

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE MONTPELLIER II

— SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC —

THESE

présentée à l'Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

SPECIALITE : Science du Sol

Formation Doctorale : Bases de la Production Végétale

Ecole Doctorale : BSIAE

**Hydro-pédologie d'un versant représentatif d'un paysage sur socle
granito-gneissique d'Afrique de l'Ouest (Togo).**

Relations avec le comportement d'une plante cultivée.

par

Didier BLAVET

Soutenue le décembre 1996 devant le Jury composé de :

MM. A. HERBILLON	Professeur	NANCY I	Rapporteur
P. BRABANT	Directeur de Recherches	ORSTOM	Rapporteur
R. POSS	Directeur de Recherches	ORSTOM	Rapporteur
.....	Examineur
.....	Examineur
.....	Examineur
J.C. REMY	Professeur	ENSAM	Directeur de Thèse

A Cathy, Acelle et Laurène.



"To err is human, but to really foul things up requires a computer." (Loi de Murphy).

AVANT PROPOS

Ce mémoire résulte d'un travail de quelques années, entrepris sur le terrain, au Togo, puis achevé au centre Orstom de Montpellier. Avant d'en présenter les résultats et les conclusions, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué, de diverses façons, à sa réalisation. Que les personnes que j'ai involontairement oubliées veuillent bien m'excuser, car elles sont fort nombreuses.

Tout d'abord, pour remonter brièvement aux sources, je dois dire que mon intérêt pour la pédologie me fut communiqué, il y a une quinzaine d'années, par des cours de maîtrise dispensés à l'Université de Rennes par monsieur le professeur Alain RUELLAN. Ces cours étaient excellemment illustrés et d'une grande clarté. J'ai retrouvé durant les années suivantes cette qualité de cours auprès d'enseignants comme monsieur le professeur Claude CHEVERRY, puis monsieur le professeur Gérard BOCQUIER, et encore monsieur le professeur Georges PEDRO. Ces enseignants, et bien d'autres, m'ont appris à découvrir la pédologie. Je garde également un excellent souvenir de la formation d'élève-chercheur dispensée à l'Orstom de Bondy par des enseignants qui devinrent par la suite mes collègues. Je dois notamment à François Xavier HUMBEL et à Gérard BELLIER, de m'avoir appris à « lire le paysage » sur le terrain.

Les années suivantes furent passées en Nouvelle Calédonie, où je découvris la cartographie des sols en rejoignant une sympathique équipe constituée d'Alain BEAUDOU, Emmanuel BOURDON, Bernard DENIS, Michel FROMAGET, Hervé LE MARTRET et Pascal PODWOJEWSKI. J'en ai gardé le goût pour l'inventaire détaillé des ressources naturelles et pour l'étude des toposéquences.

Puis ce fut le Togo, où je fus reçu au centre Orstom de Lomé par son directeur Jean Louis LIERDEMANN, ainsi que par Alain CASENAVE et François LENOIR. Leur accueil chaleureux m'a tout de suite placé dans d'excellentes conditions de travail.

Au laboratoire de pédologie du Centre Orstom de Lomé, je fus accueilli par Roland POSS. Roland fut à l'origine de ce travail. Avec une disponibilité remarquable, il me fit d'abord découvrir la pédologie du Togo, puis m'apprit beaucoup de choses sur la dynamique de l'eau. Il me mit également en relation avec les spécialistes du cotonnier au CIRAD. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance et toute mon amitié.

Par suite, Pierre BRABANT, qui était mon directeur scientifique à l'Orstom, est venu travailler au Togo. En tant que « patron » (comme on dit très amicalement en Afrique), il a su me montrer l'exemple en matière d'étude détaillée des sols et de caractérisation des horizons pédologiques. Je lui dois le fil directeur avec lequel j'ai essayé de tisser ce mémoire. Son étude détaillée d'un secteur représentatif au Cameroun m'a servi de livre de chevet.

Monsieur le professeur Emmanuel SERVAT, a bien voulu nous consacrer une grande tournée de terrain au Togo, et m'a encouragé à passer une thèse. Je le remercie pour ses nombreux conseils en matière de pédologie, ainsi que pour l'enthousiasme qu'il a su m'insuffler.

Roland MOREAU, qui était à l'époque responsable de l'unité de recherche à laquelle j'appartiens, a fortement contribué au soutien financier du programme de terrain. Qu'il en soit grandement remercié.

Pour la partie technique, mes premières pensées iront à monsieur Albert FORGET, ingénieur pédologue de l'Orstom à présent retraité, avec qui nous avons partagé bien des journées et bien des soirées sur le terrain, quand nous n'étions pas occupés à bricoler sur le centre un appareil de mesure, ou bien à rechercher la pièce indispensable (et forcément introuvable). Ce travail est aussi en grande partie le sien. Qu'il me pardonne de n'avoir exploité, dans ce mémoire, qu'une partie de ce que nous avons réalisé ensemble.

Roger MAWUSSI, ingénieur agronome devenu depuis assistant à l'Université de Lomé, apporta également une assistance technique décisive et précieuse pour ce travail. Roger a organisé, entre autres, une campagne de près de 600 forages de 3 mètres à la tarière à percussion, alors que la situation en brousse était très tendue. Que lui aussi me pardonne de ne pas avoir exploité dans ce mémoire tout ce que nous avons réalisé ensemble.

Ezoun MATHE, pédologue de l'Institut National des sols du Togo, a été mon compagnon de terrain. Il m'a beaucoup aidé à caractériser la pédoséquence. Sans sa grande méticulosité, les coupes pédologiques n'auraient pas la précision qu'elles ont.

Alain AUDEBERT, agro-physiologiste, a été mon coéquipier permanent du CIRAD. Sans ses compétences et son travail, l'étude agronomique n'aurait pu être réalisée. Qu'il trouve ici la marque de mon amitié.

