en régime permanent (R_{max}),

- l'intensité minimale d'infiltration (FN), en mm.h^{-1} . Elle représente la capacité du sol à infiltrer lorsqu'il est proche de la saturation. Cette valeur est obtenue également durant la phase de régime permanent. Durant cette phase, un régime d'équilibre s'établit entre le ruissellement et l'infiltration tant que l'intensité n'est pas modifiée. En conséquence, connaissant l'intensité (I) qui est constante et après avoir mesuré le ruissellement maximal (R_{max}), on peut déduire la valeur de FN en régime permanent considérant que : $I = R_{\text{max}} + \text{FN}$. Des variables utilisées, c'est la seule qui soit obtenue de manière dérivée par le calcul. Considérant cette manière de calculer FN dans un état proche de la saturation, on peut dire que cette valeur traduit une intensité d'infiltration sous gradient de charge hydraulique unitaire qui est assimilable à la conductivité hydraulique ou coefficient de Darcy en sol saturé (Hillel, 1974).

- les charges exportées en suspension dans l'eau. Elles indiquent, dans le contexte de l'expérimentation, la partie de l'érosion due au détachement des agrégats de sol par l'impact

des gouttes de pluie (effet " splash " ou détachabilité). Elles sont exprimées en kg.ha^{-1} . g/m^2

3.2. Les résultats des simulations de pluie

L'interprétation des résultats vise à apprécier l'influence d'un double effet : i) l'effet de la "situation culturale" sur le comportement du sol à l'impact de la pluie, ii) l'effet du "sol" sur la réponse de chaque station à ces pluies.

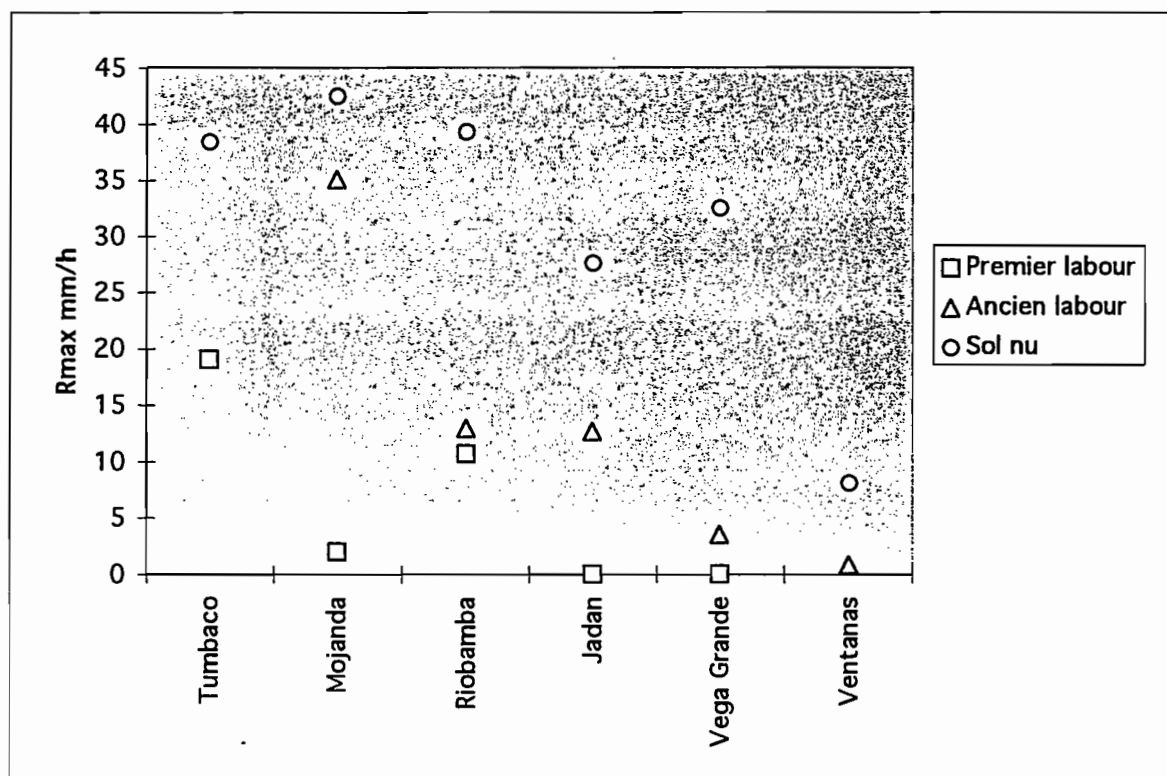
Toutes les données obtenues sous pluies simulées sont récapitulées dans des tableaux qui se trouvent en annexe 3.

L'effet "situation culturale"

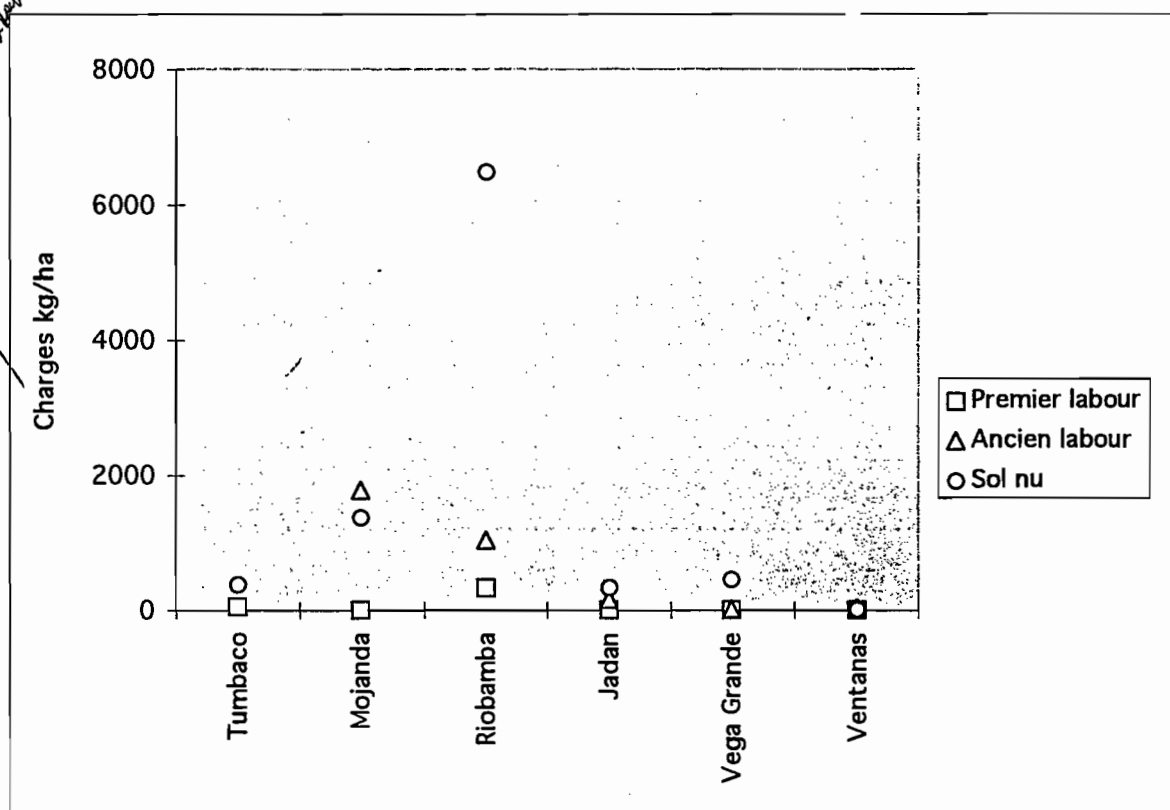
Sur la figure n° 38, on a reporté, à titre d'exemple, les valeurs de R_{max} et de charges mesurées sur un sol humide pour les situations culturales suivantes : premier labour, ancien labour et sol nu, avec $\text{IM } 15 = 60 \text{ mm.h}^{-1}$. On remarque que, quelles que soient les stations, le premier labour, symbolisé par un carré, présente les valeurs les plus proches de l'abscisse et en

Fig. n°38

*Variations de R_{max}/h et des charges par stations et par situation culturales
(sol humide, $I = 60 \text{ mm/h}$)*



Transects plots to take:



conséquence les plus faibles. Pour la variable "Rmax", les valeurs des stations de Jadan et de Vega Grande sont situées sur l'abscisse ce qui les distinguent des trois autres stations. Pour la variable "charges", les carrés de toutes les stations sont collés sur l'axe de l'abscisse, sauf Riobamba qui s'en détache très légèrement. Il n'y a pas eu à Ventanas de simulation de pluie sur la situation premier labour, on remarque, néanmoins, que la situation "ancien labour, est localisée sur l'abscisse pour les deux variables considérées ce qui la distingue de l'ensemble des autres stations.

Ces trois situations se différencient les unes par rapport aux autres essentiellement par la rugosité de leurs états de surface. Avant de débiter les essais, nous avons tenté de mesurer la rugosité de surface en évaluant sur chaque micro-parcelle de 1 m² le pourcentage de mottes. La typologie suivante a été adoptée : mottes < 1 cm, mottes de 1 à 5 cm et mottes supérieures à 5 cm. Les mesures effectuées ont fourni les données suivantes :

- le premier labour se caractérise par 80 % de mottes supérieures à 5 cm, en général de 10 à 20 cm, et 20 % de mottes entre 1 et 5 cm,
- l'ancien labour a 70 % de mottes comprises entre 1 et 5 cm, 20 % de mottes inférieures à 1 cm et 10 % de mottes supérieures à 10 cm,
- et le sol nu présente 80 % de mottes inférieures à 1 cm et 20 % de mottes comprises entre 1 et 5 cm.

En outre par rapport à ce schéma moyen, on note quelques points particuliers, sur les stations de :

- Tumbaco, les mottes se distinguent par leur résistance et montrent des efflorescences blanchâtres de carbonate de calcium. Rappelons que cette station se situe dans un environnement de cangahua dont l'induration est due essentiellement à la présence de ce carbonate;

- Jadan, le labour présente en surface de nombreux éclats de schiste. La pierrosité de surface a été évaluée en même temps qu'on procédait à la mesure de la taille des mottes, elle est de l'ordre de 30 %,

- Riobamba, le sol est sablo-ponceux et peu cohérent. La majorité des mottes est comprise entre 1 et 10 cm et moins de 1 cm. La différence entre le premier et l'ancien labour est difficilement perceptible. La faiblesse de l'agrégation de ce sol est due d'une part au pourcentage d'argile de l'ordre de 3 %, qui est le plus bas de toutes les stations, et d'autre part au taux moyen de matière organique qui est de l'ordre de 1,4 % alors que sur les autres stations, il est compris entre 2,5 et 2,9 %,

- et Vega Grande et Ventanas, se marquent par la présence de fentes de retrait avant le labour. Ces fentes sont effacées en surface par le labour mais persistent en profondeur.

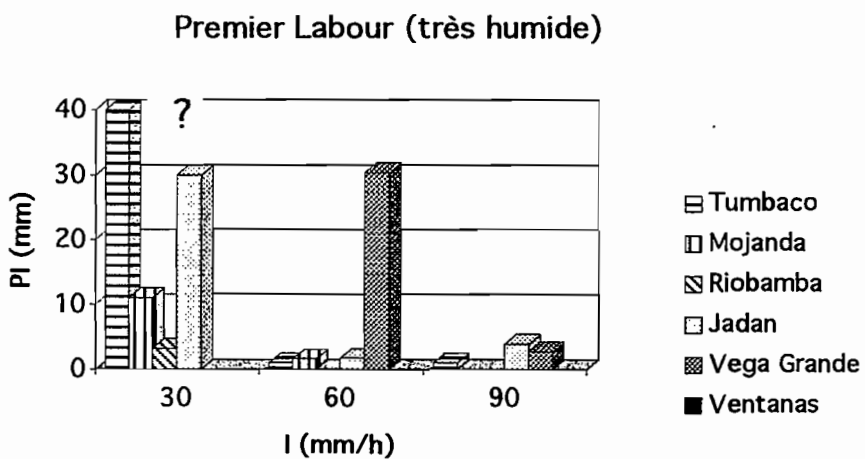
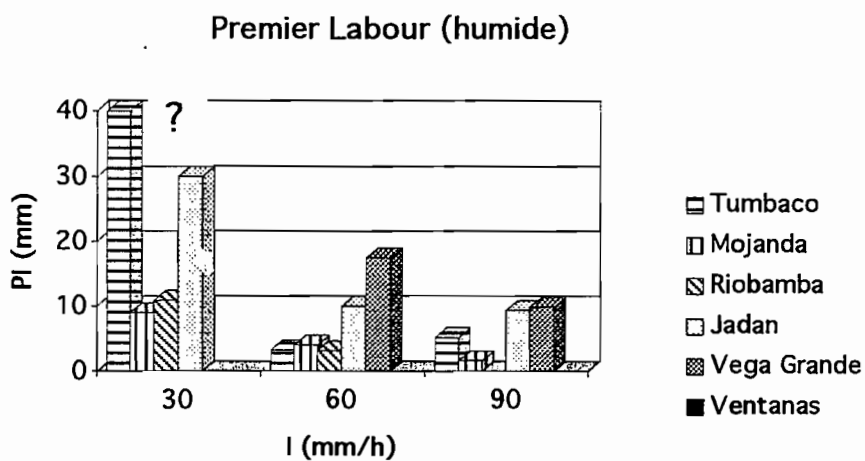
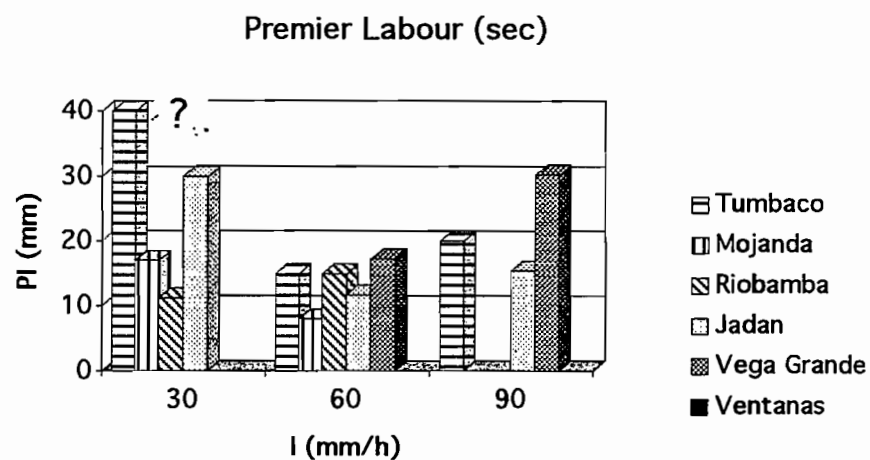
Pour apprécier l'effet de la situation culturale par le biais de la rugosité de surface, trois variables ont été utilisées - pluie d'imbibition (PI), intensité maximale de ruissellement (R_{max} en $mm.h^{-1}$) et intensité minimale d'infiltration (F_n en $mm.h^{-1}$) - qui sont des indicateurs de la dynamique de l'eau dans et sur le sol. En effet, le sol d'une station ne stocke pas les mêmes quantités d'eau en fonction du type de travail qui lui est appliqué. En principe, plus le sol est rugueux en surface, plus il est ouvert à l'infiltration de l'eau et plus il peut stocker d'eau ce qui retarde ainsi la naissance du ruissellement.

Sur la figure n° 39, on a tracé une série de 3 histogrammes, chacun d'eux montrant les variations de PI, qui traduit la capacité de stockage de l'eau par le sol, par rapport à un état d'humidité. En ordonnée, sont répertoriées les valeurs de PI et en abscisse, les 3 intensités simulées. Pour chaque variable, il est ainsi possible de suivre le comportement des sols par classe d'intensités et par type d'état d'humidité du sol. On n'a fait figurer ici que le cas des situations "premier labour et ancien labour". Les autres données se trouvent en annexe 3.

A la lecture des histogrammes, on constate que les valeurs de P_i les plus élevées, comprises entre 15 mm et 40 mm par défaut, correspondent à la situation de premier labour lorsque la pluie est appliquée en début d'essai sur un sol sec. Quel que soit l'état d'humidité du sol et pour les pluies simulées d'intensité IM 30, on remarque que les valeurs de P_i se rapportant aux stations de Tumbaco et de Jadan plafonnent

Fig. n°39

Simulation de pluie sur premier labour
Variation de la PLUIE d'IMBIBITION (PI, mm/h) en fonction de l'état d'humidité préalable et de l'intensité de pluie (I, mm/h).



respectivement à 40 mm et à 30 mm. En fait, il s'agit là de valeurs obtenues par défaut (signalées par la présence d'un point d'interrogation sur le graphe) : volontairement, on a prolongé la durée de la pluie et appliqué sur le sol - en conditions sèches, humides et très humides - des hauteurs de pluie supérieures à 15 mm (40 mm à Tumbaco et 30 mm à Jadan) sans toutefois atteindre le début du ruissellement. Rappelons que ces deux stations se distinguent des autres sites par des mottes dures pour l'une et une pierrosité de surface élevée pour l'autre.

Lorsque l'on passe à des intensités plus fortes ($IM\ 15 = 60\text{ mm.h}^{-1}$ et $IM\ 10 = 90\text{ mm.h}^{-1}$), les valeurs de P_i restent élevées à l'état sec. Elles se situent autour de 15 mm ce qui signifie que toute la pluie s'infiltre dans le sol. Par contre, lorsqu'on fait varier l'état d'humidité du sol, les valeurs de P_i baissent significativement et tendent progressivement vers des valeurs très basses ($P_i < 10\text{ mm}$ sur sol humide et $< 5\text{ mm}$ sur sol très humide). La seule exception se situe à Vega Grande où les essais sont menés sur un sol vertique peu épais, 0,25 à 0,30 m de profondeur. La présence de fentes jusqu'à la roche-mère volcano-sédimentaire imperméable favorise l'infiltration de la quasi totalité de l'eau précipitée pour tous les essais menés avec l'IM 15 comme cela a été observé pour les pluies d'intensités IM 30. Ce n'est qu'à partir du moment où le sol vertique est saturé et que les fentes sont refermées, conditions qui sont obtenues avec l'IM 10, que les valeurs de P_i commencent à varier.

Pour les deux autres situations, ancien labour et sol nu, les valeurs de P_i sont relativement proches. Les histogrammes de la situation "ancien labour" sont représentés sur la figure n° 40. Les valeurs sont comprises entre 10 et 20 mm en sec, entre 5 et 10 mm en humide et moins de 5 mm en très humide. Seule se distingue la station de Ventanas dont les valeurs, comprises entre 20 et 30 mm, restent constantes en situation d'ancien labour, quel que soit l'état hydrique tant pour l'IM 30 que pour l'IM 15. Les valeurs de P_i commencent à chuter lorsqu'on applique sur le sol l'IM 10 : les valeurs de P_i passent alors sous la limite de 20 mm en sec puis décroissent régulièrement en fonction de l'état d'humidité. Les simulations de pluie ont été réalisées à Ventanas en début de saison sèche sur une surface très rugueuse et irrégulière constituée de grosses mottes dures qui ont nécessité un travail de défonçage sur 0,20 m de profondeur. Rappelons également que le sol de Ventanas est un sol vertique comme celui de Vega Grande dont il se distingue par son épaisseur qui atteint près d'un mètre sur la station. Les fentes de retrait descendent donc ici plus profondément qu'à Vega Grande et participent activement à l'infiltration de l'eau de pluie dans le profil.

Le premier labour infiltre donc mieux l'eau de pluie que les autres situations, et en conséquence ruisselle moins. Sur la figure n° 41, on a tracé des histogrammes qui montrent les variations de P_i et de R_{max} pour les trois situations nous intéressant : premier et ancien labours et sol nu, dans le cas d'une pluie d'intensité $IM\ 15 = 60\ mm.h^{-1}$ sur un sol humide

Fig. n°40

Simulation de pluie sur ancien labour
Variation de la PLUIE d'IMBIBITION (PI, mm/h) en fonction de l'état d'humidité préalable et de l'intensité de pluie (I, mm/h).

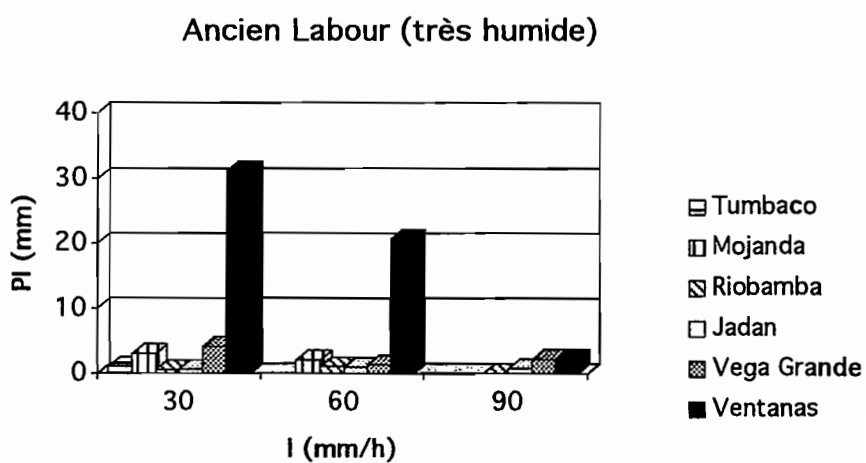
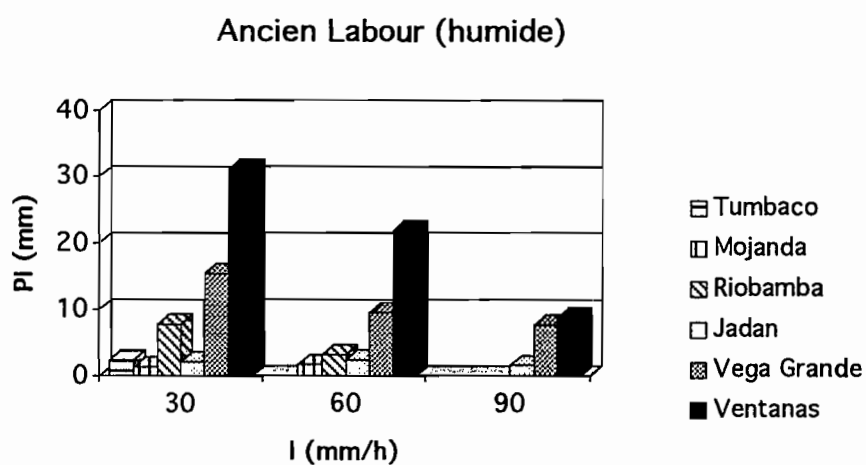
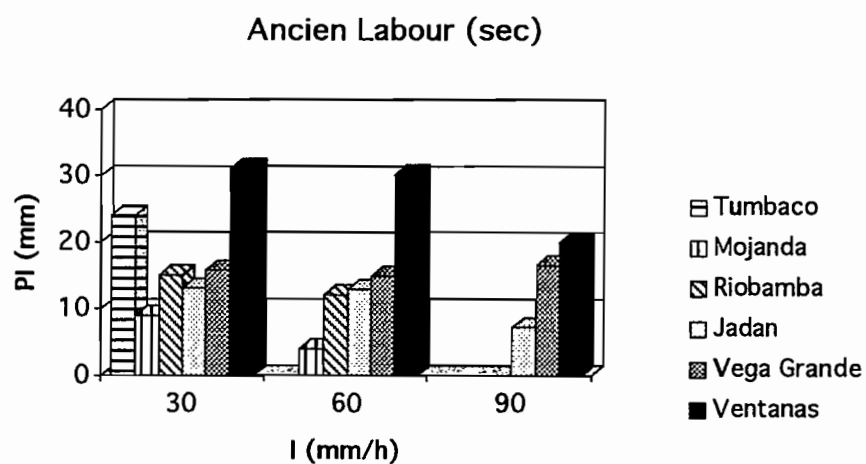
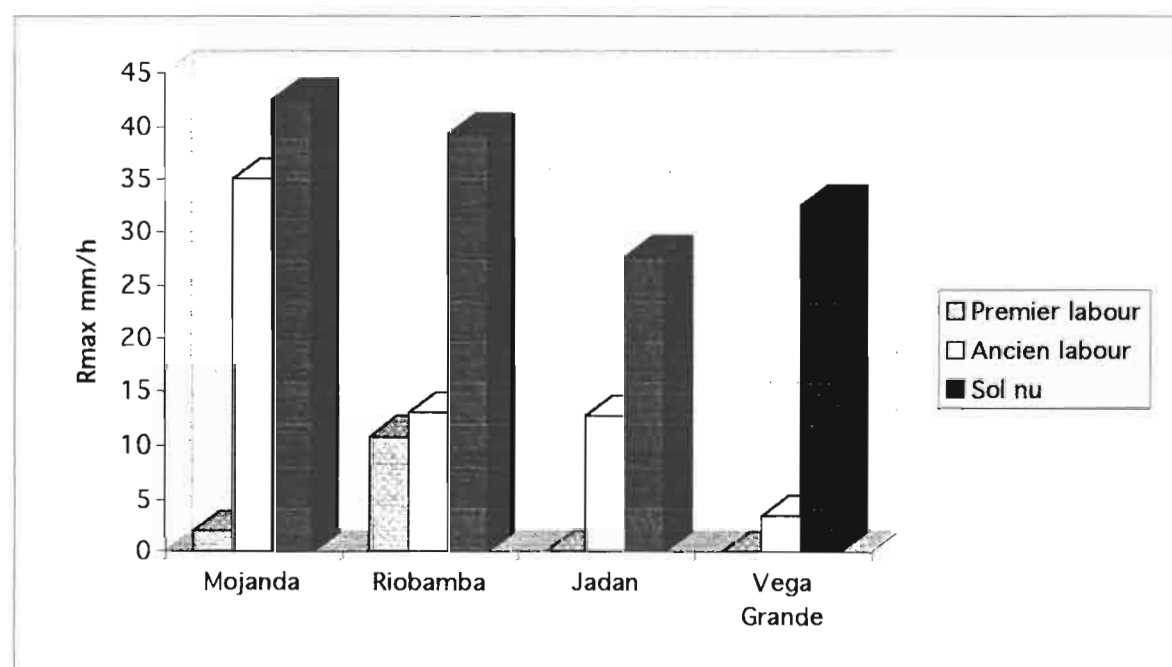
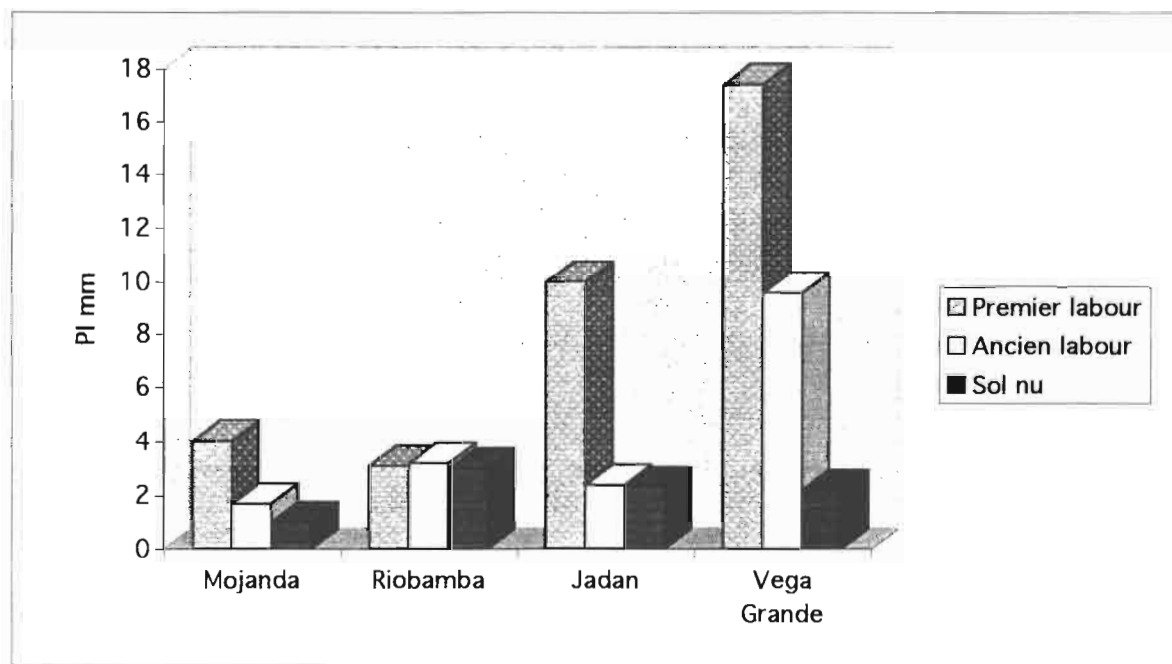


Fig. n°41

Variations de PI et Rmax (sol humide, I = 60 mm/h)



. Seules les stations, où ces trois situations ont pu être testées, sont représentées. L'histogramme du haut de la figure confirme ce que nous venons d'énoncer sur le comportement du premier labour qui affiche les valeurs de PI les plus élevées. La figure apporte une information nouvelle lorsqu'on compare cet histogramme à celui des Rmax situé au bas de la figure. On constate ainsi qu'aux valeurs de PI correspondent les valeurs de Rmax les plus faibles, dans le cas du premier labour. C'est moins net à Riobamba où, comme nous l'avons déjà noté, la rugosité de surface n'est pas assez contrastée pour pouvoir distinguer premier et ancien labours.

Pour poursuivre la démonstration, ont été représentées sur un autre graphe (voir fig. n° 42) les variations de PI et de Rmax, pour la même intensité simulée, $IM\ 15 = 60\text{ mm.h}^{-1}$ mais en prenant, cette fois-ci, le cas du sol très humide. A la différence de ce qu'on a observé sur le sol humide, on constate que les valeurs de PI sont peu différenciées entre les trois situations et qu'elles sont faibles dans l'ensemble ($< 5\text{ mm}$), hormis le cas particulier du sol avec fentes de Vega Grande. Par contre, en examinant l'autre graphe, où sont portées les valeurs de la variable Rmax, on observe, comme on l'avait noté sur le sol humide, une différence notable entre ces situations, le premier labour se distinguant une nouvelle fois par ses valeurs les plus faibles. Autrement dit pour une IM 15 de forte intensité, lorsque le sol est très humide et proche de l'état de saturation dans les trois situations, le premier labour continue à infiltrer plus d'eau que l'ancien labour et le sol nu d'où des

valeurs plus faibles de ruissellement maximal qui ne dépassent pas 10 mm.h^{-1} .

Pour apprécier de façon plus précise ce qui se passe lorsque le sol est proche de cet état de saturation, la variable F_n (intensité minimale d'infiltration en mm.h^{-1}) a été utilisée. F_n , qui résulte de la différence entre la valeur de l'intensité de pluie et celle de R_{max} et qui permet d'apprécier ainsi la capacité minimale du sol à infiltrer lorsque ce dernier est saturé et que le ruissellement a atteint son régime permanent, est dans ce cas un bon indicateur pour évaluer le comportement des différentes situations dans des conditions extrêmes.

On a exprimé par des graphes (un graphe par station, voir en annexe 3) les valeurs de F_n en fonction des intensités de pluie pour chacune des trois situations. Parmi tous les graphes construits, on a pris l'exemple des stations de Mojanda (fig. n° 43) et de Vega Grande (fig. n° 44) parce qu'elles représentent les deux principaux domaines pédologiques nous intéressant, sol andique pour l'une et sol vertique pour l'autre :

- à Mojanda, le comportement des trois situations est représenté sur le graphe par trois droites distinctes. Les points correspondent aux mesures effectuées à différentes valeurs d'intensités. Pour chaque intensité, plusieurs pluies ont été réalisées pour saturer progressivement le sol afin d'atteindre ou de se rapprocher le plus d'une valeur constante de F_n . Sur le graphe, les différentes pluies simulées par

Fig. n°42

Variations de PI et Rmax (sol très humide, I = 60 mm/h)

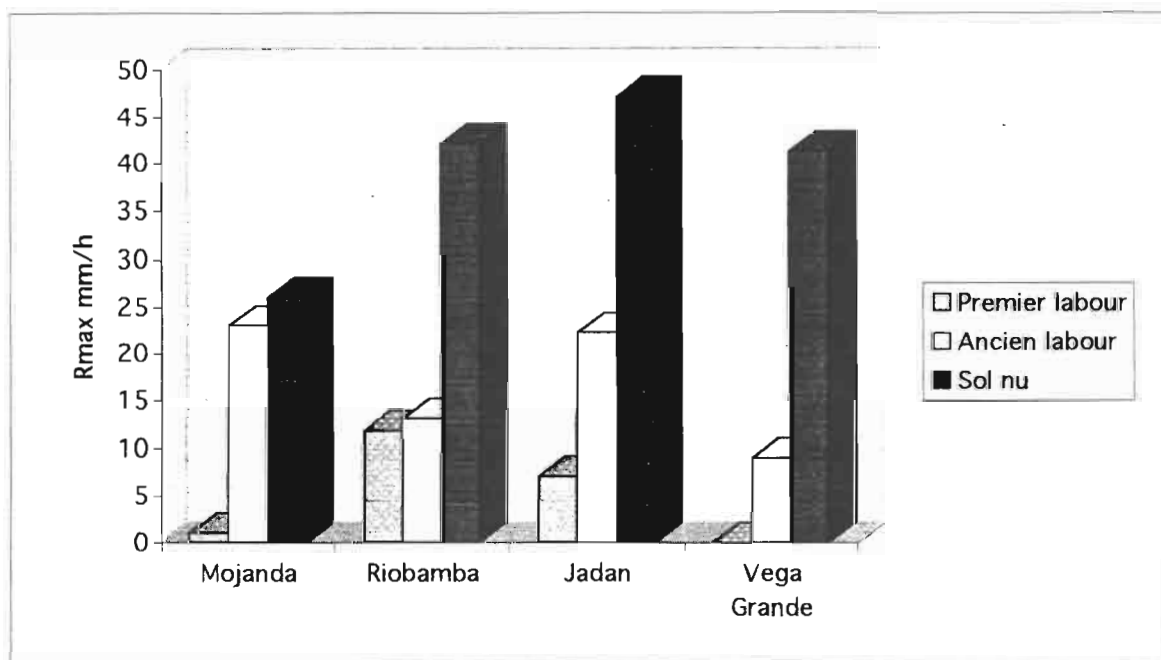
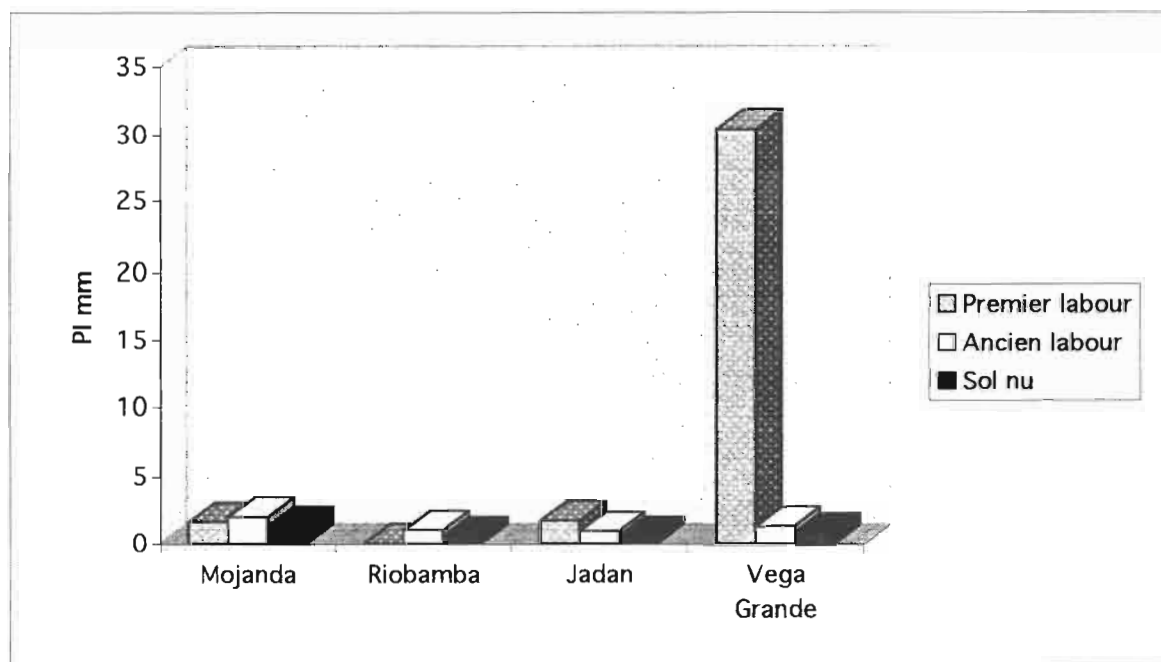


Fig. n°43

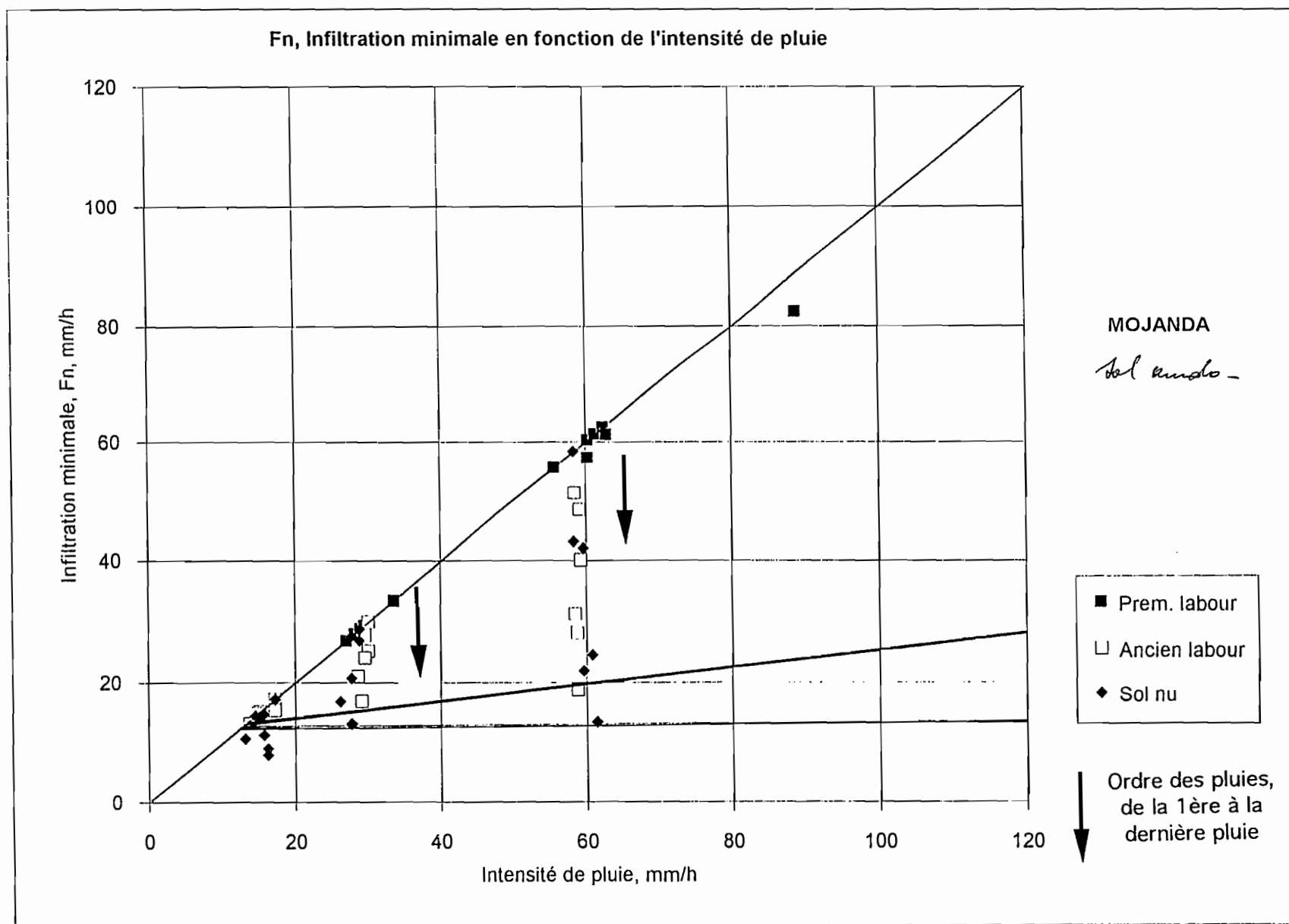
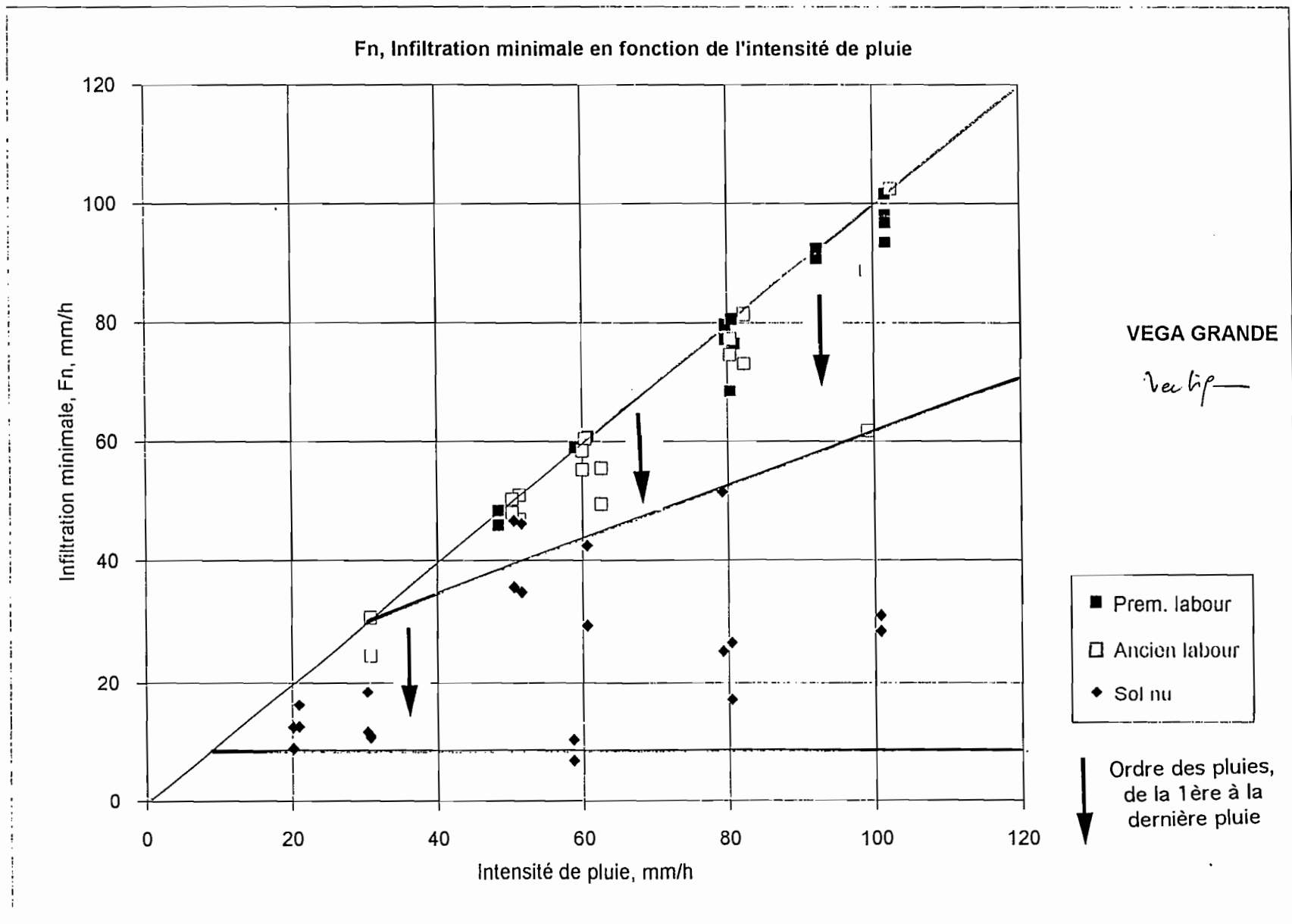


Fig. n°44



intensité sont numérotées selon un ordre croissant, depuis la première pluie jusqu'à la dernière.

La droite de plus forte pente recoupe les points (carrés noirs) qui exprime le comportement de F_n en situation de premier labour. Dans ce cas, hormis un léger décalage pour la pluie de plus forte intensité (IM 10), toute l'eau s'infiltre et on peut considérer que $F_n = 1$. L'ordre des pluies n'intervient pas : quelle que soit l'intensité, les pluies sont regroupées sans différence particulière.

La seconde droite unit les points (carrés blancs) se rapportant à l'ancien labour. Elle se distingue de la droite du premier labour par une pente moins forte qui traduit les variations des valeurs de F_n . L'ordre des pluies intervient dans ce cas. Ce sont les dernières pluies, où les valeurs de F_n sont les plus faibles et considérées comme constantes, qui ont servi de points pour tracer la droite. Seule une partie de l'eau s'infiltre et les valeurs de F_n augmentent proportionnellement à la valeur de l'intensité de pluie et à l'ordre des pluies.

Enfin, une troisième droite de pente nulle, parallèle à l'axe de l'abscisse, qui exprime ces mêmes variations sur la situation de sol nu. Ce comportement traduit que les valeurs de F_n restent constantes pour toutes les intensités correspondant à la dernière pluie simulée. On constate visuellement sur le graphe que le ruissellement continue de croître ;

- à Vega Grande, le graphe construit est voisin de l'antérieur : en effet, on distingue également trois droites représentant le comportement de chacune des situations étudiées. La droite à

la plus forte pente unit les points qui représentent le premier labour où globalement comme à Mojanda $F_n = 1$, puis vient celle qui souligne le comportement de F_n sur ancien labour et enfin on retrouve une droite parallèle à l'abscisse pour les valeurs de F_n sur sol nu. Comme précédemment, les valeurs les plus basses de F_n considérées comme constantes, qui ont servi à tracer les droites, correspondent aux dernières pluies simulées.