Je tiens aussi à mentionner l'aide efficace de Kodjo Mawussi AFANOU, qui nous a permis, dans le cadre de son mémoire d'ingénieur, de caractériser la pédologie régionale..

Je suis également très reconnaissant à Catherine PLEUVRET, spécialiste des états de surface, qui nous a aidé pour la cartographie détaillée des parcelles agronomiques

Je ne puis oublier Koffi ABALAO et Kouami EDIABOUEFA, observateurs à la station agronomique de Dalanda, qui ont effectué, entre autres, des milliers de relevés piézométriques. Leur long travail minutieux a été indispensable à la réalisation de ce mémoire.

Il me faut aussi saluer le travail de toute l'équipe de fossoyeurs et de puisatiers de la station de Dalanda. Ils n'ont jamais ménagé leurs efforts pour percer la cuirasse à la pioche et sous un soleil harassant, afin de réaliser de vraies fosses pédologiques.

J'exprimerai aussi ma gratitude à Koffi DEFOLO, chauffeur au centre Orstom de Lomé, qui m'a souvent accompagné lors des tournées de terrain. Koffi a bien souvent apporté une aide technique dépassant ses fonctions de chauffeur.

En matière d'analyse de laboratoire, je dois de nombreuses déterminations physico-chimiques à l'équipe du laboratoire d'analyses du centre Orstom de Lomé, alors dirigée par Michel MARLY. Je dois également à Joël FARDOUX, du Laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés de l'Orstom-Montpellier, des mesures de porosité. Merci également à Madame MILLOT, du laboratoire de pétrologie minéralogie de l'Orstom-Bondy, pour avoir effectué certaines déterminations minéralogiques.

Gérard STROPPIANA, professeur de mathématiques au lycée français de Lomé, m'a initié, entre deux couvre-feux, à la programmation informatique. Sans cette initiation, je n'aurais pas pu constituer de base de données pédologiques.

Au centre Orstom de Montpellier, j'ai été chaleureusement accueilli par tous les membres du Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés (Marie-José, Anne Lise, Christine, Marc, Mathurin, Georges-Henri, Marcel, Jean, Georges, Bernard ...). Qu'ils trouvent ici la marque de mon amitié et de ma gratitude pour cet accueil.

Monique SIMIER et Francis LALOE, de la cellule de biostatistique du centre Orstom de Montpellier, m'ont fourni les méthodes nécessaires au traitement statistique des données

Christian DEPRAETERE m'a initié aux modèles numériques de terrain. Je lui en suis reconnaissant.

Christine DIEULIN, du laboratoire d'hydrologie du centre Orstom de Montpellier, m'a fourni tous les outils informatiques nécessaires à la conception des divers dessins et graphiques. Je lui exprime ma gratitude.

Hervé LE MARTRET et Pierre MALARD, de l'atelier d'informatique du centre Orstom de Montpellier, m'ont permis, grâce à leur compétence et leur entrain, de rester « branché » en toutes circonstances.

Merci aussi aux sympathiques bibliothécaires du Centre Orstom de Montpellier, qui ne m'ont pas trop tenu rigueur d'avoir gardé un peu plus longtemps qu'il n'aurait fallu certains ouvrages de chevet.

Pour la rédaction proprement dite du mémoire, je dois d'abord rendre hommage à Monsieur le professeur Jean Claude REMY, qui a accepté d'assumer la lourde responsabilité de diriger ce travail. Je lui suis reconnaissant de m'avoir fait comprendre la nécessité du "fil directeur", et je le remercie de m'avoir laissé tout le temps nécessaire pour tisser quelque chose à partir de ce fil. Pour effectuer le tri au sein de la masse de données recueillies sur le terrain, il a su me faire comprendre un principe, que j'ai retrouvé par la suite chez Henri POINCARÉ "On fait de la science avec des faits, comme on fait une maison avec des pierres, mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison". Sans la pertinence de son jugement, ce mémoire aurait été beaucoup plus décousu.

En cours de rédaction, j'ai pu bénéficier de nombreux conseils de la part de Christian FELLER, Roland MOREAU, Jean François VIZIER et Alain ALBRECHT, du Centre Orstom de Montpellier. Je ne saurais que trop les en remercier.

Je n'oublierai pas Marc VIENNOT, mon colocataire de bureau, pour tous les petits encouragements et conseils pratiques prodigués durant la rédaction (et mille pardons pour avoir laissé des volutes de fumée assombrir l'atmosphère du bureau). Merci également à Pierre LEVI, un autre « ancien togolais » qui a souvent su trouver les bons mots, autour d'un petit café, pour m'encourager dans cette rédaction.

Enfin, dans la mesure où 99,9 % de ce mémoire a été réalisé sur ordinateur, je remercierai (une fois n'est pas coutume) les concepteurs d'une machine et de logiciels à qui j'ai beaucoup demandé. Cet outil ne m'a pas abandonné en cours de route, malgré les petits tracas quotidiens (et parfois les plus gros) qu'il a pu me poser.

(Nb : Il me reste à remercier ici nominativement les rapporteurs et les membres du jury, si ce mémoire est accepté pour soutenance de thèse. Mais je ne connais pas encore la composition du jury).