Par rapport à Mojanda, la pente de la droite représentant l'ancien labour est plus forte ce qui traduit des valeurs plus élevées de F_n et corrélativement un ruissellement plus faible. Outre le caractère vertical du sol de Vega Grande, rappelons aussi que le labour ancien de cette station date de deux ans alors qu'à Mojanda, le sol est cultivée depuis cinq années et a donc subi une période d'érosion plus longue.

En prenant en compte les trois variables - PI , R_{max} , et F_n - qui définissent la dynamique de l'eau dans et sur le sol, il ressort, par rapport aux trois situations étudiées et quelle que soit la station, que le premier labour se distingue par une rugosité de surface différente de celle des autres stations qui lui confère une capacité d'infiltrabilité et une disponibilité à rester ouvert plus élevées et corrélativement, une susceptibilité plus faible au ruissellement.

Le test le plus révélateur est celui où on a essayé de saturer le sol pour obtenir des valeurs constantes de F_n . Dans ces conditions extrêmes de protocole où le sol est très vulnérable



> protocole Roeser → Aveyron
agricole

> C aux protocoles de hydrologues

à la pluie, le premier labour est le seul cas où F_n =intensité de la pluie.

On peut regretter de ne pas avoir de données dans le cas du premier labour de la station de Ventanas, pour des raisons techniques liées à un mauvais fonctionnement momentané de l'appareil durant les essais. On peut penser que ce sol vertique profond, qui se comporte remarquablement en situation d'ancien labour, présente un comportement tout aussi remarquable en situation de premier labour.

Pour les deux autres situations, comme on pouvait s'y attendre, le sol est d'autant plus sensible aux gouttes de pluie que l'état d'humidité tend vers la saturation ; que l'intensité de la pluie est plus élevée. L'ordre de succession des pluies intervient également nettement. Les valeurs constantes de F_n sont obtenues avec la dernière pluie alors que dans ce cas, le ruissellement continue de croître en fonction de l'augmentation de l'intensité ; et que la rugosité superficielle du sol est moins marquée. Le sol nu et lisse est plus vulnérable que l'ancien labour.

La conséquence première d'un labour récent sur la dynamique de l'eau dans et sur le sol s'exprime dans le degré de susceptibilité du sol à s'éroder : plus les mottes sont grosses, plus le sol reste ouvert longtemps, plus il infiltre l'eau et moins il s'érode. En ce sens, le premier labour, compte tenu de ses caractéristiques hydrodynamiques particulières et de sa faible susceptibilité au ruissellement, perd très peu de terre.

Les données de charges exportées, en kg.ha^{-1} (voir tableau l'annexe 3) montrent bien que dans cette situation l'érosion est nulle ou très faible sur toutes les stations. Seul Riobamba, où le premier et l'ancien labour ne sont pas différenciés, s'écarte quelque peu de cette tendance.

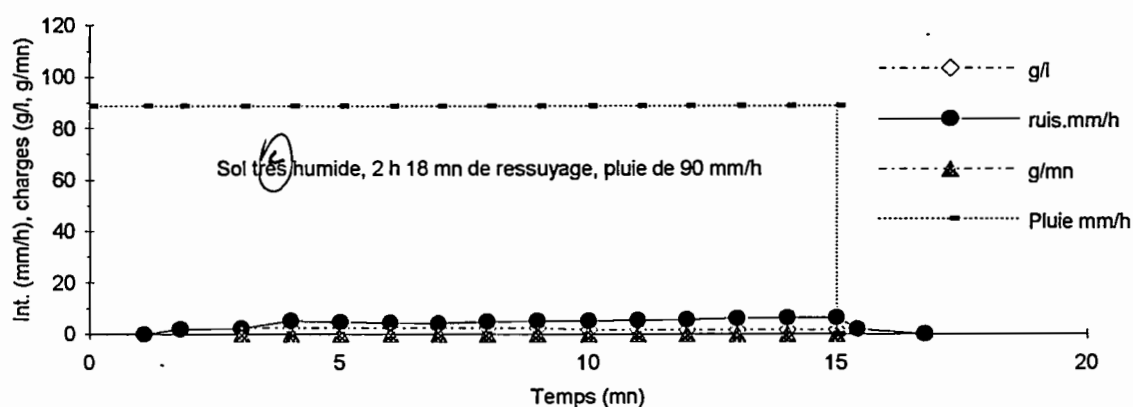
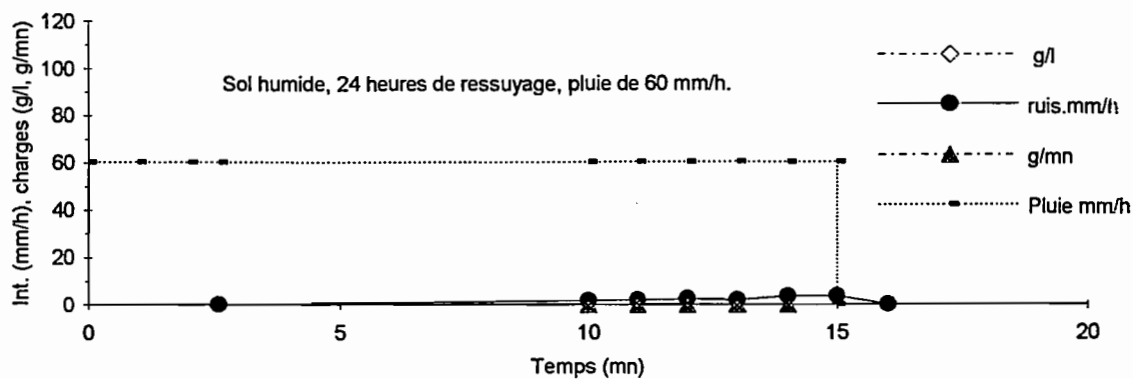
Par comparaison au premier labour, le labour ancien et le sol nu sont plus sensibles au ruissellement et montrent des pertes en terre significatives.

A titre d'exemple, les courbes de ruissellement (hydrogramme) et des charges exportées (turbidigramme) des stations de Mojanda et de Vega Grande ont été tracées (fig. n° 45 et 46). En ordonnée, les valeurs du ruissellement sont exprimées en millimètre par heure (mm.h^{-1}) et celles des charges exportées en grammes par litre et par minute (g.l^{-1} et g.mn^{-1}). On a choisi des états hydriques où le sol est humide à très humide et plusieurs pluies d'intensité, IM 15 à 60, 90 et 100 mm.h^{-1} ont été simulées. A la lecture des graphes, on constate immédiatement l'effet du premier labour (fig. n° 45) : les courbes présentent, tant pour l'eau que pour la terre, un tracé proche de l'axe des abscisses. Par contre dans le cas de l'ancien labour (fig. n° 46), le tracé des deux courbes est décollé de l'axe des abscisses ce qui traduit des pertes en eau et en terre plus élevées que sur le premier labour. On remarque aussi que le vertisol de Vega Grande, malgré l'application d'une IM 15 plus forte, 100 mm.h^{-1} contre 60 mm.h^{-1} à Mojanda, apparaît plus résistant que le sol de Mojanda. Comparativement, le sol nu est encore plus érodible que l'ancien labour (voir tableau de l'annexe 3).

Fig. n°45

**Transfert d'eau et de matière solide sous pluie constante,
en fonction de la station, sur Premier Labour.**

Station de MOJANDA



Station de VEGA GRANDE

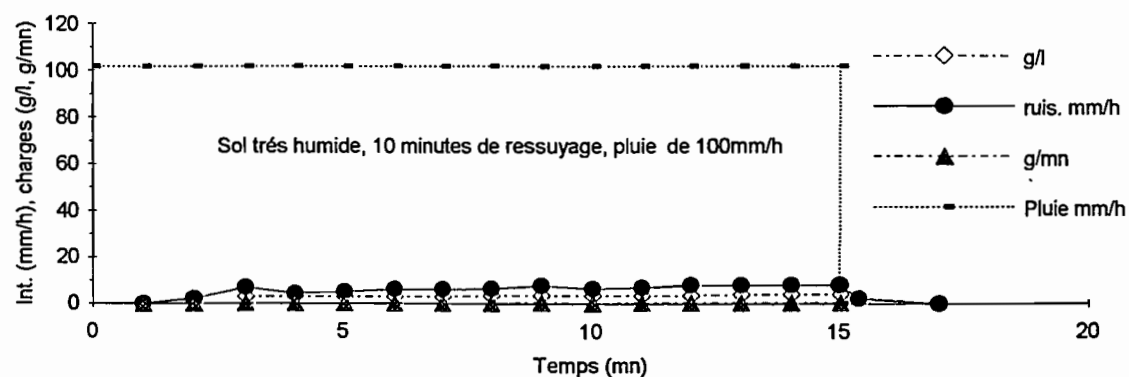
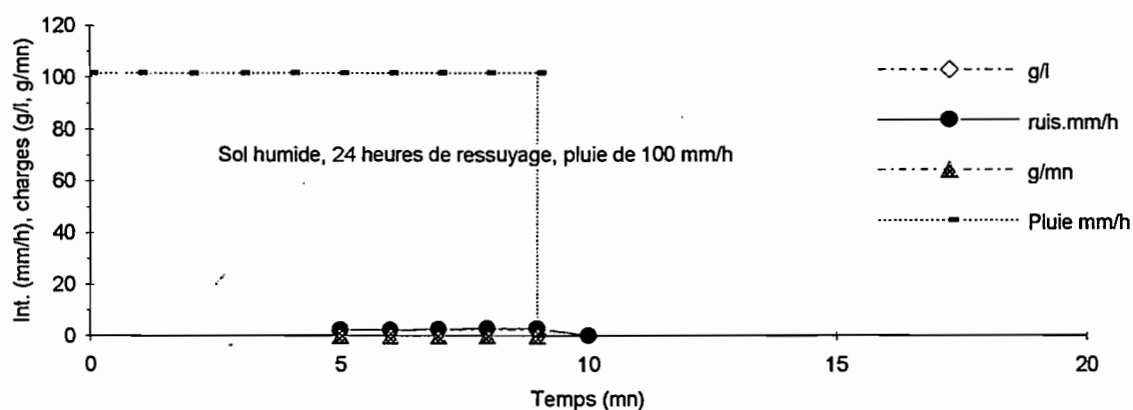
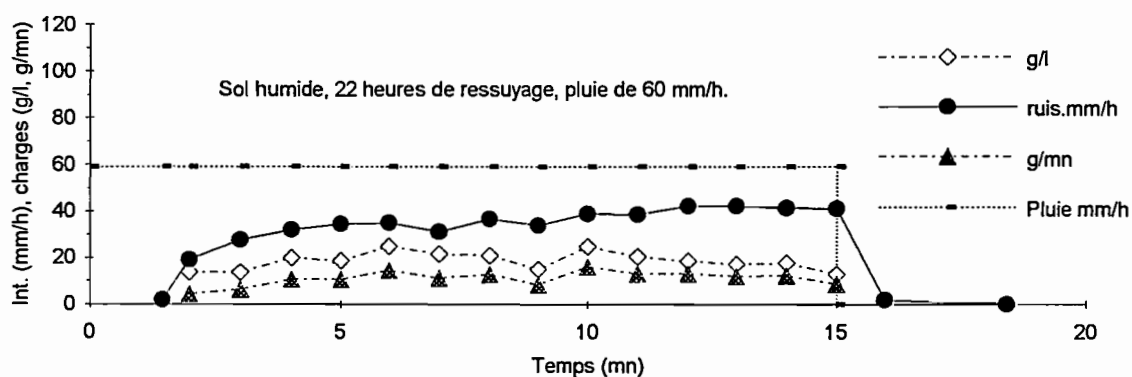
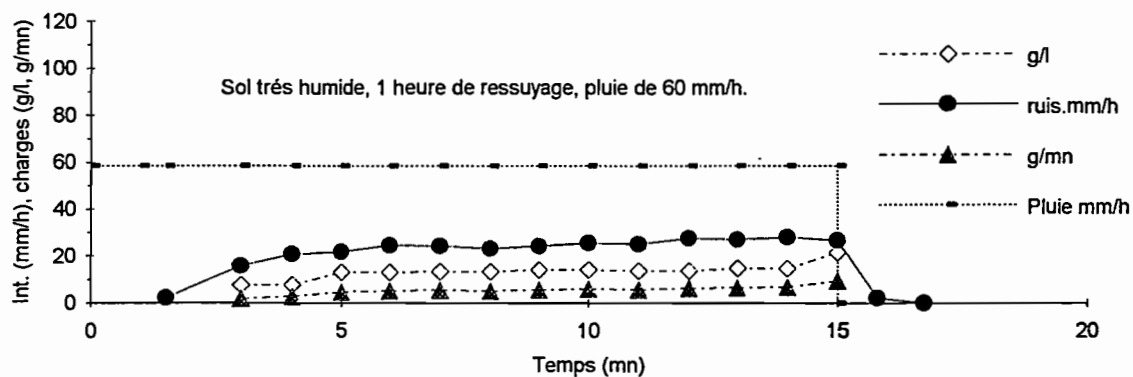


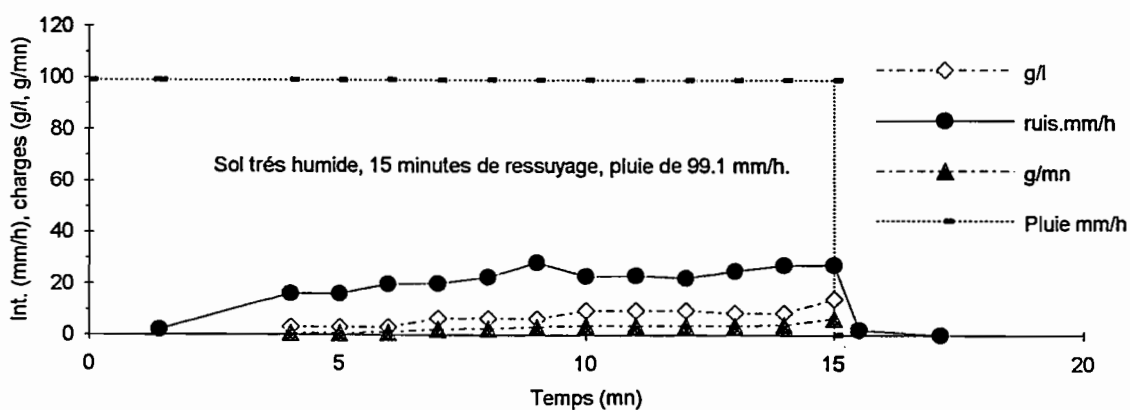
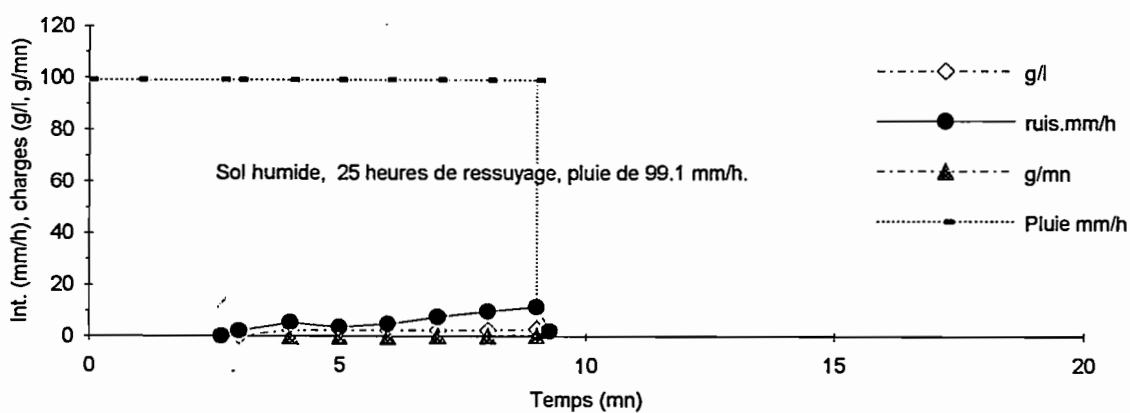
Fig. n°46

Transfert d'eau et de matière solide sous pluie constante,
en fonction de la station, sur Ancien Labour

Station de MOJANDA *Andosol*



Station de VEGA GRANDE *vertisol*



L'effet sol

Pour apprécier l'effet sol, notre analyse s'est poursuivie dans le même esprit en nous intéressant prioritairement aux données obtenues dans les conditions extrêmes de protocole où le sol est saturé, en prenant en compte l'influence tenue par la succession des pluies dans la dynamique des phénomènes. On n'a retenu que les situations ancien labour et sol nu compte tenu que le premier labour se distingue par un comportement remarquable où $F_n=1$.

Pour chaque station, on a construit une nouvelle série de graphes se rapportant à chacune de ces deux situations pour montrer les variations de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol. On a choisi une nouvelle fois, comme exemple, une intensité de pluie constante, $IM\ 15 = 60\ \text{mm.h}^{-1}$, et on a placé en abscisse les pluies simulées dans l'ordre de succession où elles ont été réalisées. La double ordonnée indique d'une part, à gauche, les valeurs de F_n et des intensités de pluies et d'autre part, à droite, les valeurs d'humidité du sol. A l'examen de ces graphes (fig. n°47 à 52), on constate que:

Fig. n°47

Variation de Fn en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol

Pluies d'intensité de 60 mm/h.

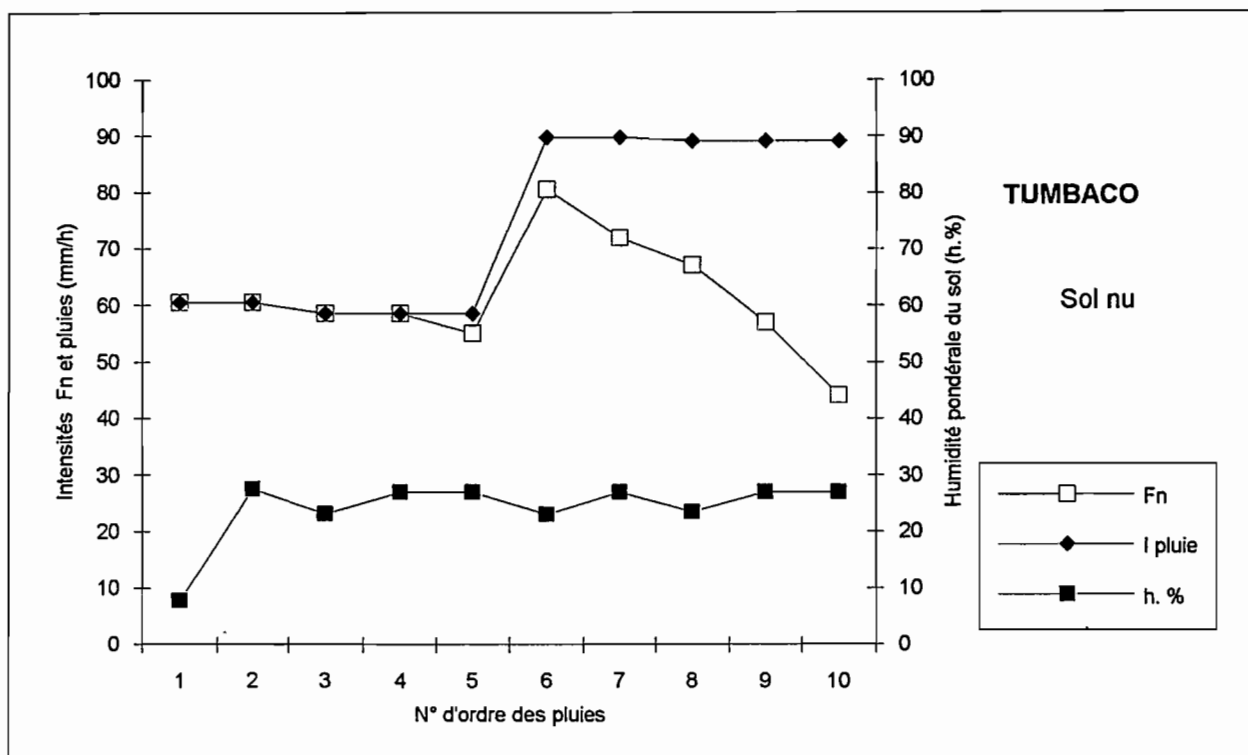


Fig. n°48

Variation de Fn en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol

Pluies d'intensité de 60 mm/h.

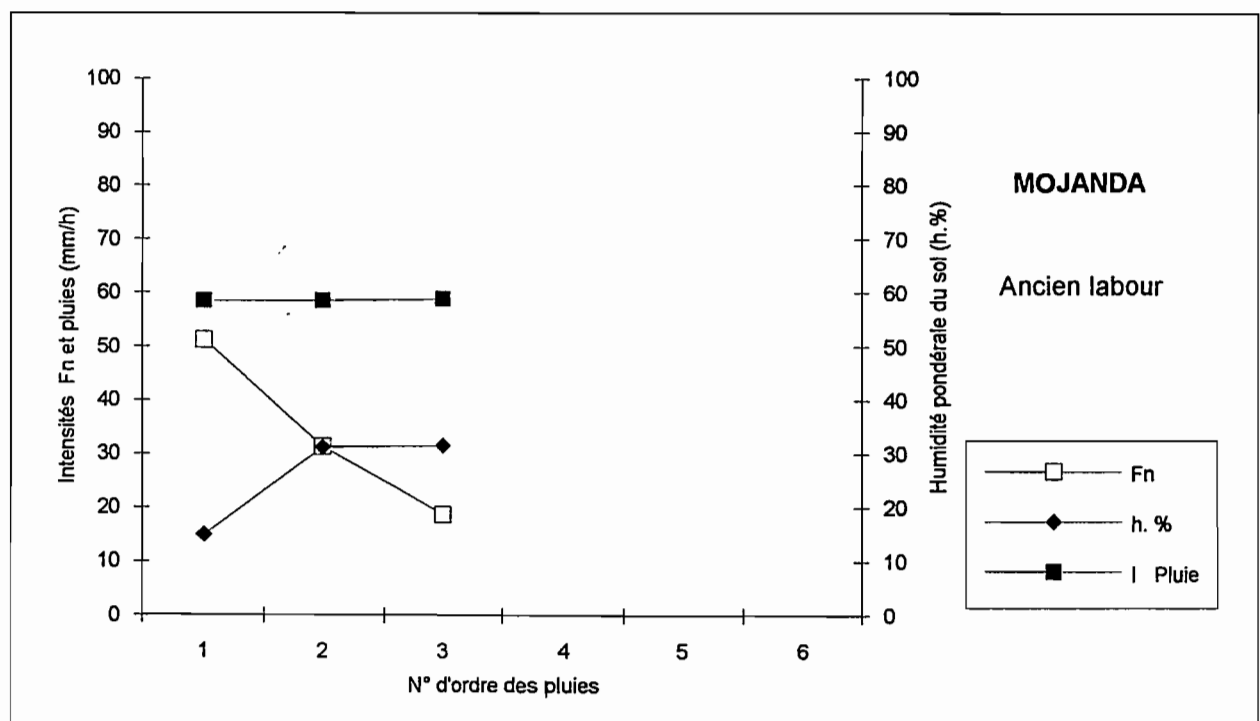
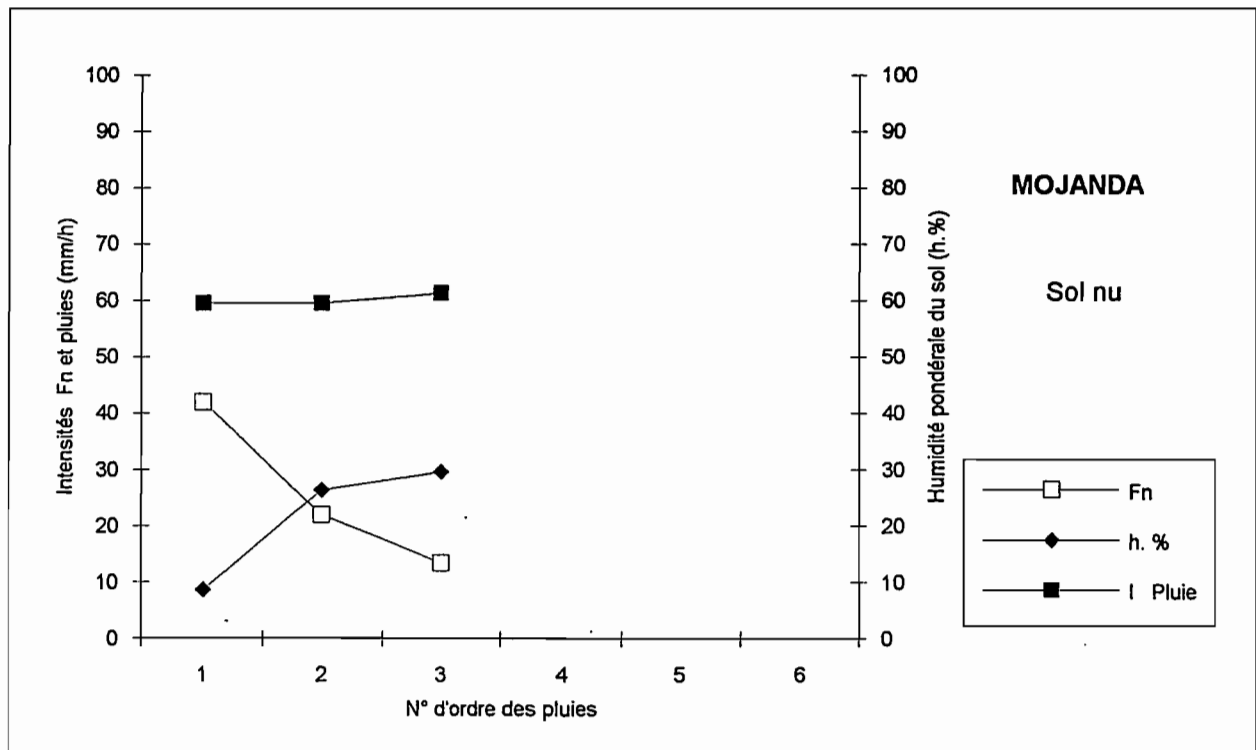


Fig. n°49

Variation de Fn en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol
Pluies d'intensité de 60 mm/h

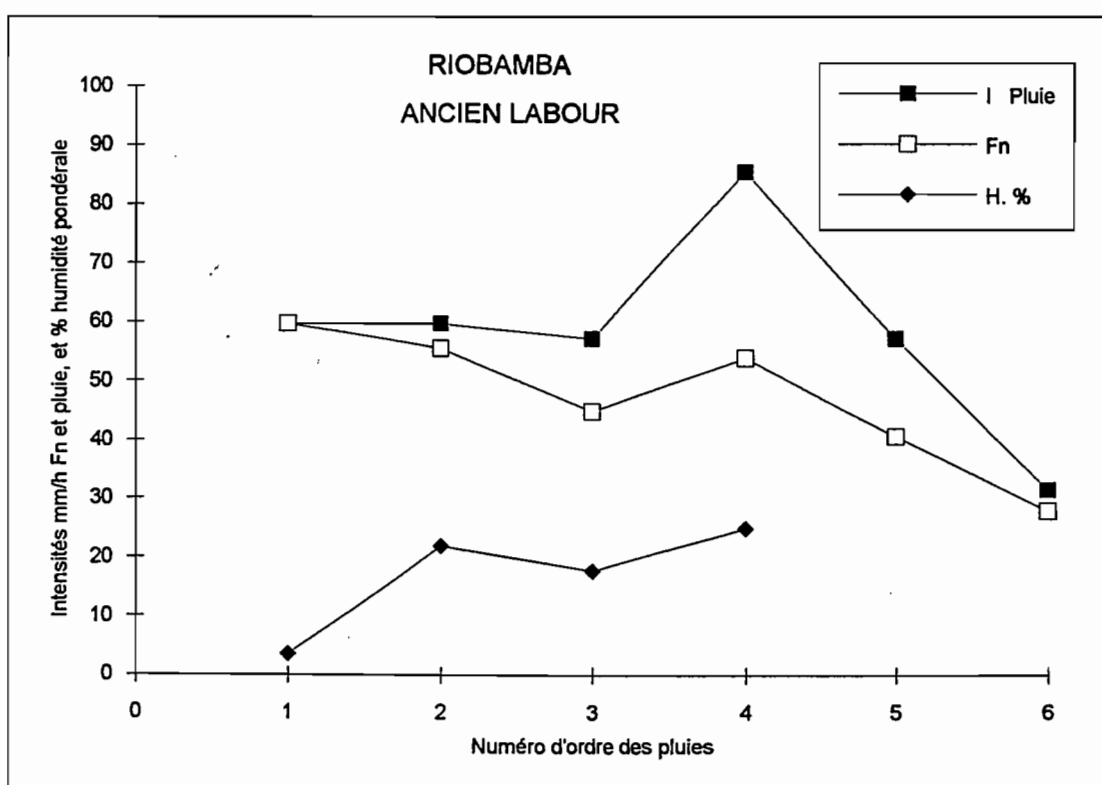
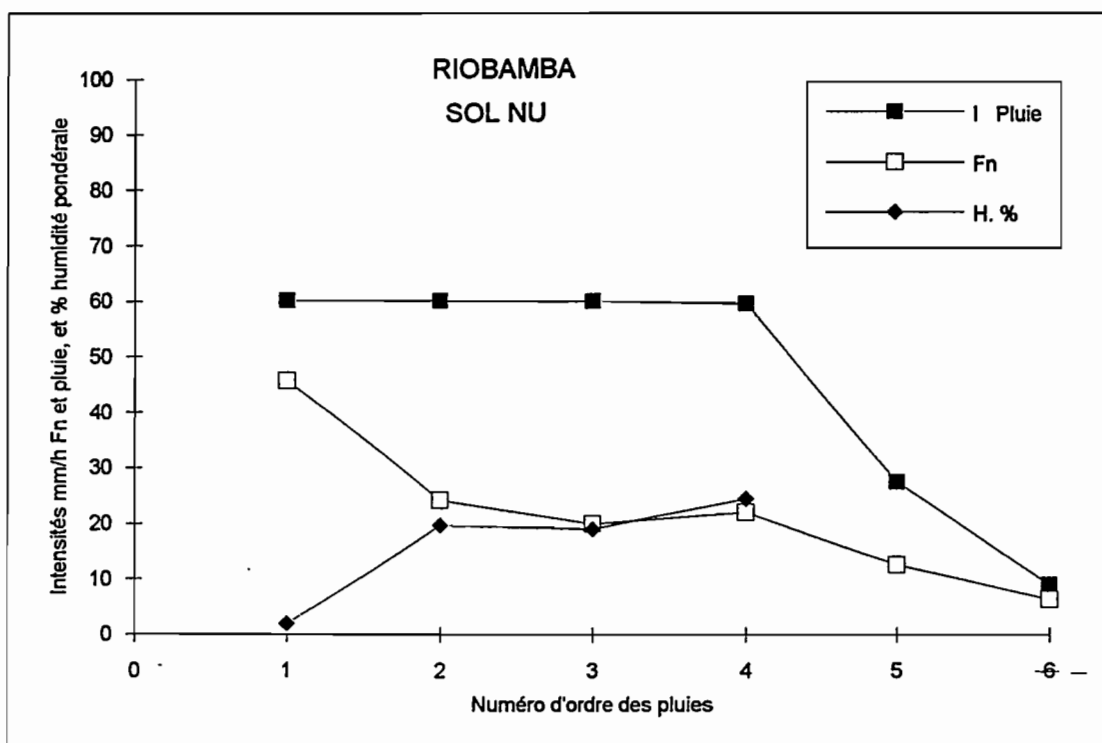


Fig. n°50

Variation de Fn en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol

Pluies d'intensité de 60 mm/h.

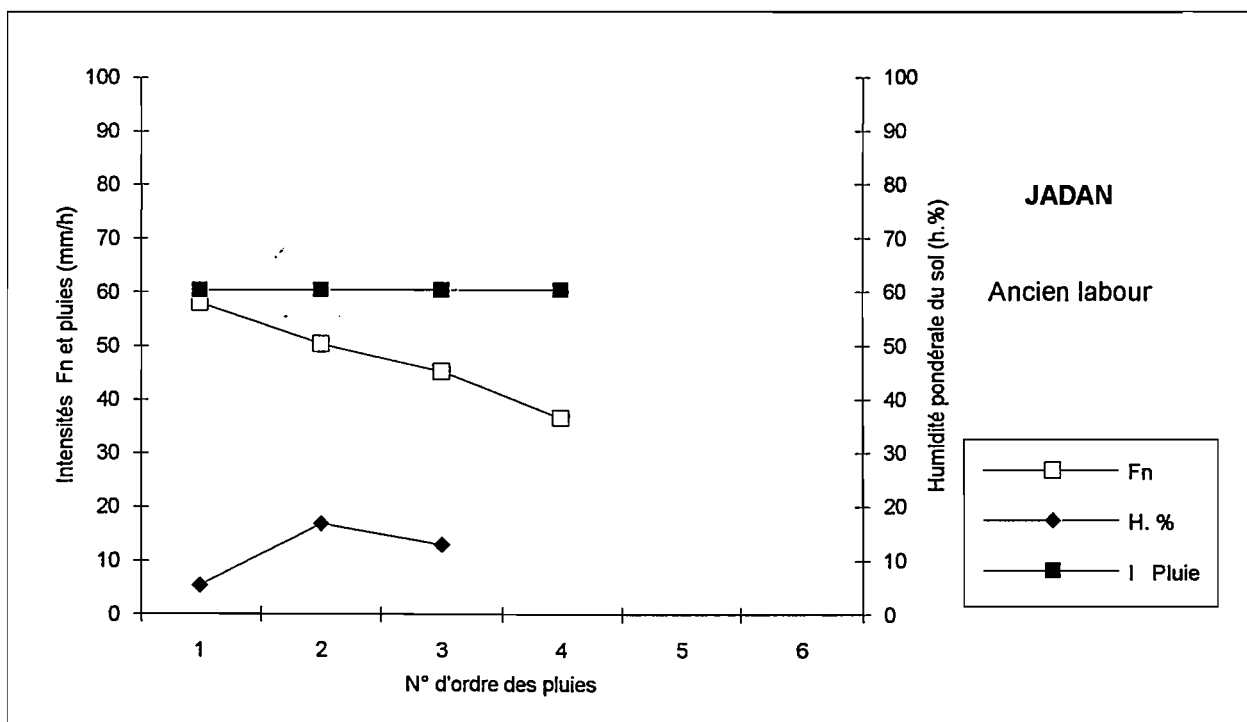
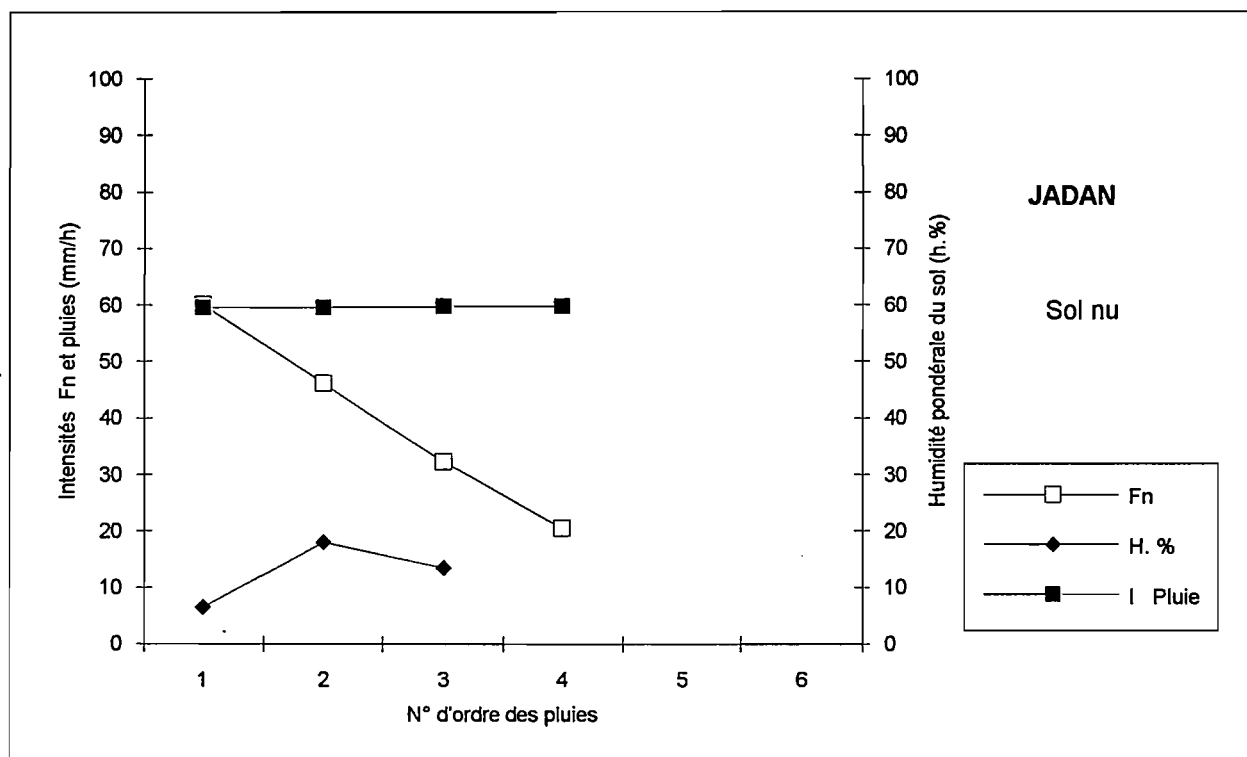


Fig. n°51

Variation de Fn en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol

Pluies d'intensité de 60 mm/h.

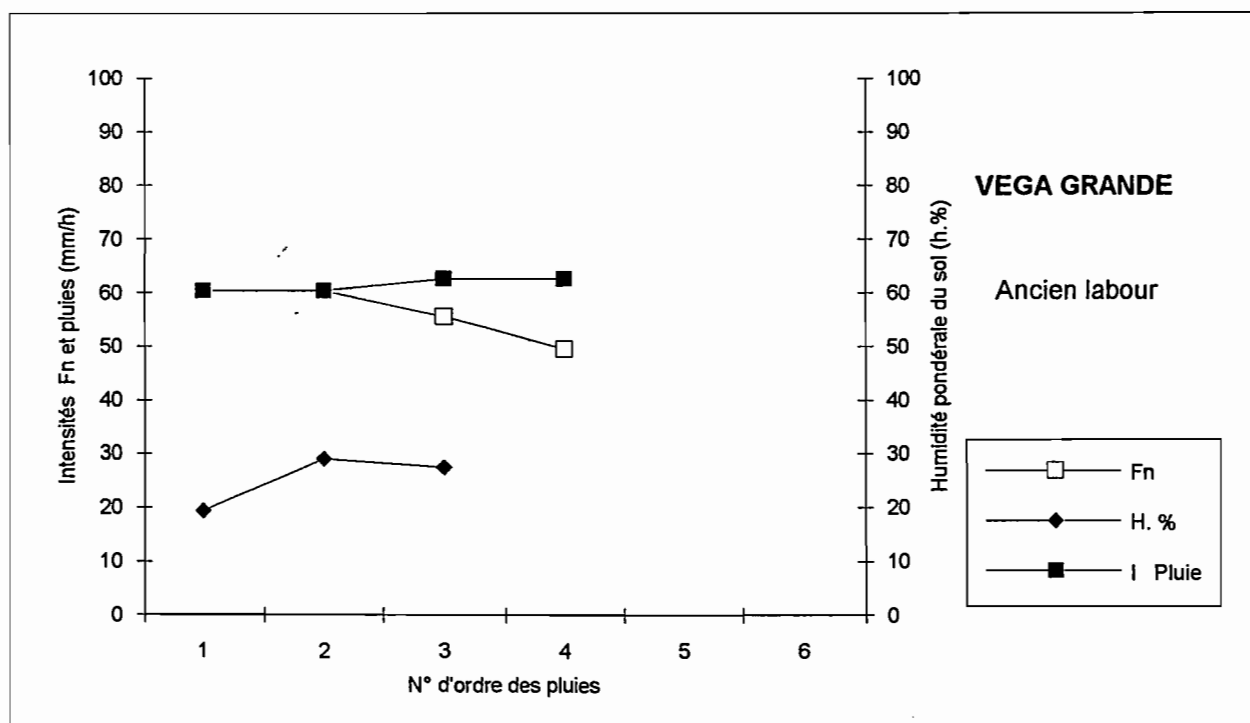
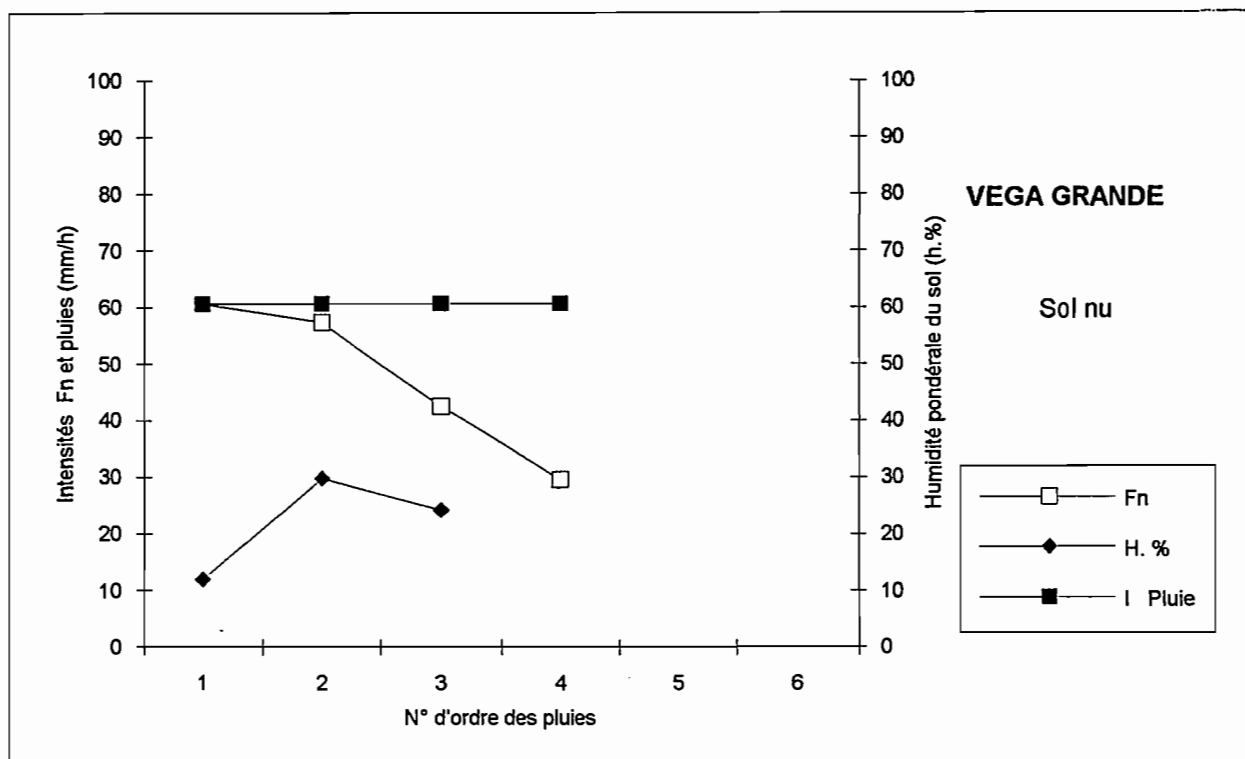
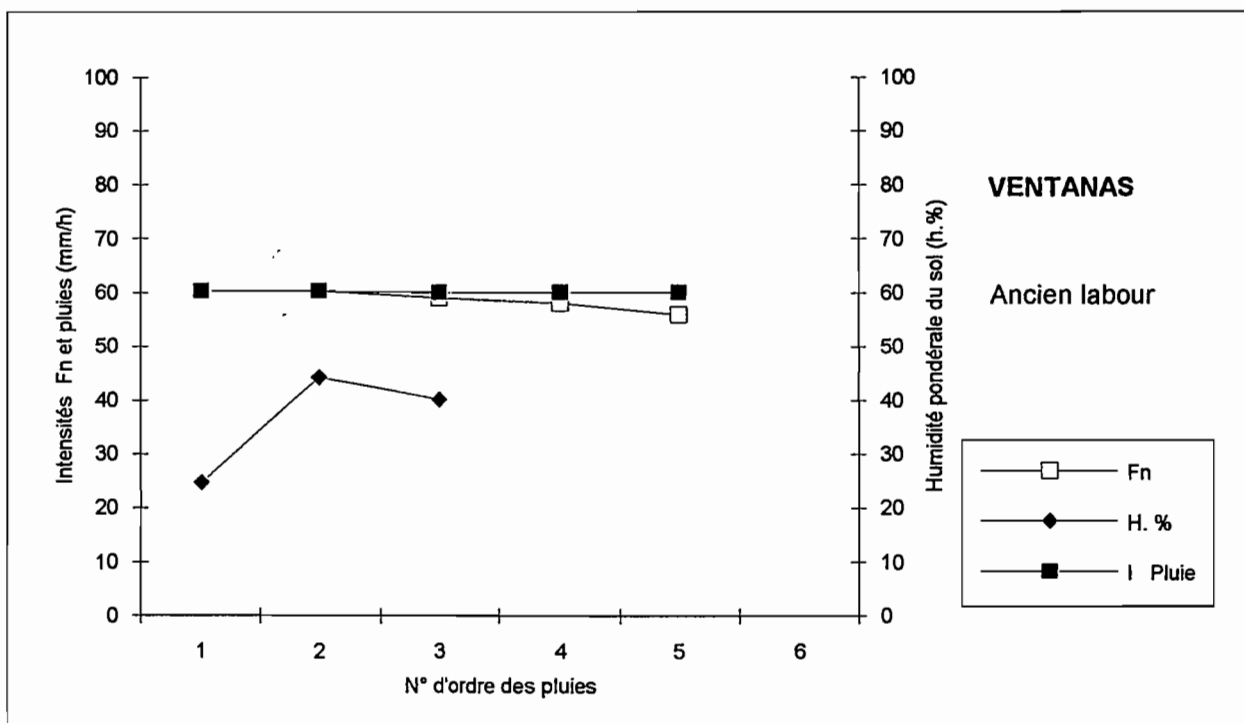
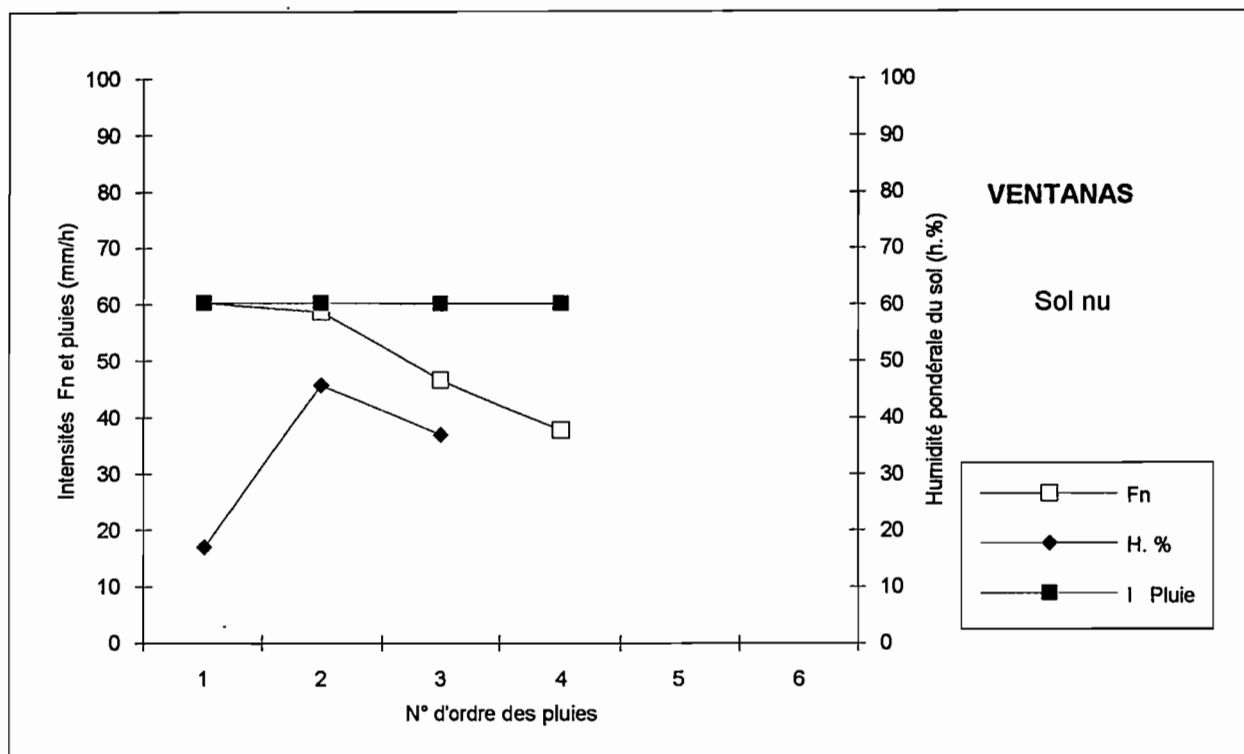


Fig. n°52

Variation de Fn en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol

Pluies d'intensité de 60 mm/h.



- très rapidement, dès la seconde ou la troisième pluie dans la plupart des cas, l'humidité des sols varie peu et s'approche de valeurs constantes,
- les valeurs de F_n continuent à varier indépendamment des valeurs d'humidité qui ont atteint un seuil limite.

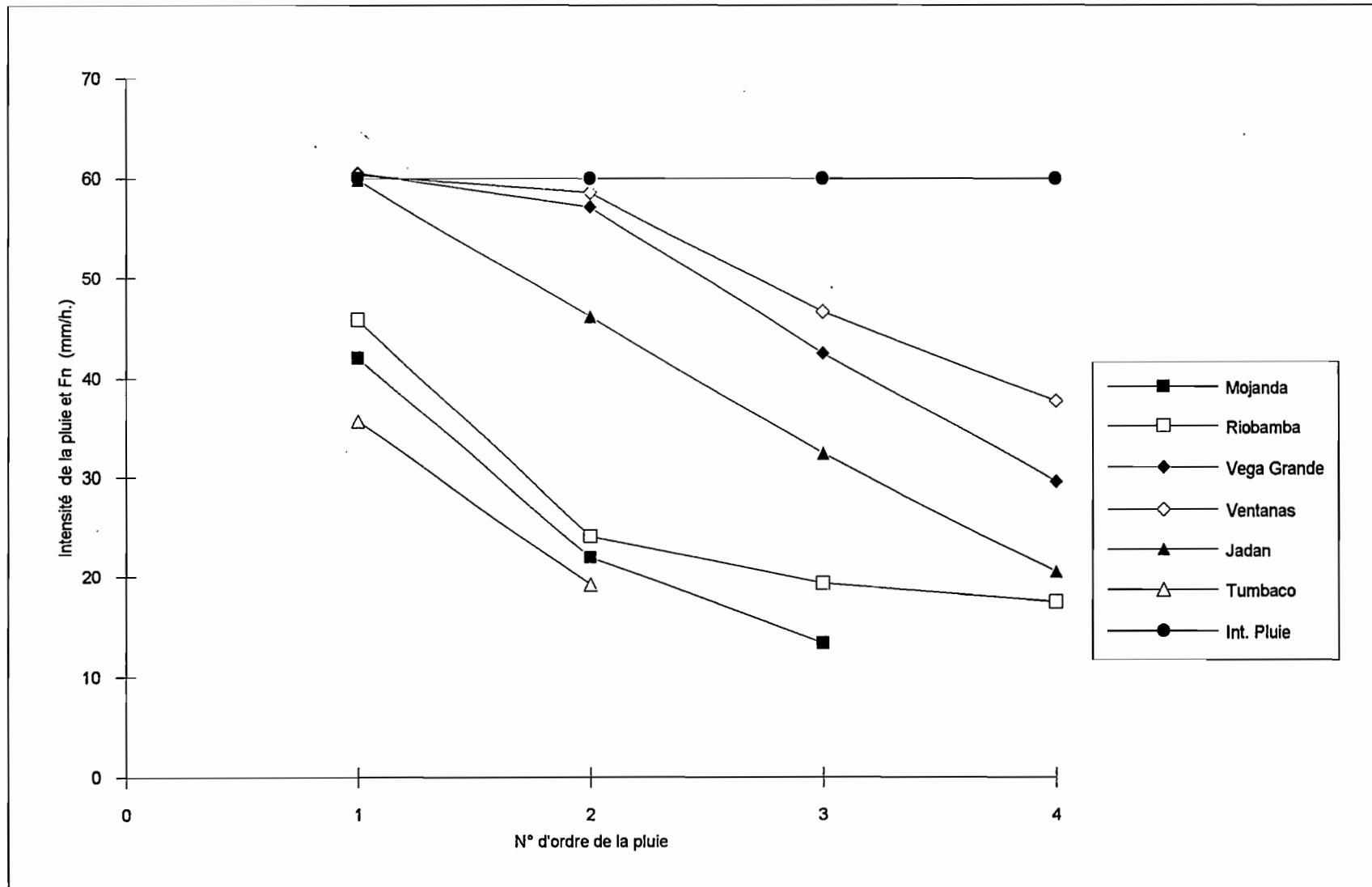
Ce constat est général sauf à Ventanas où il n'a pas été possible d'atteindre le seuil de saturation du sol qui a démontré une capacité remarquable d'infiltrabilité bien qu'on ait appliqué les mêmes quantités d'eau que celles appliquées sur les autres stations. Une tentative d'explication sera fournie plus loin.

Sur les autres stations, on peut admettre que ce seuil a été atteint et que dans ces conditions, les variations des valeurs de F_n et corrélativement celles de R_{max} sont conditionnées par l'ordre de succession des pluies et non pas par l'état d'humidité du sol qui plafonne à des valeurs constantes. Dans ce cas, on peut penser que l'état d'humidité du sol n'intervient pas dans la dynamique et que seule est active l'énergie libérée par la pluie, en agissant sur la fermeture du sol.

Pour pouvoir comparer, par rapport à ces mêmes variables, le comportement des sols de toutes les stations, on a regroupé les données sur un seul graphe (voir fig. n° 53). Ce graphe est construit comme les précédents : pour une pluie d'intensité constante ($IM\ 15 = 60\text{ mm.h}^{-1}$), ont été indiquées en abscisse la succession des pluies, et en ordonnée les valeurs

Fig. n°53

Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies (intensité 60 mm/h), sur sol nu



de F_n et d'intensité de la pluie. Afin de pouvoir apprécier au mieux l'effet sol, seule la situation du sol nu a été considérée afin d'éliminer la perturbation introduite par le travail du sol dans le cas de l'ancien labour. Pour faciliter la lecture de ce graphe, les valeurs d'humidité n'ont pas été prises en compte, elles sont supposées constantes. Il ressort de ce graphe deux groupes de phénomènes :

- en haut du graphe, un premier groupe associe les sols vertiques de Ventanas et Vega Grande. Légèrement décalé, se trouve le ranker de Jadan. Selon les travaux de Poesen (1990) et de Valentin et Figueroa (1987), si la surface du sol contient des graviers ou des fragments de roches, ces derniers protègent le sol contre le splash des gouttes de pluies et protègent la macro-porosité sous-jacente. Dans ce cas, leur influence est positive sur l'infiltration comme nous l'avons observé à Jadan. Par contre lorsque ces éléments sont inclus dans les croûtes de sédimentation ou de battance, on observe une augmentation du ruissellement.

- en bas du graphe, apparaît un second groupe composé par les andosols des stations de Riobamba, Mojanda et Tumbaco.

Le graphe montre que les valeurs de F_n sont plus élevées et celles de R_{max} plus faibles dans le premier groupe. Selon notre hypothèse, ces variations à humidité constante traduisent l'influence des réaménagements des états de surface. Autrement dit, les sols du premier groupe ruissellent moins et

infiltreront plus parce qu'ils se ferment plus lentement. En comparaison, les sols andiques du second groupe se ferment plus rapidement ce qui exprime une plus forte sensibilité à la détachabilité et à l'exportation des particules de sol hors de la micro-parcelle. Dans ce cas, la donnée "charges" est la variable qui illustre le mieux les variations observées. On a tracé une nouvelle série d'histogrammes afin de mettre en évidence l'évolution des charges exportées (kg.ha^{-1}) pour les deux situations, ancien labour et sol nu, et pour les trois états hydriques (fig. n° 54 et 55). Ces graphes apportent un complément d'informations qui conforte notre hypothèse. Outre la plus forte érodibilité déjà signalée du sol nu par rapport à l'ancien labour, on retrouve une division des stations en deux groupes : les sols andiques se distinguant par des pertes en terre plus fortes. Ces dernières peuvent atteindre des valeurs maximales comprises entre 4000 kg.ha^{-1} et de 9000 kg.ha^{-1} : le site de Riobamba est le plus érodible, il est suivi par celui de Mojanda. Par comparaison, les sols non andiques perdent moins de terre et le sol de Ventanas se distingue par une remarquable stabilité quels que soient les essais.

A titre d'exemple, on a représenté sur la fig n° 56 les courbes de ruissellement et de charges exportées des stations de Ventanas et de Riobamba, sur sol nu. On a choisi des états hydriques où le sol est humide à très humide et des pluies d'intensités $IM_{15} = 60 \text{ mm.h}^{-1}$. A Ventanas, le ruissellement se stabilise rapidement pour des valeurs globalement faibles, de l'ordre de 10 mm.h^{-1} . Les valeurs de charges exportées sont quasi nulles et superposées sur

Fig. n° 54

Simulation de pluie sur ancien labour

Variation des CHARGES (kg/ha) en fonction de l'état d'humidité préalable et de l'intensité de pluie (I, mm/h).

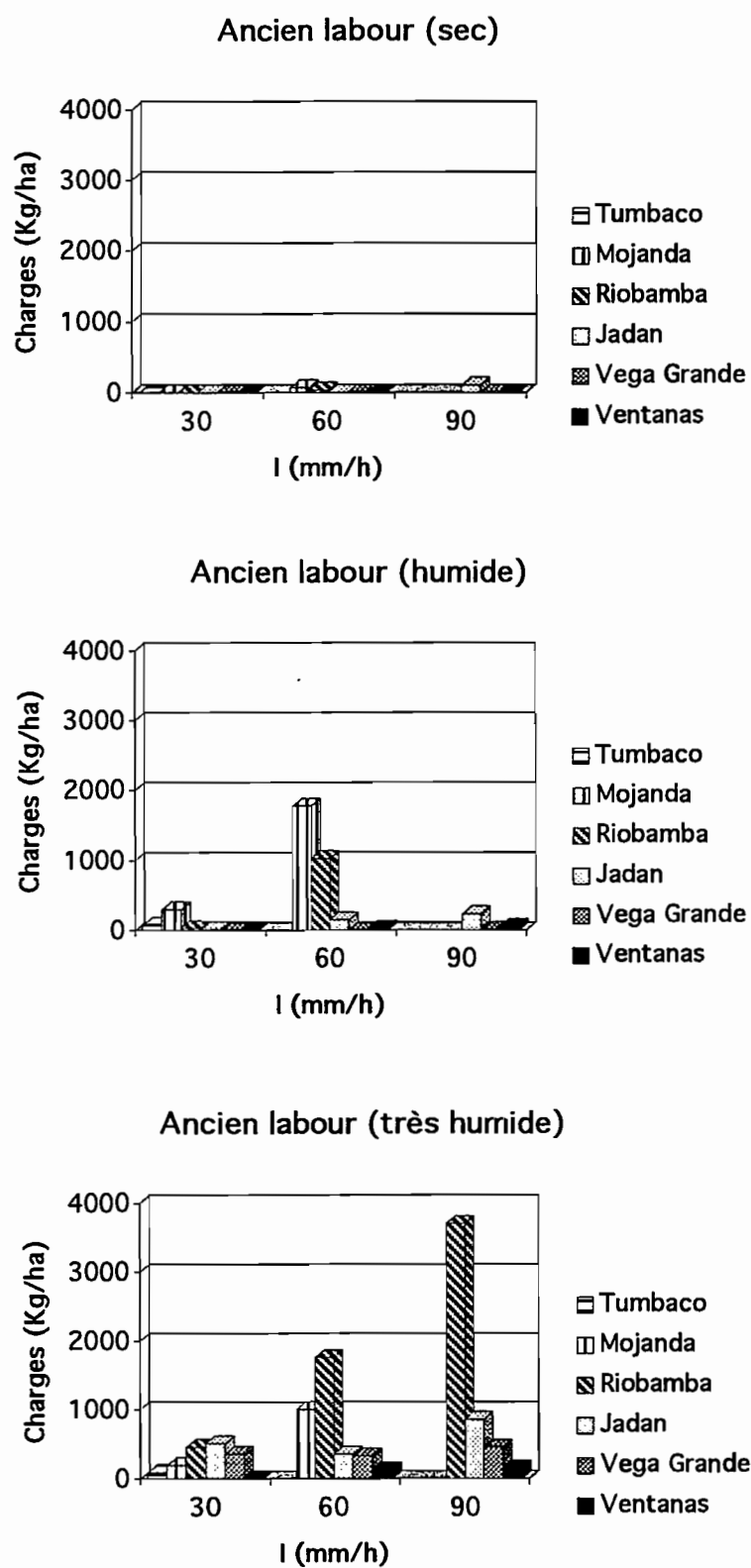


Fig. n°55

Simulation de pluie sur sol nu
Variation des CHARGES (kg/ha) en fonction de
l'état d'humidité préalable et de l'intensité de pluie (I, mm/h).

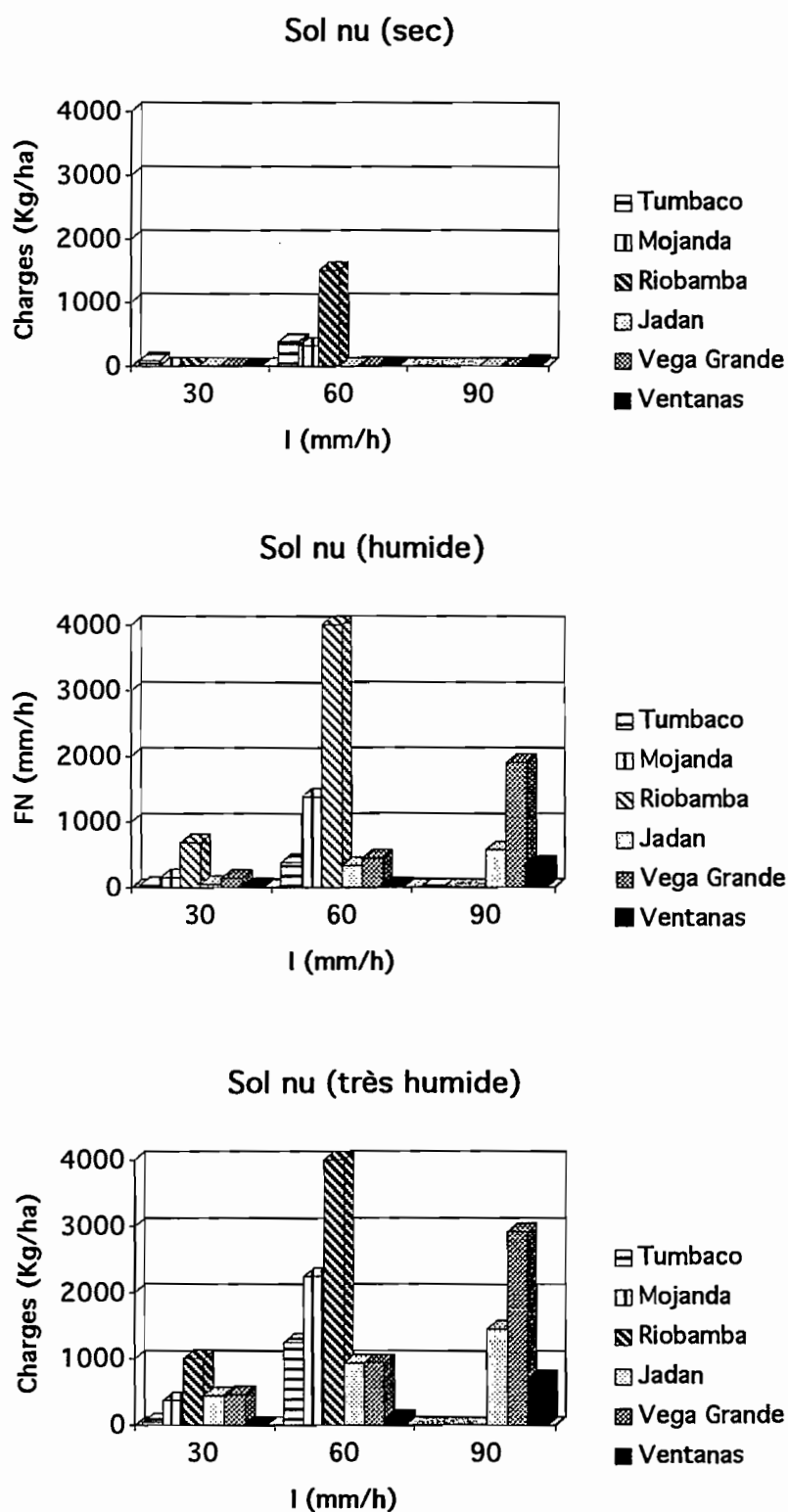
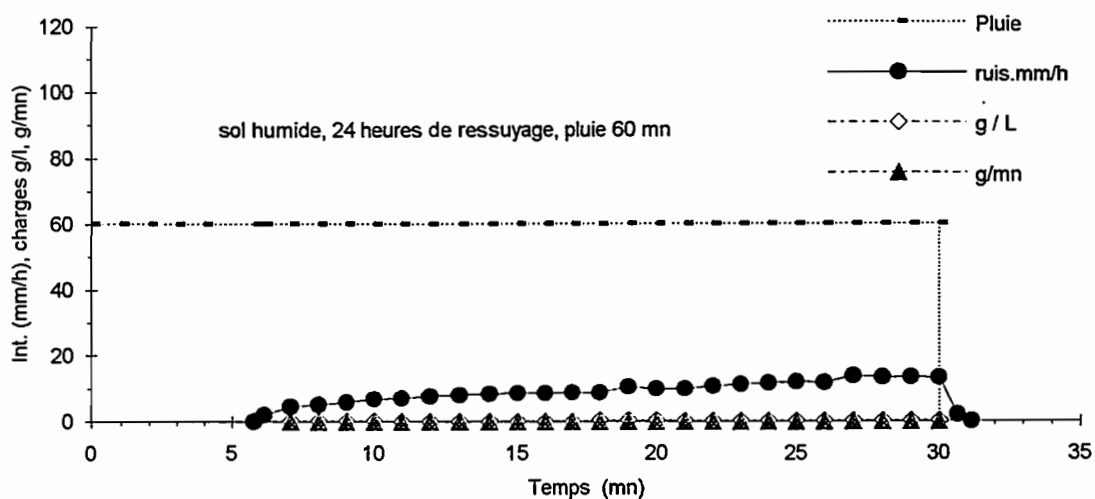


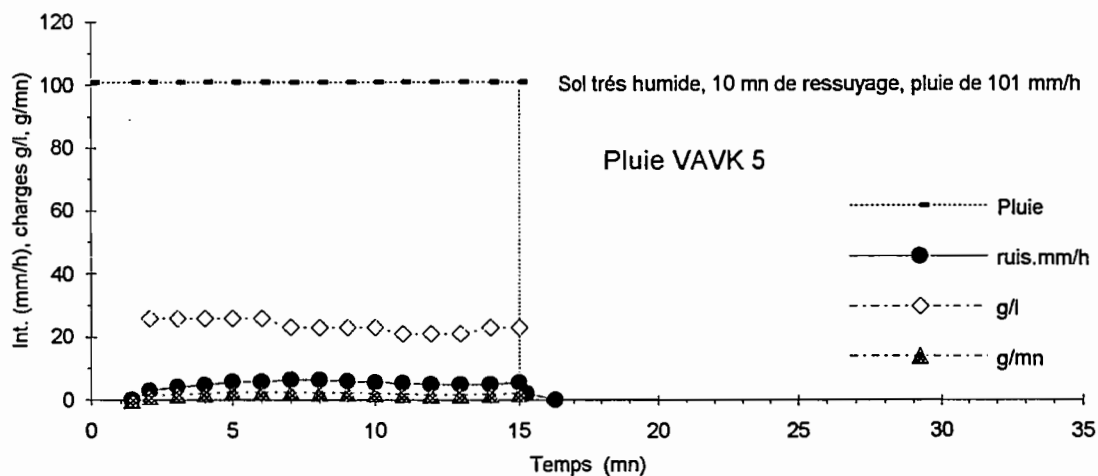
Fig. n°56

Transfert d'eau et de matière solide sous pluie constante,
en fonction de la station

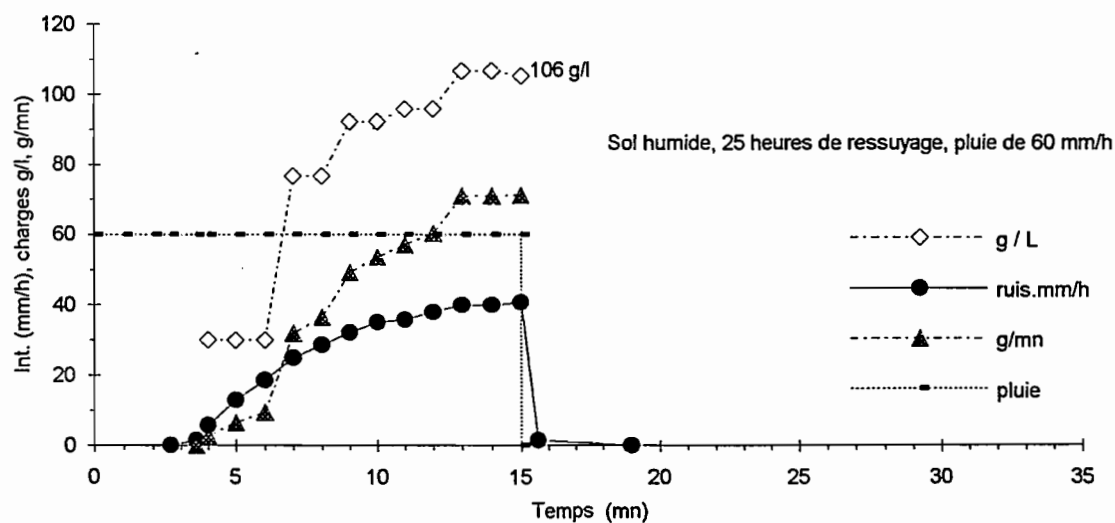
Station de VENTANAS, SOL NU



Station de VENTANAS, ANCIEN LABOUR



Station de RIOBAMBA, SOL NU



l'abscisse. En revanche, le sol de Riobamba s'érode plus rapidement : l'hydrogramme indique un plateau vers 40 mm/h et le turbidigramme dépasse le seuil de 100 g.l⁻¹.

Il nous reste à essayer d'expliquer ce classement en deux groupes. L'effet dû aux fentes des vertisols et à la pierrosité du ranker joue sans nul doute un rôle. Celui-ci a été observé mais n'a pu être quantifié ce qui empêche d'évaluer correctement son influence. A ce stade de la recherche, il faut donc se poser une autre question : existe-t-il un autre effet probant et quantifiable ?

Comme on l'avait fait pour les parcelles de ruissellement, on a tenté d'établir des régressions entre les charges exportées, variable qui traduit le mieux les réaménagements de surface, et les variables disponibles se rapportant aux constituants du sol (texture, matière organique) et à leur densité apparente. De toutes les tentatives réalisées, la meilleure corrélation obtenue correspond à l'argile qui explique dans tous les cas 80 % des variations de l'érosion, significative au seuil de 1 %, autrement dit plus le sol est argileux, plus il est résistant à l'impact des gouttes de pluie. Dans les sols des stations, la montmorillonite est le type d'argile dominant.

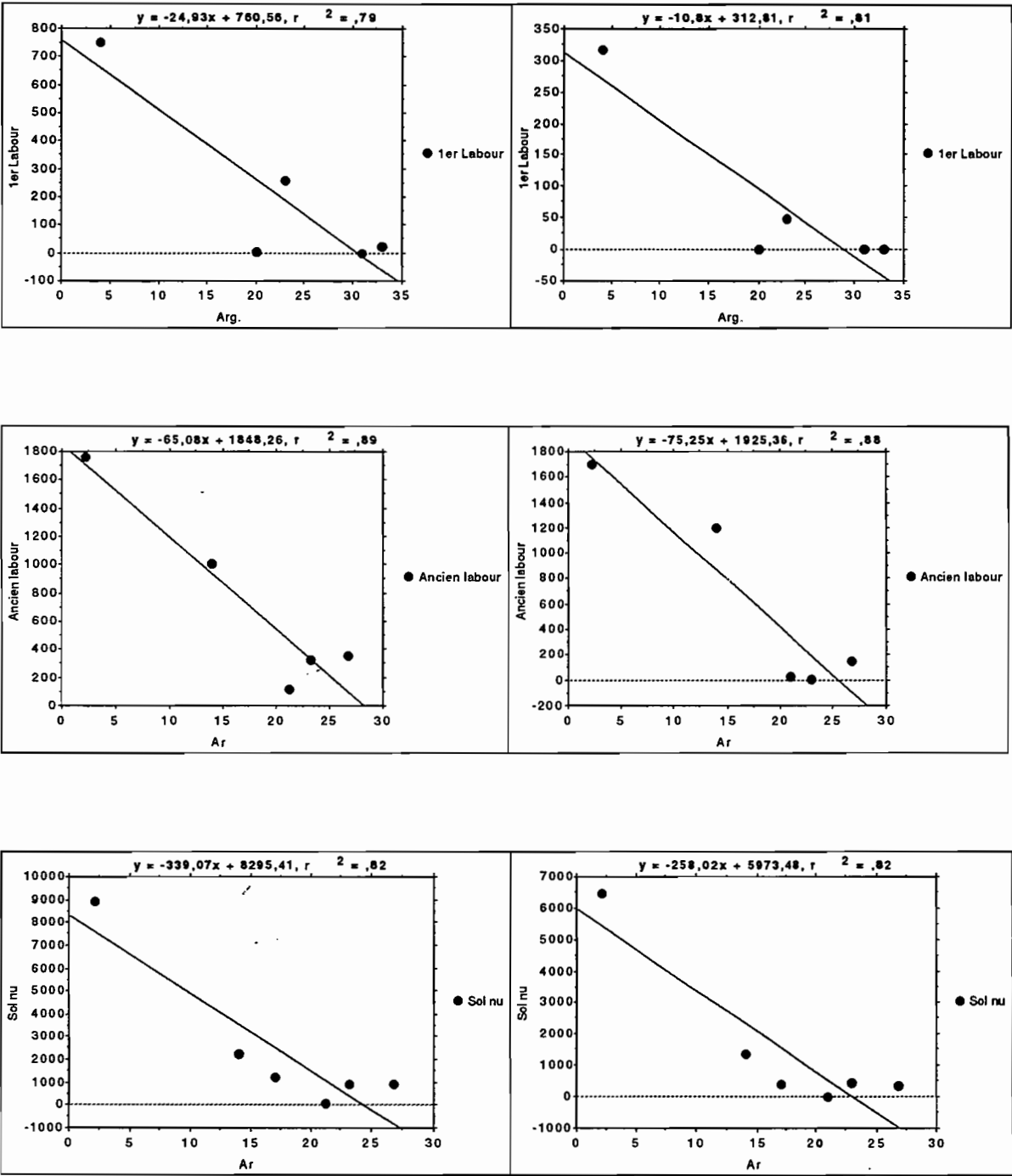
Sur la figure n° 57, on a représenté l'exemple de régressions exprimant les essais menés avec $IM\ 15 = 60\text{ mm.h}^{-1}$, pour les trois situations : sur sol humide, r^2 est compris entre 0,79 et 0,89 et sur sol très humide, entre 0,81 et 0,88.

Fig. n°57

Régressions entre charges (kg/ha) et argile (%)
(l = 60 mm/h)

Sol humide

Sol très humide



Les valeurs élevées de r^2 démontrent le rôle essentiel de l'argile dans le processus de naissance du ruissellement par rapport aux autres variables et permettent d'expliquer la division des sols des stations en deux groupes : sols vertiques d'un côté et sols andiques de l'autre. Le ranker de Jadan, qui est intégré dans le groupe des sols vertiques, se distingue également par un taux plus d'argile plus élevé que celui des sols andiques (fig. n° 58).

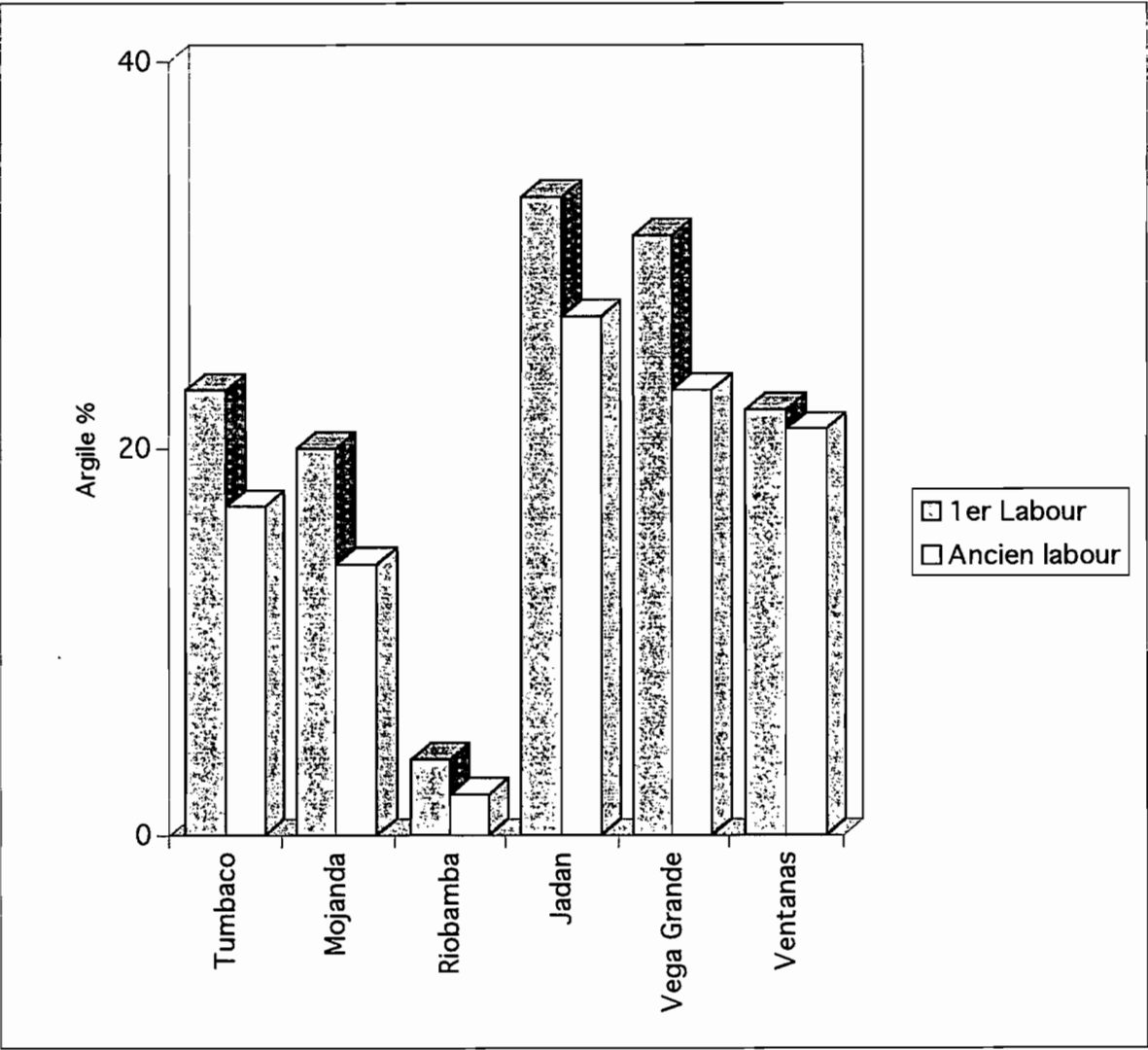
La simulation de pluies s'est donc révélée très utile pour isoler le facteur sol, ce qui n'avait pas été possible avec les parcelles de ruissellement, et pour apprécier respectivement l'effet "situation culturale" et l'effet "sol" sensu stricto.

Pour synthétiser ce qui ressort de l'analyse de ces deux effets, on peut dire que la situation la moins vulnérable à l'érosion est celle du premier labour associé à un taux d'argile compris entre 20 et 25 %. Dans ce cas, la quasi totalité de l'eau de pluie s'infiltre et il n'y a pas d'érosion (F_n =intensité de la pluie). On remarque en se référant au graphe précédent (fig. n° 58) où on a représenté les variations du taux d'argile par station, que les mottes du premier labour sont plus riches en argile dans tous les cas.

En comparaison, les situations ancien labour et sol nu réagissent positivement à l'érosion, leur sensibilité au phénomène variant d'une station à l'autre en fonction de la

Fig. n°58

Variations du taux d'argile entre Premier et Ancien labours



teneur en argile du sol. En recourant à l'interprétation des graphes (fig. n° 47 à 52) qui permettent d'apprécier, par station, les variations de F_n en fonction de l'intensité et de l'ordre des pluies, on peut estimer par lecture directe le seuil d'intensité de pluie minimale nécessaire à l'apparition du ruissellement quelle que soit la durée de la pluie (Lafforgue, 1977 ; Valentin 1985). Ce seuil correspond au point d'intersection entre les droites, ancien labour et sol nu, et la droite premier labour. Pour le labour ancien, les valeurs sont de 15 mm.h^{-1} à 20 mm.h^{-1} sur les sols andiques et le ranker de Jadan, 30 mm.h^{-1} à Vega Grande et sans valeur à Ventanas où dans ce cas $F_n=1$. Elles sont plus basses pour le sol nu : de l'ordre de 10 mm.h^{-1} sur les sols andiques de Mojanda et Tumbaco, le ranker de Jadan et le sol vertique de Vega Grande, 18 mm.h^{-1} sur l'andosol de Riobamba et 30 mm.h^{-1} sur le sol vertique profond de Ventanas.

Pag
cla

Les mesures effectuées sous pluies naturelles et sous pluies simulées apportent des éléments de réponses utiles à la compréhension de l'érosion accélérée dans les Andes de la Sierra et à la lutte contre ce phénomène. Ces deux approches se sont révélées très complémentaires parce qu'elles permettent d'apprécier les deux processus essentiels qui interviennent dans la dynamique de l'érosion - la détachabilité grâce à la simulation de pluie et l'érosion linéaire grâce aux parcelles de ruissellement. Par ailleurs, il est possible dans quelques cas de comparer leurs résultats respectifs.

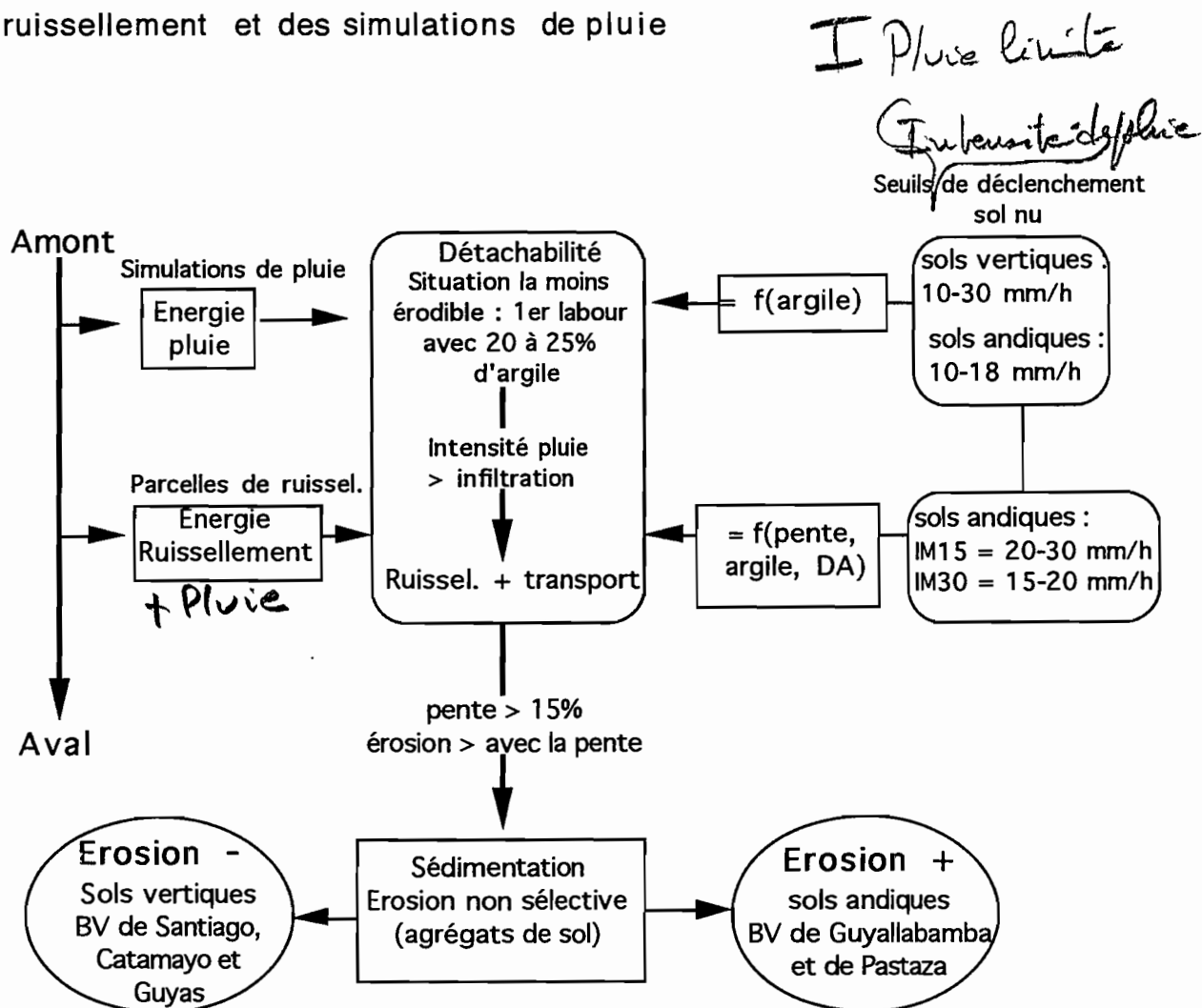
La simulation de pluie permet d'isoler un effet "sol" indépendamment de l'effet "pente" qui n'est pas significatif sur une micro-parcelle de 1 m². En comparaison, cet effet "pente" est pris en compte par les parcelles de ruissellement mais il n'est pas possible de l'isoler totalement. En effet, à partir du dispositif installé sur les stations, l'érosion mesurée dans les bacs de sédimentation exprime le bilan de trois variables : la pente, le sol et la pluie.

par d'accord
$$K = \frac{E}{R \times SC \times 2.25}$$

Compte tenu des caractéristiques propres des deux approches, le schéma ci-après regroupe les principaux acquis obtenus :

la simulation ne peut donner K car on n'y teste que la battance qui n'est pas le facteur dominant en montagne

Tableau n° 15 Synthèse des apports issus des parcelles de ruissellement et des simulations de pluie



Le schéma est organisé en fonction de la pente du versant, il indique l'apport de chacune des deux expérimentations. La simulation de pluie a permis d'étudier la naissance du ruissellement qui est à l'origine de l'érosion accélérée, elle se place à " l'amont " du schéma. Elle a permis de mettre en évidence le rôle de l'argile dans la résistance du sol à la détachabilité et à l'énergie des gouttes de pluie : globalement, le seuil d'intensité minimale de pluie requise pour déclencher le ruissellement sur sol nu est compris entre 10 et 30 mm.h⁻¹

sur les sols vertiques et le ranker argileux et entre 10 et 18 mm.h⁻¹ sur les sols andiques.

Une fois le ruissellement amorcé, l'érosion linéaire prend le relais et se développe sur le versant. Les parcelles de ruissellement ont permis de préciser son action. Au-delà de 15 % de pente, l'énergie du ruissellement devient supérieure à celle des gouttes de pluie. L'érosion n'est plus alors fonction de l'intensité de la pluie mais de la pente dont les variations d'inclinaison expliquent au moins 60 % des variations de l'érosion. Ce résultat a pu être amélioré par le calcul d'une régression multiple où sont associées à la pente les variables, argile et densité apparente, parvenant ainsi à expliquer plus de 90 % de la variance. L'association de ces trois variables semble tout à fait compatible avec l'absence de sélectivité texturale qui a été notée dans les sédiments érodés et qui exprime une érosion linéaire des agrégats du sol, d'autant plus efficace que les agrégats sont légers et sensibles à la flottaison. Pour les sols andiques, le seuil de déclenchement de l'érosion linéaire nécessite une pluie d'intensité minimale de 20 à 30 mm.h⁻¹ pour l'IM 15 et de 15 à 20 mm.h⁻¹ pour l'IM 30. Faute de séries de données homogènes, ce seuil n'a pu être déterminé pour les sols des autres stations.

Le fait d'utiliser la variable "argile" dans deux régressions, qui tentent d'expliquer pour l'une la résistance du sol à l'énergie de la pluie et pour l'autre la vulnérabilité du sol à l'énergie du ruissellement, ne semble pas contradictoire dans la mesure où les processus mis en cause interviennent à des niveaux différents. Dans un cas, plus les particules de sol sont

agrégées par l'argile et plus le sol résiste à l'impact de la pluie ; dans l'autre cas, l'argile n'est plus considérée comme un élément de résistance à la pluie car plus la pente croît, plus l'énergie du ruissellement favorise l'érosion, moins cette dernière est sélective et plus le sol est décapé sous forme d'agrégats.

Néanmoins, ces deux processus ont une incidence l'un par rapport à l'autre dans la mesure où plus un sol est agrégé et résistant à la détachabilité et plus le seuil de déclenchement du ruissellement est retardé. Les sols des stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas démontrent une sensibilité à l'érosion plus faible que les sols andiques des stations de Tumbaco, Cangahua, Mojanda et Riobamba notamment lorsque ces derniers sont mis en culture. Autrement dit, en supposant des conditions de pente et d'agressivité climatique égales, un secteur mis en culture dans le grand bassin de Guyallabamba ou de Pastaza présentera des risques d'érosion accélérée plus élevés qu'un secteur également cultivé dans les bassins de Santiago, Guayas ou Catamayo.