Pour finir, je dédie ce mémoire à Cathy, Axelle et Laurène, qui ont tout supporté dans les coulisses.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE : LE PAYSAGE DE RÉFÉRENCE	
ET LE VERSANT REPRÉSENTATIF	5
CHAPITRE 1. LE PAYSAGE DE RÉFÉRENCE : DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES	9
1.1. <i>L'extension géographique du paysage</i>	9
1.2. <i>Les composantes du paysage : état des connaissances</i>	12
1.3. <i>Conclusion du chapitre 1</i>	26
CHAPITRE 2. CHOIX D'UN VERSANT REPRÉSENTATIF DU PAYSAGE.....	27
2.1. <i>Choix et caractéristiques de la région</i>	28
2.2. <i>Choix du versant</i>	35
2.3. <i>Conclusion du chapitre 2</i>	36
CHAPITRE 3. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU VERSANT REPRÉSENTATIF	37
3.1. <i>La climatologie du versant</i>	37
3.2. <i>La géologie du versant</i>	47
3.3. <i>La topographie du versant</i>	49
3.4 <i>La morpho-pédologie du versant</i>	54
3.5. <i>L'occupation du sol du versant</i>	57
3.6. <i>Conclusion du chapitre 3</i>	60
CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE	63
DEUXIÈME PARTIE : L'HYDROPÉDOSÉQUENCE	
SUR LE VERSANT REPRÉSENTATIF	65
CHAPITRE 4. LA PÉDOSÉQUENCE	69
4.1. <i>Les méthodes d'étude</i>	69
4.2. <i>L'organisation pédologique du versant</i>	86
4.3. <i>Les séquences de caractères analytiques</i>	132
4.4 <i>Conclusion du chapitre 4</i>	141

CHAPITRE 5. L'HYDROSÉQUENCE	145
5.1 Le dispositif.....	145
5.2 Résultats et interprétations.....	150
5.3 Conclusion du chapitre 5	166
CHAPITRE 6. RELATIONS ENTRE PÉDOSEQUENCE ET HYDROSÉQUENCE	169
6.1. Relations statistiques entre la fréquence annuelle d'engorgement et le type d'horizon pédologique	170
6.2. Relations statistiques entre la fréquence annuelle d'engorgement et les variables pédologiques quantitatives.....	176
6.3. Conclusion du chapitre 6	183
CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE	185
TROISIÈME PARTIE : RELATIONS ENTRE L'HYDROPÉDOSÉQUENCE ET LE COMPORTEMENT D'UNE PLANTE CULTIVÉE.....	187
CHAPITRE 7. RELATIONS ENTRE L'HYDROPÉDOSÉQUENCE ET LE COMPORTEMENT DU COTONNIER.....	191
7.1. Matériel et méthodes.....	192
7.2. Résultats et interprétations.....	202
7.3. Conclusion du chapitre 7	231
CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE.....	233
CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	235
1. L'inventaire des ressources naturelles en terre et en eau.....	237
2. L'évaluation de l'aptitude agricole des ressources	242
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	245
ANNEXES	255
TABLE DES MATIÈRES ET LISTE DES ILLUSTRATIONS	293

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'aménagement et la mise en valeur agricole constituent un objectif majeur dans le cadre du développement des régions de l'Afrique tropicale de l'ouest. Mais cet objectif ne peut être atteint sans une bonne connaissance des paramètres du milieu, et particulièrement des ressources en terre et en eau. En effet, il faut avoir préalablement répondu aux deux questions suivantes :

- quelles sont et comment se répartissent les ressources en terre et en eau dans cette région?
- quelle est l'aptitude agricole de ces ressources ?

Pour répondre à ces questions, il faut mener une série de travaux de recherche à différents niveaux, ainsi que le précise BRABANT (1991) :

- **à un premier niveau**, il s'agit d'identifier et de localiser les ressources par grandes unités naturelles : les paysages. Ce niveau exploratoire correspond à des études à très petite échelle ($> 1/1000.000$).

- **à un second niveau**, il s'agit d'étudier de manière détaillée des sites représentatifs de ces paysages. Ces sites représentatifs n'occupent généralement que de faibles superficies (versant, interfluve ou petit bassin versant) car les paysages tropicaux s'organisent souvent sous la forme d'un motif répétitif et ordonné. Ces sites peuvent donc s'étudier à très grande échelle ($1/500$ à $1/1000$). A cette échelle, on peut caractériser finement les ressources en terre et en eau, et effectuer une évaluation précise de leur aptitude agricole. Pour certaines plantes cultivées dont on connaît mal les contraintes, on peut procéder à ce niveau à des essais agronomiques. Enfin, les résultats obtenus à ce niveau permettent de préciser la manière de cartographier les ressources en terre et en eau sur des superficies plus vastes.

- **aux niveaux suivants**, il s'agit de transposer à des échelles plus petites (échelle du $1/200\ 000$ au $1/10\ 000$) les résultats obtenus au niveau des sites représentatifs.

Suivant cette démarche générale, les études de niveau exploratoire ont été achevées au cours des dernières décennies, pour l'ensemble de l'Afrique de l'ouest. En revanche, l'inventaire des ressources aux niveaux suivants reste en grande partie à faire. C'est pourquoi **cette étude se situe au second niveau de cette démarche (cf. figure 1)**. Il s'agit, en effet, d'étudier un versant représentatif d'un paysage identifié lors d'études exploratoires, et qui couvre de vastes superficies susceptibles d'être destinées à une mise en valeur agricole.

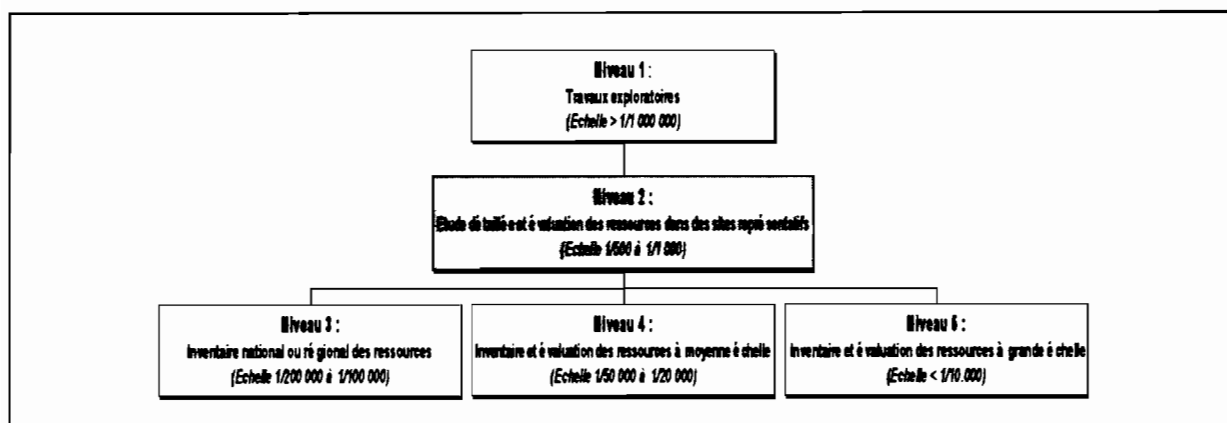


Figure 1. Position de cette étude au second niveau d'une approche générale d'inventaire et d'évaluation des ressources naturelles en terre et en eau. D'après P. BRABANT, 1991.

Les éléments de cette étude seront présentés selon le plan suivant :

En **première partie**, nous décrivons le paysage de référence à partir de données bibliographiques, puis nous effectuerons le choix d'un versant représentatif de ce paysage et fournirons les caractéristiques générales de ce versant.

En **deuxième partie**, nous étudierons l'hydropédoséquence de ce versant représentatif, c'est à dire ses composantes pédologique et hydrologique.

En **troisième partie**, nous aborderons l'évaluation de l'aptitude agricole de ce versant, en étudiant les relations entre l'hydropédoséquence et le comportement d'une plante cultivée dont on connaît mal les contraintes : le cotonnier.

Il sera alors possible, en **conclusion**, de présenter les enseignements de l'étude effectuée à l'échelle du versant représentatif, puis d'évoquer certaines perspectives pour la transposition de ces résultats à des échelles plus petites.

PREMIÈRE PARTIE :

LE PAYSAGE DE RÉFÉRENCE ET LE VERSANT REPRÉSENTATIF

Cette partie est destinée à présenter le paysage de référence, puis le site représentatif choisi.

Dans un premier chapitre, l'examen de données bibliographiques nous permettra de faire **le point sur les connaissances qui concernent ce paysage.**

Ceci nous amènera, dans un second chapitre, à **choisir un versant représentatif au Togo.**

Les caractéristiques générales de ce versant seront présentées dans un troisième chapitre.

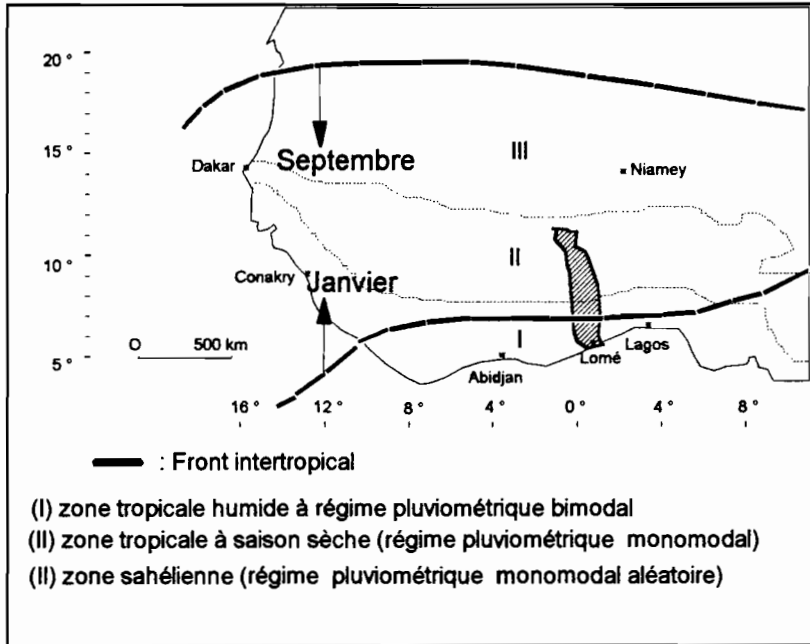
CHAPITRE 1. LE PAYSAGE DE RÉFÉRENCE : DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

Le paysage de référence ne possède pas de nom générique. Il peut toutefois être défini par ses composantes : un climat tropical à saison sèche contrastée, une végétation de savane, un modelé constitué d'une succession de versants, un substratum granito-gneissique, et enfin, une organisation pédologique à sols ferrallitiques et sols ferrugineux.

A partir de cette définition, certaines données bibliographiques vont nous permettre, dans les paragraphes suivants, de préciser l'extension géographique de ce paysage, puis de faire l'état des connaissances sur ses composantes.

1.1. L'extension géographique du paysage

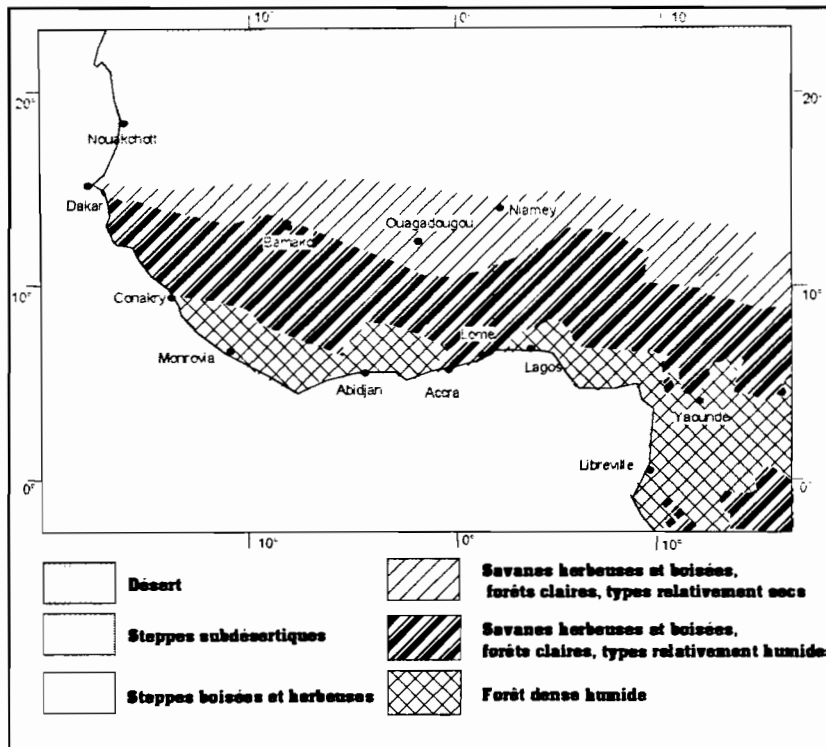
L'extension géographique du paysage de référence peut être précisée à l'aide de documents cartographiques disponibles à l'échelle de l'Afrique de l'ouest (O.U.A., 1971; BOULET et al., 1971; VALENTIN et al., 1990; MOREAU, 1993; LEPRUN, 1979). En effet, ce paysage correspond à l'intersection entre la zone tropicale à saison sèche (cf. figure I-1), la zone de savane (cf. figure I-2), la zone de coexistence des sols ferrallitiques et des sols ferrugineux (cf. figure I-3), et le socle granito-gneissique (cf. figure I-4). Il en résulte que ce paysage s'étend sur plus de 500.000 km² (cf. figure I-5), en englobant une partie de la Guinée, de la Côte d'Ivoire, du Ghana, du Togo, du Bénin, du Nigeria et du Cameroun, ainsi que les parties méridionales du Mali et du Burkina Faso.