Concernant le sol nu, dont le comportement a été suivi sur les parcelles de ruissellement et sous pluies simulées, les résultats montrent que les pertes en eau et en terre sont toujours plus élevées que sur le sol labouré et planté. Ce constat est d'autant plus préoccupant qu'au cours du cycle cultural, le sol est nu chaque année entre deux récoltes, avant que ne lève le semis. Sur sol nu, les pertes en terre par

détachabilité atteignent des valeurs élevées comme par exemple à Riobamba où les pluies simulées ont provoqué une érosion de l'ordre de 6000 à 9000 kg.ha⁻¹, avec IM 15 = 60 mm.h⁻¹ sur sol humide et très humide. On note la même dynamique sur les parcelles de ruissellement où l'érosion linéaire a provoqué des pertes en terre moyennes comprises entre 50 et 130 t.ha⁻¹. Les valeurs les plus basses ont été enregistrées à Cangahua et à Ventanas avec respectivement 50 et 60 t.ha⁻¹ ce qui représente tout de même une érosion conséquente : si on suppose une densité apparente moyenne des sols secs de l'ordre de 1, une tonne de matériaux érodés par hectare et par an est équivalente à une lame de sol érodée de 0,1 mm soit une lame de 5 mm pour une érosion de 50 t.ha⁻¹ à Cangahua et de 6 mm pour une érosion de 60 t.ha⁻¹ à Ventanas, avec des précipitations plus de trois fois plus élevées à Ventanas qu'à Cangahua.

Compte tenu de ces résultats, la lutte anti-érosive devra donc s'attacher à :

- agir sur la pente du versant par des ouvrages permettant de dissiper l'énergie du ruissellement,
- améliorer l'infiltration de l'eau par le travail du sol afin de retarder la naissance du ruissellement. En ce sens, l'ancien labour est plus vulnérable que le premier labour, notamment sur sol nu lorsque le semis n'a pas encore levé.

CHAPITRE TROIS

***APPROCHE APPLIQUEE DE LA GESTION
DES TERRES - VALORISATION DES RESULTATS
POUR LA LUTTE ANTI-EROSIVE***

Les recherches sur l'érosion, replacées dans un cadre agricole, posent la question de la durabilité de l'agrosystème du minifundio de la Sierra équatorienne. Elles ne visent pas uniquement à apporter des connaissances nouvelles sur un milieu original et mal connu, elles doivent aussi répondre à un problème social et humain et doivent pouvoir conduire à aider le paysannat à améliorer ses conditions d'existence.

En effet, évaluer spatialement l'extension des manifestations érosives, mesurer l'intensité des phénomènes et appréhender les causes majeures qui sont à l'origine de l'accélération des processus, comme nous l'avons fait jusqu'ici, n'a de sens que si les données issues de ces recherches sont finalisées et valorisées pour lutter contre l'érosion.

1) LA LUTTE CONTRE L'EROSION EN MONTAGNE

1.1 Positionnement général

En montagne, les risques d'érosion sont plus élevés qu'en plaine. Comme nous l'avons analysé dans les chapitres antérieurs, la montagne présente, outre les problèmes de réaménagement des états de surface et de battance des sols communs à tous les milieux, des risques accrus d'érosion liés au rôle de la pente dont la contribution au phénomène peut être exacerbée par la mise en culture des sols. Dans ce cas ... "l'intervention humaine révèle ou instaure un déterminisme

naturel pesant, qui explique la virulence des processus d'érosion et de leurs combinaisons" (Neboit, 1991). Autrement dit, le milieu contraint l'activité de l'homme qui en retour peut perturber le milieu.

Si l'on considère que dans les milieux naturellement "fragiles" comme le sont les montagnes, le développement des sociétés peut révéler et accroître, par l'emploi de techniques maladroites ou inadaptées, l'impact de l'érosion sur les sols ; on peut espérer, par ailleurs, infléchir cette tendance en intervenant sur ces mêmes techniques. Dans ce cas, toute action, qui vise à mieux adapter les itinéraires culturels aux contraintes du milieu et à faire jouer ainsi à l'homme un rôle actif dans la gestion durable des terres, doit permettre de freiner et de contrôler la dynamique des phénomènes. C'est en ces termes que s'est posé le défi dans la Sierra de l'Equateur où le petit paysan du minifundio, qui était cantonné à un double rôle d'agent et de victime résignés de l'érosion, devait sortir de cette situation stérile afin d'assurer ses besoins vitaux, à moyen et long terme.

Le problème de lutte contre l'érosion posé par l'exemple de la Sierra équatorienne n'est pas nouveau. D'autres sociétés montagnardes se sont trouvées confrontées à ce problème et ont essayé d'y répondre avec ou plus ou moins de réussite. Parmi les actions connues, on peut rappeler les exemples suivants :

- la restauration des terrains en montagne (RTM) qui a été mise en oeuvre en France à la fin du siècle passé et conduite par les forestiers, avec une forte implication de l'Etat. Pour lutter contre la torrentialité et protéger les zones actives situées dans les vallées, les techniciens de la RTM ont entrepris de reforester et de végétaliser les espaces dégradés et de corriger les torrents et les ravines (Lilin, 1986). D'un point de vue technique, cette stratégie a été efficace car elle a permis de réduire la torrentialité et de restaurer les terres dégradées. D'un point de vue socio-économique, les résultats sont plus contrastés. Selon Murra (1991), il faut relativiser l'importance des zones touchées par ces mesures : seuls 18% du territoire du département des Alpes de Haute Provence, secteur où l'impact de la RTM a été le plus fort, sont protégés et restaurés. En outre, la population montagnarde a été globalement peu touchée par les actions entreprises dans la mesure où elle quittait les régions concernées, attirée par l'industrialisation et l'urbanisation des basses vallées, à la fin du XIX ème siècle quand la politique de RTM a vu le jour ;

- la défense et restauration des sols (DRS) qui s'est développée en Algérie, puis autour de la zone méditerranéenne entre 1940 et 1960. Les principes de la RTM ne convenaient pas dans les régions citées qui se caractérisaient par de fortes densités de population. Les forestiers furent donc conduits à promouvoir la stratégie de DRS basée essentiellement sur la construction de banquettes de reboisement pour améliorer l'infiltration de l'eau (Murra, 1991

à nuancer

RTM et CES

→ reforest
et la p... h

; Lilin, 1986). Par exemple, dans la montagne tellienne de l'Algérie, d'énormes moyens mécaniques et humains furent engagés pour la construction et l'extension des banquettes. Les résultats techniques furent globalement médiocres dans la mesure où les banquettes se révélèrent totalement inefficaces dans les zones argileuses. D'un point de vue économique, les résultats furent aussi insuffisants, les ouvrages se dégradèrent rapidement. Ils furent peu entretenus par manque de formation et de sensibilisation du paysannat local. (Roux 1987)
-94

Ces deux exemples montrent que, si la lutte contre l'érosion des sols en montagne est bien souvent une nécessité, les moyens à mettre en oeuvre restent délicats à utiliser. Dans les deux exemples, les actions se sont développées indépendamment des sociétés paysannes. Les moyens techniques, employés dans le cadre de la RTM, sont acceptables mais on ne sait pas ce qui serait advenu de leur efficacité dans des zones peuplées où les techniciens auraient dû composer avec des parcelles de cultures. La DRS, quant à elle, met en exergue les limites d'un seul type d'ouvrage qu'on multiplie sans tenir compte du caractère spécifique du milieu et des traditions paysannes.

1.2 Le cas de la Sierra équatorienne

Pour pouvoir répondre de façon efficace à notre objectif, il a été nécessaire d'élargir le champ thématique de nos recherches et de les orienter vers une connaissance plus précise des itinéraires culturels utilisés dans le minifundio, notamment dans le domaine de la conservation des sols. Il s'agissait d'appréhender le comportement du paysan face à l'érosion et de l'intégrer à notre démarche.

Dans ces conditions, existait-il localement des méthodes conservatoires traditionnelles et si oui, comment expliquer leur faible impact compte tenu de la progression de l'érosion sur les sols du minifundio ? Par ailleurs, était-il possible de remédier à ces insuffisances et si oui, comment faire participer le paysannat du minifundio en utilisant ses pratiques et ses traditions culturelles ?

L'objectif central d'une telle démarche était se rapprocher le plus possible des réalités de terrain et d'intégrer la population du minifundio dans une action participative forte afin d'identifier des méthodes conservatoires simples, efficaces et adaptées au contexte socio-économique local. Cette question de la participation paysanne, qui a été peu prise en compte pendant très longtemps, a progressé énormément depuis la fin des années 1980. Face aux fréquents échecs affichés par les programmes de lutte anti-érosive, les mentalités ont évolué faisant émerger le concept de " Land husbandry " (Shaxson et

al., 1989 ; Hudson, 1992) qui est présenté comme une stratégie nouvelle, délibérément participative, où sont mieux pris en compte les besoins des paysans et des éleveurs. Cette stratégie a été définie en français par Roose (¹⁹⁸⁷1994) sous le vocable : " Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols " (GCES).

Le paysannat du minifundio constitue un milieu relativement fermé et méfiant, héritier d'une histoire sociale très troublée (voir chapitres 1). Tenter de développer un programme de conservation des sols dans ce milieu, sans la participation et l'intégration de la population locale, aurait été, plus ici qu'ailleurs, voué à un échec évident.

Les enquêtes de terrain

Pour s'adapter à ce questionnement, la stratégie mise en oeuvre a commencé, d'abord, par la mise en place et la réalisation d'enquêtes. Dans le questionnaire correspondant à ces enquêtes, la perception du problème de l'érosion par l'agriculteur du minifundio a été prise en compte ainsi que les moyens mis en oeuvre pour y remédier. Les enquêtes ont été réalisées sur toute la Sierra, elles ont touché un nombre plus important d'agriculteurs sur les sites où étaient installées les stations.

Les résultats globaux sont décevants tant en ce qui concerne la perception de l'érosion que les moyens locaux de lutte. Lorsque l'érosion menace, le seul recours du paysan est d'évoquer la fatalité divine à l'origine d'événements climatiques catastrophiques (De Noni, Viennot, Trujillo, 1986). A titre d'exemple, dans la région de Cangahua où les pluies érosives sont très souvent accompagnées de grêle, c'est la vierge "Maria Trinidad" qui est mise en cause : "... Pour la quasi totalité des habitants de la région sinistrée, la grêle de mars 1982 est une punition infligée par la vierge "Maria Trinidad" qui, depuis quelques années, apparaît à quelques privilégiés au sommet d'une montagne proche appelée Jambi Machi ... dans ces

conditions, les mesures à prendre sont évidentes : il s'agit d'organiser un pèlerinage de toutes les communautés du voisinage jusqu'à Jambi Machi ... " (Fauroux, 1989).

Le paysan reste alors relativement passif et résigné face aux manifestations atmosphériques qui traduisent pour lui un déchaînement de forces à la fois naturelles et surnaturelles.

Des méthodes simples, comme celle du labour isohypse qui est très utile lorsque le relief est en pente, ne sont pas utilisées. En général, il n'y a pas de direction définie pour le sens du labour si ce n'est lorsqu'il est effectué par traction animale. Dans ce cas, le paysan fait suivre aux animaux les courbes de niveau non pas pour protéger le sol contre l'érosion mais pour économiser la santé des bêtes qui représentent un capital plus important que la terre. Ce cas reste isolé, néanmoins, car le petit paysan ne dispose pas, dans la plupart des cas, d'un capital suffisant pour acheter des bêtes. On est surpris sur le terrain par le faible nombre d'animaux présents dans le paysage de "minifundio". Ceci explique que la pratique du compost soit réduite. Les prix des engrais chimiques est trop élevé également ce qui ne permet pas à l'agriculteur de lutter contre la baisse de fertilité des sols. L'emploi des engrais, lorsqu'il existe, est en général très irrégulier et effectué en doses insuffisantes.

Le labour motorisé ainsi que le labour manuel, effectué avec "l'asadon", la houe locale, sont réalisés en règle générale dans le sens de la plus grande pente. De plus en plus fréquemment,

le paysan pratique également le labour mécanisé. Le tracteur est loué à une coopérative ou à un grand propriétaire et est utilisé de façon communautaire par un groupe d'agriculteurs. Les risques d'accident sont élevés en raison de l'inclinaison des pentes : dans la province de Chimborazo, où la pression du minifundio sur la terre est très forte, nous avons observé la présence de tracteurs sur des versants pouvant atteindre 60 % de pente. L'introduction de la mécanisation a contribué à agrandir la taille des parcelles et à faire disparaître les anciens paysages agraires bocagers. La règle devient donc l'abandon ou la destruction systématique d'anciens ouvrages agricoles, la plupart étant de type "terrasse", hérités des sociétés précolombiennes et dont le rôle était de contrôler en partie les effets du ruissellement et de l'érosion. Ces vestiges, relativement nombreux dans toute la Sierra (Gondard, Lopez, 1983), sont constitués par des talus de pierres ou de blocs de cendres indurées. A Pimampiro (Province de Imbabura), les talus sont volontairement abattus pour laisser la place à de grandes parcelles mécanisables. A proximité de Zhud (province de Cañar), dans une zone de colonisation récente et de moyenne propriété, de larges terrasses au profil concave, témoins de l'ancienne civilisation Cañari, apparaissent sous le "Chaparral" (autre terme pour désigner le "matorral") en cours de défrichement. Ici aussi, ces ouvrages sont détruits pour agrandir la taille des champs. A Punín et à Flores ainsi qu'à Colta et Chunchi (Province de Chimborazo), il existe également, dans des conditions de pente déjà forte (40-60 %) et à une altitude située entre 3200 m et 3600 m, de

véritables terrasses séparées par des talus de plusieurs mètres de haut. Les talus intermédiaires ont été abandonnés ou détruits et seuls sont conservés les talus qui servent de limites de propriété. Ceux-ci ne délimitent plus que des "pseudo-terrasses" excessivement larges et déclives, inadaptées aux conditions du milieu. A Ingapirca (Province de Cañar), qui est une ancienne zone d'influence incaïque, certains chemins principaux sont bordés d'énormes tas de cailloux bien empilés qui auraient pu, judicieusement entassés selon les courbes de niveau, constituer de magnifiques cordons de pierres (gabions).

En résumé, les pratiques et ouvrages conservatoires sont très rares et lorsqu'ils existent, ils sont peu efficaces pour limiter les phénomènes d'érosion. C'est le cas, par exemple, sur les hautes terres densément cultivées des provinces de Chimborazo et de Cotopaxi, où apparaissent quelques ouvrages récents de conservation des sols dont l'efficacité est réduite. Il s'agit de petites rigoles d'écoulement des eaux de ruissellement (les "rayas") et de barrières vives. Les rigoles sont en général trop peu profondes (une vingtaine de cm au plus) et leur pente est trop déclive (20 à 25 %) pour assurer un transfert satisfaisant des eaux de ruissellement. Il en est de même pour les haies vives de "siges" (*Gynerium*) qui sont disposées d'une manière aléatoire face à la pente dominante (De Noni et al., 1994).

On est donc très éloigné du contexte qui avait permis aux sociétés pré-hispaniques, avec des densités de population déjà

élevées (voir chapitre 1), de mettre au point une gestion conservatoire des sols adaptée aux versants andins. Le petit paysan a une perception à court terme du travail de la terre destiné à satisfaire ses besoins immédiats, la conservation du sol pour les générations futures ne fait pas partie de sa logique et cela se comprend.

Les méthodes conservatoires utilisées

Les réponses aux enquêtes ayant apporté peu d'éléments nouveaux sur les moyens de lutter contre l'érosion, le problème restait quasi entier. Devant l'absence de stratégie locale, quelles méthodes de conservation des sols fallait-il préconiser, tout en favorisant une participation forte du paysannat ? De quelle manière évaluer l'efficacité de ces méthodes avant d'envisager une possible application sur le terrain ?

L'un des buts principaux était de limiter le ruissellement, l'élément essentiel étant d'améliorer l'infiltration de l'eau par le travail du sol. Le tracé des billons est très rarement isohypse, les opérations de sarclage sont effectuées très rapidement ce qui laisse peu de temps pour retravailler le sol

et façonner correctement de nouvelles buttes au pied de la plante. Dans tous les cas, les billons ne sont pas refaits au cours du cycle cultural.

Pour corriger cette pratique, pour toutes les cultures (maïs, pommes de terre et fève, seule l'orge qui est cultivée à plat échappe à cette pratique), a été préconisé de façonner systématiquement la surface du sol en un billonnage profond et isohypse. Au moment des travaux de sarclage et de buttage, répétés 3 fois en moyenne au cours du cycle cultural, le billon, dont la forme s'émousse jusqu'à disparaître quasi totalement à mesure que se succèdent les pluies, devait être refait totalement.

L'effet du "mulch" est important aussi pour protéger le sol des gouttes de pluies. En général après la récolte, le paysan laisse entrer les bêtes sur la parcelle pour manger les résidus de culture. Le sol est alors piétiné, tassé et laissé nu. A titre de démonstration, on s'est efforcé d'empêcher les animaux d'entrer sur les parcelles améliorées et on n'a ramassé qu'une partie des résidus de telle sorte que le sol ne soit jamais totalement nu entre deux semis.

Des ouvrages simples, disposés perpendiculairement à la plus grande pente, ont été envisagés pour freiner l'énergie du ruissellement et le transfert de l'eau. L'objectif était d'étaler les eaux en nappe pour briser cette énergie et éviter que le ruissellement ne dépasse une vitesse de l'ordre de 25 cm par seconde, seuil au-delà duquel l'eau se concentre et érode le sol (Hjulström, 1935). Les matériaux utilisés pour réaliser ces

ouvrages étaient nécessairement ceux qu'emploient traditionnellement les paysans dans leur vie quotidienne (maisons, haies, murets, bandes de végétation, etc.) et dont nous avons noté l'existence au cours des enquêtes. En permettant de freiner l'énergie du ruissellement, ces ouvrages favorisent le dépôt et l'accumulation des matériaux transportés par les eaux. Des "pseudo-terrasses" se forment ainsi progressivement et naturellement (voir plus loin croquis de la fig. n° 60 + photo). Leur formation requiert donc peu de travail de la part de l'agriculteur, leur coût est faible et leur entretien facile, ce qui était bien le but recherché (Bennett, 1939 ; Lilin, 1986 ; Hudson, 1973, 1992 ; Roose, 1994).

Pour pouvoir tester l'efficacité de ces méthodes et compter avec la participation des paysans, le dispositif existant sur les stations a été utilisé. Toutes les stations étant installées dans des conditions "vraies" de terrain et non pas sur des sites agronomiques expérimentaux correspondant que rarement avec ces conditions, notre approche pouvait s'inscrire dans le cadre du minifundio. Grâce aux résultats acquis en situation témoin sous pluies naturelles et simulées, des données de référence étaient disponibles et pouvaient être comparées à celles qui seraient obtenues sur les parcelles améliorées. Cette comparaison était nécessaire pour pouvoir justifier l'efficacité de nos propositions.

2) LES APPORTS DE L'EXPÉRIMENTATION PAR LES PARCELLES AMÉLIORÉES ET LES SIMULATIONS DE PLUIE

Pour tester l'efficacité de nos propositions de lutte anti-érosive, sur toutes les stations ont été installées des parcelles de ruissellement différentes des parcelles témoins et une nouvelle série de pluies simulées a été réalisée. Par rapport aux situations témoins, le nouveau dispositif opère sur des situations améliorées qui intègrent des éléments de lutte anti-érosive, basés essentiellement sur le travail du sol et l'inclinaison de la pente.

2.1 Les parcelles de ruissellement améliorées

Dispositif et protocole

Comme nous l'avons introduit au chapitre précédent, les parcelles de ruissellement améliorées sont plus grandes que les parcelles témoins : leur surface est de 1000 m² (50 m X 20 m). Leur taille a permis d'installer correctement les ouvrages conservatoires et de s'affranchir des effets de bordure. Leur dimensions a été limitée volontairement, par

*reste à
prouver*

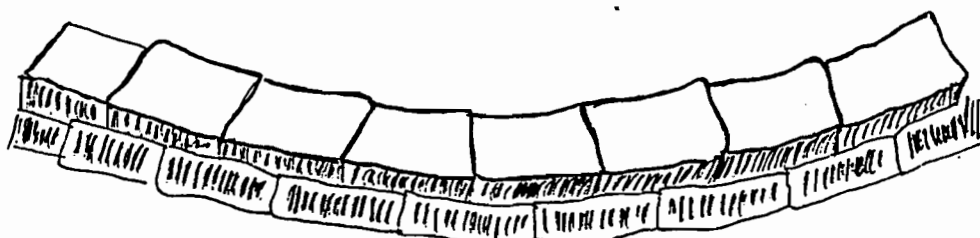
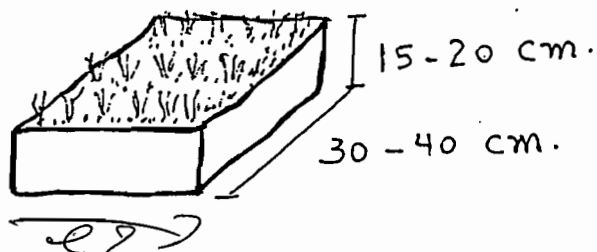
ailleurs, à 1000 m² afin de ne pas créer un écart de surface trop important par rapport aux parcelles témoins et d'éviter ainsi d'introduire un effet "transfert d'échelle" d'autant plus difficile à maîtriser que cet écart est important. Les résultats ont été exprimés en kilogrammes ou tonne par hectare afin de pouvoir comparer les résultats avec ceux des parcelles témoins.

Les parcelles de ruissellement améliorées ont été installées en même temps que les parcelles témoins et à côté de ces dernières. Il était ainsi possible de suivre précisément le comportement des ouvrages testés et d'apporter des modifications si cela était nécessaire (fig. n° 59). En fonction des stations et des problèmes de conservation des sols, l'ajout d'une ou plusieurs parcelles améliorées a été réalisé (tableaux récapitulatifs en annexe 1 et tab. n° 16). Sur toutes les parcelles, la culture traditionnelle a été maintenue et des ouvrages anti-érosifs pour briser l'énergie du ruissellement ont été installés. Par ailleurs, le sol a systématiquement été travaillé pour améliorer l'infiltration de l'eau. Compte tenu de la longueur de la parcelle et de l'avis des paysans, une distance de l'ordre de 10 à 12 m entre chaque ouvrage a été définie ce qui donne un nombre de 3 ouvrages par parcelle. Comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent, nous avons préféré nous ranger à l'avis du paysan plutôt que de calculer cette distance par des formules qui ne sont que rarement adaptées aux problèmes locaux.

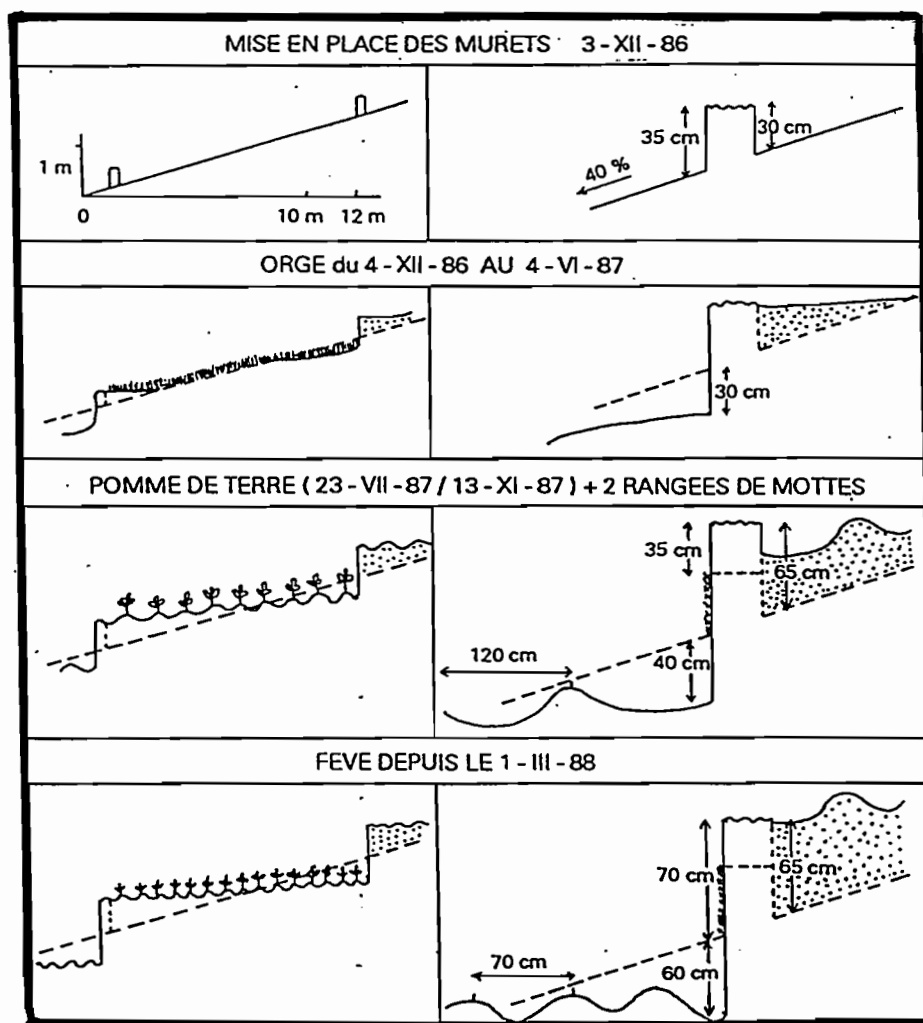
Fig. n°60

La pratique du muret de "chambas" (Station de Mojanda)

La chamba est une motte de terre
et d'herbe avec racines



Chaque étape de construction est composée de
2 rangées de chambas, retournées et empiées
l'une sur l'autre



Station de Mojanda : Mise en place et évolution de la hauteur des
murets qui passe de 0,30-0,35m à 1,30m, entre 1986 et 1988

Tab. n° 16

Erosion et ruissellement, par années, pour la période 1986-1991

Parcelles améliorées

Station de TUMBACO		AMELIOREEN N° 1		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha
86-87	688,3	104863	1,5	19803
87-88	706,5	55230	0,8	469
88-89	627,1	382211	6,1	581
89-90	625,7	116516	1,9	861
90-91	777,4	72129	0,9	668
Moy sur 5 ans	685,0	146190	2,1	4476

la moyenne entre 19 et 10,5
cela signifie quoi ?

Station de CANGAHUA		AMELIOREEN N° 1			AMELIOREEN N° 2		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
86-87	452,3	3849	0,1	337	6204	0,1	501
87-88	435,7	22882	0,5	396	27322	0,6	525
88-89	691,5	3431	0,0	32	879	0,0	12
89-90	488,6	388	0,0	58	0	0,0	2
90-91	609,6	11746	0,2	508	20250	0,3	827
Moy sur 5 ans	535,5	8459	0,2	266	10931	0,2	373

Station de MOJANDA		AMELIOREEN N° 1			AMELIOREEN N° 2		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
86-87	668,9	22867	0,3	358	20472	0,3	377
87-88	886,2	11900	0,1	368	12688	0,1	241
88-89	1265,2	7221	0,1	104	5781	0,0	82
89-90	814,6	5109	0,1	123	5217	0,1	39
90-91	943,6	31864	0,3	1081	9718	0,1	174
Moy sur 5 ans	915,7	15792	0,2	403	10775	0,1	182

Station de RIOBAMBA		AMELIOREEN N° 1		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha
86-87	702,1	18625	0,3	449
87-88	751,0	462545	6,2	7620
88-89	997,1	363736	3,6	1360
89-90	501,2	163803	3,3	3411
90-91	560,4	64833	1,2	9300
Moy sur 5 ans	702,4	214708	3,1	4428

Station de JADAN		AMELIOREE		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha
1989	307,6	111466	3,6	12602
1990	428,9	71325	1,6	5018
1991	483,9	81696	0,9	3056
Moy. 1989-91	406,8	88162	2,03	6892

Station VEGA GRANDE		AMELIOREEN N° 1			AMELIOREEN N° 2			AMELIOREEN N° 3		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
1989	638,5	87657	1,4	18224	16673	0,3	9775	16832	0,3	3165
1990	550,9	133278	2,4	7178	135235	2,5	18880	74036	1,3	8131
Moy sur 2 ans	594,7	110467	1,9	12701	75954	1,3	14328	45435	0,8	5648

Station de VENTANAS		AMELIOREEN N° 1			AMELIOREEN N° 2		
date	P. mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
89	2249,5	2145569	9,5	12122	2486651	11,1	44960
90	1569,2	49409	0,3	527	65158	0,4	2913
91	1439,7	1042716	7,2	8309	1238364	8,6	9094
Moy sur 3 ans	1752,8	1079232	6,2	6966	1263391	7,2	18989

Selon les caractéristiques des sites et les résultats des enquêtes, les méthodes et les matériaux suivants pour l'édification des ouvrages conservatoires ont été retenus :

- à Tumbaco, le choix s'est porté vers la méthode des bandes enherbées parce que la prairie à "kikuyu" (*Penisetum clandestinum*), relativement étendue dans le secteur, présente une remarquable faculté de colonisation des sols et de développement dans des conditions écologiques difficiles (présence de la cangahua et pluviométrie inférieure à 700 mm). On a donc installé sur la parcelle une bande de kikuyu et profité de cet essai pour tester, à titre expérimental, sur les bandes restantes deux autres types de graminées : "le pasto lloron" (*Eragrostris curvula*) et "le pasto azul" (*Dactylus glomerata*) ;

- à Cangahua, ont été installés des ouvrages isohypses constitués par des murets de bloc de cangahua et des haies d'arbustes ("chilca", *Spartium junceum*) qui sont des matériaux et des pratiques très utilisés dans cette région, même si le rôle dévolu par les sociétés locales n'est pas à priori de lutter contre l'érosion. On a installé deux parcelles améliorées : sur l'une, ont été placés des murs de blocs de cangahua dont l'induration naturelle est propice à l'édification



Parcelle de culture entourée par un muret de blocs de cangahua. Dans la Sierra volcanique, l'érosion a décapé de vastes surfaces de cangahua, formation volcanique indurée, stérile en l'état pour l'agriculture. Le paysan utilise donc peu ce matériau si ce n'est pour construire des murets servant à délimiter les parcelles. Il n'emploie pas ces murets pour lutter contre le ruissellement. L'absence de pratiques conservatoires traditionnelles est l'une des caractéristiques importantes de la Sierra de l'Equateur.



Site expérimental de cangahua. Compte tenu de l'importance spatiale des surfaces de cangahua dans ce secteur et de la possibilité de construire des murets de blocs de cangahua pour lutter contre le ruissellement, cette technique a été testée sur le site en disposant plusieurs murets selon les courbes de niveau. L'érosion moyenne pour la période 1986-91 a été ainsi ramenée à $< 1/2 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$.

de talus évoluant en terrasses progressives ; tandis que sur l'autre, des fossés d'infiltration (rappelons que la zone de cangahua souffre d'un déficit hydrique chronique chaque année durant le cycle cultural) ont été creusés et associés à des haies de chilca, arbuste qui présente le double avantage d'être pâturable et de fixer par ses racines les bords du fossé. L'action de cordons de pierres (blocs de cangahua) a également été envisagée mais cette méthode a été rapidement abandonnée car l'infiltration de l'eau dans le sol était insuffisante ;

- à Mojanda, l'environnement étant dépourvu de cailloux ou de matériau induré en raison de l'importante couche de pyroclastites, les agriculteurs utilisent la bande enherbée ou le muret formé de mottes de terre et d'herbe avec racines ("chambas" dans le langage local) pour cloisonner leurs parcelles. On s'est donc inspiré de cette tradition locale et nous avons installé deux parcelles améliorées en plaçant : sur l'une, des murets de mottes d'herbe qui, retournées et empilées, ont permis de créer des terrasses perméables de construction progressive (fig. n° 60) ; et sur l'autre, des bandes enherbées qui ont évolué, peu à peu, en terrasses.

Sur cette ultime parcelle, à partir de la troisième année de suivi, lorsque l'accumulation de sédiments est devenue importante à l'amont de la bande, des mottes de terre ont été ajoutées à la partie supérieure de celle-ci. L'ouvrage initial a donc évolué vers une construction mixte, bandes plus murets



Site expérimental de Mojanda. Les deux plus grandes parcelles ont 1000 m² de surface. Sur celle de gauche, ont été installées des murets de mottes d'herbe, retournées et empilées ; sur celle de droite, ont été testées des bandes enherbées associées à des murets de mottes d'herbe. Ces ouvrages, dérivés des pratiques locales, évoluent vers des terrasses de construction progressive.



Site expérimental de Cangahua. Sur l'une des deux grandes parcelles, ont été creusés des fossés d'infiltration (chaque année, ce secteur souffre d'un déficit hydrique durant le cycle cultural) associés à des haies de "chilca", arbuste qui présente le double avantage d'être pâturable et de fixer par ses racines les bords des fossés.

en grosses mottes, bien adaptées aux conditions locales. Lorsque l'herbe a été correctement enracinée, une partie des mottes a été débitées directement à la base de la bande ;

- à Riobamba, où il manque aussi de matériaux résistants (cailloux ou sol induré), nous avons opté, comme à Mojanda et comme le pratique le paysannat local, pour la bande enherbée. Sur une seule parcelle, on a installé des bandes isohypses composées alternativement par de la végétation naturelle (*Stipa ichu* du paramo, qui se trouve ici dans son étage écologique) et par du pâturage artificiel ("pasto azul", *Dactylis glomerata*). Par rapport à l'herbe du paramo, le développement du pasto azul a été assez médiocre ; le recours à un ouvrage mixte, bande plus muret comme à Mojanda, n'a pas été possible à cause de la mauvaise cohésion des particules du sol de la station (andosol vitrique) pour former des mottes ;

- à Jadan, Vega Grande et Ventanas, où les observations ont débuté plus tardivement, nous avons décidé, à la vue des résultats déjà obtenus, de tester sur chacune de ces stations une parcelle améliorée dotée de bandes enherbées. La graminée retenue était le "pasto elefante" (*Pennisetum purpureum*). A Jadan, une seule parcelle améliorée a été installée. En revanche à Vega Grande et à Ventanas, ce dispositif a été complété. Deux parcelles améliorées ont été ajoutées à Vega Grande pour tester l'action des fossés d'infiltration et des cordons pierreux. A Ventanas, une parcelle améliorée supplémentaire a été installée pour observer les

effets dus au labour minimal associé à un désherbage chimique.

Les résultats des parcelles de ruissellement améliorées

Pour toutes les stations, le tableau n° 16 indique la hauteur pluviométrique en millimètres (mm), le volume d'eau ruisselé en litres par hectare (l.ha^{-1}), le coefficient de ruissellement en % et les pertes en terre (charges de fond plus suspension en kilogrammes par hectare (kg.ha^{-1})). Les données par mois se trouvent dans les tableaux de l'annexe 1.

Pour aider à la comparaison entre les différentes situations, on a reporté sur des histogrammes, par station, les données des parcelles améliorées et celles des situations témoins. Les figures correspondantes, n° 61, 62 et 63, indiquent les valeurs moyennes par année du ruissellement et des pertes en terre. De cette comparaison, il ressort que l'efficacité des méthodes testées pour diminuer les pertes en eau et en terre est très positive. Par station, les valeurs suivantes ont été obtenues :

- pour la station de Tumbaco (1986-91), l'érosion moyenne et les KRM pour la période ont été

Fig. n°61

Erosion log t/ha - Ruissellement moyen annuel KRa et KRM %
86-91

Parcelle témoin cultivée

Parcelle témoin non cultivée

Parcelle améliorée 1

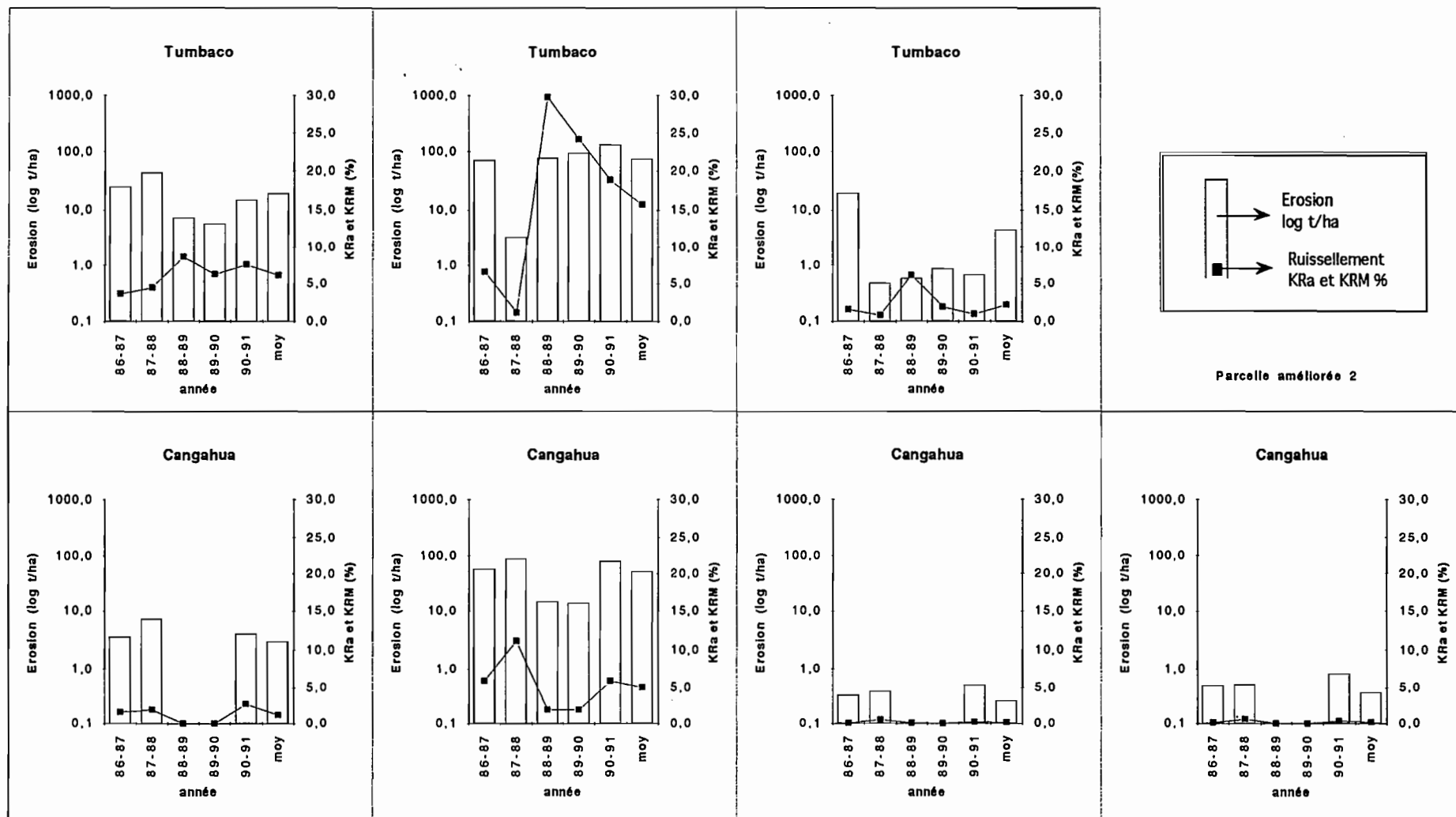


Fig. n°62

**Erosion log t/ha - Ruissellement moyen annuel KRa et KRM %
86-91**

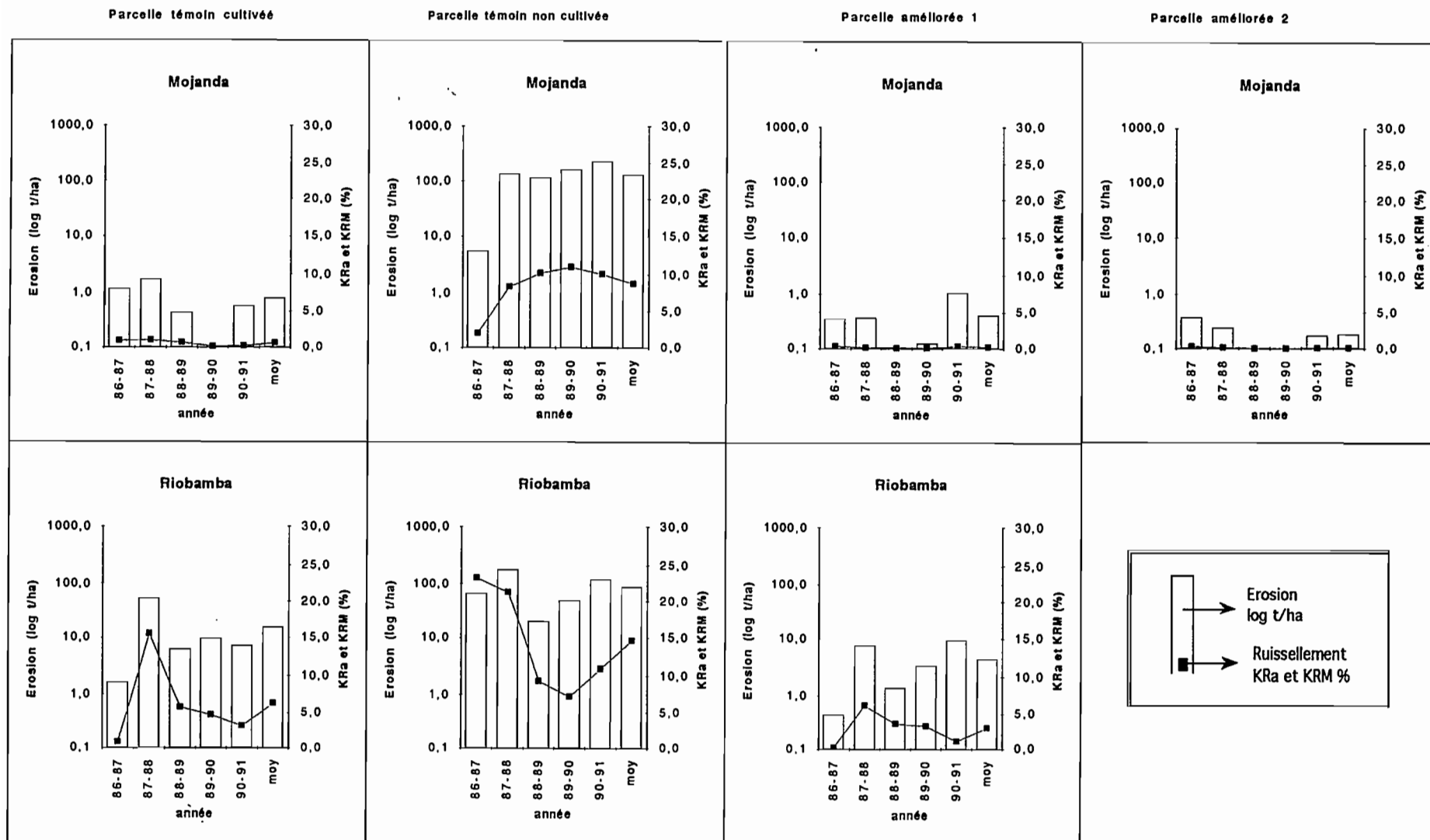
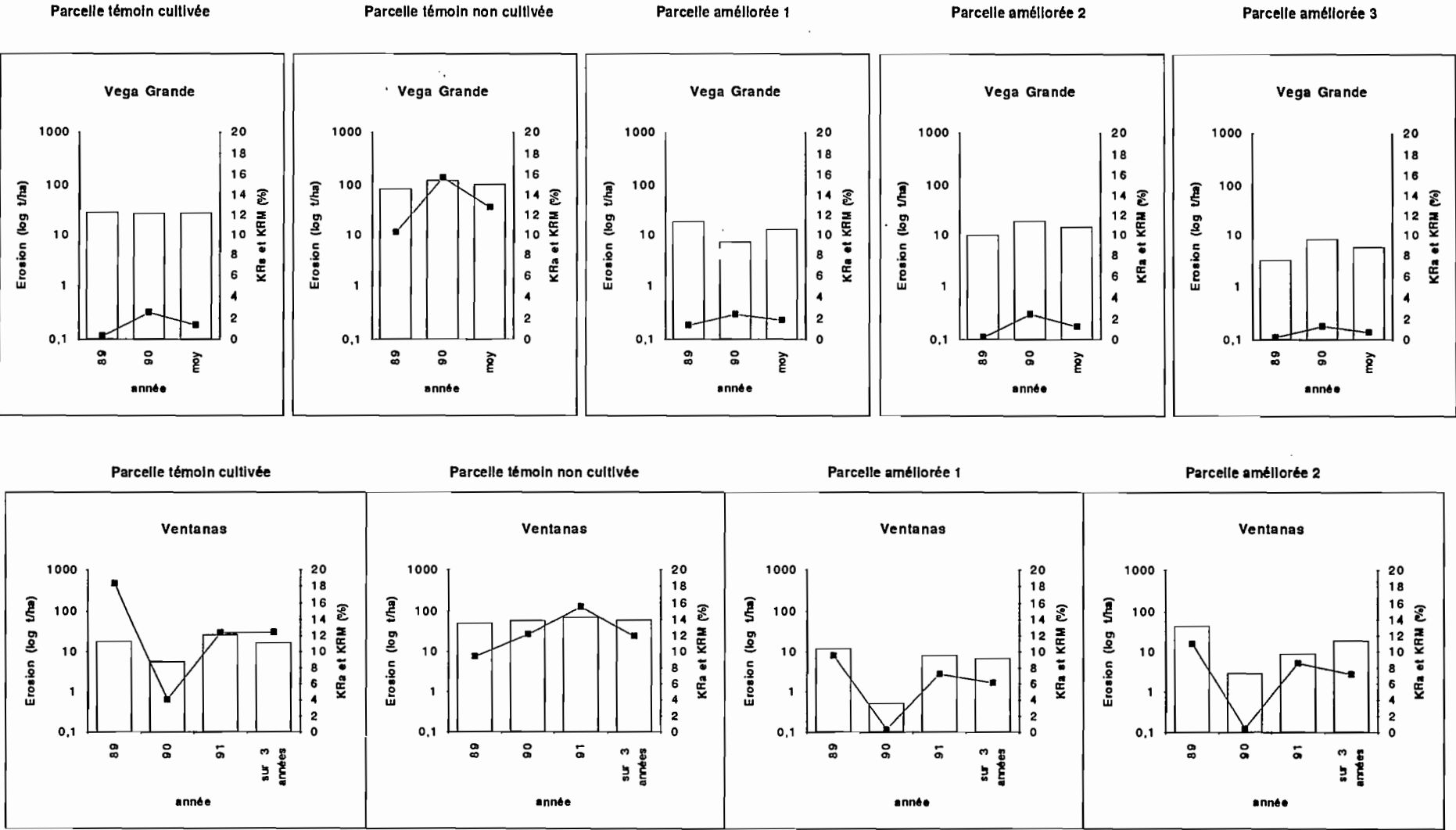


Fig. n°63

Erosion log t/ha - Ruissellement moyen annuel KRa et KRM%



respectivement de 4,5 t/ha et de 2,1 % sur l'unique parcelle améliorée (bandes enherbées). En réalité, l'érosion sur cette parcelle a été moins élevée que ce que nous annonçons. La première mesure, effectuée en septembre 1986, correspond à un orage d'une exceptionnelle violence qui s'est abattu sur la station alors que l'installation des ouvrages conservatoires sur la parcelle améliorée n'était pas encore achevée et correctement consolidée. Si nous éliminons cette mesure, l'érosion moyenne pour la période est abaissée à moins de 0,8 t.ha⁻¹ et le KRM à 1,8 % ;

- pour la station de Cangahua (1986-91), l'érosion et les KRM ont été inférieurs à 0.4 t.ha⁻¹ et de l'ordre de 0,2 % sur les deux parcelles améliorées (murets de cangahua et bandes enherbées) ;

- pour la station de Mojanda, l'érosion et les KRM sont également très faibles sur les deux parcelles améliorées, respectivement : 0.4 t.ha⁻¹ et 0,2 % sur l'une ; 0,2 t.ha⁻¹ et 0,2 % sur l'autre (murets et bandes enherbées) ;

- pour la station de Riobamba, les valeurs de l'érosion et des KRM sur la seule parcelle améliorée se situent à 4,5 t.ha⁻¹ et à 3,1 % (bandes enherbées) ;

- pour les trois stations restantes - Jadan (1989-91), Vega Grande (1989-90) et Ventanas (1989-91) - les pertes en eau et en terre sont plus élevées que sur les

stations précédentes, les résultats sont relativement hétérogènes entre parcelles et d'un site à l'autre. Ici, la précision des mesures est, rappelons-le, de moindre qualité, car les observations ont été plus intermittentes du fait de l'éloignement et de l'accès difficile de ces sites. A Vega Grande où il y a 3 parcelles améliorées, deux d'entre elles présentent des valeurs comprises entre 18 et 10 t.ha⁻¹ (respectivement bandes enherbées et cordons pierreux), avec des KRM inférieurs à 2 %, seule la troisième parcelle (fossés d'infiltration) affiche un résultat satisfaisant de l'ordre de 3 t.ha⁻¹ et un KRM de 0,3 %. A Jadan, on ne dispose que d'une seule parcelle améliorée pourvue de bandes enherbées : l'érosion fut de 7 t.ha⁻¹ pour un KRM faible, de l'ordre de 2 %. Enfin, à Ventanas, on a mesuré sur les deux parcelles améliorées qui composent la station, pour l'une 19 t.ha⁻¹ de perte en terre (travail minimum du sol) et pour l'autre 7 t.ha⁻¹ (bandes enherbées), avec des KRM de l'ordre de 6-7 % incluant des KRM.max proches de 20 %.