Commentaire de la figure I-1

La zone tropicale à saison sèche est comprise entre 8° et 15° de latitude Nord. Elle est caractérisée par un régime pluviométrique monomodal centré sur le mois d'août. La saison des pluies estivale dure environ 5 mois. Par rapport à la zone méridionale, ce resserrement dans l'année de la saison des pluies pourrait s'expliquer assez logiquement par le fait que le déplacement de l'équateur météorologique conduit à une arrivée plus tardive et un départ plus précoce de la "zone d'activité pluviogénique" (WAUTHY, 1983). Dans cette zone, les pluviosités mensuelles peuvent dépasser 200 mm au coeur de la saison des pluies. L'humidité relative au cours de la saison sèche est nettement inférieure à 50 %. Cette zone latitudinale présente toutefois des variations de la pluviosité moyenne annuelle : les précipitations annuelles peuvent décroître du Sud au Nord de cette zone de 1500 mm à 750 mm.

Figure I-1. Esquisse des climats d'Afrique de l'ouest. D'après l'atlas international de l'ouest africain (O.U.A., 1971) et CHAUVEL (1977).



Commentaire de la figure I-2

Les formations végétales se répartissent selon les bandes latitudinales climatiques. Ainsi, la zone de savane correspond sensiblement à la zone tropicale à saison sèche.

Figure I-2. La végétation au sud du Sahara. D'après VALENTIN et al. 1990.

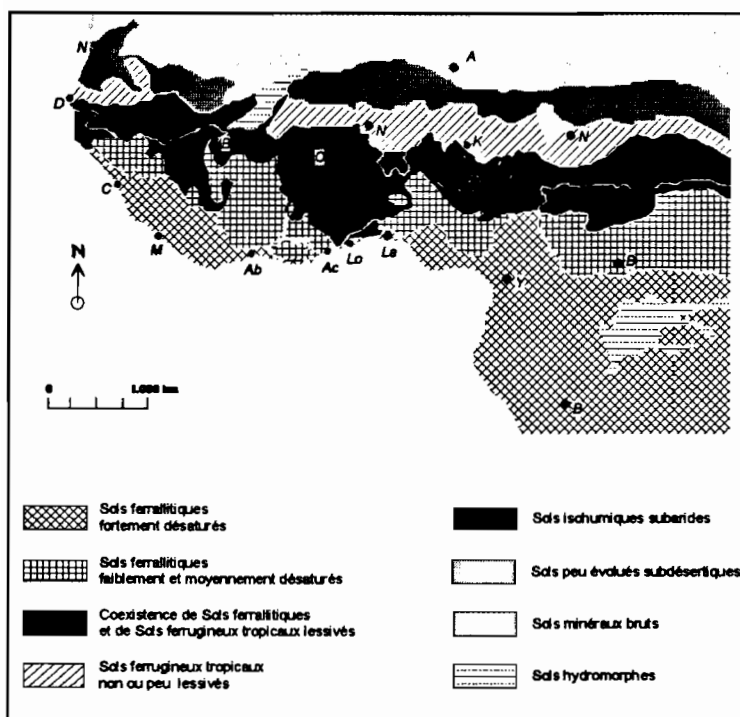


Figure I-3. Carte des sols d'Afrique de l'ouest. D'après MOREAU (1993).

Commentaire de la figure I-3

La zone de coexistence des sols rouges ferrallitiques et des sols ferrugineux correspond sensiblement à la zone tropicale à saison sèche (BOULET et al., 1971; CHAUVEL, 1977; MOREAU, 1993).

Les sols ferrallitiques y sont caractérisés par une désalcalinisation totale des produits d'altération, la néoformation de kaolinite et l'individualisation d'oxy-hydroxydes de fer. Les propriétés les plus évidentes de ces sols (colorations vives du rouge au jaune; faible capacité d'échange; argiles non gonflantes) sont liées à cette constitution minéralogique. Ce type de sol se forme dans des conditions de drainage important (BOURGEON et PEDRO, 1992)

Les sols ferrugineux présentent un infrasol argileux hydromorphe, et un épépédon déferriqué et désargillifié.

Sur les versants, la distribution de ces deux types de sols s'effectue selon un ordre systématique : les sols rouges ferrallitiques s'observent toujours en position haute, en amont des sols ferrugineux. Les sols ferrallitiques, préservés de l'érosion, se seraient formés dans des conditions paléoclimatiques humides analogues à celles qui s'observent aux basses latitudes. Quant aux sols ferrugineux, ils se formeraient actuellement au dépend des précédents, en position topographique favorisant l'alternance des humectations et des dessiccations du sol (CHAUVEL, 1977).

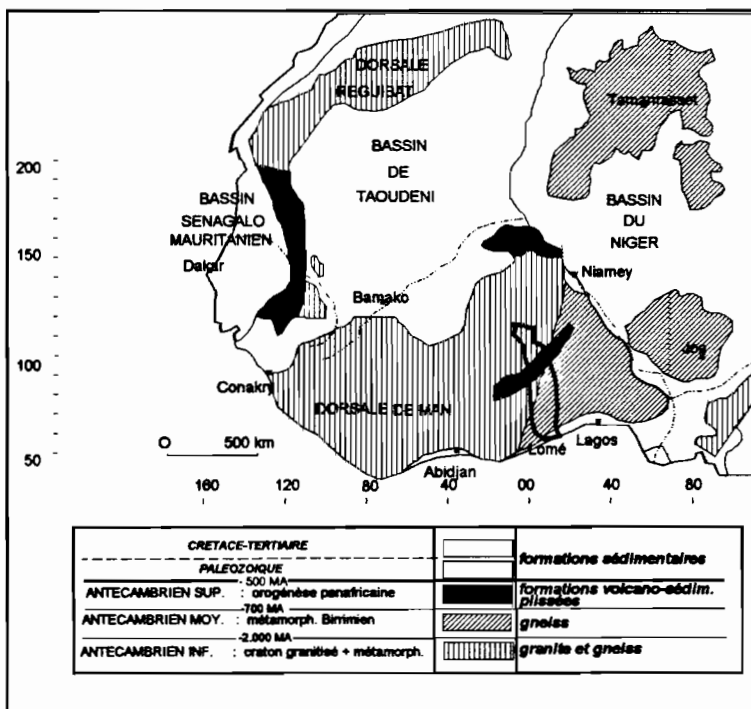


Figure I-4. Esquisse géologique de l'Afrique de l'ouest. D'après LEPRUN (1979)

Commentaire de la figure I-4

Le socle granitique antécambrien et les gneiss birimiens associés à celui-ci représentent d'importantes superficies en Afrique de l'ouest. un vaste craton granitéisé aurait occupé toute cette zone au précambrien inférieur. Au Birimien (-2000 MA), une phase métamorphisante aurait concerné le panneau oriental de ce craton, et aurait donné naissance à des orthogneiss, des paragneiss et des migmatites.

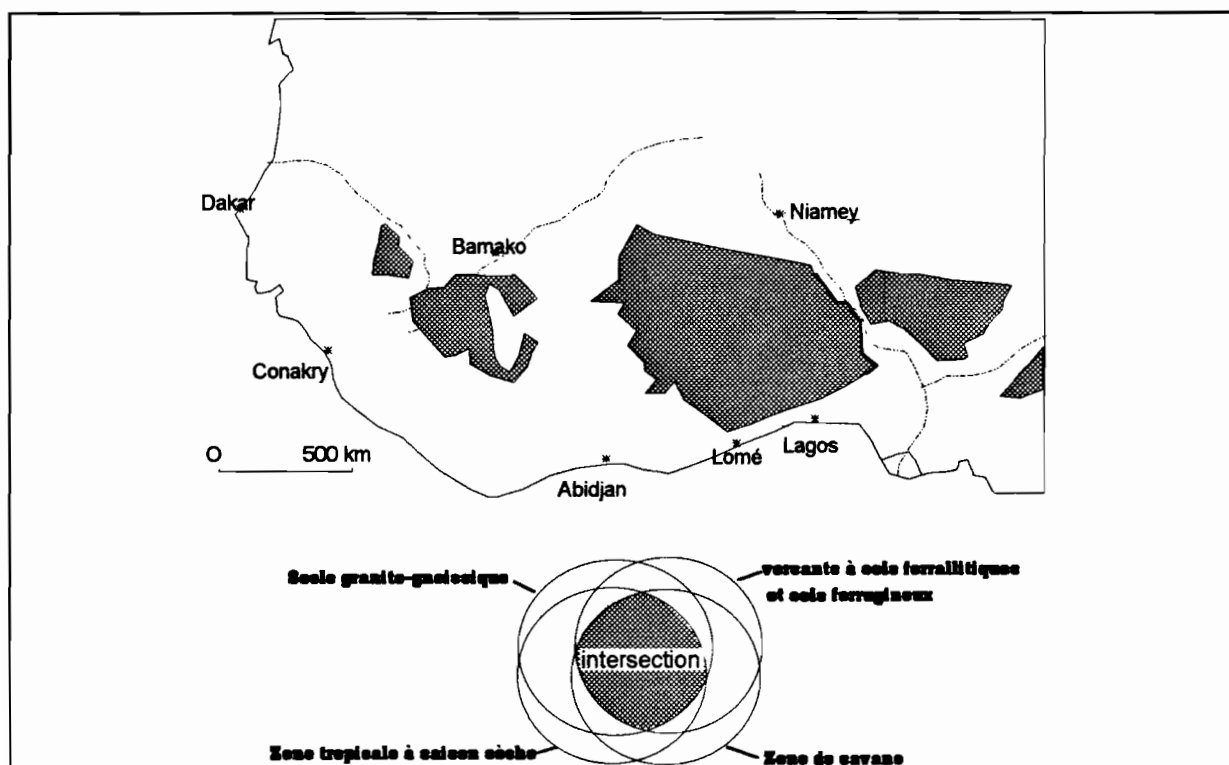


Figure I-5. Extension géographique du paysage de référence.

1.2. Les composantes du paysage : état des connaissances

Les composantes du paysage de référence peuvent être schématisées sur un versant-type synthétique, qui constitue un "modèle qualitatif" du paysage (MULLON, 1988).