Comparées aux données obtenues en situations témoins (fig. n° 61, 62 et 63 et tab. en annexe 1, les mesures effectuées sur les parcelles améliorées démontrent l'efficacité des ouvrages conservatoires testés, notamment l'emploi de la bande enherbée. Dans tous les cas, les valeurs observées en situation améliorée se situent bien en deçà de celles enregistrées en situations témoins.

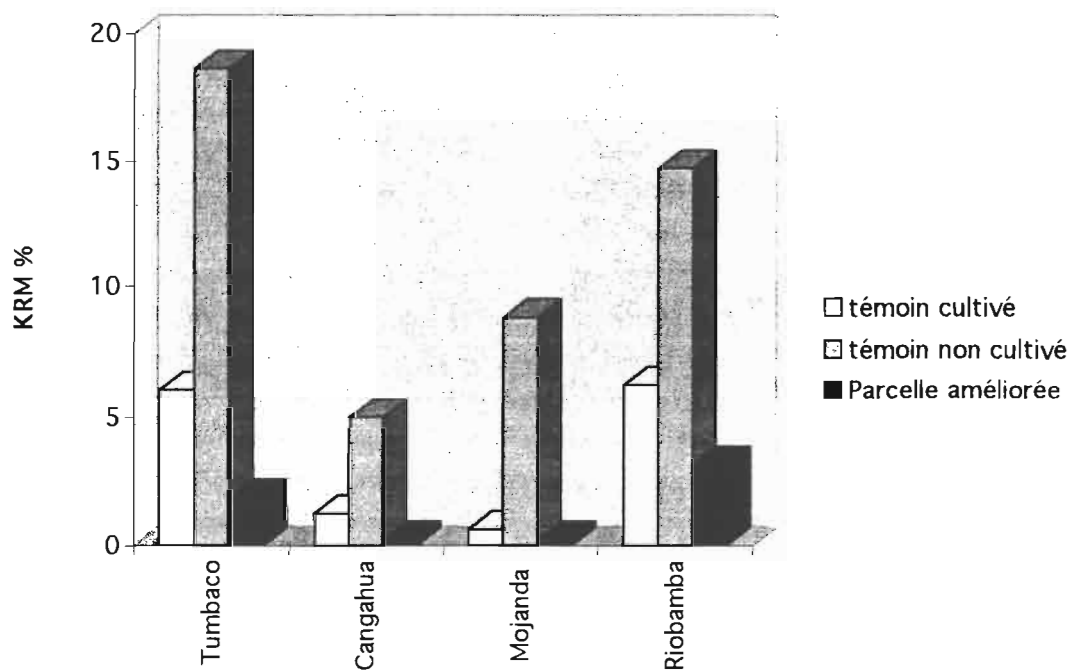
Les valeurs obtenues sur les stations de la Sierra du nord -

Tumbaco, Cangahua, Mojanda et Riobamba, où on dispose de valeurs moyennes correspondant à une série de données réparties régulièrement sur 5 ans, montrent bien l'excellent comportement des ouvrages testés (voir fig. n° 64). C'est ainsi qu'à Tumbaco, les valeurs de l'érosion et du KRM enregistrées sur la parcelle améliorée sont beaucoup plus faibles que sur les autres parcelles : elles sont respectivement, 120 et 9 fois moindres que sur le témoin non cultivé ; 24 et 3 fois moindres également que sur le témoin cultivé. Les rapports les plus élevés se situent à Cangahua et à Mojanda où on trouve respectivement entre 135 et 720 fois moins de terre et entre 25 et 88 fois moins d'eau qu'en situation témoin non cultivé. C'est à Riobamba que les rapports sont les plus étroits mais avec des valeurs, néanmoins, très significatives : l'érosion sur la parcelle améliorée est respectivement 20 fois et 4 fois moins importante que sur les parcelles témoins, avec des pertes en eau entre 2 à 5 fois plus faibles.

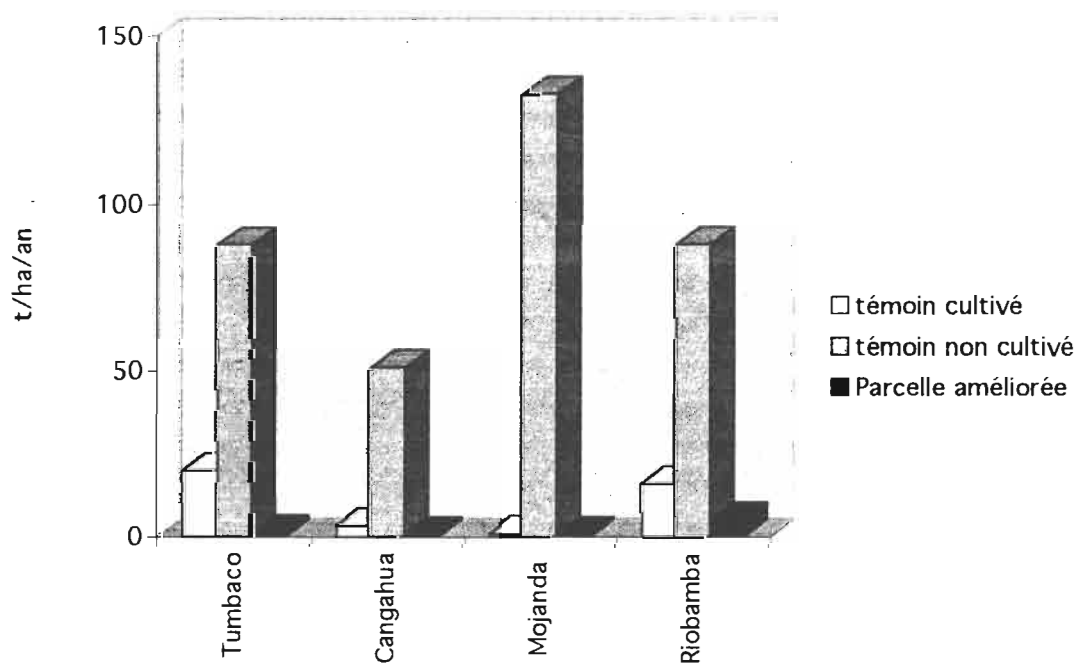
Si l'on passe d'une analyse des résultats globaux moyens pour la période à un examen année par année (tab. n° 16), il est intéressant de noter que les rapports qui donnent des valeurs maximales correspondent indifféremment à une année de faible ou de forte érosion, ce qui témoigne de l'efficacité des ouvrages testés. Par exemple à Cangahua, l'érosion sur la parcelle témoin non cultivée est de $13,9 \text{ t.ha}^{-1}$ en 1989-90 ce qui est la plus basse valeur de toute la période, parallèlement l'érosion sur la parcelle améliorée n° 2 est quasi inexistante et estimée à 2 kg, soit 7000 fois moins autrement dit, le plus

Fig. n° 64

Coefficients annuels moyens de ruissellement



Pertes en terre annuelles moyennes



fort rapport pour toute la période. A Mojanda, pour une très forte érosion supérieure à 160 t.ha^{-1} en 1989-90 sur le témoin non cultivé, la parcelle améliorée n° 2 s'érode 4000 fois moins ce qui est également le plus fort rapport enregistré pour toute la période. Sur la station de Riobamba pour la période allant du 20 septembre au 12 novembre 1987 (date de semis) où 3 pluies érosives ont donné lieu à près de 34 t.ha^{-1} de terre perdue sur la parcelle témoin en culture traditionnelle alors que pour ces mêmes dates et pour un labour identique, l'érosion sur la grande parcelle améliorée n'est que de l'ordre de $1,1 \text{ t.ha}^{-1}$.

Sur les trois autres stations (fig. n° 63), les mesures relevées se situent dans une fourchette de valeurs plus élevées (entre 7 et 19 t.ha^{-1}) que sur les stations de la Sierra volcanique. Néanmoins, il ressort clairement que les parcelles améliorées s'érodent moins vite que les parcelles témoins, globalement entre 3 et 14 fois moins. Il est intéressant de noter les bons résultats obtenus avec la technique des fossés d'infiltration. Une solution mixte, associant bandes enherbées et fossés, devrait permettre d'abaisser sensiblement plus l'érosion.

Les pertes en eau ont été également réduites de façon significative. Hormis la station de Ventanas (KRM entre 6 et 7 %) où la pluviométrie annuelle est bien plus élevée que sur les autres sites, de l'ordre de 1500 à 2000 mm, ce coefficient ne dépasse pas 3 % sur toutes les autres stations. Dans le cas particulier de la Sierra, où l'eau dans le sol peut manquer au cours du cycle cultural, réduire le ruissellement présente un réel intérêt pour contrôler l'alimentation hydrique de la plante

et mener ainsi la récolte à terme.

Les observations effectuées sur les parcelles améliorées montrent également l'amélioration des rendements des végétaux. De manière générale, on constate sur les stations une bonne relation entre la maîtrise des pertes en eau et en terre et l'amélioration de la production agricole. Parmi les situations où les rendements se sont accrus de manière significative au cours de la période, on peut citer l'exemple de Mojanda : la récolte de pommes de terre a été en moyenne de l'ordre 4 t.ha^{-1} sur la parcelle témoin et de 8 t.ha^{-1} sur la parcelle améliorée, la différence ayant été encore plus forte les années où a été cultivée la fève avec $1,1 \text{ t.ha}^{-1}$ sur la parcelle témoin et 9 t.ha^{-1} en condition améliorée. Sur la portion de versant comprise entre deux murets et dont l'inclinaison initiale est de l'ordre de 40 %, la pente moyenne avait diminué pratiquement de moitié, après 3 années d'observation, du fait de l'accumulation de la terre derrière les ouvrages (voir fig. n° 60). La pente la plus faible, voisine de 10 %, correspond aux 3 ou 4 derniers mètres qui jouxtent le muret et où s'est accumulée la plus grande partie des particules du sol. C'est dans cette zone qu'on a relevé les rendements les plus élevés par rang de culture ;

Nos observations montrent, aussi, l'adaptabilité socio-économique des ouvrages. A mesure que les parcelles améliorées se mettaient en place sur les stations, on a cherché à évaluer l'adaptabilité des ouvrages aux coutumes

locales. Pour sensibiliser l'agriculteur à l'intérêt de ces techniques, outre leur efficacité pour lutter contre l'érosion, on a insisté pour démontrer que :

- * les ouvrages évoluant progressivement et naturellement en pseudo-terrasses, le temps de travail consacré par l'agriculteur à ce type d'activité est minimal ;

- * l'utilisation exclusive de matériaux autochtones permet à l'agriculteur d'acquérir rapidement la maîtrise nécessaire pour construire ces ouvrages,

- * enfin, le coût d'installation et d'entretien des ouvrages est minimal et ne constitue donc pas un facteur limitant rédhibitoire au développement d'une stratégie conservatoire et durable des terres. L'évaluation des coûts durant la période des essais a permis de dresser le tableau suivant :

Tableau n° 17

Coûts de construction et d'entretien des ouvrages

Tableau 6.

durant la période 1986 - 1991

années	Talus en mottes herbeuses "Chambas"			Murets en blocs de cendre indurée			Bandes enherbées	
	nombre de jours-homme (j/h) type de travaux	coût pour 20 m linéaires	coût / ha sucres	nombre de jours-homme (j/h) type de travaux	coût pour 20 m linéaires	coût / ha sucres	nombre de jours-homme (j/h) type de travaux	coût / ha sucres
1	1/j/h piochage 2/j/h pose de 2 rangs	2625	131250	2/j/h défonçage 3/j/h Tr + pose de 2 rangs	4375	218750	3/j/h tracé des bandes et semis	46000 dont 25000 semences
2	Idem	2625	131250	Idem	4375	218750	2 j/h entretien + 3 coupes par an	84000
3	1/j/h piochage 1/j/h pose de 1 rang	1750	87500	1/j/h défonçage 2/j/h Tr + pose de 2 rangs	2625	131250		84000
4	Idem	1750	87500	Idem	2625	131250		84000
5	1/j/h entretien		21000	1/j/h entretien		31000		84000
Coût total pour la période		458500 soit 1310 FF			721000 soit 2060 FF		382000 soit 1091 FF	

*j/h : jour/homme - Tr. : transport - 1 franc = 350 sucres
(monnaie locale)*

Pour les cinq années culturales considérées, on constate que les coûts globaux et cumulés sont très bas et varient entre 1000 et 2000 FF par hectare, pour la période de cinq ans. On peut donc estimer que des investissements de ce type sont accessibles au paysannat local, d'autant plus que ce dernier augmente ses bénéfices grâce à l'augmentation des rendements¹.

Ceci étant, ces données n'ont qu'une valeur très relative dans

¹ On n'a pas pu évaluer de façon précise le revenu du paysan. Néanmoins, en conditions normales, la production agricole est destinée essentiellement à l'alimentation de la famille. En conditions améliorées, l'augmentation des rendements permet au paysan de dégager un surplus de récolte qui est vendu au marché de la ville proche et qui lui rapporte ainsi un bénéfice qu'il n'avait pas auparavant.

la mesure où le minifundio pratique, de manière ancestrale, le travail communautaire qui permet de mobiliser un groupe de villageois pour effectuer des tâches d'intérêt général sur toutes les parcelles de la commune. Dans ce cas, le travail n'a plus de coût chiffré et l'investissement est quasi nul ou réduit au minimum comme dans le cas des bandes enherbées où il se résume à l'achat de quelques semences ;

Nos observations montrent, enfin, la faisabilité des méthodes préconisées dans les conditions du minifundio. Pour tester la faisabilité des méthodes, on a développé sur la station de Mojanda une opération de valorisation en vraie grandeur. Une trentaine de familles, sensibilisées par les résultats obtenus à proximité de chez eux sur la station, s'est portée rapidement volontaire pour participer à cette action. Les principales règles de cette opération étaient les suivantes :

- une somme d'argent remboursable au bout d'une année selon un taux d'intérêt faible (10 %), de l'ordre de 1.000 Frs, était prêtée à chaque famille afin d'améliorer la qualité des intrants (achat de semences améliorés, d'engrais etc ...). Cette action a été d'autant plus appréciée que les taux d'intérêt pratiqués en Equateur sont très élevés et en moyenne supérieurs à 50 %,

- pour accéder à ce prêt et démontrer ainsi leurs motivations, les paysans s'engageaient volontairement à installer sur leurs parcelles les ouvrages conservatoires testés sur la station.

Au bout de 2 années de suivi, on constatait que les agriculteurs géraient sans problème particulier les ouvrages conservatoires, qu'ils étaient satisfaits des rendements obtenus et qu'ils respectaient avec régularité les échéances de remboursement du crédit. Cet exemple, qui a connu un vif succès, montre qu'il est possible sur la base d'une concertation entre les différents acteurs, agriculteurs, techniciens et chercheurs, d'atteindre les objectifs fixés. Les paysans ont démontré ainsi qu'ils pouvaient s'intégrer positivement à une opération de conservation des sols et qu'ils étaient prêts à se former à des pratiques culturales mieux adaptées aux pentes de la Sierra dans la mesure où ces pratiques tiennent compte de leurs usages et traditions. Cet exemple concret démontre qu'il existe d'autre stratégie que l'assistanat passif du paysannat associé à l'introduction de pratiques extérieures à la région, comme cela se pratique dans de nombreux programmes de conservation des sols où le taux d'échecs est supérieure aux réussites.

2.2 Les simulations de pluie en situations améliorées

Dispositif et protocole

Une nouvelle série de pluies simulées a été réalisée pour compléter l'étude du comportement de situations spécifiques qui n'ont pu être précisées sur les parcelles de ruissellement. Nous avons choisi la situation de sol enherbée qui a été utilisée sur la plupart des stations et le cas de la cangahua qui, du fait de son importance dans la Sierra, notamment dans les bassins versants volcaniques de Guyallabamba et de Pastaza, nécessitait une analyse plus approfondie.

Le sol enherbé est une place importante dans notre stratégie de conservation des sols, les ouvrages de type, bandes ou murets "végétalisés", ont donné de bons résultats par rapport aux autres méthodes testés pour réduire l'énergie du ruissellement. Néanmoins, leur susceptibilité au ruissellement n'a pu être estimée précisément car ce phénomène est difficilement perceptible à l'échelle de la parcelle où les résultats expriment l'effet de plusieurs variables. Le but recherché était donc d'évaluer ce comportement en tentant de répondre à deux questions. Celle du rôle du couvert végétal sur

l'infiltration de l'eau dans le sol ; à terme existe-t-il un risque de reprise du ruissellement et de l'érosion à partir de la bande enherbée ? Et celle du comportement d'une graminée par rapport à une autre autrement dit, y-a-t-il des différences de comportement du couvert en fonction des graminées utilisées ? Les essais de simulations de pluies ont été conçus dans ce sens et ont été réalisées sur toutes les stations sauf à Cangahua et Ventanas pour des raisons techniques.

Il était important également d'envisager le cas de la cangahua qui est l'une des composantes principales des paysages de la Sierra. Lorsque l'érosion fait affleurer la cangahua, la déprise agricole tend à s'accélérer sur cette formation indurée et impropre en l'état à l'agriculture (voir chapitre 1). Pour freiner l'exode des paysans, il est donc nécessaire de se poser la question de la réhabilitation de la cangahua pour l'agriculture. Rappelons que pour pouvoir réhabiliter cette formation, il faut d'abord défoncer sa surface puis pulvériser les mottes pour préparer le lit de semence. Le problème majeur réside dans ce travail de réhabilitation qui rend le matériau de plus en plus érodible à mesure que s'amenuise la taille des agrégats comme le montrent les résultats obtenus sur les parcelles témoins de la station de Cangahua (voir chapitre 2). Bien que de bons résultats aient été obtenus sur les parcelles améliorées de cette même station pour réduire les pertes en terre, d'autres problèmes restaient en suspens pour mieux répondre à l'attente du paysannat. Les risques d'érosion demeuraient sensibles car le matériau pulvérulent est très battant, en

outre ce dernier infiltre faiblement l'eau d'où l'existence d'un déficit hydrique pour l'alimentation de la plante et, enfin, il est peu fertile en l'état notamment à cause d'une carence en matière organique, ce qui nuit à l'obtention de rendements corrects.

Ces différents facteurs limitants ont été mis en évidence sur les parcelles de ruissellement mais l'approche n'a pas été assez précise pour permettre d'y remédier. C'est la raison pour laquelle une nouvelle série de pluies simulées a été effectuée avec pour objectif d'évaluer l'influence d'amendements organiques et d'apports de pierres ponce sur le comportement hydrodynamique de la cangahua réhabilitée.

Pour des raisons pratiques d'accessibilité à une source d'alimentation en eau destinée au simulateur, les essais ont été effectués sur le site de Tumbaco, à proximité de la station, sur une zone dégradée où affleure une surface de cangahua indurée, de l'ordre d'un demi-hectare. Les situations suivantes ont été envisagées sur des micro-parcelles de 1 m² :

- la cangahua défoncée à différentes profondeurs :

+ 4 parcelles défoncées à 20 cm,

+ 3 parcelles défoncées à 40 cm,

+ 3 parcelles défoncées à 60 cm.

Les mottes sont ensuite brisées et ratissées dans le sens de la pente, sans aucun apport ;

- la cangahua défoncée à 20 cm de profondeur et brisée en mottes, avec incorporation de matière organique dans tout le profil puis ratissée dans le sens de la pente. On a réalisé ainsi :

- + 3 parcelles avec 40 t.ha^{-1} de fumier de poulet,
- + 1 parcelle avec 80 t.ha^{-1} de fumier de poulet,
- + 3 parcelles avec 120 t.ha^{-1} de fumier de poulet,
- + 3 parcelles avec 120 t.ha^{-1} de fumier de bovin ;

- et la cangahua défoncée à 20 cm de profondeur et brisée en mottes, avec incorporation de pierres poncees dans tout le profil, soit une augmentation de 16 % du volume initial de sol puis ratissée dans le sens de la pente. Trois parcelles ont été ainsi préparées.

Pour toutes les situations, sur sol enherbé et sur cangahua réhabilité, les protocoles de simulation, que nous avons suivis, sont les mêmes que ceux déjà utilisés sur les situations témoins (voir chapitre 2). Rappelons que les intensités maximales simulées ont une durée de 10, 15 et 30 minutes et que trois états hydriques, étalés sur 24 heures, sont pris en compte.

Les résultats des pluies simulées en situation améliorée

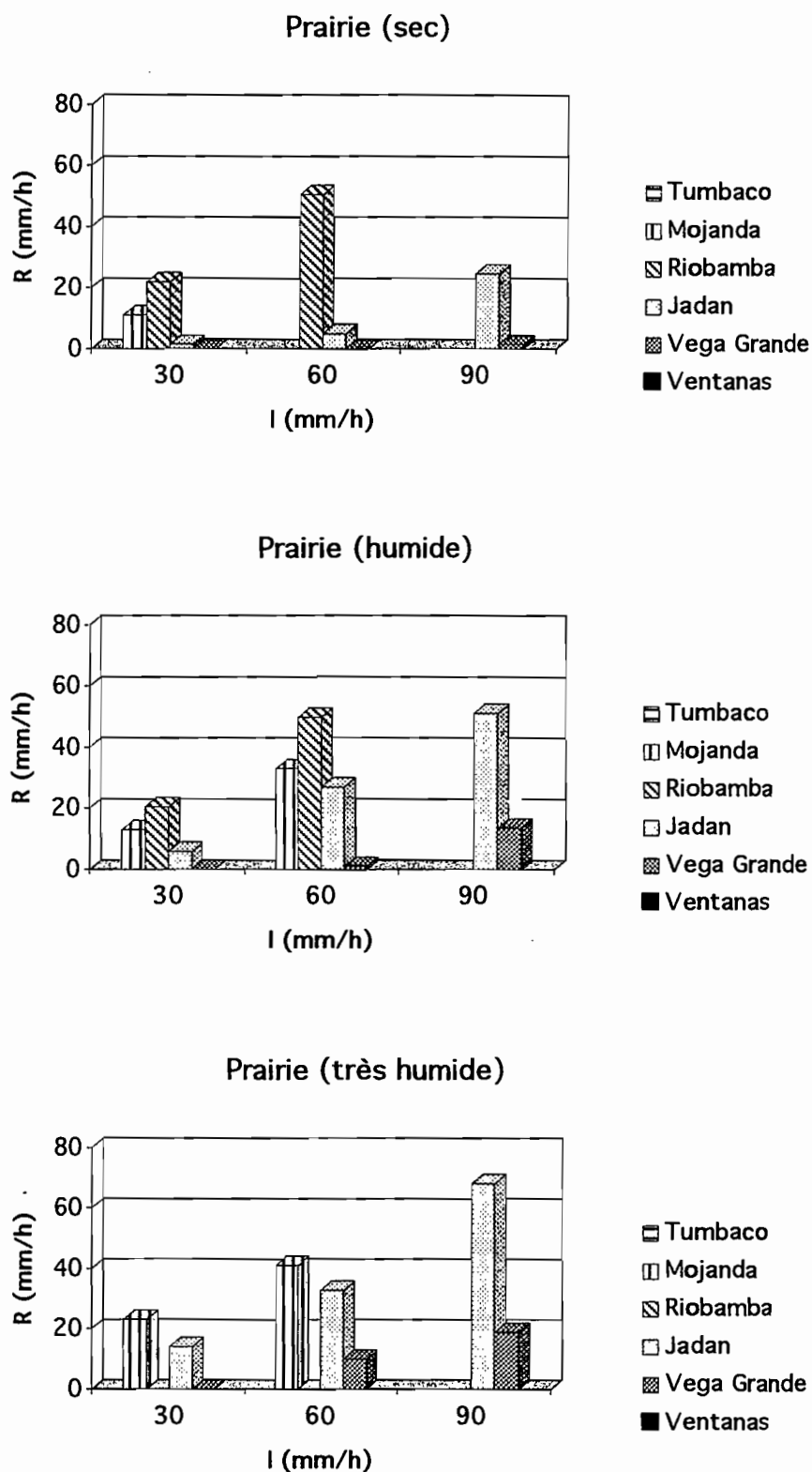
Les pluies simulées ont fourni également des résultats importants, complémentaires de ceux obtenus sur les parcelles de ruissellement et applicables au domaine de la conservation des sols.

Sur le sol enherbé a été envisagé l'impact de l'herbe sur l'érodibilité du sol et la naissance du ruissellement. En général pour tous les sites, le pourcentage de couverture végétale sur la micro-parcelle est proche de 100 %.

Les valeurs de la pluie d'imbibition (P_i) sont faibles dans l'ensemble (voir² tableaux de l'annexe 3) et comparables à celles obtenues en situation témoin sur sol nu qui est la situation la plus défavorable. On a tracé sur la figure n° 65 les histogrammes se rapportant aux valeurs de R_{max} . Corrélativement aux valeurs de P_i , les valeurs de R_{max} sont élevés comme cela avait été noté également sur sol nu. En revanche, l'eau est quasi propre car les charges solides exportées sont très faibles sous prairie (tableaux de l'annexe 3).

Fig. n° 65

Simulation de pluie sur prairie
variation du RUISSELLEMENT MAXIMAL (R, mm/h) en fonction de
l'état d'humidité préalable et de l'intensité de pluie (I, mm/h).



Trois sites se distinguent particulièrement - Riobamba, Mojanda et Jadan - avec des valeurs maximales comprises entre 50 et 60 mm.h⁻¹. Pour illustrer cette dynamique, les courbes de ruissellement (hydrogramme) et des charges exportées (turbidigramme) des trois stations ont été tracées (fig. n° 66). Une situation intermédiaire a été choisie où le sol est humide et la pluie simulée d'intensité, IM 15 = 60 mm.h⁻¹. L'examen des graphes montre que le ruissellement est actif sur ce type de couvert. Le début de l'essai est marqué par une phase d'imbibition de courte durée qui n'excède pas 5-7 mn puis lui succède une phase transitoire qui indique une augmentation rapide de l'intensité de ruissellement puis intervient, à partir de 8 à 10 mn, la dernière phase qui exprime la stabilisation du ruissellement à des valeurs maximales. Les exemples choisis sont caractérisés par des intensités de ruissellement de l'ordre de 40-50 mm.h⁻¹ à Riobamba et à Mojanda. Ces dernières sont plus faibles à Jadan où elles avoisinent 30 mm.h⁻¹. Sur le site de Jadan, la couverture végétale n'est pas totale et laisse entrevoir de petites plages de sol nu où l'infiltration est plus forte. L'érosion est inexistante dans les trois cas. Le sol n'intervient que faiblement pour expliquer ces comportements. En contre partie, les caractéristiques morphologiques des graminées sont essentielles pour expliquer les forts ruissellements observés. Sur les trois stations, tous les essais ont été effectués sur des graminées du type "pasto azul" (*Dactylus glomerata*) et "pasto Kikuyu" (*Penisetum clandestinum*) qui ont

un excellent développement latéral, très couvrant, avec une prospection racinaire en profondeur plutôt faible.

Pour apprécier l'effet d'un autre type de pâturage, on a réalisé une nouvelle série de pluies simulées à Tumbaco en utilisant une graminée différente des précédentes et encore peu utilisée dans la région, le "pasto lloron" (*Eragrostis curvula*). Celui-ci forme de grosses touffes qui se caractérisent par un port élevé et vertical des tiges et par une prospection racinaire abondante et profonde. Il est intéressant de noter que pour tous les tests, même avec des intensités maximales de l'ordre de 100 mm.h^{-1} , le ruissellement est resté quasi inexistant sur ce type de graminée alors que les essais effectués sur le "Kikuyu" et le "pasto azul" ont donné des valeurs de ruissellement relativement élevées. Ce dernier essai montre qu'on peut observer des différences de comportement importantes selon le type de graminées utilisées ;

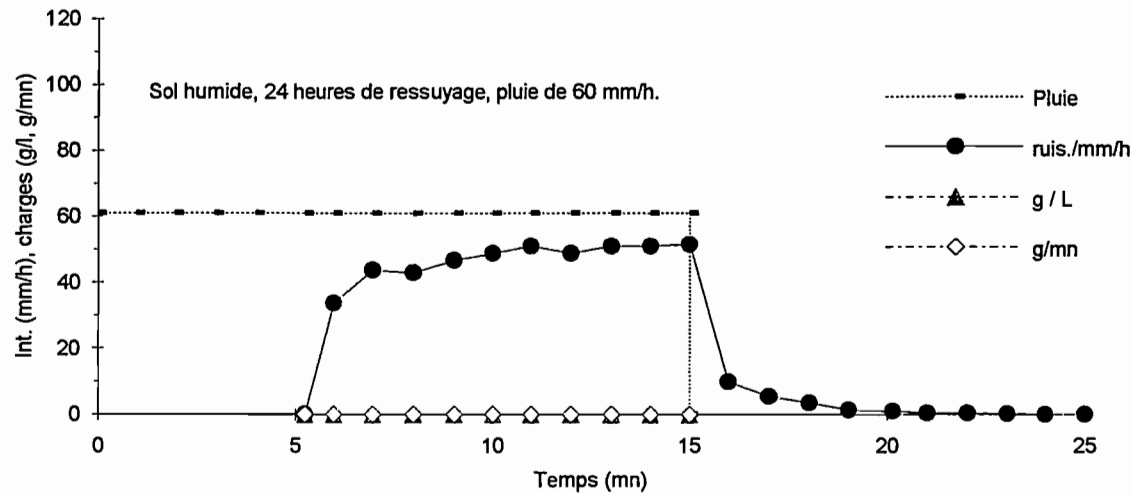
Pour la situation de cangahua réhabilitée, les résultats des différents essais effectués ont été reportés sur la figure n° 67 où sont mis en relation la pluie utile et la lame d'eau ruisselée. La pluie utile (Pu) correspond à la hauteur d'eau effectivement tombée durant le test² ; la pluie efficace représente la pluie qui provoque le ruissellement, elle est calculée par différence entre la pluie utile et la pluie d'imbibition.

² Rappelons qu'on a veillé à appliquer la même pluie utile quelles que soient les intensités simulées : IM30 à 30 mm/h, IM15 à 60 mm/h et IM10 à 90 mm/h correspondent toutes à une pluie utile de 15 mm.

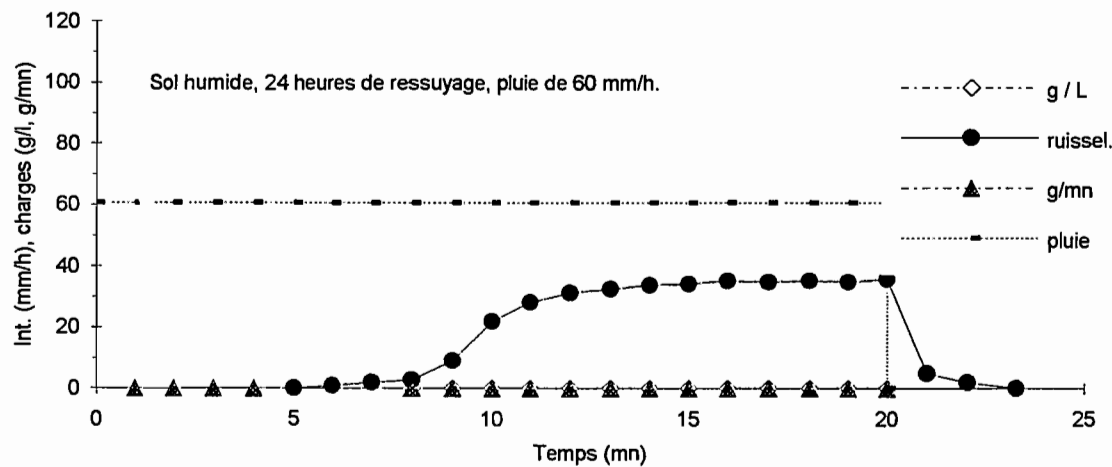
Fig. n°66

Transfert d'eau et de matière solide sous pluie constante,
en fonction de la station, sur Prairie

Station de RIOBAMBA



Station de MOJANDA



Station de JADAN

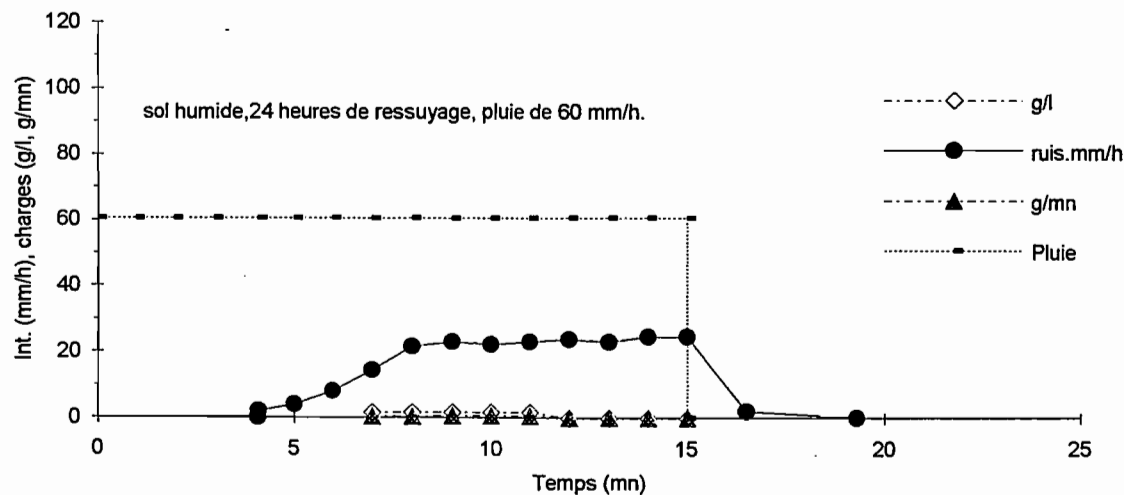
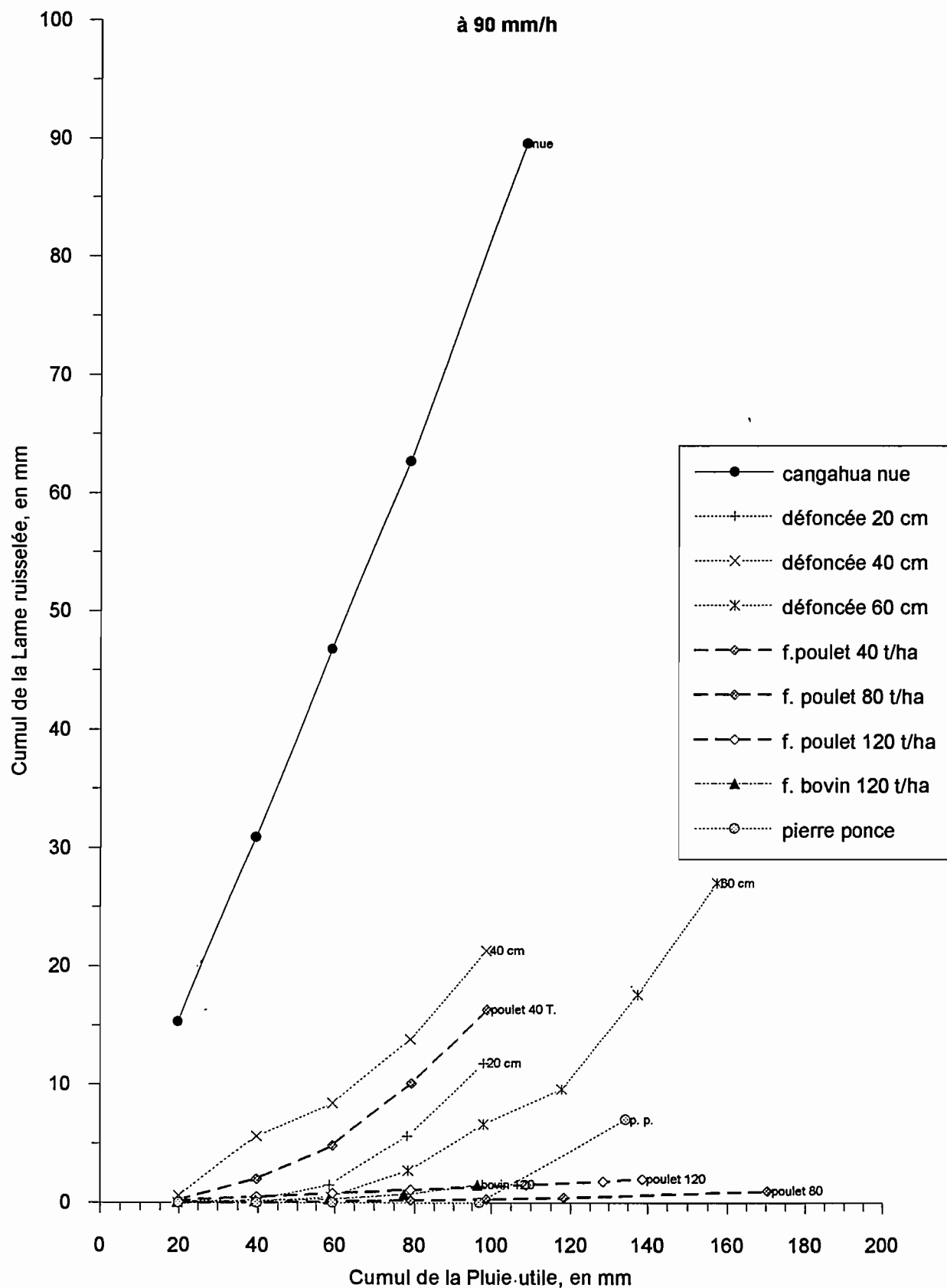


Fig. n° 67

Relations Pluie Utile - Lamé Ruisselée



A partir de ce graphe³, on peut déduire :

* pour la Cangahua défoncée sur 20, 40 et 60 cm de profondeur, sans aucun apport et pour des intensités de 30, 60 et 90 mm.h⁻¹. A IM 30 = 30 mm.h⁻¹, le ruissellement est absent ou très faible pour les 3 profondeurs et ne s'exprime à partir des essais menés à IM 15 = 60 mm.h⁻¹ et à IM 10 = 90 mm.h⁻¹.

On n'a placé sur le graphe que les deux profondeurs extrêmes de labour correspondant à 0,2 et 0,6 m. On constate que la relation "pluie utile - lame ruisselée" ne met pas en évidence de différence significative en fonction de la profondeur de défonçage de la cangahua. Les faibles variations constatées restent du même ordre de grandeur et ne traduisent pas d'évolution significative. Indépendamment des profondeurs de défonçage, le comportement de la cangahua au ruissellement se modifie en fonction des états hydriques. Sur sol sec, le ruissellement est nul quelle que soit l'intensité de pluie ; sur sol humide, les ruissellements maximaux sont faibles, de 0 à 14% et sur sol très humide (> à 25% de la masse volumique), les ruissellements maximaux varient de 30 à 58%.

Considérant que les différences sont faibles pour les

³ Pour comparaison, on a placé sur ce graphe la situation de cangahua indurée qui illustre le cas de situation extrême : en effet, à cause de son induration et de sa surface nue et lisse, cette formation ruisselle quasi instantanément sans perdre de terre. On trouvera en annexe 3, l'exemple de deux hydrogrammes et turbigrammes qui montrent ce comportement pour une pluie d'intensité IM = 60 mm/h.

profondeurs testées dans l'expérimentation, il a été décidé de poursuivre les tests d'incorporations de matières organiques et de pierres ponce en se limitant à la profondeur de défonçage de 20 cm ;

* pour la cangahua défoncée sur 20 cm de profondeur, avec apport de matière organique. Les quelques essais de réhabilitation, que nous avons pu observer dans les zones où la cangahua occupe de grandes surfaces, montrent que l'agriculteur incorpore du fumier dans l'horizon défoncé. C'est essentiellement le fumier de poulet qui est utilisé car il existe dans le bassin de Quito, par exemple, de nombreux élevages de poulet. En second ordre, le paysan peut utiliser aussi du fumier de bovin néanmoins ce dernier est plus difficile à se procurer car il est essentiellement produit par les troupeaux des haciendas qui le recyclent en grande partie sur place.

Au moyen de ces tests, l'effet de l'incorporation de matière organique sur l'infiltration de l'eau dans le sol a été examiné (Leprun, 1986 ; Albrecht, 1992). Les doses utilisées par les agriculteurs, souvent inférieures à 20 t.ha^{-1} , nous paraissant trop faibles, nous avons testé des doses plus fortes afin de pouvoir mettre en évidence l'effet fumier. Les doses suivantes ont été testées :

+ pour le fumier de poulet : 40 t.ha^{-1} , 80 t.ha^{-1} , 120 t.ha^{-1} ,
+ et pour le fumier de bovin, 120 t.ha^{-1} .

Par type d'intensité, on a obtenu les résultats suivants. A 30 mm.h^{-1} , on observe que le ruissellement est absent lors des premières pluies, puis très faible quel que soit le type de fumier. A 60 mm.h^{-1} , les manifestations du ruissellement restent faibles alors que sur la cangahua défoncée, sans apport, les lames ruisselées étaient comprises entre 10 et 22 mm pour une pluie utile de 100 mm réalisée en 5 averses. A 90 mm.h^{-1} , enfin, le ruissellement s'organise et devient aussi efficace que dans le cas de la cangahua sans apport lorsque la dose de fumier est de 40 t.ha^{-1} . Néanmoins pour les doses supérieures, 80 et 120 t.ha^{-1} , le ruissellement continue à être faible quel que soit le fumier utilisé ;

* pour la cangahua défoncée sur 20 cm de profondeur, avec apport de pierres ponce. La pierre ponce, très abondante dans les couches géologiques, n'est pas utilisée, en général, par l'agriculteur traditionnel. Son emploi est récent et revient aux horticulteurs et aux fleuristes dont l'activité, à la périphérie des grandes villes, est en pleine expansion. Ils utilisent ce matériau pour le stockage de l'eau dans le sol.

Dans nos tests, on a utilisé, en s'inspirant de cette pratique, une couche de quatre centimètres de pierre ponce qui a été répandue sur la cangahua préalablement défoncée, puis incorporée et bien mélangée sur les premiers 20 cm de profondeur.

Avec ce traitement, nous avons constaté une capacité d'infiltration supérieure à 90 mm.h^{-1} , tout s'infiltre jusqu'à totaliser une pluie utile d'environ 100 mm, le système

fonctionne alors comme un réservoir qui déborderait une fois plein.