Ce modèle peut être proposé en raison de l'existence de constantes dans l'organisation du paysage : ainsi, sur les versants de ce paysage, les éléments géomorphologiques et pédologiques apparaissent toujours selon la même succession topographique (LEVEQUE, 1976). On retiendra toutefois que ce modèle représente le cas d'un versant suffisamment éloigné des niveaux de base local (fleuve ou rivière importante) et général (océan). En effet, les versants peuvent être géomorphologiquement et pédologiquement "tronqués" vers l'amont selon l'importance de l'érosion générale, ou encore vers l'aval, selon le type d'axe de drainage (cf. figure I-6).

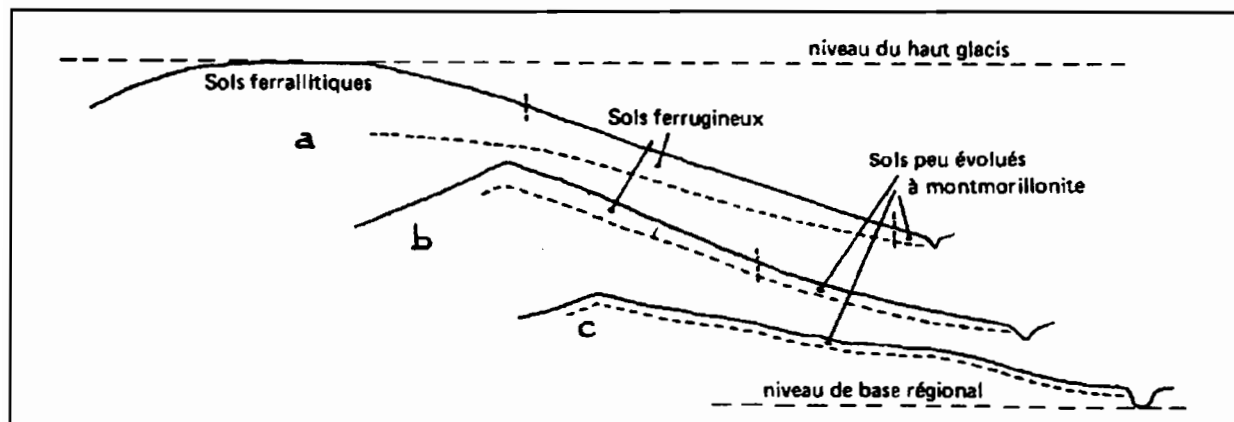


Figure I-6. Troncature par l'érosion du versant-type. D'après LEVEQUE (1976).

Ce concept de versant-type nous permet de définir, à partir d'éléments bibliographiques, un modelé-type, une végétation type, une pédoséquence-type et une hydroséquence-type.

1.2.1. Le modelé-type

De nombreuses études géomorphologiques ont été effectuées à la faveur de la cartographie des sols de l'Afrique de l'ouest dans le courant des années 1960 à 1980. Il ressort de ces études que le modelé du versant-type présente 4 unités étagées (cf. figure I-7) :

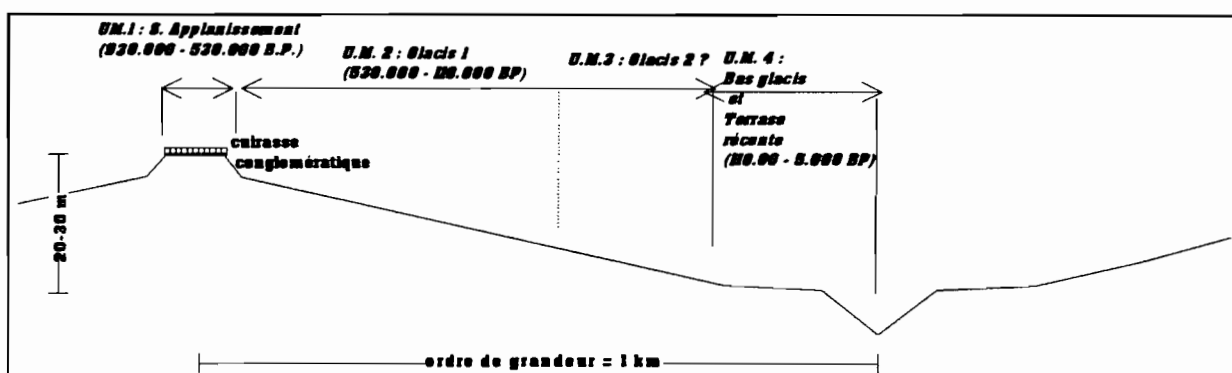


Figure I-7. Le modelé du versant-type

- **Unité de modelé 1** : le sommet d'interfluve. Celui-ci est plan . Il constituerait le témoin de l'érosion d'une surface d'aplanissement. Selon différents essais de corrélations pédologiques

et géomorphologiques menés en Afrique de l'ouest (PIAS, 1968; GAVAUD, 1970; BOULET, 1970 et 1978; GRANDIN, 1976; LEPRUN, 1979; LEVEQUE, 1979; KALOGA, 1986), cette surface d'aplanissement daterait du pléistocène, et correspondrait au “ haut-glacis quaternaire ” (-900.000 à -530.000 ans). Parmi les arguments avancés en faveur de cette hypothèse, LEVEQUE (1979) note que les sommets aplanis se situent sensiblement à la même altitude pour une latitude donnée, et que celle-ci croît régulièrement à mesure que l'on s'éloigne de l'océan (100 mètres au voisinage des terres de Barre qui limitent le socle granito-gneissique au sud du Togo, et de l'ordre de 420 mètres à 400 kilomètres à l'intérieur des terres). L'ensemble formerait un seul plan de pente général d'environ 1/1.000. Un autre argument en faveur d'une surface d'aplanissement est que ce type de sommet se situe dans le même plan que de vastes bowés situés en piedmont des hauts reliefs voltaïens (FAURE, 1985 et 1987). On notera (cf. figure I-8) qu'en s'approchant du niveau de base local ou général, la poursuite de l'érosion de ces sommets plans et cuirassés donne naissance à des sommets convexo-plan à fragments de cuirasse relictuelle, puis à des sommets convexes (BEAUDOU et COLLINET, 1977).