Au travers de cette dernière série de pluies simulées dont le but était d'apprécier la dynamique de l'eau dans le sol pour quelques situations améliorées, on peut tirer les enseignements suivants :

- l'incorporation de matière organique améliore de façon substantielle l'infiltration et le stockage de l'eau. Trois mois après cette campagne et malgré la sécheresse sévissant, on pouvait remarquer la présence d'une importante végétation, uniquement sur les trois parcelles traitées au fumier. L'absence constatée d'effet avec un apport de 40 t.ha^{-1} montre que la dose utilisée par les paysans, de l'ordre de 20 t.ha^{-1} , est insuffisante comme on pouvait s'y attendre. On a donc bien fait de passer directement à des doses supérieures et il semble, sur la base des résultats acquis, que le seuil d'efficacité se situe entre 40 et 80 t.ha^{-1} , la dose optimale restant à déterminer. Les doses d'amendements organiques employées actuellement par les agriculteurs se situent bien en-deçà de cette limite et sont donc inefficaces pour améliorer l'infiltration de l'eau ;

- la pierre ponce joue un rôle efficace de filtre en augmentant la macro-porosité du sol, sa capacité de stockage de l'eau n'a pas été testée. Néanmoins, on doit être conscient qu'augmenter

l'infiltration sur ce type de sol, qui repose sur un horizon induré à faible profondeur et sur des pentes généralement déclives, peut accroître les risques de ruissellement hypodermique et de glissement.

Il apparaît donc qu'une méthode mixte qui combinerait matière organique et pierres ponce, à des doses dans ce cas plus faibles que celles testées ici, devrait améliorer significativement l'infiltration.

En conclusion, il ressort que les améliorations testées permettent de répondre positivement à l'objectif de notre recherche appliquée. Par rapport aux situations témoins, les pertes en terre et les coefficients de ruissellement relevés sous pluies naturelles et simulées sont plus faibles en situations améliorées et atteignent des valeurs-seuils admissibles pour un milieu particulier comme celui du minifundio de la Sierra de l'Equateur. Par ailleurs, ces résultats sont issus de méthodes et d'ouvrages qui tiennent compte des besoins et des capacités socio-économiques des populations, et les conditions de faisabilité sont bonnes. Néanmoins, pour pouvoir valoriser correctement cette stratégie et lui assurer une efficacité durable, une attention particulière doit être portée, lorsqu'on passe des conditions expérimentales aux vraies conditions paysannes, aux

phénomènes de report hydrique et d'"érosion mécanique sèche".

Les phénomènes de report hydriques ("run on") interviennent dans la gestion de l'eau à l'échelle du terroir ou du versant. A l'échelle de la parcelle de ruissellement améliorée, les effets des reports hydriques, dus à des surfaces très ruisselantes, ne sont que peu perceptibles sur une surface qui ne représente qu'une partie de la parcelle paysanne et du versant. En revanche, les simulations de pluie ont bien montré l'influence de surfaces potentiellement ruisselantes comme la cangahua dénudée et certains types de couverts végétaux. En vraies conditions de terrain, sur un versant où s'étage un groupe de plusieurs parcelles, ces risques de ruissellement peuvent augmenter considérablement. Dans les cas correspondants, se posent donc, à cette échelle, un problème de gestion de l'eau et la nécessité de compléter et de doubler les ouvrages par un réseau de rigoles ou de fossés pour diriger les flux en excès vers un collecteur principal ;

Les manifestations de "l'érosion mécanique sèche" sont également à envisager. Ce type particulier d'érosion du sol est provoqué uniquement par l'homme sans qu'interviennent la pluie ou le vent. Il se produit lorsque l'agriculteur procède au travail du sol et qu'il entraîne progressivement la terre du haut vers le bas du versant, processus d'autant plus actif que l'inclinaison de la pente est forte. Nous avons remarqué sur les parcelles que des volumes de terre importants sont

transportés par les outils lors des opérations de semis ou au cours de la récolte. Sur les parcelles améliorées, la terre s'accumule derrière les ouvrages de conservation. Jusqu'à 15-20 % de pente, ce phénomène est relativement contrôlable et n'impose qu'un réajustement léger de la configuration des ouvrages isohypses, qu'ils s'agissent des bandes enherbées ou des murets. Au-delà de cette limite de pente, il est nécessaire de procéder, chaque année, à une élévation de la hauteur de l'ouvrage pour compenser l'épaisseur de terre qui s'est accumulée derrière celui-ci. Le cas le plus significatif est celui de Mojanda où la station se situe sur une pente moyenne de 40 %. Au départ, chaque ouvrage était constitué par deux rangées superposées de mottes de terre dont la hauteur était d'environ 30 cm (se reporter à la figure n° 60). Puis, progressivement, à l'occasion des travaux culturels liés au semis et aux récoltes et effectués à la houe, des déplacements considérables de terre se sont produits du haut vers le bas de la parcelle. Le piochage du sol, qui commence toujours au pied de l'ouvrage, donne lieu à un surcreusement à la base de celui-ci, puis à un déplacement de la terre vers le bas de la parcelle jusqu'à ce qu'un autre ouvrage fasse obstacle. Ces déplacements simultanés de terre, par creusement à l'avant de l'ouvrage et par remblaiement à l'arrière de celui-ci, nous ont obligés à surélever la hauteur de tous les ouvrages d'environ 35 cm par an. Sur 20 mois d'observation, la hauteur est passée de 30 cm à 1.30 m et à 1,60-1,80 m au bout de 4 ans. A partir de la 5^e année, il n'a plus été nécessaire de modifier la hauteur. Le versant avait évolué vers un profil en terrasses

bien individualisées où la pente entre deux talus était de l'ordre de 10-15 %.

Il est remarquable de constater que cette évolution, que nous n'avions pas prévue, est à attribuer aux seuls travaux cultureux. On estime que le poids de terre qui s'accumulait annuellement derrière chaque ouvrage était d'environ 8 tonnes par 20 m linéaire, soit 40 t.ha^{-1} dans le cas d'un seul ouvrage par 100 m de long.

Néanmoins, il n'aurait pas été envisageable au départ de construire, pour des problèmes évidents de stabilité, des talus pouvant dépasser 1,5 m de haut. La bonne cohésion du matériel motteux utilisé a permis d'atteindre cette hauteur sans problème majeur ce qui n'aurait certainement pas été le cas dans d'autres conditions pédologiques (Roose, Ndayizigiye, 1994). Ceci étant, en intervenant sur les effets de l'érosion mécanique sèche, il devrait être possible de mieux contrôler l'édification des talus afin de ne pas dépasser 1 mètre de haut.

CONCLUSION

Le but de la recherche était, à partir des manifestations d'érosion accélérée des sols cultivés de la Sierra d'Equateur, qui est la région du pays la plus sévèrement affectée par ce phénomène, de proposer une alternative de gestion durable des agrosystèmes d'altitude concernant essentiellement le minifundio. Elle constitue un exemple qui illustre les difficultés de gestion des terres auxquelles sont confrontés la plupart des pays en voie de développement, en cette fin de siècle. Elle pose, de façon plus spécifique, le problème de la durabilité des agrosystèmes de montagne : ceux de la zone andine d'abord tels qu'ils existent en Colombie, au Pérou ou en Bolivie mais aussi ceux qu'on peut trouver en zone méditerranéenne, en Afrique de l'Est ou dans la chaîne himalayenne.

Le bilan de cette recherche peut s'exprimer sous la forme de trois grands types d'acquis :

- d'ordre méthodologique d'abord. L'érosion accélérée a été envisagée par la mesure du ruissellement et de l'érosion sur 7 sites expérimentaux implantés au sein de 5 grands bassins représentatifs des milieux andins aménagés. Sur chaque site, des parcelles de ruissellement ont été installées et suivies pendant 5 ans et plusieurs centaines de pluies simulées ont été effectuées. Au total, un réseau de 26 stations de mesures de l'érosion, qui n'existaient pas auparavant en Equateur, a été créé. Ce réseau de mesures présente également un caractère méthodologique novateur à l'échelle de la montagne andine où dans les pays concernés, notamment le Pérou, la Colombie et la

Bolivie, il existe très peu de référence sur l'érosion alors que ce phénomène semble très actif en milieu agricole.

En choisissant la méthode des parcelles expérimentales et de la simulation de pluie, nous nous inscrivons dans les grands courants de la recherche internationale comme le souligne Hudson (1993) dans son travail de synthèse sur les méthodes de terrain pour mesurer le ruissellement et l'érosion. Néanmoins, pour pouvoir répondre à la demande du partenaire, nous avons été conduits à sortir de ce cadre et à développer quelques aspects originaux, concernant : i) la situation des sites expérimentaux : en général, ce type d'étude est réalisé dans des stations agronomiques, dotés d'appareils de mesures performants et faciles d'accès, où la précision des observations est recherchée avant tout dans le but d'élaborer des modèles. Bien que de telles stations existaient en Equateur, nous avons fait le choix, quitte à être moins précis sur la qualité des mesures, d'installer notre dispositif de mesures chez les paysans, en conditions réelles de terrain ; ii) la taille des parcelles, la plus courante, est comprise entre 50 et 100 m², soit une longueur de 10 à 20 m pour une largeur de 5 m. Dans le cas d'un sol nu, non travaillé, qui est la situation de référence du modèle américain de Wischmeier (1978, 81), cette taille semble convenir assez bien. Par contre, la largeur de la parcelle se révèle insuffisante lorsque le sol est travaillé et semé. Pour éviter ce problème et pouvoir ainsi nous rapprocher de l'échelle de la parcelle paysanne, nous avons construit des parcelles beaucoup plus grandes, atteignant 1000 m², qui ne sont que rarement utilisées ; iii)

nous n'avons pas cherché à reproduire le modèle américain de Wishmeier, les mesures effectuées n'ayant pas pour but de quantifier globalement l'érosion. Si nous avons choisi ces méthodes, c'est parce qu'elles permettaient d'évaluer et de comparer l'action de l'érosion en fonction de différents modes de cultures, traditionnels et améliorés, afin de tester l'efficacité de quelques mesures conservatoires. En aucun cas, les mesures obtenues ne sont transposables à l'échelle du grand bassin versant ou du sous bassin versant. Elles ne sont transposables que sur des sites, versant ou terroir, éventuellement petit bassin versant élémentaire, présentant les mêmes conditions de milieu¹.

Le principal intérêt de la méthode est de se situer dans le cadre de la parcelle paysanne et de considérer des actions de gestion durable des terres concertées avec les agriculteurs, autrement dit d'inclure dans la démarche une dimension socio-économique de la connaissance du sol, peu prise en compte généralement. A une époque où la recherche porte ses efforts sur l'élaboration de modèles, la pertinence d'une telle démarche dans le cadre d'une recherche appliquée, comme celle que nous avons menée en Equateur, pose une interrogation : le comportement, complexe et particulier, de la société du minifundio est-il modélisable ? Partant de là, la modélisation

¹ A partir de l'inventaire des ressources physiques et humaines du bassin versant, une recherche des sites, présentant les mêmes conditions de milieu que les sites étudiés, peut être effectuée. Nous avons envisagé une recherche de ces sites en utilisant un SIG dont le but est de fournir un zonage du bassin versant concernant les risques potentiels d'érosion et la gestion conservatoire des terres. Ce travail, actuellement en cours, est effectué avec deux étudiants de DEA.

est-elle nécessaire à la réussite d'un programme appliqué de conservation des sols ?

Les principales étapes de notre démarche sont résumées dans le tableau ci-après :

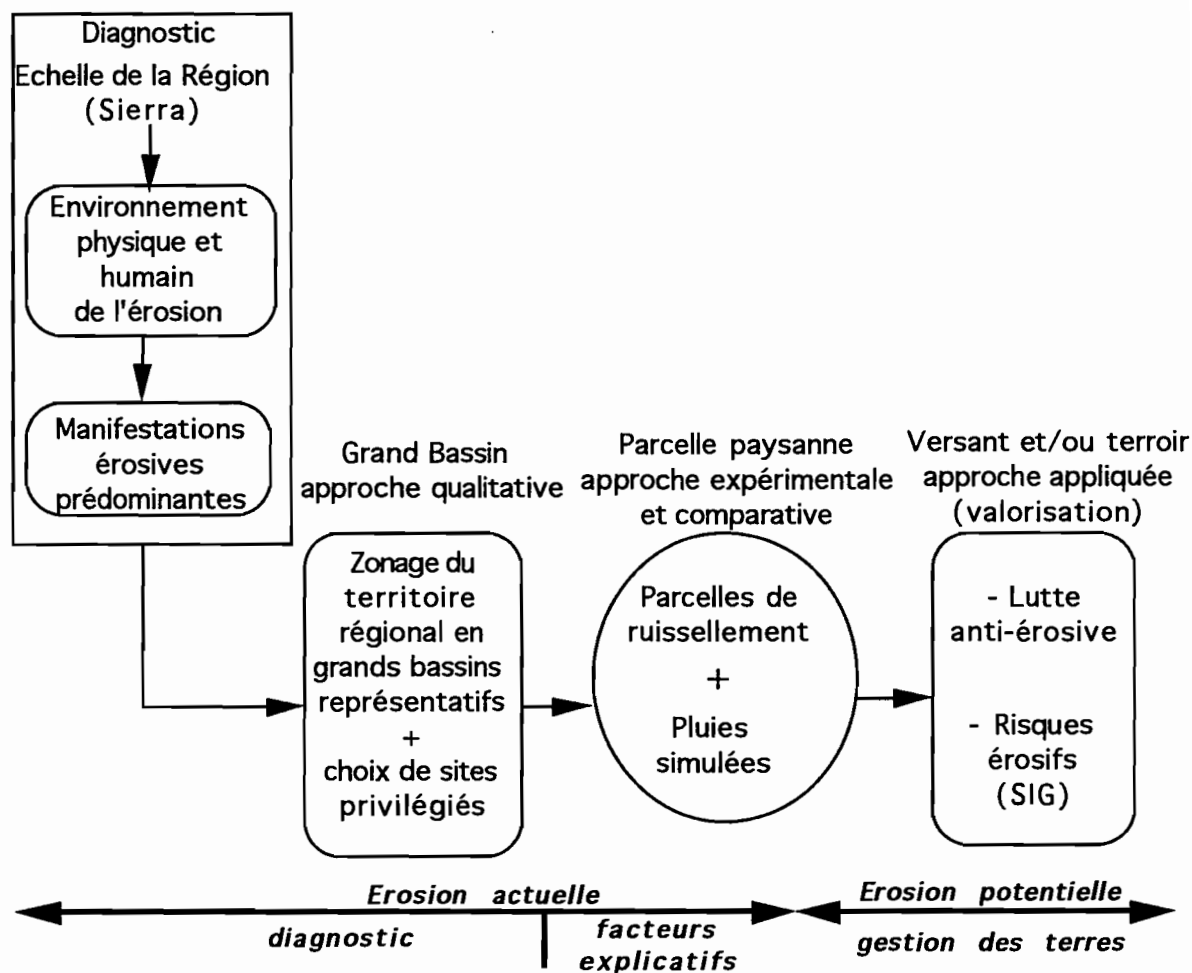


Tableau. n° 18 : Les principales étapes de la méthode de travail

- d'ordre scientifique ensuite. L'érosion est forte même s'il existe des différences de comportement entre les situations culturelles pour un même type de sol et globalement entre les sols des stations. La remarquable stabilité du premier labour

n'est, en fait, qu'éphémère et celui-ci évoluera inévitablement vers un ancien labour plus érodible si des mesures conservatoires ne sont pas prises.

Concernant les sols des stations, les sols andiques, lorsqu'ils sont mis en culture, se montrent plus sensibles à l'érosion que les autres types de sol, en particulier les sols vertiques. L'inclinaison de la pente et la texture du sol, le taux d'argile et notamment la montmorillonite, constituent des critères essentiels d'évaluation de la stabilité des sols cultivés.

La notion d'andosol est apparue tardivement dans le vocabulaire des pédologues. Depuis une quinzaine d'années, de nombreux travaux, essentiellement français, australiens et japonais, ont permis de préciser la définition des andosols. Néanmoins, les études se réfèrent essentiellement à des analyses précises de laboratoire portant sur les caractéristiques et le comportement des allophanes. Il existe très peu de référence, encore actuellement, sur le comportement des andosols en conditions réelles de terrain, ces derniers passant généralement pour des sols stables et fertiles. Notre recherche montre que les andosols andins, lorsqu'ils sont cultivés, perdent leur stabilité initiale et sont plus sensibles à l'érosion que les vertisols développés sur des matériaux non volcaniques.

Notre analyse montre aussi que le poids des contraintes naturelles, imposé par la haute montagne andine, n'est pas suffisant pour expliquer à lui seul l'ampleur des phénomènes. L'extension par le minifundio d'un agrosystème particulier sur

les versants et les hautes terres andines, aboutissement d'un processus qui a commencé il y a cinq cents ans et qui s'est accéléré au cours des 40 dernières années, contribue également à fragiliser le milieu et à accélérer l'érosion des sols cultivés, en donnant naissance à un type particulier d'agrosystème d'altitude. Dans l'état actuel et à l'opposé des stratégies conservatoires mises au point par les sociétés pré-hispanique, le minifundio souffre d'un manque évident de "savoir-faire" et d'appui technique extérieur ;

- d'ordre technique, enfin. On aborde ici le domaine de la lutte anti-érosive et de la gestion conservatoire des sols qui est l'objectif appliqué à atteindre. La série d'observations effectuées en conditions améliorées montrent, par comparaison avec les situations témoins, que la progression de l'érosion n'est pas une fatalité. L'homme étant impliqué directement dans la dynamique des processus, son influence peut être corrigée de façon à ramener les effets de l'érosion à des normes admissibles. La recherche de solutions ne constitue pas une utopie car le minifundio est forcé, pour l'instant, à rester en place. Le retour vers des terres plus fertiles, situées dans le bassin, dépendrait d'une nécessaire évolution sociale à l'échelon national dont il est difficile, à priori, d'évaluer la faisabilité à court et moyen termes. Les résultats issus des parcelles améliorées sont encourageants dans la perspective de pallier les difficultés de la situation actuelle. Ils indiquent qu'un ensemble de mesures, peu contraignantes et adaptées à "l'environnement physique et

humain", peut faire chuter l'érosion à moins de 1t/ha/an si on prend en compte quelques principes de base. La dissipation de l'énergie du ruissellement est fondamentale. Des ouvrages simples, construits avec des matériaux locaux, et disposés perpendiculairement à la pente dominante semblent convenir. Dans un milieu de haute montagne conditionné par les phénomènes de gravité, ce type d'intervention est prioritaire pour freiner l'érosion.

Pour conforter l'efficacité de ce dispositif, les résultats montrent par ailleurs qu'on peut diminuer la production de ruissellement en améliorant l'infiltration de l'eau dans le sol. Les différences de comportement enregistrées sous pluies simulées, entre le premier et l'ancien labour ainsi que sur la cangahua récupérée, indiquent qu'un travail régulier et soigné du sol ainsi que l'incorporation de matière organique pour améliorer l'agrégation donnent de bons résultats pour augmenter l'infiltration,

Le contrôle de l'érosion mécanique dite "sèche" est également indispensable. Le labour animal s'effectue en général en suivant les courbes de niveau. Dans le minifundio, très déshérité, les animaux de trait sont rares. Les labours sont réalisés manuellement ou grâce à des tracteurs loués à des coopératives. Dans ces deux cas, les volumes de terre transportée mécaniquement vers le bas du champ ou du versant sont considérables. A Mojanda, il a fallu près de 4 ans pour que les talus de terrasses se stabilisent à plus de 1,50 m,

L'aménagement des zones de reports hydriques constitue le dernier principe important. Les pluies simulées montrent que les ruissellements sont importants sur les sols enherbés et sur la cangahua indurée. Les reports hydriques issus de ces zones menacent les sols arables situés en contrebas. Un aménagement de ces zones, actuellement non pris en considération, constitue une mesure de première urgence au même titre que les zones en culture.

Bien qu'encourageants, ces résultats ne se suffiront pas à eux-mêmes s'il ne sont pas englobés dans un système d'amélioration générale de la production agricole et de durabilité de l'agrosystème qui doit intégrer outre la conservation des sol, la fertilisation, évoquée précédemment, l'irrigation, l'amélioration variétale des semences, etc. Seul, le petit paysan ne pourra assumer ce défi. Il est nécessaire qu'une véritable concertation s'établisse entre la population du minifundio, les chercheurs-techniciens et les responsables politiques. Ce n'est qu'au prix d'une participation forte et conjointe de l'état et du petit paysannat que seront établies les bases d'une agriculture andine durable.

Comme le montre cet exemple de la Sierra d'Equateur, l'homme, à différents niveaux d'intervention, est un acteur principal pour permettre l'amélioration et la durabilité de l'agrosystème andin. Même si les conditions naturelles sont plus difficiles à maîtriser ici qu'ailleurs, l'aptitude agricole des sols peut être améliorée. Veyret et Pech rappellent dans leur livre sur "L'homme et l'environnement" (1993) l'exemple de la

Champagne qualifiée de "Pouilleuse" par les physiocrates au XVIII^e siècle et qui s'est transformée par la suite en une riche terre à blé. Les auteurs concluent de la façon suivante : " Une telle évolution est forcément plus aisée dans les pays riches que dans les pays pauvres où le paysan, directement dépendant de la nature et des aptitudes agronomiques des sols, n'a pas forcément les moyens financiers et techniques de les amender ou de les améliorer".

BIBLIOGRAPHIE

Acosta-Solis (M.), 1968. - División fitogeográfica y formaciones geobotánicas del Ecuador, Casa de la Cultura ecuatoriana, Quito, 307 p.

Acosta-Solis (M.), 1976. - Investigadores de la geografía y de la naturaleza de America tropical, IPGH, Biblioteca Ecuador, Quito, 201 p.

non cite
Albrecht (A.), Rangun (L.), Barret (P.), 1992. - Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique), Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., Vol. XXVII, n°1, pp. 121-133.

Asseline (J.), Valentin (C.), 1978. - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion, Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XV, n°4, pp. 321-349.

Asseline (J.), Custode (E.), De Noni (G.), Viennot (M.) et Trujillo (G.) - 1993 - La simulación de lluvia : metodologías y prácticas, Accord DNA-ORSTOM, Quito, 66 p.

Atlas del Ecuador, 1982. - Editions J.A. - Banco central del Ecuador, Paris, 80 p.

Almeida (G.), De Noni (G.), Nouvelot (J.F.), Trujillo (G.), Winckell (A.), 1984.- Los principales procesos erosivos en Ecuador,

PRONAREG - PRONACOS - ORSTOM, Quito, 31p., avec une carte du pays (2 couleurs) à l'échelle de 1/1000.000.

Athens (J.S), 1980. - El proceso evolutivo de las sociedades complejas y la ocupación del Periodo Tardío-Cara en los Andes septentrionales del Ecuador, Inst. de Arqueología de Otavalo.

Cite? Avenard (J.M.), 1972. Approche cartographique des formations superficielles dans la zone du contact forêt-savane en Côte d'Ivoire, Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum., Vol. IX, n°2, Paris, pp. 137-140.

Ayala (E.) Editor, 1983-90. - Nueva Historia del Ecuador, Corporación Editora Nacional/Editorial Grijalbo Ecuatoriana, Quito, 15 volumes.

Ayala (E.), 1985. - La Historia del Ecuador. Ensayos de interpretación, Corporación Editora Nacional, Biblioteca de historia ecuatoriana, vol. 10, Quito, 403 p.

Bailly (C.), Benoit de Coignac (G.), de Vergnette (J.), Roche (P.), 1967 - Note résumant les expérimentations réalisées à Madagascar sur le ruissellement et les pertes en terre en parcelles élémentaires, CR Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, p. 1342.

Bailly (C.), Malvos (C.), Sarrailh (J.M.), Rakotomanana (J.L.), Rampana (L.), Ramanahadray Fils, 1976 - Etude de la sensibilité des sols de Madagascar à l'érosion. Expérimentation en parcelles élémentaires. Bois et Forêts des Tropiques, n°169.

Barnadé Cobo (P), 1956. - Historia del nuevo mundo (1653), Biblioteca de autores españoles, t.XII - cap. 18, Ad. Atlas, Madrid, p. 121.

Barsky (O) Ed., 1980. - Ecuador: cambios en el agro serrano, FLACSO-CEPLAES, Quito, 531 p.

Barsky (O), 1984. - La reforma agraria ecuatoriana, FLACSO, Quito, 406 p.

Cite?

Bennett (H.), 1939. - Elements of soil conservation, Mac Graw-Hill, New-York.

Blandin (L.), 1977 - El clima y sus características en el Ecuador, IPGH, Quito.

Bolline (A.), 1982. - Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique, Thèse Dr géographie, Liège, 356 p.

Bonifaz (E.), 1979. - Cazadores prehistóricos del Ilaló, Varela 190 Quito, 113 p.

Bonifaz (E), 1982. - Los indígenas de altura del Ecuador, Publitécnica (quatrième édition), Quito, 260 p.

Casenave (A.), Valentin (C.), 1989. - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration, ORSTOM, Sér. Didactiques, Paris, 229 p.

Chiriboga (M), 1986. - Del indigenismo a las organizaciones indígenas, Colección Ethnos, Quito, p. 179.

Cieza de León (P.), 1967. - El senorio de los Incas, Instituto de Estudios peruanos, Lima. *pages?*

Collinet (J.), Valentin (C.), 1979. - Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Applications agronomiques. Cah. ORSTOM, Pédo., 17-4, *2* pp. 283-328.

Collinet (J.), 1988. - Comportement hydrodynamique et érosif de sols de l'Afrique de l'Ouest, Evolution des matériaux et des

organisations sous simulation de pluies, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 513 p.

Colmet-Daage (F.) et al., 1967 et 1969. - Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques :

- 1^{er} partie : Cah ORSTOM, sér. Pédol., V, 1 : 3-37.

- 2^e partie : Cah ORSTOM, sér. Pédol., V, 4 : 353-391.

- 3^e partie : Cah ORSTOM, sér. Pédol., VII, 4 : 493-560.

Colmet-Daage (F.) et al., 1979 et 1980. - Mapas de suelos de la Sierra ecuatoriana, 1/50 000, ozalid, 20 hojas norte, 20 hojas centro-norte, 20 hojas centro, 20 hojas centro-sur, 20 hojas sur, 13 hojas extremo sur, 13 p. leyenda, Quito, MAG-ORSTOM.

Comet-Daage, Zebrowski et al. y departamentos de edafología de PRONAREG 1983, 1985. - Mapas de suelos de la Sierra ecuatoriana, color, 1/200 000 : Tulcán, Ibarra, Quito, Latacunga-Ambato, Riobamba, Cañar, Cuenca, Loja, Zamora, Macará, Quito, MAG-ORSTOM

Costales (P. et A.), 1971. - Reforma agraria, in Historia social del Ecuador, Casa de la Cultura ecuatoriana, Quito.

C.P.C.S., 1967. - Classification des sols, Rapport multi., ENSA Grignon, 67p.

CTFT, 1966. - L'équation universelle de perte de sol de Wishmeier, Rapport multigr. Madagascar, 15 p., 1 tab., 6 réf.

CTFT, 1970. - Cinquième campagne d'observations sur la station de mesure de l'érosion d'Allokoto, Rapport multigr. Niger-Haute-Volta, 34 p.

CTFT, 1979. - Conservation des sols au sud du Sahara, Collection Techniques rurales en Afrique, CTFT - Ministère de la Coopération, Paris, 296 p.

Custode (E), Sourdat (M.), 1975-1983. - Cartes morpho-pédologiques de l'Amazonie (Provinces de Napo, Morona-Santiago et Zamora-Chinchipe), 1/500.000, Département de Géomorphologie Pédologie de PRONAREG - ORSTOM, Quito.

Custode (E.), Viennot (M.), 1986 a. - El riesgo de erosión en la region amazonica, CEDIG-ORSTOM, Documentos de investigación N° 6, Quito, pp. 79-88.

Custode (E.), Viennot (M.), 1986 b. Evaluacion de algunas características físicas y químicas de los suelos recientemente cultivados en la Región Amazónica del Ecuador, Coloquio Ecuador 86, in Revista Cultura, Vol. n° 24, Banco Central, Quito, pp. 371-382.

Custode (E.), Sourdat (M.), 1986 c. - Paisajes y suelos de la Amazonía ecuatoriana entre la conservación y la explotación Coloquio ECUADOR 86, in revista Cultura VOL VIII N° 24 a, Banco Central, 1986, Quito (Ecuador), p. 325-337 + traduction française dans la série Colloques et séminaires "Equateur 1986".

Custode (E.), De.Noni (G.), Trujillo (G.), Viennot (M.), 1992 a - La cangahua en el Ecuador caracterización morpho-edafológica y comportamiento frente a la erosión, *in* Suelos volcánicos endurecidos. 1 carte et 10 tab., México, p. 332-346 .

Custode (E.), Viennot (M.), 1992 b. - Impacto del cultivo en 3 suelos de la region amazónica ecuatoriana, in Ecologia desenvolvimento e cooperação na Amazonia, Série cooperação amazonico, Universidad Federal da Para, Belém-Para (Brésil), pp. 122-136.

Demangeot (J.), 1976. - Les espaces naturels tropicaux, Masson, Paris, 190 p.

Demangeot (J.), 1990. La part des montagnes dans les milieux naturels continentaux, in "La terre et les hommes", édit. Fac. Let. Sc. Humaines, Clermont-Ferrand, p. 587-596.

De Noni (G.), 1978. - "La cartographie au service d'un inventaire géomorphologique de la province du PASTAZA (Amazonie Equatorienne) : Types de relief et apports volcaniques". Thèse de 3^{ème} cycle, géographie physique des régions cristallines et volcaniques, Clermont-Ferrand, 142 p. multigr.

De Noni (G.), Derruau (M.) - 1979 - "Sur la géomorphologie des pyroclastites dans les Andes de l'Equateur" (partie méridionale exclue). Cahiers ORSTOM, série Sciences Humaines, Vol. XVI, 3, p. 251-259.
16, 3 : 251-259.

De Noni (G.), Guevara , 1980. - Reconocimiento cartográfico de la región amazónica ecuatoriana : Provincia del Pastaza, Département de Géomorphologie et de Télédétection de PRONAREG - ORSTOM, Quito, 36 p. + une carte couleur à 1/500.000.

De Noni (G.), 1982.- Análisis cualitativo de tres procesos de erosión en la Sierra volcánica del Ecuador, CEDIG-ORSTOM, Documentos de investigación N° 2, Quito, p.39-54.

De Noni (G.), Nouvelot (J.F.), 1983. - Los principales procesos erosivos en Ecuador, Séminaire sur "Políticas sobre conservación de los recursos naturales renovables, en particular del recurso suelo", MAG - UNESCO, Quito, p. 48-59.

De Noni (G.), Nouvelot (J.F.), Trujillo (G.), 1985 a.- Erosion and conservation of volcanic ash soils in the highlands of Ecuador: a case study: sixth international soil classification workshop, Chile and Ecuador, part 1, SMSS (Washington), PUCC (Santiago de Chile), p. 263-274.

De Noni (G.), Viennot (M.), 1985 b - Estudio de algunos procesos de erosión en la Sierra volcánica del Ecuador (3200 m-4800 m), Revista Colombiana de la ciencia del suelo, Vol XVI, nº 1, Bogota, p. 23-31.

De Noni (G.), 1986 a.- Breve visión histórica de la erosión en el Ecuador, CEDIG-ORSTOM, Documentos de investigación Nº 6, Quito, p. 15-23.

De Noni (G.), Nouvelot (J.F.), Trujillo (G.), 1986 b.- Estudio cuantitativo de la erosión con fines de protección de los suelos: las parcelas de ALANGASI y Ilalo, CEDIG-ORSTOM, Documentos de investigación Nº 6, Quito, p. 35-47.

De Noni (G.), Trujillo (G.), Viennot (M.), 1986 c.- L'érosion et la conservation des sols en Equateur, Cah. ORSTOM, sér. pédol., vol. XXII, nº 2, p. 235-245.

De Noni (G.), Viennot (M.), Trujillo (G.), 1986 d.- L'érosion et la conservation des sols en Equateur, cah. ORSTOM, sér. Pédologie, vol. XXII, nº 2, Paris, p. 235-245.

De Noni. (G.), 1986 e.- Breve historia de la erosión en el Ecuador, Documentos de investigación nº6, CEDIG-ORSTOM, Quito, p.15-23.

De Noni (G.), Aspiazu (P.), Fernandez (M.A.), 1986 f.- Erosion eólica al norte de la hoya de Quito. CEDIG-ORSTOM, Documentos de investigación, Quito, nº 6, p. 69-78.

De Noni (B.), De Noni (G.), Fernandez (M.A.), Peltre (P.), 1986 g.- Accidentes climáticos y gestión de las quebradas de Quito. Análisis del aluvion de la Raya del 23 de enero de 1986. revue de CEPEIGE, Quito, p. 25-44.

De Noni (G.), Pourrut (P.), Viennot (M.), 1987.- Analyse de l'impact du "Niño" 1982-83 sur le milieu morphodynamique

instable de l'Equateur, Colloque "Climats et risques naturels", A.F.G.P, Paris, p.157-168.

De Noni (B.), De.Noni (G.), Fernandez (M.A.), Peltre(P.). - 1988 - Drainage urbain et accidents climatiques à Quito (Equateur). Analyse d'un cas récent de crue boueuse. Cah. Sci. Hum., ORSTOM, Paris, Vol 24, n° 2, p. 225-249.

24, 25

De Noni (G.), Viennot (M.), 1989. - Le projet DNA-ORSTOM sur l'Etude de l'érosion et des pratiques de conservation des sols en Equateur, Bulletin du Réseau Erosion, ORSTOM, Montpellier, 5 p.

De Noni (G.), Viennot (M.), Trujillo (G.), 1989-90. - Mesures de l'érosion dans les Andes de Equateur, cah. ORSTOM, sér. Pédologie, vol.XXV, n° 1-2, Paris, p.183-196.

25, 1-2

De Noni (B), De.Noni (G.), Viennot(M.),1990 a - Le poids de l'histoire sur la morphogenèse agricole des Andes de l'Equateur. *in* La Terre et les Hommes, Mélanges offerts à M. Derruau. A.P.F.L.C. Clermont-Ferrand, p. 511-534 .

De Noni (G.), Viennot (M.), 1990 b - De l'approximation cartographique aux réalisations de terrain : la lutte contre l'érosion agricole dans les Andes équatoriennes. *in* "Les sociétés rurales de montagne (Andes et Himalaya)". Université de Grenoble - CNRS, p. 61-65 .

De Noni (G.), Trujillo (G.), Viennot (M.), 1992 - Ensayo de análisis histórico, social y económico de la cangahua en el Ecuador, *in* Suelos volcánicos endurecidos. 1 carte et 5 tab., México, p. 503-514 .

De Noni (G.), Viennot (M.), 1993 - Les recherches sur l'érosion par l'ORSTOM, évolution et perspectives : cas de la montagne équatorienne. Journées PIREN, CNRS, Lyon, 12 p.

11 p.

De Noni (G.), Misset (M. A.), Quantin (P.), Roose (E.), Zebrowski (C.) et Viennot (M.), 1993 - Conservation et restauration des sols agricoles à travers l'étude de 3 exemples menés par l'ORSTOM : Algérie, Equateur et Mexique, Colloque International de Téhéran sur l'eau et les sols. (sous presse). → Bull. Res Erosion ?

De Noni, G, Janeau, J.L., Prat, C., Trujillo, G., Viennot, M., 1994 a - Hydrodynamique, érodibilité et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique latine (Equateur, Mexique et Nicaragua) : impact du matériau originel et effet de la réhabilitation agricole, XVè Congrès International de Science du Sol, vol. 6 a, Commission V, 10-16 Juillet 1994, Acapulco (Mexique) pp. 554-570.

De Noni (G.), Trujillo (G.), Viennot (M.), 1994 b - L'érosion agricole dans les Andes d'Equateur - Phénomène naturel ou phénomène historique, in Bull. Pédo. de la FAO n° 70 (GCES, E. Roose), Rome, pp. 353-362.

De Noni (G.), Roose (E.), Nouvelot (J.F.), 1995. - L'environnement humain de l'érosion, Bull. n°14, Réseau Erosion, ORSTOM -CTA, Montpellier, 625 p.

Delaunay. (D.), 1989. - Espacios demográficos y redes migratorias, Collection "Etudes de Géographie", Corporación Editora Nacional - Colegio de Geógrafos del Ecuador, Quito, p.71-98.

Deler (J.P.), 1981. - Genèse de l'espace équatorien. Essai sur le territoire et la formation de l'état national, IFEA, 279 p., Paris.

Deler (J.P.), Gómez (N.), Portais (M.), 1983. - El manejo del espacio en el Ecuador. Etapas claves, Geografía básica del Ecuador, Tome 1, CEDIG-ORSTOM, Quito, 239 p.

De Ploey (J.), 1989. - Soil erosion map of western Europe, Laboratoire expérimentale de géomorphologie, Catena Verlag, Louvain (Belgique). *pages - à compléter*

Derruau (M.), 1988. - Précis de géomorphologie, Masson, 7^{ème} édition, Paris, 533 p.

etc? Dollfus (O.), 1965. - Les Andes centrales du Pérou et leurs piémonts, Etude géomorphologique, Thèse, Bordeaux, 559 p.

Dollfus (O.), 1981. - El reto del espacio andino, IEP, Lima, 141p.

Donkin (R.A.), 1979. - Agricultural terracing in the aboriginal new world, Viking fund publications in anthropology, Arizona, 196 p.

Dubucq (M.), 1986. - Télédétection spatiale et érosion des sols. Etude bibliographique, Cah. ORSTOM, sér. Pédologie, Vol. XXII, *1980?*
Paris, pp. 247-258. *22, 9, 1*

Duchaufour (Ph.), 1995 - Pédologie, Ed. Masson, 4^{ème} édition, Paris, 324 p.

F.A.O., 1980. - Méthode provisoire pour l'évaluation de la dégradation des sols, ed. F.A.O., Rome, 88 p.

etc? F.A.O, 1991. - Problèmes et perspectives pour une agriculture et un développement rural durables, Conférence FAO/Pays-Bas sur l'Agriculture et l'Environnement, 'S-Hertogenbosch, 32 p.

Farell (G.) et Da Ros (S.), 1983. - El acceso a la tierra del campesino ecuatoriano, Mundo andino, Quito, 132 p.

Farga (C.) et Almeida (J.), 1981. - Campesinos y haciendas de la Sierra norte, Pendoneros, Otavalo, 362 p.

Faucher (B.), Savoyat (E.), 1973. - Esquisse géologique des Andes de l'Equateur, Revue de géographie physique et de géologie dynamique, vol. XV, Fasc. 1-2, Paris, pp. 115-142.

15, 2, 115 - 142 -

Fauroux (E.), 1989. - La grêle à Cangahua (Equateur), Ed. ORSTOM, Coll. "à travers champs", in Le risque en Agriculture, Paris, pp. 225-231.

Fieldes (M.), Perrott (K.W.), 1966. The nature of allophane soils. Rapid field and laboratory test for allophane, J. Sc. 9, Nelle Zélande, pp. 623-629.

Fournier (F.), 1960. - Les relations entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques, PUF, Paris, 201 p.

Fournier (F.), 1966. Utilisation des bassins-versants d'investigation hydrologique ^{ou 2} par l'étude de l'érosion du sol, Bull. de l'Association de géographes français, n° 348-349, Paris, pp. 49-52.

Fritsch (J.M.), Sarrailh (J.M.), 1986. - Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement de pâturages, Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., vol. XXII, n°2, pp. 209-222.

27, 2, 1

Galabert (J.), Millogo (E.), 1972. - Indice d'érosion par la pluie en Haute-Volta, Rapport multigr., CTFT Haute-Volta, 57 p.

Gimeno (A.), 1974. - La expedición del general Flores al Ecuador como síntoma, in Atti del 40 congresso internazionale degli americanisti, vol.3, Gênes, p.295-301.

Gondard (P.), Lopez (F.) + équipe du dépt de géographie de PRONAREG, 1975-1983. - Cartes d'utilisation actuelle des sols et des paysages végétaux de la Sierra, échelles 1/50.000 et 1/200.000, Département de Géographie de PRONAREG - ORSTOM, Quito.

Gondard (P.), 1982. - Carte de l'utilisation des sols de l'Equateur (1/4.000.000), Atlas del Ecuador, Edit. "J.A.", Paris-Quito, p. 46.

Gondard (P.) et López (F.), 1983. - Inventario arqueológico preliminar de los Andes septentrionales del Ecuador, PRONAREG-ORSTOM-Banco Central, Quito, 274 p.

Gril (J.J.), 1982. - L'érosion dans le vignoble du Beaujolais. Etude comparative des techniques culturales sur la commune de Pommiers, Cemagref, DDA, Chambre d'Agriculture, Lyon, 28 p.

cité ?

Guilcher (A.), 1965. - Précis d'Hydrologie - Marine et continentale, Masson, Paris, 389 p.

Heusch (B.), 1970. - L'érosion du pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidentale, in Annales de la Recherche Forestière au Maroc, numéro spéciale sur l'érosion, t. 12, Rabat, pp. 9-176.

Hillel (D.), 1974. - L'eau et le sol. Principes et processus physiques, Vander Ed., Louvain, 1 vol., 288 p.

Hjulström (F.), 1935. - Studies on the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyries, Bull. Géo. Inst. Univ. Uppsala 25, pp. 293-305 et 442-452.

Hudson (N.W.), 1963. - Soil conservation, Ed. Batsford, London, 320 p.

Hudson (N.W.), 1991. - A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects, FAO Soil Bulletin, n°64, Rome, 65 p.

Hudson (N.W.), 1992. - Land Husbandry, Batsford, London, 192 p.

Humbolt (A.), 1838. - Geognostische und physikalische beobachtungen über die vulkane des hochlands von Quito, Poggendorffs Ann. Phys. Cham., 40 und 44.

Humbolt (A.), 1853. - Kleine schriften geognostische und physikalische enrinnerungen, Stuggart und Tübingen. *pages?*

Huttel (C.), 1975. - Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de la basse Côte d'Ivoire, IV : estimation du bilan hydrique, in " La terre et la vie", revue d'écologie appliquée, 29, pp. 192-202.

Huttel (C.), Winckell (A.), Zebrowski (C.) y departamento de Geomorfología de PRONAREG, 1982 à 1985. - Mapas morfo-pedologico hojas, Valdez, Esmeraldas, Quinde, Santo Domingo de los Colorados, Quevedo, Guayaquil, Machala, Arenillas, 1/200 000è.

IGM (Institut Géographique Militaire), 1982. - Carte topographique de l'Equateur (1/3.500.000), Atlas del Ecuador, Edit. "J.A.", Paris-Quito, pp. 8-9.

INEC, 1991 : Recensement de population. Document préliminaire, Quito. *pages.*

Jimenez de la Espada (M.), 1965. - Relaciones geográficas de Indias, Biblioteca de autores espanoles, Perou, p. 221.

Knapp (G.), 1988 - Ecologia cultural prehispanica del Ecuador, Ed. Banco Central del Ecuador, Quito, 206 p.

La Condamine (J. M.), 1986. - Journal du voyage fait par ordre du roi à l'Equateur, servat d'introduction historique à la mesure des 3 preiers degrés du méridien, Coordination générale du Colloque "Ecuador 1986", Quito, 221 p.



Lafforgue (A.), 1977. - Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles, Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., vol. XIV, n°4, pp 299-343.

14, 45.

Lal (R.), 1982. - Effects of slope length and terracing on runoff and erosion on a tropical soil, IAHS Publ. 137, pp. 23-31.

Lal (R.), Editor, 1988. - Soil erosion research methods, Soil and Water conservation Society (Ankeny, Iowa-USA) et Soil Conservation and Environment International Society of Soil Science (Wageningen, Pays-bas), 244 p.

Leamy (M.), 1979 - International Committee on the classification of Andisols, letter n° 13, Soil Bureau, Nelle Zélande.

Page

Leamy (M.), 1987 - International Committee on the classification of Andisols, letter n° 9, Soil Bureau, Nelle Zélande.

Page

Le Bissonnais (Y.), 1988. - Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous la pluie, Thèse Université d'Orléans/INRA, 220 p.

Lecarpentier (C.), Oster (R.), 1979. - L'érosion en milieu tropical tempéré par l'altitude : l'exemple des Andes colombiennes, Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen, Université Louis Pasteur - INRA, Strasbourg, pp. 43-48.

Leprun (J.C.), Silveira da (C.O.), Sobral Filho (R.M.), 1986. - Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens, Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., vol. XXII, n°2, pp. 223-234.

22, 23.

Lilin (C.), 1986. - Histoire de la restauration des terrains en montagne au XIX^e siècle, Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., vol. XXII, n°2, pp. 133-146.

Murra (J.), 1978. - Organizacion económica del estado Inca, Siglo XXI, México, p. 62.

Murra (R.), 1991 - La restauration des terrains en montagne dans l'approche actuelle de la conservation des sols, Bull. Réseau érosion n°12, Montpellier, pp.11-20.

cité ? Nahal (I.), 1975. - Principes de conservation des sols, Masson, Paris, 143 p.

Naranjo (P.), 1981. - El clima del Ecuador, Casa de la Cultura ecuatoriana, Quito..

Neboit (R.), 1991. - L'homme et l'érosion, Faculté des lettres et sciences humaines de l'Université de Clermont-Ferrand II, fasc. 34, 2^{ème} édition, Clermont-Ferrand, 269 p.

Nouvelot (J. F.), 1982 a. - Normas pluviométricas propuestas para el Ecuador, rapport interne, PRONAREG-ORSTOM, Quito.

Nouvelot (J. F.), 1992 b. - Erosion mécanique, Transport solide, Sédimentation dans le cycle de l'eau, ORSTOM, Montpellier, 126 p.

Oberem (O), 1981. - El acceso a recursos naturales de diferentes ecologías en la Sierra ecuatoriana (siglo XVI) como contribución a la ethnohistoria ecuatoriana, Pendoneros, Otavalo, 406 p.

Ortiz-Solorio (C.A.), 1990. - Claves para la taxonomía de Suelos trad. Agricultural handbook N° 436 complété pour les andisols, C. P. et IMTA, Montecillo, Mexico DF. 576p.

Pareja-Diezcanseco (A.), 1979. - Ecuador : de la prehistoria a la conquista espagnola, Editorial Universitaria, Quito, 434 p.

Peltre-Wurtz. (J.), 1989. - El pan que comemos es estadounidense, Collection "Etudes de Géographie", Corporación Editora Nacional - Colegio de Geógrafos del Ecuador, Quito, p.7-16.

Perez (A.), 1947. - Las mitas ^{les mitas?} en la real audiencia de Quito, Ministerio del Tesoro, Quito, p. 67.

Poesen (J.), 1987. - The role of slope angle in surface seal formation, in V. Gardner (editor), International Geomorphology II, pp. 437-448.

Poesen (J.), Bryan (R.B.), 1989-90. - Influence de la longueur de pente sur le ruissellement : rôle de la formation de rigoles et de croûtes de sédimentation, Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXV, n° 1-2, Paris, pp. 71-80. . 25, 1 !

Pourrut (P.), 1983. - Los climas del Ecuador. Fundamentos explicativos, Documentos de investigación n°4, CEDIG-ORSTOM, Quito, pp. 8-43.

Pourrut (P.), 1994. - L'eau en Equateur. Principaux acquis en hydroclimatologie, Coll. Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris, 147 p.

Prescott (W.), 1847. The conquest of Peru, 2 volumes, New York, 211 p.

Prat (C.), 1991. - Etude du Talpetate, horizon volcanique induré de la région Centre-Pacifique du Nicaragua. Genèse, caractérisation morphologique, physico-chimique et hydro-dynamique, son rôle dans l'érosion des sols. Thèse de doctorat, Uni. Paris VI, 350 p.

Quantin (P.), 1972 - Les andosols, Rvue bibliographique des connaissances actuelles, Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol X, n° 3, pp. 273-301.

10,31

Quantin (P.), 1992 a. - Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles Hébrides (Vanuatu), Etude de la pédogenèse initiale en milieu tropical. ORSTOM Paris, Coll. Etudes et Thèses, 493p.

Quantin (P.), 1992 b. - Etude des sols volcaniques indurés (Tepetates) des bassins de Mexico et de Tlaxcala (Mexique), Rapport scientifique final CEE, ORSTOM-Paris, 77 p.

Quantin (P.), 1994 - The andosols, World Reference Base for Soil Resources, ORSTOM - Bondy, 10 p.

Ramon (J.) et López (M.), 1981. - La agricultura de los Andes ecuatorianos, comunidad andina, alternativas políticas de desarrollo, CAAP, Quito, p. 3.

Ricquet (J.), 1982. - Evaluation globale de la dégradation des terres, Nature et Ressources, Vol. XVIII, n°25, pp. 19-23.

18,251

Roose (E.), 1973. - Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical, Thèse Doct. Ing., Fac. Sci. Abidjan, ORSTOM, n°20, 125 p.

Roose (E.), 1977. - Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales, Trav. et Doc. ORSTOM, n°78, Paris, 108 p.

Roose (E.), 1981. - Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale, Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris, 569 p.

Roose (E.), 1994. - Introduction à la GCES, Bull. pédologique de la FAO, n°70, Rome, 420 p.

Roose (E.), Ndayizigiye (F.), 1994. - L'agroforesterie, la minéralisation minérale et la GCES au Rwanda, in Introduction à la GCES, Bull. pédologique de la FAO, n°70, Rome, pp. 309-326.

Rubio Orbe (G.), 1987. - Los indios ecuatorianos: evolución histórica y políticas indigenistas, Corporación editora nacional, Quito, 226 p.

Sarrailh (J.M.), 1983. - Les parcelles de ruissellement : synthèse de 4 années d'étude, Projet ECEREX, C.R. les journées de Cayenne, pp. 394-403.

Sauer (W.), 1965 - Geología del Ecuador, Editorial del Ministerio de Educacion, Quito, 383 p.

Sepulveda (C.), 1982. - Estructuras agrarias y reproducción campesina, Pontifica Universidad Católica del Ecuador, Quito, 294 p.

Sherman (G.D.), Matsuoka (Y.), Ikawa (H.), Uehara (G.), 1964 - The role of the amorphous fraction in the properties of the tropical soils, Agrochimica Ital. 8, n° 2, pp. 148-162.

Shoji (S.), Masui (J.), 1969 - Amorphous clay minerals of recent volcanic ash soils in Hokkaido, Soil Sc. Plant. Nutrit. jap., vol. 15, n° 4, pp. 161-168;

Shoji (S.), Ito (T.), Saigusa (M.), Yamada (I.), 1985 - The case for recognizing a suborder of non-allophanic andisol (Alland), Proc. 6th Inter. Soil Clas. Workshop, Chile-Ecuador, pp. 175-189.

Shoji (S.), Otowa (M.), 1988 - Distribution and significance of Andosols in Japan, Proc. 9th Soil Clas. Workshop, Japan, pp. 13-24.

Sieffermann (G.), 1969 - Le sols de quelques régions volcaniques du Cameroun, Thèse, Strasbourg, 285 p.

Sohr (R.), 1983 - Artículo del periódico "Hoy", 12/07/83, Quito (Equateur).

Soil Survey Staff, 1975. - Agriculture Handbook n°436 Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soils surveys. SCS Washington D.C., 754 p.

Sourdat (M.), Custode (E.), 1983. - Mapa edafológico, escala 1/500 000 : Provincias del Napo, de Pastaza, de Morona-Santiago norte, de Morona-Santiago sur y Zamora Chinchipe, 4 hojas de colores. Quito, MAG-ORSTOM e I.G.M.

Cite⁹. (Souris (M.), 1995. - Modèles numériques de terrain de la Sierra de l'Equateur, Mission ORSTOM, Quito (Equateur).

Tricart (J.), 1962. - L'épiderme de la terre. Esquisse d'une géomorphologie appliquée, Masson, Paris, 167 p.

Tricart (J.), 1965. - Principes et méthodes de la géomorphologie, Masson, Paris, 496 p.

Tricart (J.), 1978. - Géomorphologie applicable, Masson, Paris, 204 p.

Troll (C.), 1959. - Die tropischen Gebirge, ihre dreidimensionale klimatische und planzengeographische Zonierung, Bonner geogr. Abh., Heft 25, 93 p.

Troll (C.), 1968. - Geo-ecology of the mountainous regions of the tropical America, Colloquium Geographicum, Band 9, Bonn, pp. 15-56.

Valentin (C.), 1979. - Problèmes méthodologiques de la simulation de pluie. Application à l'étude de l'érodibilité des sols, in Colloque sur l'érosion agricole en milieu tempéré, Ed. H. et T. Vogt, INRA Colmar, Strasbourg, pp. 117-122.

Valentin (C.), 1985. - Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques, Thèse de 3ème Cycle, Paris VII, Ed. ORSTOM, Sér. Etudes et Thèses, 259 p.

Veyret (Y.), Pech (P.), 1993. - L'homme et l'environnement, PUF, Paris, 423 p.

Vos (R.), 1988. - Petroleo, estado y cambio agrario. Ecuador 1972-1984, in Geografia basica del Ecuador, Tome 5, Geografia agraria, vol.1, Quito, p. 15-36.

Wada (S.I.), Wada (K.), 1977 - Density and structure of allophane, Clay Mine., n° 12, pp. 89-298.

Wada (K.), 1980 - Mineralogical characteristics of andisols, Ed. Theng, pp. 87-107.

Wassmer (P.), 1987. - Description d'une méthode d'étude de l'érosion sous cultures sur fortes pentes. les parcelles expérimentales. RRAM Project, 27p.

Winckell (A.), De Noni (G.), Sourdat (M.), 1982. - Carte géomorphologique de l'Equateur (1/4.000.000), Atlas del Ecuador, Edit. "J.A.", Paris-Quito, pp. 14-15.

Winckell (A.), Zebrowski (C.) + équipe du dépt de Géomorphologie de PRONAREG, 1975-1983. - Cartes morpho-

pédologiques et d'Aptitudes Agricoles de la Côte, 1/200.000, Département de Géomorphologie et de Télédétection de PRONAREG - ORSTOM, Quito.

Zebrowski (C.), 1992. - Los suelos volcanicos endurecidos en America latina, in Terra, Vol. 10, numé. spécial, Mexico, pp. 15-23.

Wischmeier (W.H.), Smith (D.), 1978. - Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning, Agriculture Handbook n° 537, Washington D.C., 58p.

Wischmeier (W.H.) et Smith (D.), 1981. - Predicting rainfall conservation planning, Washington, 51 p.

Wolf (Th), 1975. - Geografía y geología del Ecuador, Ed. Casa de la Cultura Ecuatoriana, Quito, 798 p.

Zingg (A.), 1940. - Degree and length of slope as it affects soil loss in runoff, Agr. Engng, n°21, pp. 3-8.

TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE PREMIER</u>	10
APPROCHE GEOGRAPHIQUE ET HISTORIQUE DE L'EROSION DANS LA SIERRA	
1) IMPORTANCE DE L'EROSION ACCELEREE DES SOLS	16
L'érosion accélérée relayée par le ruissellement diffus	
L'érosion accélérée relayée par les mouvements de masse	
L'érosion accélérée relayée par l'érosion éolienne	
2) UTILISATION DES SOLS ET FACTEURS ANTHROPIQUES DE L'EROSION DES SOLS	53
L'agriculture pré-coloniale	
L'agriculture coloniale	
L'agriculture récente	
3) LES GRANDS BASSINS ET LES SITES	78
Grands bassins pyroclastiques de Guayllabamba et de Pastaza (sites de Mojanda, Riobamba, Tumbaco et Cangahua)	
Grands basins sédimentaires de Santiago (site de Jadan) et de Catamayo (site de Vega Grande)	
Grand bassin de Piemont (site de Guayas)	
<u>CHAPITRE DEUX :</u>	143
APPROCHE EXPERIMENTALE DES FACTEURS DE L'EROSION SOUS PLUIES NATURELLES ET SIMULEES	
1) INTERET DES STATIONS DE MESURES DE L'EROSION	144
Les parcelles de ruissellement	
La simulation de pluies	
2) APPORT DE L'EXPERIMENTATION PAR LES PARCELLES DE RUISELLEMENT	152
2.1) Dispositif et protocoles	155
2.2) Les résultats des parcelles de ruissellement	155
Le facteur végétation	
Le facteur sol	
Le facteur pente	
Le facteur précipitations	
3) APPORT DE L'EXPERIMENTATION PAR LES SIMULATIONS DE PLUIES	206
3.1) Intérêt de la méthode. Dispositif et protocole	207
3.2) Les résultats sous pluies simulées	219
L'effet des "situations culturales"	

<u>CHAPITRE TROIS</u>	264
APPROCHE APPLIQUEE DE LA GESTION DES TERRES : VALORISATION DES RESULTATS POUR L LUTTE ANTI-EROSIVE	
1) LA LUTTE CONTRE L'EROSION EN MONTAGNE	265
1.1) Positionnement général	265
1.2) Le cas de la Sierra équatorienne	269
Les enquêtes de terrain	
Les méthodes conservatoires utilisées	
2) LES APPORTS DE L'EXPÉRIMENTATION PAR LES PARCELLES AMELIOREES ET LES SIMULATIONS DE PLUIES	278
2.1) Les parcelles de ruissellement améliorées	278
Dispositif et protocole	
Les résultats des parcelles de ruissellement améliorés	
2.2) Les simulations de pluie en situations améliorées	302
Dispositif et protocole	
Les résultats des pluies simulées en situation améliorée	
<u>CONCLUSION</u>	320
Bibliographie	330
Index des cartes, tableaux et figures	
Table des matières	
Annexe	

↓ Préciser les figures

Index des cartes, tableaux et figures

cartes

n°		page
1	Relief de l'Equateur	4
	Situation de l'Equateur sur le continent Sud-Américain	
2	Les ensembles topographiques de l'Equateur	12
3	Le volcanisme quaternaire dans la Sierra	13
4	Les sols de la Sierra	14
5	Extrait de la carte de Ibarra	19
6	Extrait de la carte de Loja	23
7	Croquis de l'érosion concentrée (Latacunga)	28
8	Croquis de l'érosion concentrée + mouvements de masse (Quito)	36
9	Croquis de l'érosion concentrée + érosion éolienne (Mojanda)	42
10	Typologie des principales manifestations de l'érosion en Equateur	46
11	Conséquences des transformations agraires dans le bassin de Cayambe	72
12	Utilisation des sols dans la Sierra	73
13	Les Grands Bassins et les sites expérimentaux	79
14	Les classes de pentes dans la Sierra	88
15	Pluviométrie annuelle + IM30 dans la Sierra	90
16	Essai de spatialisation de la cangahua	138

tableaux

n°		page
1	Caractéristiques des dynamiques d'érosion de la Sierra	48
2	La structure agraire en Equateur 1954-1985, nombre d'exploitations et superficies occupées en %	76
3	Présentation des bassins versants et des sites	82
4	Résultats analytiques des sols des stations de Mojanda et de Riobamba	99
5	Résultats analytiques des sols des stations de Tumbaco et de Cangahua	110
6	Résultats analytiques des sols des stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas	127
7	Texture et minéraux lourds de la cangahua	139
8	Comparaison des méthodes parcelles et pluies simulées	151
9	Erosion et ruissellement par années pour la période 1986-1991, parcelles témoin cultivées et non cultivées	156
10	Valeurs moyennes par station des coefficients de ruissellement (KRM%) et de l'érosion ($Er.t.ha^{-1}$)	158
11	Comparaison sols en place et sédiments érodés par parcelle et par station, résultats analytiques	178
12	Erosion provoquée par les cinq pluies les plus érosives $Kg.ha^{-1}$	199
13	Corrélation. Erosion en fonction de la pente, (du taux d'argile, de matière organique, de limon et de sable)	202
14	Corrélation. Erosion en fonction de la pente, de l'argile et de la densité apparente.	203
15	Synthèse des apports issus des parcelles de ruissellement et des simulations de pluie	260
16	Erosion et ruissellement par années pour la période 1986-1991. Parcelles améliorées	281
17	Coût de construction et d'entretien des ouvrages durant la période 1988-91	299
18	Les principales étapes de la méthode de travail	324

figures

n°		page
1	Le ruissellement concentré (Latacunga)	29
2	L'érosion concentrée relayée par les mouvements de masse	37
3	L'érosion concentrée relayée par l'érosion éolienne	43
4	Effets de l'érosion concentrée sur versants volcaniques et du socle	50
5	Evolution de l'utilisation des sols dans la région de Tupigachi	56
6	Etagement de la végétation dans la Sierra volcanique	75
7	Composition colorée : images spot des bassins de Quito et Ibarra	84
8	Coupe au travers du bassin de Cayambe	85
9	Coupe du Chimborazo et du versant externe	86
10	Coupe dans la bassin de Quito où sont situées les stations de Tumbaco, Cangahua et Mojanda	98
11	Coupe au travers des bassins de Catamayo et de Loja	116
12	Coupe du site de la station de Jadan dans le bassin de Cuenca	124
13	Coupe du site de la station de Vega Grande dans le bassin de Catamayo	128
14	Coefficient annuels moyens de ruissellement et de pertes en terres sur les témoins cultivés et non cultivés pour les 7 stations	159
15	Erosion $\log t \cdot ha^{-1}$, ruissellement moyen annuel KRM et KRM% (86-91). Témoin cultivé et témoin non cultivé. Tumbaco, Mojanda, Cangahua, Riobamba,	162
16	Erosion $\log t \cdot ha^{-1}$, ruissellement moyen annuel KRM et KRM% (86-91). Témoin cultivé et témoin non cultivé. Vega Grande, Ventanas.	163
17	Ruissellement, érosion et pluie décennales. Témoin cultivé, témoin non cultivé. Tumbaco 1989-1990.	165
18	Ruissellement, érosion et pluie décennales. Témoin cultivé, témoin non cultivé. Tumbaco 1988-1989.	166
19	Ruissellement, érosion et pluie décennales. Témoin cultivé, témoin non cultivé. Tumbaco 1987-1988.	167
20	Ruissellement, érosion et pluie décennales. Témoin cultivé, témoin non cultivé. Riobamba 1989-1990.	169
21	Ruissellement, érosion et pluie décennales. Témoin cultivé, témoin non cultivé. Riobamba 1988-1989.	170
22	Ruissellement, érosion et pluie décennales. Témoin cultivé, témoin non cultivé. Riobamba 1987-1988.	171
23	Corrélation Erosion en fonction de (taux de matière organique, d'argile, de limon et de sable) Les sept stations	176
24	Comparaison sol en place, sédiments érodés. Résultats analytiques. Tumbaco	180
25	Comparaison sol en place, sédiments érodés. Résultats analytiques. Cangahua	181
26	Comparaison sol en place, sédiments érodés. Résultats analytiques. Mojanda	182
27	Comparaison sol en place, sédiments érodés. Résultats analytiques. Riobamba	183

28	Corrélation Erosion en fonction de la pente. Pour les 7 stations Corrélation Erosion en fonction de la pente. Pour Tumbaco, Cangahua, Mojanda, Riobamba	185
29	Corrélation Erosion en fonction du ruissellement. Mojanda Corrélation Erosion en fonction de la pluie. Mojanda	186
30	Corrélation Erosion en fonction du ruissellement. Riobamba Corrélation Erosion en fonction de la pluie. Riobamba	187
31	Corrélation Erosion en fonction du ruissellement. Cangahua Corrélation Erosion en fonction de la pluie. Cangahua	191
32	Corrélation Erosion en fonction du ruissellement. Tumbaco Corrélation Erosion en fonction de la pluie. Tumbaco	194
33	Corrélation Erosion en fonction de l'IM 15. Cangahua Corrélation Erosion en fonction de l'IM 30. Cangahua	195
34	Corrélation Erosion en fonction de l'IM 15. Mojanda Corrélation Erosion en fonction de l'IM 30. Mojanda	196
35	Corrélation Erosion en fonction de l'IM 15. Riobamba Corrélation Erosion en fonction de l'IM 30. Riobamba	197
36	La simulation de pluie : dispositif et principes de fonctionnement	209
37	Hydrogramme théorique de ruissellement, pluie d'intensité constante.	216
38	Variation de R_{max}/h par stations et par situations culturales Variation des charges par stations et par situations culturales	220
39	Simulation de pluie sur premier labour. Variation de la pluie d'imbibition en fonction de l'état d'humidité préalable et de l'intensité de la pluie. Pour les stations	224
40	Simulation de pluie sur ancien labour. Variation de la pluie d'imbibition en fonction de l'état d'humidité préalable et de l'intensité de la pluie. Pour les stations	227
41	Variations de la pluie d'imbibition et du R_{max} . Pour les stations (sol humide, $I = 60$ mm/h	228
42	Variations de la pluie d'imbibition et du R_{max} . Pour les stations (sol très humide, $I = 60$ mm/h	231
43	F_n Infiltration minimale en fonction de l'intensité de la pluie Mojanda	232
44	F_n Infiltration minimale en fonction de l'intensité de la pluie Vega Grande	233
45	Transfert d'eau et de matière solide sous pluie constante en fonction de la station, sur Premier Labour. Mojanda, Vega Grande	238
46	Transfert d'eau et de matière solide sous pluie constante en fonction de la station, sur Ancien Labour. Mojanda, Vega Grande	239
47	Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol. Tumbaco. Pluies d'intensité de 60 mm/h. Sol nu	241
48	Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol. Mojanda. Pluies d'intensité de 60 mm/h. Sol Nu et Ancien Labour	242
49	Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol. Riobamba. Pluies d'intensité de 60 mm/h. Sol Nu et Ancien Labour	243
50	Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol. Jadan. Pluies d'intensité de 60 mm/h. Sol Nu et Ancien Labour	244
51	Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol. Vega Grande. Pluies d'intensité de 60 mm/h. Sol Nu et Ancien Labour	245
52	Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol. Ventanas. Pluies d'intensité de 60 mm/h. Sol Nu et Ancien Labour	246
53	Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol. Les sept stations. Pluies d'intensité de 60 mm/h. Sol Nu	248
54	Simulation de pluie sur ancien labour. Variation des charges en fonction de l'état d'humidité préalable et l'intensité de la pluie pour les stations. Ancien Labour	251
55	Simulation de pluie sur ancien labour. Variation des charges en fonction de l'état d'humidité préalable et l'intensité de la pluie pour les stations. Sol Nu	252

5 6	Transfert d'eau et de matière solide sous pluie constante en fonction de la station : Ventanas sol nu et ancien labour ; Riobamba, sol nu	253
5 7	Régressions entre charge et teneur en argile : Premier Labour, Ancien Labour et sol nu pour les sols humide et très humide	255
5 8	Variation du taux d'argile entre Premier et Ancien Labours. Pour les sept stations	257
5 9	Schéma illustrant le dispositif utilisé pour installer une station	280
6 0	La pratique du muret de 'chambas" (station de Mojanda)	286
6 1	Erosion et ruissellement moyen annuel KRa et KTM% 86-91. Tumbaco et Cangahua.	289
6 2	Erosion et ruissellement moyen annuel KRa et KTM% 86-91. Mojanda et Riobamba.	290
6 3	Erosion et ruissellement moyen annuel KRa et KTM% 86-91. Vega Grande et Ventanas	291
6 4	Variations du coefficient annuel moyen de ruissellement. Pour les 4 stations et les 3 situations culturelles	295
6 5	Simulation de pluie sur prairie. Variation du ruissellement maximale en fonction de l'état d'humidité préalable et de l'intensité de la pluie. Pour les stations	301
6 6	Transfert d'eau et de matière solide sur prairie	310
6 7	Relations pluie utile - lame ruisselée	311

ANNEXE

ANNEXES 1

***(Tableaux de pertes en eau et en terre
sous pluies naturelles)***

EROSION et RUISSELLEMENT, (mensuel et annuel)										
Station de Tumbaco, 1986 - 1991										
P. AMELIOREE					TEMOIN CULTIVE			TEMOIN NON CULTIVE		
date	en mm	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha	l/ha	KR %	kg/ha
Sept.86	63.1	86107	13.6	18601	108086	17.1	18422	118386	18.8	34459
Oct.86	92.6	10624	1.1	809	23857	2.6	2338	81827	8.8	6830
Nov.86	63.2	960	0.2	94	0	0.0	198	18928	3.0	2231
Dec.86	53.1	0	0.0	17	0	0.0	42	0	0.0	40
Jan.87	64.5	851	0.1	42	775	0.1	80	32018	5.0	3074
Fév.87	39.9	0	0.0	12	0	0.0	23	0	0.0	31
Mar.87	40.6	119	0.0	21	418	0.1	31	0	0.0	23
Avr.87	115.1	3339	0.3	79	7028	0.6	173	12728	1.1	410
Mai.87	96.7	1735	0.2	44	44272	4.6	830	115479	11.9	3973
Jun.87	42.1	1128	0.3	81	67034	15.9	2880	74468	17.7	18863
Jul.87	0.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Aoû.87	17.4	0	0.0	2	0	0.0	0	0	0.0	0
86-87	688.3	104863	1.5	19803	251470	3.7	25019	453834	6.6	69934
Sep.87	41.2	23732	5.8	138	0	0.0	95	13696	3.3	1505
Oct.87	138.9	15331	1.1	209	158281	11.4	41742	158746	11.4	62750
Nov.87	9.9	0	0.0	3	0	0.0	37	0	0.0	44
Dec.87	54.3	0	0.0	0	0	0.0	0	52170	9.4	7971
Jan.88	53.0	1439	0.3	10	0	0.0	0	16083	3.0	304
Fév.88	45.7	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	93
Mar.88	19.7	300	0.2	1	570	0.3	4	945	0.5	539
Avr.88	152.2	4711	0.3	36	17187	1.1	316	370870	24.4	8040
Mai.88	94.2	8692	0.9	67	129054	13.7	1298	389176	41.3	22556
Jun.88	51.2	190	0.0	1	0	0.0	0	0	0.0	0
Jul.88	21.5	835	0.4	2	4537	2.1	11	52287	24.3	1195
Aoû.88	24.7	0	0.0	0	2335	0.9	25	29355	11.9	2094
87-88	706.5	55230	0.8	469	311964	4.4	43528	1083326	15.3	107090
Sep.88	45.1	960	0.2	0	5080	1.1	6	43723	9.7	2145
Oct.88	65.0	2109	0.3	18	5066	0.8	79	31610	4.9	1234
Nov.88	86.2	9505	1.1	170	90457	10.5	2342	439922	51.0	15740
Dec.88	38.9	1066	0.3	7	3017	0.8	55	40077	10.3	1149
Jan.89	55.1	831	0.2	9	4462	0.8	9	119452	21.7	5099
Fév.89	53.8	580	0.1	7	2280	0.4	7	59148	11.0	3207
Mar.89	88.9	6046	0.7	48	27095	3.0	253	357435	40.2	23209
Avr.89	19.9	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Mai.89	111.5	261914	23.5	255	383057	34.4	4023	708957	63.6	23984
Jun.89	39.9	1866	0.5	12	4183	1.0	135	13848	3.5	706
Jul.89	22.8	97334	42.7	55	17070	7.5	337	52290	22.9	721
Aoû.89	0.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
88-89	627.1	382211	6.1	581	541766	8.6	7246	1866462	29.8	77193
Sep.89	49.6	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Oct.89	157.7	91569	5.8	159	184672	11.7	2682	587902	37.3	44156
Nov.89	29.8	14122	4.7	85	9596	3.2	352	187736	63.0	16610
Dec.89	0.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jan.90	30.5	130	0.0	41	1391	0.5	37	3517	1.2	91
Fév.90	68.8	281	0.0	13	2241	0.3	69	62249	9.0	4921
Mar.90	58.2	620	0.1	35	2946	0.5	109	61646	10.6	2048
Avr.90	90.3	1076	0.1	25	9945	1.1	150	144285	16.0	1706
Mai.90	49.8	104	0.0	3	8559	1.7	55	86149	17.3	3878
Jun.90	18.9	0	0.0	0	839	0.4	39	17339	9.2	847
Jul.90	10.5	0	0.0	0	339	0.3	10	0	0.0	0
Aoû.90	61.6	8614	1.4	499	171178	27.8	2250	356778	57.9	20013
89-90	625.7	116516	1.9	861	391706	6.3	5753	1507601	24.1	94270
Sep.90	43.4	1498	0.3	38	31670	7.3	137	125514	28.9	9589
Oct.90	214.2	48693	2.3	331	348926	16.3	5066	799496	37.3	34363
Nov.90	17.5	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Dec.90	46.9	698	0.1	5	6038	1.3	41	9438	2.0	235
Jan.91	92.2	489	0.1	10	7855	0.9	54	36925	4.0	799
Fév.91	38.7	1640	0.4	39	24484	6.3	302	97384	25.2	8664
Mar.91	89.4	17578	2.0	170	148930	16.7	9276	73543	8.2	33999
Avr.91	51.5	206	0.0	7	7056	1.4	47	31457	6.1	1750
Mai.91	111.7	1006	0.1	56	11608	1.0	180	198588	17.8	27858
Jun.91	40.2	0	0.0	0	2801	0.7	42	34994	8.7	10976
Jul.91	20.1	321	0.2	13	1332	0.7	44	59322	29.5	2695
Aoû.91	11.6	0	0.0	0	979	0.8	10	979	0.8	11
90-91	777.4	72129	0.9	668	591680	7.6	15200	1467640	18.9	130939
Moy. sur										
5 ans	685.0	146190	2.1	4476	417717	6.1	19349	1275773	18.6	95885

EROSION et RUISSELLEMENT, (mensuel et annuel)													
Station de Cangahua 1986 - 1991													
		P. AMELIOREE 1			P. AMELIOREE 2			P. TEMOIN CULTIVEE			P. TEMOIN NON CULTIVEE		
date	P. mm	l/ha	kr %	kg/ha	l/ha	kr %	kg/ha	l/ha	kr %	kg/ha	l/ha	kr %	kg/ha
Oct.86	62.6	2631	0.4	91	1911	0.3	117	10148	1.6	409	28747	4.6	3100
Nov.86	65.3	0	0.0	55	0	0.0	69	0	0.0	177	20083	3.1	798
Dec.86	38	66	0.0	46	540	0.1	76	47	0.0	195	49144	12.9	12266
Jan.87	53.5	375	0.1	33	555	0.1	52	4875	0.9	206	67179	12.6	14136
Fév.87	74.7	777	0.1	98	3198	0.4	171	58048	7.8	2652	103155	13.8	25726
Mar.87	26	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Avr.87	64.2	0	0.0	5	0	0.0	5	0	0.0	0	0	0.0	0
Mai.87	50.8	0	0.0	10	0	0.0	11	0	0.0	19	780	0.2	127
Jun.87	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jul.87	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
AO.87	17.2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
86-87	452.3	3849	0.1	337	6204	0.1	501	73118	1.6	3658	269088	5.9	56154
Sep.87	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Oct.87	99.1	7230	0.7	234	10170	1.0	392	71226	7.2	7235	115806	11.7	33075
Nov.87	17.6	189	0.1	9	9	0.0	7	0	0.0	13	5237	3.0	431
Dec.87	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jan.88	50.9	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	19	8270	1.6	361
Fév.88	42.8	315	0.1	10	455	0.1	8	0	0.0	0	82569	19.3	14281
Mar.88	10.9	557	0.5	4	327	0.3	4	0	0.0	0	429	0.4	43
Avr.88	110.3	13926	1.3	131	15786	1.4	112	12544	1.1	32	265510	24.1	40310
Mai.88	29.5	665	0.2	8	575	0.2	2	813	0.3	5	7713	2.6	299
Jun.88	32.2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jul.88	42.4	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
AO.88	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
87-88	435.7	22882	0.5	396	27322	0.6	525	84582	1.9	7303	485533	11.1	88801
Sep.88	25.6	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	364	0.1	19
Oct.88	40.4	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	1648	0.4	545
Nov.88	108.6	154	0.0	4	0	0.0	12	0	0.0	0	6678	0.6	2175
Dec.88	46.1	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jan.89	63.8	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Fév.89	58.2	1504	0.3	20	879	0.2	0	754	0.1	11	52464	9.0	7621
Mar.89	161.4	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	3848	0.2	2205
Avr.89	23.2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Mai.89	86.1	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	51698	6.0	1637
Jun.89	51.7	152	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	450	0.1	4
Jul.89	15.3	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
AO.89	11.1	1621	1.5	9	0	0.0	0	0	0.0	0	15962	14.4	224
88-89	691.5	3431	0.0	32	879	0.0	12	754	0.0	11	133110	1.9	14431
Sep.89	34	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Oct.89	98.8	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	9636	1.0	627
Nov.89	38.2	0	0.0	5	0	0.0	0	0	0.0	0	15122	4.0	4232
Dec.89	15.3	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jan.90	42.7	0	0.0	7	0	0.0	2	0	0.0	30	1120	0.3	1857
Fév.90	72.4	1	0.0	27	0	0.0	0	141	0.0	3	3031	0.4	671
Mar.90	37.4	81	0.0	8	0	0.0	0	0	0.0	0	19542	5.2	2332
Avr.90	48.8	286	0.1	9	0	0.0	0	0	0.0	0	37749	7.7	3237
Mai.90	38.7	20	0.0	3	0	0.0	0	0	0.0	0	8449	2.2	917
Jun.90	33.8	0	0.0	0	0	0.0	0	110	0.0	2	10	0.0	2
Jul.90	24.2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
AO.90	4.3	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
89-90	488.6	388	0.0	58	0	0.0	2	252	0.0	35	94660	1.9	13876
Sep.90	8.2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	259	0.3	7
Oct.90	95.4	2699	0.3	29	2399	0.3	31	5266	0.6	74	56945	6.0	6330
Nov.90	0.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Dec.90	55.2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jan.91	87.5	481	0.1	65	196	0.0	15	930	0.1	32	45601	5.2	21034
Fév.91	29.3	1938	0.7	141	4968	1.7	349	32682	11.2	2498	64031	21.9	18339
Mar.91	112.3	1997	0.2	37	4106	0.4	126	52245	4.7	518	83007	7.4	9775
Avr.91	49.1	586	0.1	44	1116	0.2	53	19563	4.0	75	37403	7.6	6184
Mai.91	96	4045	0.4	192	7465	0.8	252	55777	5.8	928	73747	7.7	17491
Jun.91	13.2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jul.91	39.7	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
AO.91	23.7	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
90-91	609.6	11746	0.2	508	20250	0.3	827	166463	2.7	4125	360993	5.9	79162
Moy. sur													
6 ans	535.5	8459	0.2	266	10931	0.2	373	65034	1.2	3027	268677	5.0	50485

EROSION et RUISSELLEMENT. (mensuel et annuel)
Station de Moienda, 1986 - 1991

P. AMELIOREE 1

P. AMELIOREE 2

P. TEMOIN CULTIVEE

P. TEMOIN NON CULTIVEE

date	P. mm	l/ha	kr %	kg/ha	l/ha	kr %	kg/ha	l/ha	kr %	kg/ha	l/ha	kr %	kg/ha
Oct.86	41.8	5923	1.4	82	8158	2.0	102	16417	3.9	380	16930	4.1	757
Nov.86	127.7	4857	0.4	92	1420	0.1	130	3484	0.3	263	4174	0.3	186
Dec.86	16.8	1578	0.9	41	1458	0.9	29	8497	5.1	120	6097	3.6	125
Jan.87	76.7	1797	0.2	66	2677	0.3	76	7076	0.9	197	4697	0.6	237
Fév.87	60.3	0	0.0	43	0	0.0	14	0	0.0	24	0	0.0	42
Mar.87	107.0	4299	0.4	19	3921	0.4	10	13907	1.3	99	61278	5.7	3653
Avr.87	136.7	2064	0.2	5	966	0.1	4	6608	0.5	7	24572	1.8	407
Mai.87	94.1	1851	0.2	3	1314	0.1	2	5651	0.6	81	17051	1.8	199
Jun.87	0.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jul.87	0.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Aoû.87	7.8	498	0.6	7	558	0.7	9	1681	2.2	14	1081	1.4	35
86-87	668.9	22867	0.3	358	20472	0.3	377	63322	0.9	1185	135881	2.0	5642
Sep.87	42.9	213	0.0	30	0	0.0	18	1990	0.5	28	1390	0.3	109
Oct.87	94.6	1620	0.2	54	3540	0.4	50	5136	0.5	59	51018	5.4	6656
Nov.87	26.2	0	0.0	0	0	0.0	9	16355	6.2	60	79735	30.4	2790
Dec.87	14.2	2022	1.4	42	2122	1.5	37	5907	4.2	34	9707	6.8	284
Jan.88	70.8	57	0.0	11	353	0.0	11	473	0.0	16	310	0.0	17
Fév.88	40.0	38	0.0	11	428	0.1	6	1700	0.4	44	1213	0.3	51
Mar.88	78.5	1173	0.1	40	1535	0.2	33	1589	0.2	57	62352	7.9	44092
Avr.88	240.8	3084	0.1	59	1884	0.1	31	15736	0.7	149	153804	6.4	42258
Mai.88	99.6	661	0.1	71	1054	0.1	34	19905	2.0	1165	188780	19.0	34137
Jun.88	98.0	1002	0.1	21	842	0.1	7	7592	0.8	65	33516	3.4	1196
Jul.88	65.8	2030	0.3	28	930	0.1	6	15213	2.3	85	161413	24.5	5430
Aoû.88	14.8	0	0.0	2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
87-88	886.2	11900	0.1	368	12688	0.1	241	91596	1.0	1761	743238	8.4	137020
Sep.88	80.5	1412	0.2	14	1022	0.1	5	19905	6.2	1165	188780	30.4	44092
Oct.88	89.9	538	0.1	17	688	0.1	18	2108	0.2	46	13753	1.5	450
Nov.88	178.4	744	0.0	20	1034	0.1	30	16059	0.9	38	258163	14.5	11699
Dec.88	139.7	1043	0.1	13	353	0.0	4	12934	0.9	81	179904	12.9	2706
Jan.89	92.2	128	0.0	1	0	0.0	0	0	0.0	0	8249	0.9	3
Fév.89	132.9	667	0.1	15	687	0.1	9	2420	0.2	27	85830	6.5	18184
Mar.89	227.5	511	0.0	11	626	0.0	11	10634	0.5	27	399624	17.6	74397
Avr.89	67.1	624	0.1	1	394	0.1	4	1384	0.2	11	64444	9.6	2475
Mai.89	109.5	1496	0.1	7	909	0.1	2	33258	3.0	87	223508	20.4	4532
Jun.89	82.4	50	0.0	2	0	0.0	0	795	0.1	23	6230	0.8	72
Jul.89	45.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Aoû.89	20.1	8	0.0	3	68	0.0	1	0	0.0	0	0	0.0	0
88-89	1265.2	7221	0.1	104	5781	0.0	82	87569	0.7	442	1290206	10.2	115316
Sep.89	93.1	2672	0.3	7	2792	0.3	13	3258	0.3	28	313355	33.7	47421
Oct.89	163.2	0	0.0	7	97	0.0	0	0	0.0	0	314851	19.3	31519
Nov.89	47.0	47	0.0	4	7	0.0	2	3754	0.8	11	22854	4.9	1075
Dec.89	65.2	0	0.0	2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jan.90	52.2	0	0.0	1	0	0.0	0	0	0.0	0	1330	0.3	6
Fév.90	109.1	32	0.0	47	532	0.0	1	0	0.0	0	0	0.0	0
Mar.90	81.6	1991	0.2	39	1552	0.2	14	319	0.0	37	188006	23.0	82760
Avr.90	105.7	251	0.0	11	141	0.0	8	80	0.0	2	59115	5.6	3476
Mai.90	44.2	94	0.0	3	74	0.0	0	1831	0.4	7	102	0.0	0
Jun.90	23.3	0	0.0	1	0	0.0	0	157	0.1	1	764	0.3	2
Jul.90	22.1	22	0.0	1	22	0.0	0	205	0.1	1	5	0.0	0
Aoû.90	7.9	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
89-90	814.6	5109	0.1	123	5217	0.1	39	9603	0.1	87	900380	11.1	166261
Sep.90	31.5	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Oct.90	161.5	656	0.0	15	299	0.0	14	196	0.0	5	84219	5.2	12547
Nov.90	82.3	871	0.1	162	841	0.1	7	104	0.0	64	96384	11.7	27600
Dec.90	34.2	49	0.0	0	89	0.0	0	587	0.2	8	87	0.0	356
Jan.91	122.6	459	0.0	4	699	0.1	4	1305	0.1	37	72367	5.9	7051
Fév.91	18.9	0	0.0	0	0	0.0	0	262	0.1	1	0	0.0	0
Mar.91	176.9	1843	0.1	26	1883	0.1	24	1624	0.1	35	229032	12.9	47912
Avr.91	108.9	26238	2.4	826	4556	0.4	105	10296	0.9	405	247484	22.7	115861
Mai.91	121.7	1748	0.1	28	449	0.0	9	251	0.0	2	192926	15.9	18224
Jun.91	20.0	0	0.0	0	902	0.5	10	1465	0.7	17	31665	0.0	3994
Jul.91	24.7	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Aoû.91	40.4	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
90-91	943.6	31864	0.3	1061	9718	0.1	174	16089	0.2	574	954162	10.1	233545
Moy.sur													
5 ans	915.7	15792	0.2	403	10775	0.1	182	53636	0.6	810	804773	8.8	131557

EROSION et RUISSELLEMENT, (mensuel et annuel)										
Station de Riobamba, 1986 - 1991										
P. AMELIOREE				P. TEMOIN CULTIVEE				P. TEMOIN NON CULTIVEE		
date	P. mm	l/ha	ruissel.	kg/ha	l/ha	ruissel.	kg/ha	l/ha	ruissel.	kg/ha
Oct.86	84.5	362	0.0	60	944	0.1	79	744	0.1	105
Nov.86	105.2	2411	0.2	97	7534	0.7	358	22034	2.1	487
Dec.86	37.5	2175	0.6	40	9425	2.5	475	15250	3.4	27653
Jan.87	20	0	0.0	18	0	0.0	35	0	0.0	67
Fév.87	89.3	1210	0.1	92	4668	0.5	185	47768	5.3	4371
Mar.87	100.9	1627	0.2	44	6227	0.6	97	91642	9.1	16165
Avr.87	159.8	3651	0.2	52	11200	0.7	199	522140	32.7	8139
Mai.87	104.9	7189	0.7	47	20618	2.0	216	936788	89.3	9636
Jun.87	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jul.87	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Aoû.87	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
86-87	702.1	18625	0.3	449	60615	0.9	1644	1636365	23.3	66623
Sep.87	21.6	120	0.1	3	816	0.4	32	416	0.2	25
Oct.87	103.8	6410	0.6	165	200226	19.3	20288	282410	27.2	17085
Nov.87	52.9	18650	3.5	949	131182	24.8	13546	90282	17.1	10958
Dec.87	33.3	26808	8.1	2606	57968	17.4	6531	64091	19.2	32106
Jan..88	30.4	0	0.0	0	0	0.0	0	421	0.1	12
Fév.88	99	7580	0.8	1286	95955	9.7	5615	109074	11.0	23966
Mar.88	23.9	1337	0.6	6	2347	1.0	12	2013	0.8	48
Avr.88	181.7	340658	18.7	2562	539525	29.7	6070	815369	44.9	89723
Mai.88	151.7	58723	3.9	35	130202	8.6	457	224421	14.8	5566
Jun.88	42.4	70	0.0	0	2965	0.7	6	5565	1.3	68
Jul.88	14.2	1402	1.0	5	4796	3.4	31	4796	3.4	14
Aoû.88	17.7	907	0.5	6	0	0.0	0	0	0.0	0
87-88	751	462545	6.2	7620	1165165.6	15.5	52554	1598444	21.3	179546
Sep.88	64.5	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Oct.88	93.4	2526	0.3	90	390	0.0	0	44995	4.8	3355
Nov.88	259.2	319771	12.3	847	260183	10.0	2763	476894	18.4	1999
Dec.88	64.6	1483	0.2	11	8699	1.3	95	18699	2.9	143
Jan.89	82.7	1512	0.2	19	6888	0.8	115	4661	0.6	83
Fév.89	66.3	99	0.0	0	329	0.0	1	9490	1.4	411
Mar.89	164.8	22286	1.4	314	84089	5.1	270	136582	8.3	2980
Avr.89	94.8	10029	1.1	43	79618	8.4	2025	110118	11.6	4104
Mai.89	95.5	5831	0.6	33	128851	13.5	842	128051	13.4	6648
Jun.89	52.4	130	0.0	2	6894	1.3	53	4394	0.8	54
Jul.89	23.4	69	0.0	0	246	0.1	0	246	0.1	0
Aoû.89	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
88-89	997.1	363736	3.6	1360.243	576185	5.8	6163	934130	9.4	19777
Sep.89	104.4	19682	1.9	1471	24944	2.4	4109	131854	12.6	11114
Oct.89	89.7	771	0.1	2	4121	0.5	85	6821	0.8	67
Nov.89	13.2	848	0.6	1	11390	8.6	55	14390	10.9	397
Dec.89	36.2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Jan.90	24.1	0	0.0	0	1306	0.5	6	0	0.0	0
Fév.90	115.1	27191	2.4	1005	13724	1.2	129	83710	7.3	9794
Mar.90	34.9	302	0.1	2	2560	0.7	15	2560	0.7	11
Avr.90	78.3	133970	17.1	2395	197131	25.2	9322	252830	32.3	38195
Mai.90	28.5	261	0.1	5	1386	0.5	21	3386	1.2	36
Jun.90	44.9	460	0.1	1	3375	0.8	3	1514	0.6	2
Jul.90	22.8	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Aoû.90	13.5	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
89-90	501.2	163803	3.3	3411	234993	4.7	9635	365211	7.3	48502
Sep.90	30.6	12	0.0	0	670	0.2	0	1670	0.5	0
Oct.90	178.1	57683	3.2	9226	159992	9.0	6942	462252	26.0	94434
Nov.90	47.2	124	0.0	2	1562	0.3	36	10228	2.2	3175
Dec.90	29.9	494	0.2	4	3247	1.1	8	5247	1.8	78
Jan.91	48.5	0	0.0	12	133	0.0	0	65208	13.4	9540
Fév.91	30.2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Mar.91	69.2	5513	0.8	53	4835	0.7	162	42975	6.2	12406
Avr.91	42.5	801	0.2	2.16	6061	1.4	27	27061	6.4	2590
Mai.91	53.1	218	0.0	2	416	0.1	0	416	0.1	0
Jun.91	61.7	0	0.0	0	421	0.1	3	421	0.1	5
90-91*	560.4	64833	1.2	9300	176668	3.2	7179	613808	11.0	122229
Moy. sur										
5 ans	702.4	214708	3.1	4428	442726	6.3	15435	1029592	14.7	87335

EROSION et RUISSELLEMENT (mensuel et annuel)										
Station de Jadan 1989-1991										
		P. AMELIOREE			P. TEMOIN CULTIVEE			P. TEMOIN NON CULTIVEE		
date	P. mm	l/ha	KR %	Kg/ha	l/ha	Kr%	Kg/ha	l/ha	KR%	Kg/ha
Mar.89	145,3	109500	7,5	12497	129608	8,9	14132	389590	26,8	42349
Abr.89	29,5									
May.89	23,7									
Jun.89	46,7	1365	0,5	94	698	0,3	1656	0	0,0	1221
Jul.89	54,4	601	0,1	11	441	0,1	16	29826	5,5	977
Ago.89	8,0									
Sep.90	26,9									
Oct.90	187,9	19258	1,6	588	131691	10,6	3448	270890	21,8	90820
Nov.90	75,9	3846	0,5	108	16678	2,2	1448	160207	21,1	19009
Dic.90	138,2	48221	3,5	4322	267976	19,4	16800	357612	25,9	39911
Ene.91	44,0	24	0,0	1	1506	0,3	4	7635	1,7	6
Feb.91	140,4	79798	5,7	3048	77500	5,5	28342	309922	22,1	98681
Mar.91	155,5	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Abr.91	44,9	1493	0,3	6	5208	1,2	19	26198	5,8	206
May.91	45,6	383	0,1	1	512	0,1	1	8370	1,8	5
Jun.91	34,6	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0	0
Jul.91	18,9									
Moy.										
89-91	912,8	17633	0,9	3056	42121	4,0	17134	104017	8,5	97726

EROSION et RUISSELLEMENT, (mensuel et annuel)																
Station de Vega Grande, 1989 - 1990																
P. AMELIOREE 1					P. AMELIOREE 2			P. AMELIOREE 3			P. TEMOIN CULTIVEE			P. TEMOIN NON CULTIVEE		
date	P. mm	l/ha	kr %	kg/ha	l/ha	kr %	kg/ha	l/ha	kr %	kg/ha	l/ha	kr %	kg/ha	l/ha	kr %	kg/ha
jan 89	194.2	67288	3.5	17752	6414	0.3	9482	6660	0.3	2837	7914	0.4	26208	187451	9.7	31408
fév 89	81.7	2659	0.3	43	1880	0.2	54	1880	0.2	78	3130	0.4	138	34919	4.3	275
mar 89	204.8	10720	0.5	364	5998	0.3	197	6774	0.3	227	9565	0.5	1564	321516	15.7	47200
avr 89	70.9	6989	1.0	66	2381	0.3	42	1517	0.2	23	1229	0.2	23	110260	15.6	3813
mai 89	4.8	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
jun 89	10.6	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
jul 89	0.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
aoû 89	0.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
sep 89	10.4	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
oct 89	52.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
nov 89	9.1	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
déc 89	0.0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
89	638.5	87657	1.4	18224	16673	0.3	9775	16832	0.3	3165	21837	0.3	27933	654145	10.2	82696
jan 90	43.8	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
fév 90	264.9	132995	5.0	7083	135235	5.1	18805	74038	2.8	8049	141095	5.3	26996	787748	29.7	107161
mar 90	74.2	283	0.0	49	0	0.0	47	0	0.0	25	843	0.1	70	11660	1.6	8532
avr 90	168.0	0	0.0	46	0	0.0	29	0	0.0	57	0	0.0	15	66273	3.9	6817
90	550.9	133278	2.4	7178	135235	2.5	18880	74038	1.3	8131	141938	2.6	27082	865682	15.7	122510
1989	638.5	87657	1.4	18224	16673	0.3	9775	16832	0.3	3165	21837	0.3	27933	654145	10.2	82696
1990	550.9	133278	2.4	7178	135235	2.5	18880	74038	1.3	8131	141938	2.6	27082	865682	15.7	122510
moy. sur																
2 ans	594.7	110467	1.9	12701	75954	1.3	14328	45435	0.8	5648	81888	1.4	27507	759913	12.8	102603

EROSION et RUISSELLEMENT, (mensuel et annuel)													
Station de Ventanas, 1989 - 1991													
P. AMELIOREE 1				P. AMELIOREE 2				P. TEMOIN CULTIVEE			P. TEMOIN NON CULTIVEE		
date	P. mm	l/ha	ruissel.	kg/ha	l/ha	ruissel.	kg/ha	l/ha	ruissel.	kg/ha	l/ha	ruissel.	kg/ha
jan.89	306.45	60232	2.0	959	72444	2.4	921	282280	9.2	5295	21936	0.7	341
Fev.89	635.8	450901	7.1	5674	382889	6.0	4115	1150308	18.1	5918	156571	2.5	2899
Mar.89	562.45	683884	12.2	3204	1135136	20.2	6555	1256785	22.3	3215	702241	12.5	18937
Avr.89	401.1	623014	15.5	1225	521578	13.0	31881	1124292	28.0	2117	828600	20.7	17848
Mai.89	249.4	327539	13.1	1057	374605	15.0	1485	288580	11.6	1966	410072	16.4	12025
Jun.89	26.85	0	0.0	1	0	0.0	0	0	0.0	3	0	0.0	3
Jul.89	4.2	0	0.0	0	0	0.0	0	15024	35.8	17	0	0.0	0
Aoû.89	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Sep.89	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Oct.89	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Nov.89	14.9	0	0.0	2	0	0.0	1	384	0.3	20	0	0.0	14
Dec.89	48.3	0	0.0	1	0	0.0	1	0	0.0	9	0	0.0	7
89	2249.45	2145569	9.5	12121.75	2486651	11.1	44959.57	4117654	18.3	18560.15	2119419	9.4	52074
Jan.90	416.5	4984	0.1	105	2272	0.1	97	59380	1.4	1710	88821	1.7	11891
Fev.90	484.9	30775	0.6	315	62700	1.3	821	556985	11.5	3905	1256238	25.9	37540
Mar.90	360.6	13354	0.4	83	0	0.0	1980	20501	0.6	104	589970	16.4	8425
Avr.90	176.7	41	0.0	14	0	0.0	4	534	0.0	15	134	0.0	45
Mai.90	45.1	255	0.1	9	186	0.0	8	47	0.0	17	651	0.1	960
Jun.90	43.9	0	0.0	1	0	0.0	2	0	0.0	3	0	0.0	5
Jul.90	2	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Dec.90	39.5	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
90	1569.2	49409	0.3	527	65158	0.4	2913	637447	4.1	5755	1915815	12.2	58865
Jan.91	97.3	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0
Fev.91	883.6	951582	11.0	7164	684647	7.7	7725	1125400	12.7	23393	995324	11.3	41512
Mar.91	363.6	91134	2.5	1145	553717	15.2	1369	647291	17.8	3394	1208463	33.2	29366
Avr.91	95.2	0	0.0	0	0	0.0	0	7847	0.8	9	33827	3.6	657
91	1439.7	1042716	7.2	8309	1238364	8.6	9094	1780538	12.4	26796	2237614	15.5	71535
89	2249.45	2145569	9.5	12122	2486651	11.1	44960	4117654	18.3	18560	2119419	9.4	52074
90	1569.2	49409	0.3	527	65158	0.4	2913	637447	4.1	5755	1915815	12.2	58865
91	1439.7	1042716	7.2	8309	1238364	8.6	9094	1780538	12.4	26796	2237614	15.5	71535
moy. sur													
89-91	1752.783	1079232	6.2	6986	1263391	7.2	18989	2178546	12.4	17037	2090949	11.9	60825

ANNEXES 2

***(Intensités de pluie - IM 15 et IM 30 - relevées
sur les stations de Tumbaco, Cangahua,
Mojanda et Riobamba)***

HAUTEUR CLASSEE DES INTENSITES MAXIMALES DE PLUIES (IM15,IM30 en mm/h)

STATION DE TUMBACO

86-87				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	32	29,2	52	18,2
1-5	70	40,4	72	39,8
5-10	40	18,0	32	22,7
10-15	11	3,4	6	6,3
15-20	10	5,1	9	5,7
20-25	3	1,7	3	1,7
25-30	2	0,6	1	1,1
30-35	4	0,0	0	2,3
35-40	1	0,0	0	0,6
40-45	1	0,6	1	0,6
45-50	0	0,6	1	0,0
50-55	0	0,0	0	0,0
55-60	0	0,0	0	0,0
60-65	0	0,0	0	0,0
65-70	0	0,0	0	0,0
70-75	1	0,0	0	0,6
> à 75	1	0,6	1	0,6
max	77,2		46,2	
nb tot.	176		178	

87-88				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	22	31,5	53	13,0
1-5	90	42,9	72	53,3
5-10	22	13,1	22	13,0
10-15	10	4,8	8	5,9
15-20	9	4,8	8	5,3
20-25	5	0,6	1	3,0
25-30	2	0,6	1	1,2
30-35	3	0,0	0	1,8
35-40	1	0,0	0	0,6
40-45	2	1,2	2	1,2
45-50	0	0,0	0	0,0
50-55	1	0,6	1	0,6
55-60	0	0,0	0	0,0
60-65	0	0,0	0	0,0
65-70	0	0,0	0	0,0
70-75	1	0,0	0	0,6
> à 75	1	0,0	0	0,6
max	78,0		53,8	
nb tot.	169		168	

88-89				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	16	29,2	35	13,3
1-5	42	37,5	45	35,0
5-10	26	15,8	19	21,7
10-15	13	10,8	13	10,8
15-20	7	2,5	3	5,8
20-25	6	0,8	1	5,0
25-30	3	0,8	1	2,5
30-35	2	1,7	2	1,7
35-40	0	0,8	1	0,0
40-45	0	0,0		0,0
45-50	0	0,0		0,0
50-55	3	0,0		2,5
55-60	1	0,0		0,8
60-65	0	0,0		0,0
65-70	0	0,0		0,0
70-75	0	0,0		0,0
> à 75	1	0,0		0,8
max	135,2		39,2	
nb tot.	120		120	

89-90				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	15	24,0	31	11,1
1-5	63	44,2	57	46,7
5-10	20	12,4	16	14,8
10-15	9	7,0	9	6,7
15-20	9	4,7	6	6,7
20-25	4	3,1	4	3,0
25-30	3	1,6	2	2,2
30-35	1	0,8	1	0,7
35-40	5	0,8	1	3,7
40-45	3	0,8	1	2,2
45-50	0	0,8	1	0,0
50-55	0	0,0		0,0
55-60	1	0,0		0,7
60-65	1	0,0		0,7
65-70	1	0,0		0,7
70-75		0,0		0,0
> à 75		0,0		0,0
max	66,0		56,2	
nb tot.	135		129	

HAUTEUR CLASSEE DES INTENSITES MAXIMALES DE PLUIES (IM15,IM30 en mm/h)

STATION DE CANGAHUA

Année 86-87				
classe	IM15		IM30	
	événements			
mm/h	Nbre	%	Nbre	%
0-1	12	34,3	12	35,3
1-5	6	17,1	9	26,5
5-10	10	28,6	7	20,6
10-15	2	5,7	4	11,8
15-20	1	2,9	1	2,9
20-25	2	5,7	0	0,0
25-30	1	2,9	0	0,0
30-35	0	0,0	0	0,0
35-40	1	2,9	1	2,9
40-45	0	0,0	0	0,0
max	39,6		36,0	
nb tot.	35		34	

Année 87-88				
classe	IM15		IM30	
	événements			
mm/h	Nbre	%	Nbre	%
0-1	27	19,7	35	28,5
1-5	63	46,0	55	44,7
5-10	22	16,1	24	19,5
10-15	17	12,4	7	5,7
15-20	6	4,4	0	0,0
20-25	0	0,0	1	0,8
25-30	0	0,0	0	0,0
30-35	0	0,0	0	0,0
35-40	2	1,5	1	0,8
40-45	0	0,0	0	0,0
max	39,2		39,2	
nb tot.	137		123	

Année 88-89				
classe	IM15		IM30	
	événements			
mm/h	Nbre	%	Nbre	%
0-1	9	5,7	18	12,2
1-5	102	64,6	94	63,9
5-10	31	19,6	27	18,4
10-15	8	5,1	4	2,7
15-20	6	3,8	2	1,4
20-25	0	0,0	2	1,4
25-30	1	0,6	0	0,0
30-35	1	0,6	0	0,0
35-40	0	0,0	0	0,0
40-45	0	0,0	0	0,0
max	32,8		23,0	
nb tot.	158		147	

Année 89-90				
classe	IM15		IM30	
	événements			
mm/h	Nbre	%	Nbre	%
0-1	2	2,0	5	5,3
1-5	48	47,5	56	58,9
5-10	26	25,7	19	20,0
10-15	10	9,9	9	9,5
15-20	8	7,9	4	4,2
20-25	4	4,0	1	1,1
25-30	0	0,0	1	1,1
30-35	1	1,0	0	0,0
35-40	0	0,0	0	0,0
40-45	2	2,0	0	0,0
max	44,8		27,0	
nb tot.	101		95	

HAUTEUR CLASSEE DES INTENSITES MAXIMALES DE PLUIES (IM15,IM30 en mm/h)

STATION DE MOJANDA

86-87				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	10	12,2	13	16,3
1-5	37	45,1	40	50,0
5-10	15	18,3	17	21,3
10-15	8	9,8	7	8,8
15-20	5	6,1	2	2,5
20-25	4	4,9		
25-30	2	2,4		
30-35				
35-40				
40-45				
45-50				
50-55			1	1,3
55-60				
60-65				
65-70				
70-75				
> à 75	1	1,2		
max	79		54	
nb tot.	82		80	

87-88				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	15	6,9	24	11,7
1-5	100	46,3	112	54,4
5-10	45	20,8	43	20,9
10-15	23	10,6	17	8,3
15-20	14	6,5	3	1,5
20-25	7	3,2	4	1,9
25-30	3	1,4	1	0,5
30-35	3	1,4	2	1,0
35-40	3	1,4		
40-45	1	0,5		
45-50				
50-55				
55-60	1	0,5		
60-65	1	0,5		
65-70				
70-75				
> à 75				
max	60		33	
nb tot.	216		206	

88-89				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	21	7,2	35	13,1
1-5	146	50,3	149	55,8
5-10	57	19,7	52	19,5
10-15	30	10,3	17	6,4
15-20	13	4,5	8	3,0
20-25	11	3,8	3	1,1
25-30	3	1,0	2	0,7
30-35	5	1,7	1	0,4
35-40	1	0,3		
40-45	1	0,3		
45-50				
50-55	1	0,3		
55-60	1	0,3		
60-65				
65-70				
70-75				
> à 75				
max	56		33	
nb tot.	290		267	

89-90				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	23	10,8	30	16,3
1-5	107	50,5	103	56,0
5-10	40	18,9	32	17,4
10-15	22	10,4	11	6,0
15-20	5	2,4	4	2,2
20-25	8	3,8	2	1,1
25-30	2	0,9		
30-35	3	1,4	1	0,5
35-40	1	0,5		
40-45				
45-50			1	0,5
50-55				
55-60				
60-65				
65-70				
70-75				
> à 75	1	0,5		
max	86		49	
nb tot.	212		184	

HAUTEUR CLASSEE DES INTENSITES MAXIMALES DE PLUIES (IM15,IM30 en mm/h)

STATION DE RIOBAMBA

: 86-87				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	30	20,4	34	23,9
1-5	63	42,9	65	45,8
5-10	29	19,7	25	17,6
10-15	8	5,4	8	5,6
15-20	8	5,4	5	3,5
20-25	3	2,0	3	2,1
25-30	4	2,7	1	0,7
30-35	0	0,0	1	0,7
35-40	0	0,0	0	0,0
40-45	1	0,7	0	0,0
45-50	1	0,7	0	0,0
50-55	0	0,0	0	0,0
55-60	0	0,0	0	0,0
60-65	0	0,0	0	0,0
65-70	0	0,0	0	0,0
70-75	0	0,0	0	0,0
> à 75	0	0,0	0	0,0
max	45,6		34,2	
nb tot.	147		142	

87-88				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	16	11,6	20	16,7
1-5	72	52,2	68	56,7
5-10	29	21,0	19	15,8
10-15	8	5,8	5	4,2
15-20	7	5,1	3	2,5
20-25	1	0,7	2	1,7
25-30	3	2,2	2	1,7
30-35	1	0,7	1	0,8
35-40	0	0,0	0	0,0
40-45	0	0,0	0	0,0
45-50	1	0,7	0	0,0
50-55	0	0,0	0	0,0
55-60	0	0,0	0	0,0
60-65	0	0,0	0	0,0
65-70	0	0,0	0	0,0
70-75	0	0,0	0	0,0
> à 75	0	0,0	0	0,0
max	46		31,4	
nb tot.	138		120	

88-89				
classe	IM 15		IM 30	
	événements			
mm/h	Nbre	%	Nbre	%
0-1	34	18,2	34	21,4
1-5	94	50,3	81	50,9
5-10	30	16,0	26	16,4
10-15	14	7,5	8	5,0
15-20	3	1,6	5	3,1
20-25	8	4,3	5	3,1
25-30	2	1,1	0	0,0
30-35	2	1,1	0	0,0
35-40	0	0,0	0	0,0
40-45	0	0,0	0	0,0
45-50	0	0,0	0	0,0
50-55	0	0,0	0	0,0
55-60	0	0,0	0	0,0
60-65	0	0,0	0	0,0
65-70	0	0,0	0	0,0
70-75	0	0,0	0	0,0
> à 75	0	0,0	0	0,0
max	34,0		24,4	
nb tot.	187		159	

89-90				
classe mm/h	IM 15		IM 30	
	événements			
	Nbre	%	Nbre	%
0-1	37	28,7	35	33,0
1-5	63	48,8	52	49,1
5-10	12	9,3	6	5,7
10-15	4	3,1	6	5,7
15-20	8	6,2	5	4,7
20-25	1	0,8	0	0,0
25-30	1	0,8	1	0,9
30-35	1	0,8	0	0,0
35-40	0	0,0	0	0,0
40-45	0	0,0	1	0,9
45-50	2	1,6	0	0,0
50-55	0	0,0	0	0,0
55-60	0	0,0	0	0,0
60-65	0	0,0	0	0,0
65-70	0	0,0	0	0,0
70-75	0	0,0	0	0,0
> à 75	0	0,0	0	0,0
max	46,8		40,8	
nb tot.	129		106	

ANNEXES 3

(Données obtenues sous pluies simulées)

PLUIE D'IMBIBITION (PI) en mm

SITUATIONS CULTURALES	ETAT D'HUMIDITE	INTENSITE mm/h	STATIONS					
			<i>Tumbaco</i>	<i>Mojanda</i>	<i>Riobamba</i>	<i>Jadan</i>	<i>Vega Grande</i>	<i>Ventanas</i>
Premier Labour	Sol sec	30	40	17	11,2	30	#N/A	#N/A
		60	15	8	15	11,7	17,2	#N/A
		90	20	#N/A	#N/A	15,4	30,3	#N/A
	Sol humide	30	40	9	10,9	30	#N/A	#N/A
		60	3,2	4	3,1	10	17,4	#N/A
		90	5,2	1,6	#N/A	9,4	9,9	#N/A
	Sol très humide	30	40	11	3,2	30	#N/A	#N/A
		60	1	1,6	#N/A	1,7	30,4	#N/A
		90	1	#N/A	#N/A	3,9	2,7	#N/A
Ancien Labour	Sol sec	30	24	9	15,1	13,1	15,8	31,1
		60	#N/A	4	12,1	12,9	14,9	30,2
		90	#N/A	#N/A	#N/A	7,2	16,5	20
	Sol humide	30	2,4	1,4	7,8	2,1	15,4	31,1
		60	#N/A	1,7	3,2	2,4	9,6	20,6
		90	#N/A	#N/A	#N/A	1,6	7,7	2,2
	Sol très humide	30	1	3	0,5	0,6	4,1	31,1
		60	#N/A	2	1	0,9	1,3	20,6
		90	#N/A	#N/A	0	0,7	2,1	2,2
Prairie	Sol sec	30	#N/A	2,6	2,2	7,4	15,1	#N/A
		60	#N/A	3,4	1	5,7	14,2	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	6,2	3,5	#N/A
	Sol humide	30	#N/A	4,1	4,3	4,3	14,9	#N/A
		60	#N/A	1,2	3,7	3,4	8,5	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	1,4	2,9	#N/A
	Sol très humide	30	#N/A	1,4	#N/A	0,8	20,1	#N/A
		60	#N/A	13,2	#N/A	1,7	3,9	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	0,9	2,8	#N/A
Sol nu	Sol sec	30	19	11	7,7	12,5	14,9	29,9
		60	13,2	6	4,5	12,4	12,7	30,2
		90	#N/A	#N/A	#N/A	12,8	14,8	16,1
	Sol humide	30	2,6	1,9	6,6	2,6	4,8	20
		60	2,5	1	3	2,3	2,2	4,5
		90	3	#N/A	#N/A	1,4	2,6	4,7
	Sol très humide	30	1,8	2,5	0,4	0,2	0,9	2,2
		60	2,2	1,3	0,5	0,5	0,8	1,2
		90	2	#N/A	#N/A	0,7	0,6	1,6

#N/A = pas de donnée

INTENSITE MAXIMALE DE RUISSELLEMENT (Rmax) en mm/h

SITUATIONS CULTURALES	ETAT D'HUMIDITE	INTENSITE mm/h	STATIONS					
			Tumbaco	Mojanda	Riobamba	Jadan	Vega Grande	Ventanas
Premier Labour	Sol sec	30	0	0	0	0	0	#N/A
		60	0	0	0	0	0	#N/A
		90	0	#N/A	#N/A	0	0	#N/A
	Sol humide	30	0	0	1,6	0	#N/A	#N/A
		60	19	2	10,7	0	0	#N/A
		90	15	6	#N/A	0,1	1,5	#N/A
	Sol très humide	30	0	0	3,3	0	#N/A	#N/A
		60	35	1	11,7	7	0	#N/A
		90	41	#N/A	#N/A	13	6,4	#N/A
Ancien Labour	Sol sec	30	0	1	0	0,9	0	0
		60	#N/A	9	0,5	1,2	0	0
		90	#N/A	#N/A	#N/A	2,8	0	0
	Sol humide	30	6	10	5,3	5	0	0
		60	#N/A	35	12,9	12,6	3,5	0,8
		90	#N/A	#N/A	#N/A	18	6,3	1,9
	Sol très humide	30	5	5	21,2	8,9	6	0
		60	#N/A	23	13	22,2	8,9	2,4
		90	#N/A	#N/A	31,7	31,9	17	3,2
Prairie	Sol sec	30	#N/A	11	21,9	1,5	0	#N/A
		60	#N/A	#N/A	50,4	5	0	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	24,6	1,5	#N/A
	Sol humide	30	#N/A	13	20,5	5,9	0	#N/A
		60	#N/A	33	49,9	27	1,1	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	51,2	13,6	#N/A
	Sol très humide	30	#N/A	23	#N/A	14,1	0	#N/A
		60	#N/A	41	#N/A	32,8	9,9	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	68,1	18,9	#N/A
Sol nu	Sol sec	30	4	0	1,7	2	0	0
		60	19	9	15,4	0,1	3	0
		90	#N/A	#N/A	#N/A	0,1	0	2,3
	Sol humide	30	7,7	12,2	7,8	13,5	10,1	0,1
		60	38,4	42,5	39,3	27,6	32,5	8,1
		90	#N/A	#N/A	#N/A	36,1	40,6	17,5
	Sol très humide	30	9	17	14,8	19,7	19,3	2,8
		60	37	26	42,1	47,1	41,3	15
		90	#N/A	#N/A	#N/A	54,1	58	22,7

#N/A = pas de donnée

INTENSITE MINIMALE D'INFILTRATION (Fn) en mm/h

SITUATIONS CULTURALES	ETAT D'HUMIDITE	INTENSITE mm/h	STATIONS					
			<i>Tumbaco</i>	<i>Mojanda</i>	<i>Riobamba</i>	<i>Jadan</i>	<i>Vega Grande</i>	<i>Ventanas</i>
Premier Labour	Sol sec	30	30	32	30,6	30,7	#N/A	#N/A
		60	60	59	59,9	60	59	#N/A
		90	90	#N/A	#N/A	92	91,7	#N/A
	Sol humide	30	30	29	30,1	30,3	#N/A	#N/A
		60	42	57,3	48,2	59,7	59,9	#N/A
		90	75	83	#N/A	93,3	91,4	#N/A
	Sol très humide	30	30	30	26,9	28,2	#N/A	#N/A
		60	25	58,3	#N/A	56,2	60,8	#N/A
		90	49	#N/A	#N/A	78,5	88,1	#N/A
Ancien Labour	Sol sec	30	24	28	29,8	28,3	31,5	31,1
		60	#N/A	50	59,6	59	59,7	60,4
		90	#N/A	#N/A	#N/A	85,3	91,5	90,4
	Sol humide	30	20	19	26,6	30	30,8	31,1
		60	#N/A	24	47,2	47,9	55,6	60
		90	#N/A	#N/A	#N/A	71,2	83,9	88
	Sol très humide	30	20	15	15,3	26,2	24,7	31,1
		60	#N/A	31,3	32,5	38,3	52,4	58,2
		90	#N/A	#N/A	53,8	57,4	73,3	86,8
Prairie	Sol sec	30	#N/A	20	8,7	27,5	30,2	#N/A
		60	#N/A	#N/A	10,1	55,5	56,7	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	63,8	86,1	#N/A
	Sol humide	30	#N/A	16	8,1	24,5	30,7	#N/A
		60	#N/A	29	10,9	34,2	58,6	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	40,1	74,4	#N/A
	Sol très humide	30	#N/A	6	#N/A	18,5	29,8	#N/A
		60	#N/A	21	#N/A	27,9	51	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	45,4	69,2	#N/A
Sol nu	Sol sec	30	19	16	27,9	28	29,8	29,9
		60	41	28	46,9	59	51	60,4
		90	#N/A	#N/A	#N/A	89	69,2	87,2
	Sol humide	30	17	15	23,3	17	20,1	29,3
		60	20	19	20,8	32,8	27,1	52,4
		90	#N/A	#N/A	#N/A	56,7	36,9	73,2
	Sol très humide	30	12	21	14,4	10,8	11,3	26,5
		60	24	33	14,2	12,8	18,3	45,6
		90	#N/A	#N/A	#N/A	35,8	26,9	56,1

#N/A = pas de donnée

CHARGES en Kg/ha

SITUATIONS CULTURALES	ETAT D'HUMIDITE	INTENSITE mm/h	STATIONS					
			<i>Tumbaco</i>	<i>Mojanda</i>	<i>Riobamba</i>	<i>Jadan</i>	<i>Vega Grande</i>	<i>Ventanas</i>
Premier Labour	Sol sec	30	0	0	#N/A	0	#N/A	#N/A
		60	0	0	0	0	0	#N/A
		90	0	#N/A	0	0	0	#N/A
	Sol humide	30	0	0	3	0	#N/A	#N/A
		60	48	0	318	0	0	#N/A
		90	4	#N/A	#N/A	0	3	#N/A
	Sol très humide	30	0	0	#N/A	0	#N/A	#N/A
		60	261	5	752	20,5	0	#N/A
		90	124	117	#N/A	7	331,9	#N/A
Ancien Labour	Sol sec	30	0	0	0	1	0	0
		60	#N/A	72	34	0,5	0	0
		90	#N/A	#N/A	#N/A	109	0	0
	Sol humide	30	76	302	34,3	12,5	0	0
		60	#N/A	1773	1027	150	7	31
		90	#N/A	#N/A	#N/A	234,5	9,8	57
	Sol très humide	30	91	192	462	512,5	359	0
		60	#N/A	1004	1758	353	325,5	119,5
		90	#N/A	#N/A	3702	860	457	151,5
Prairie	Sol sec	30	#N/A	0	19	0	0	#N/A
		60	#N/A	0	26	0	0	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	4,5	1,5	#N/A
	Sol humide	30	#N/A	5	6	0	0	#N/A
		60	#N/A	8	6,5	14	0	#N/A
		90	#N/A	#N/A	#N/A	5	0	#N/A
	Sol très humide	30	#N/A	1	8	1	5	#N/A
		60	#N/A	21	34	0	5	#N/A
		90	0	#N/A	#N/A	11	29	#N/A
Sol nu	Sol sec	30	85	0	10	3,5	0	0
		60	386	318	1504	0	3	0
		90	#N/A	#N/A	#N/A	0	0	51
	Sol humide	30	42	152	690	45,5	142	0
		60	382	1379	6485	334	446,5	6
		90	3	#N/A	#N/A	579,5	1901	336
	Sol très humide	30	52	375	1006	449,5	462	6,5
		60	1250	2246	8918	938,5	951	103,5
		90	#N/A	#N/A	#N/A	1451	2919,5	715

#N/A = pas de donnée

Humidité des parcelles avant les pluies simulées (0 à - 2 cm)

Station		Tumbaco		Mojanda		Riobamba		Vega Grande		Ventanas		Jadan	
		H %	n p	H %	n p	H %	n p	H %	n p	H %	n p	H %	n p
Ancien labour	sec	3.3	3	14.9	6	3.6	11	19.4	8	24.7	11	5.4	8
	1 heure	31.9		31.2		21.9		29		44.2		16.8	
	24 heures	32.8		31.5		17.6		27.5		40.2		12.9	
Sol nu	sec	6.7	4	8.7	6	2	10	11.9	11	17	12	6.4	8
	1 heure	26.3		26.4		19.7		29.8		45.7		18	
	24 heures	21.9		29.7		19.1		24.2		36.9		13.5	

n. p. = nombre de parcelles

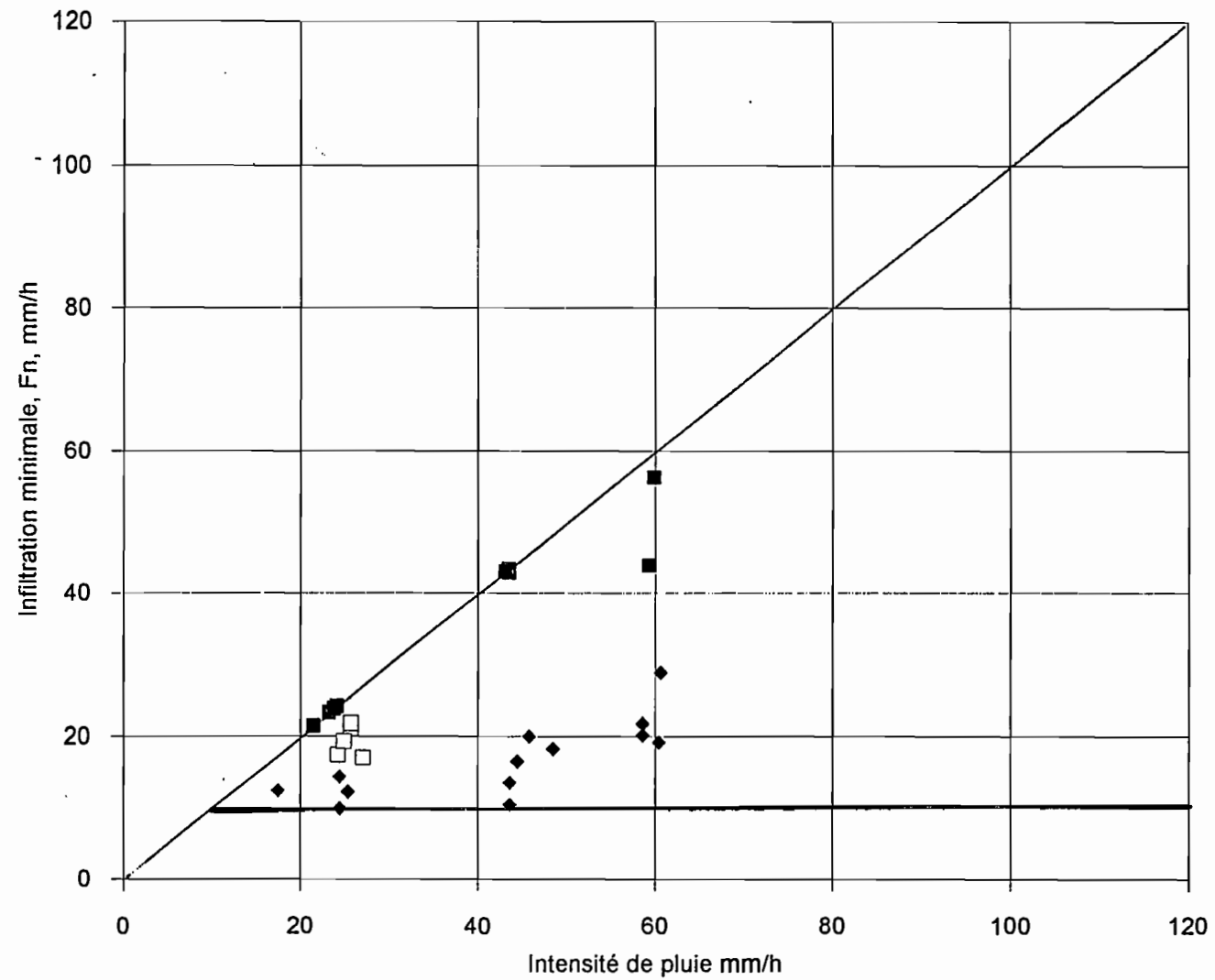
Profondeur prise en considération dans ce tableau : 0 à - 2 cm

Humidité des parcelles avant les pluies simulées (-5 à -10 cm)

Station		Tumbaco		Mojanda		Riobamba		Vega Grande		Ventanas		Jadan	
		H %	n p	H %	n p	H %	n p	H %	n p	H %	n p	H %	n p
Premier labour	sec			19.4	4	11.3	5	19.5	7			9.3	7
	1 heure			26.9		15.7		24.4				17.1	
	24 heures			39.3		27.5		28.1				17.8	
Ancien labour	sec			19.1	6	7.1	11	17.8	8	26.8	11	7.6	8
	1 heure			26.4		8.8		28.3		38.6		16.9	
	24 heures			28.8		17.1		28		42.5		16.5	
Prairie	sec			23	4	13.7	6	16.8	8			13.1	8
	1 heure			27		15.3		30.1				19	
	24 heures			35.5		19.2		27.3				18.8	
Sol nu	sec	22.9	4	21.2	6	10.3	10	23	11	29.7	13	10.2	8
	1 heure	29.9		23.4		10.9		27.6		42.4		17.5	
	24 heures	27.7		31.9		16.5		26		36.8		16.9	
Sol nu, ou Cangahua nue	sec	15.8	2									9.7	2
	1 heure	17.4										15.7	
	24 heures	19.8										12.2	
Cangahua défoncée	sec	15.6	5										
	1 heure	24.6	5										
	24 heures	25.2	7										
Moyenne toutes situations	sec	18.1	9	20.7	20	10.6	30	19.3	34	28.3	24	10	31
	1 heure	23.9	9	25.9		12.7		27.6		40.5		17.2	
	24 heures	24.2	11	33.9		20.1		27.4		39.7		16.4	

Profondeur prise en considération dans ce tableau : - 5 à - 10 cm

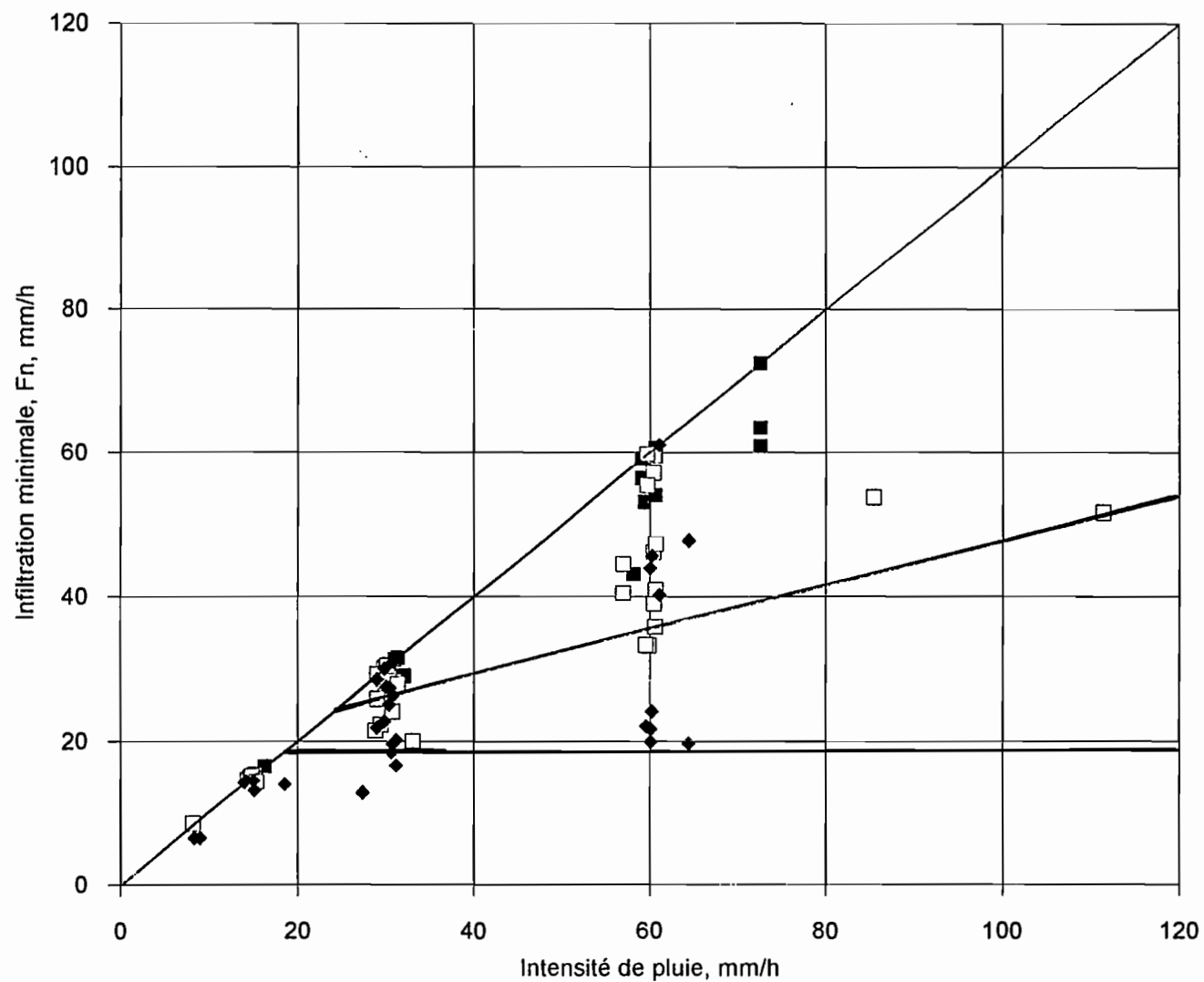
Fn, Infiltration minimale en fonction de l'intensité de pluie



TUMBACO

- Prem. labour
- Ancien labour
- ◆ Sol nu

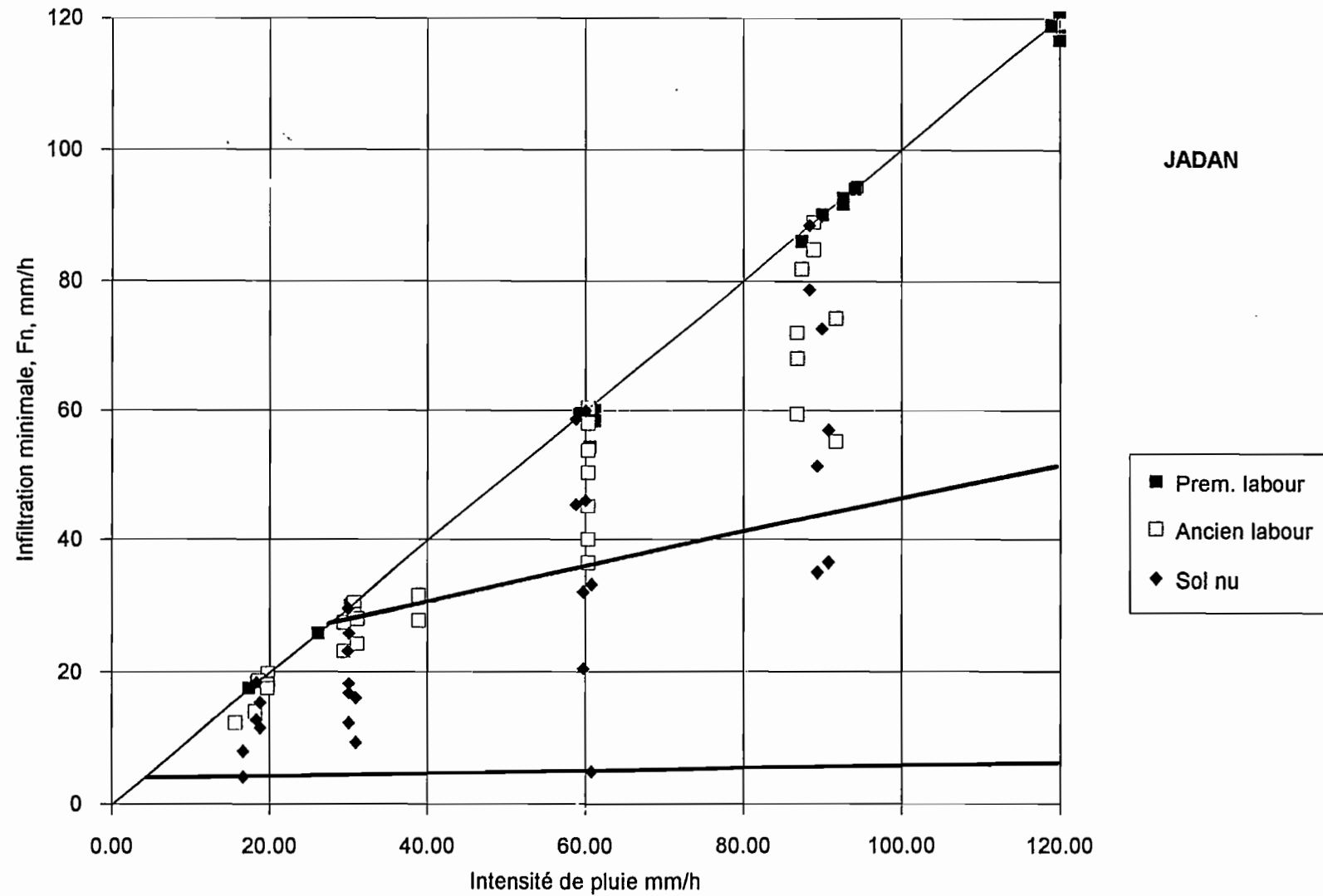
F_n, Infiltration minimale en fonction de l'intensité de pluie

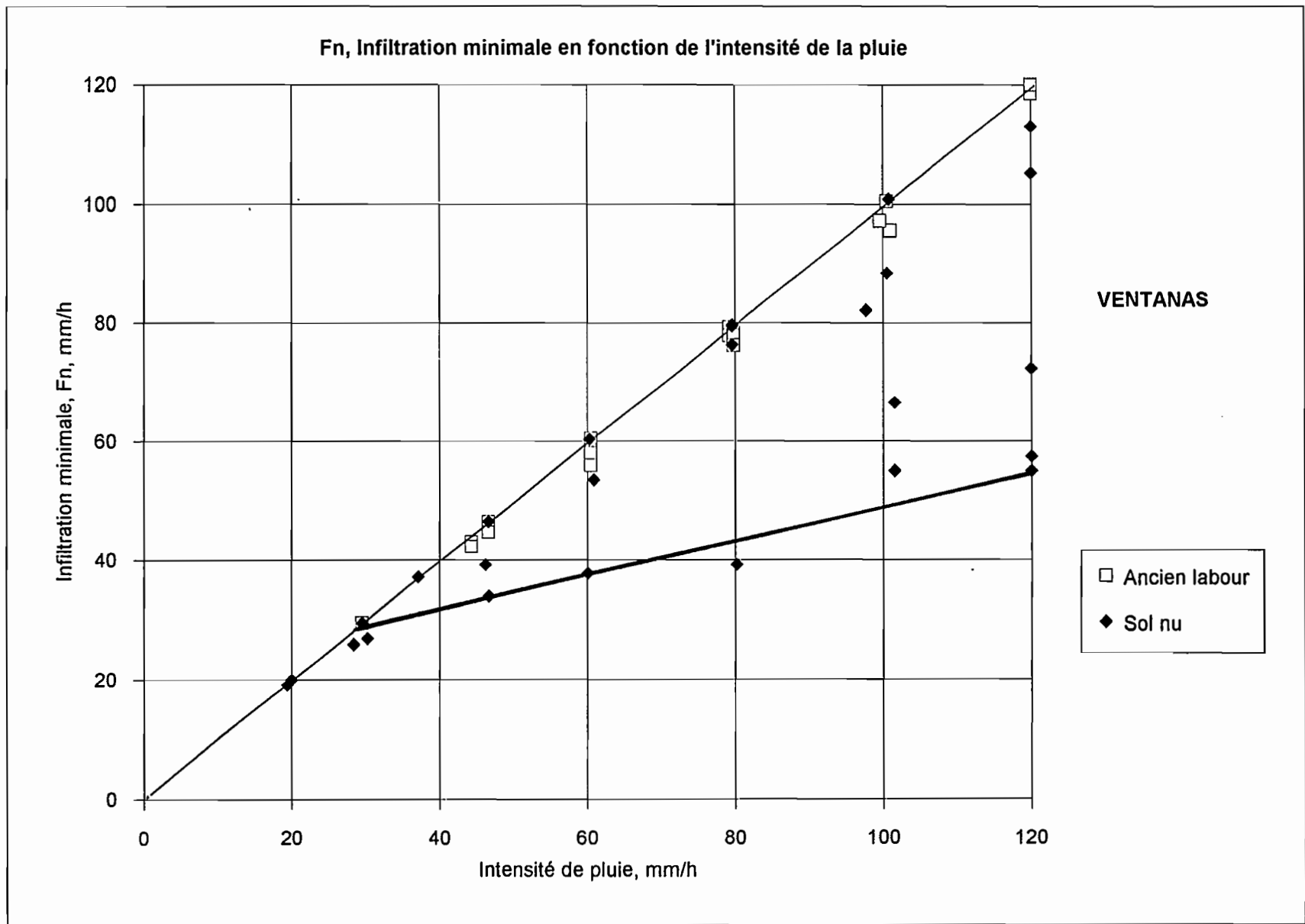


RIOBAMBA

- Prem. labour
- Ancien labour
- ◆ Sol nu

F_n, Infiltration minimale en fonction de l'intensité de pluie





Transfert d'eau et de matière solide sous pluie constante, sur cangahua indurée

Station de TUMBACO , CANGAHUA NUE INDUREE