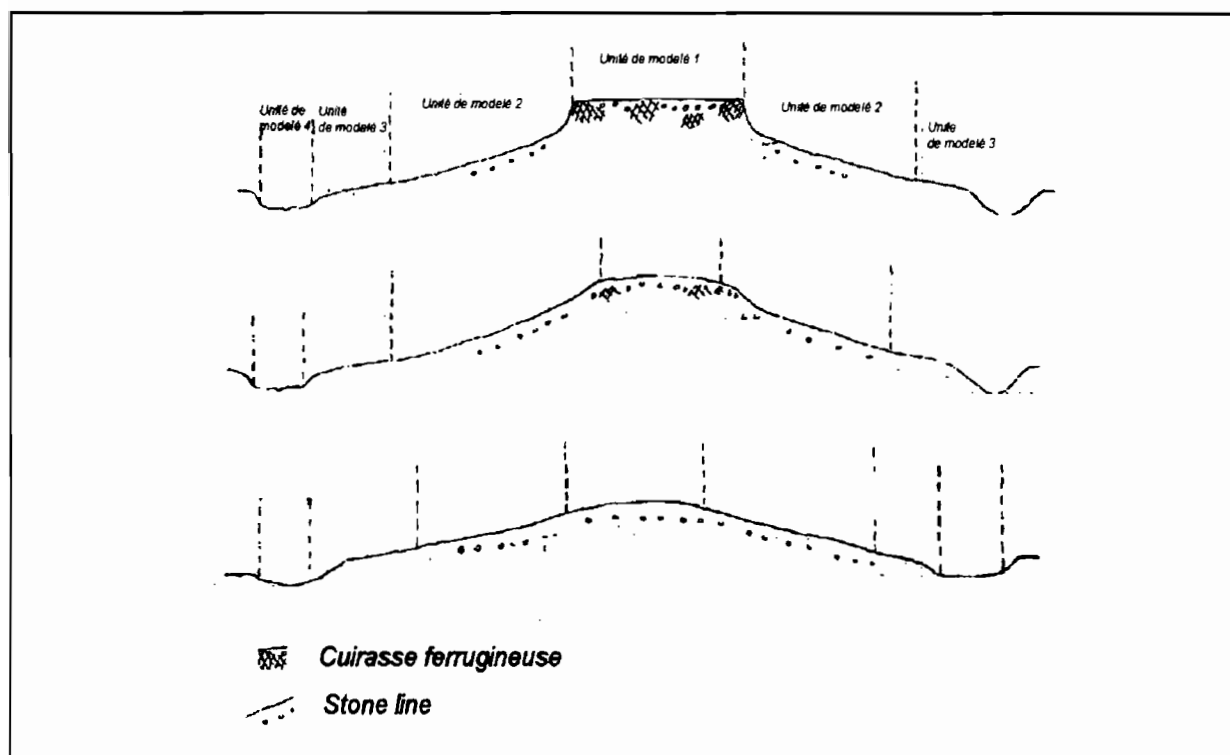


Figure I-8. Evolution du sommet du versant-type. D'après BEAUDOU et COLLINET (1977).

- **Unité de modelé 2** : à l'aval de l'escarpement d'érosion formé en rebord de la surface sommitale, le profil du versant prend l'aspect d'un glacis convexo-plan. Ce niveau de glacis pourrait être le "moyen glacis" du quaternaire, observé par MICHEL (1970) dans les bassins des fleuves Sénégal et Gambie, et daté par cet auteur d'entre -530.000 et -110.000 ans. Le façonnement de ce glacis serait lié à une phase érosive provoquée à la fois par un climat sec (phase de rhexistase) et un enfoncement général du niveau de base. Une telle phase "displuviale" serait contemporaine d'une période glaciaire (GAVAUD, 1970, 1975 et 1977; HERVIEU, 1975)

- **Unité de modelé 3** : le profil en long du versant se modifie à la faveur d'une rupture de pente. Pour expliquer l'origine de cette rupture, deux hypothèses différentes sont proposées : selon une première hypothèse, cette rupture de pente pourrait être associée à une nouvelle phase érosive (par rhexistase et/ou enfoncement du niveau de base) (LEVEQUE, 1979; KALOGA, 1986). De ce fait, cette partie du versant correspondrait à une nouvelle génération de glacis (non daté). Selon une autre hypothèse, il s'agirait plutôt d'un affaissement progressif de la surface topographique par érosion interne (FRITSCH et al, 1990b; FRITSCH, 1993).

- **unité de modelé 4** : à proximité de l'axe de drainage, elle correspond à un complexe colluvio-alluvial, appelé parfois "surface fonctionnelle" par les géomorphologues. Si l'on se réfère à la chronologie proposée par MICHEL et aux datations effectuées par SCHWARTZ (1991), les formations alluviales de cette unité de modelé seraient au plus âgées de 5.000 ans, tandis que les formations colluviales correspondraient au "bas glacis" (-110.000 à -5.000 ans).

En résumé, le relief de ce versant-type s'est façonné au cours du quaternaire, à l'occasion d'une série de phases d'érosion successives. Si ce relief est très caractéristique, la chronologie absolue de ces phases érosives reste assez imprécise. Par ailleurs, l'origine de la rupture entre l'unité de modelé 2 et l'unité de modelé 3 n'est pas certaine. Enfin, la séparation

entre les formations colluviales de bas de versant et les formations alluviales sensu stricto reste peu précise.

1.2.2. La végétation-type

Le couvert végétal du versant-type peut être relativement diversifié en raison de l'action anthropique. Toutefois, le transect topographique le plus fréquemment observé est le suivant (cf. figure I-9) :

- sur les sommets de versant, généralement préservés pour l'habitat, on observe des vestiges de forêt claire climacique (ADJANOHOUN, 1964; AVENARD, 1969 et 1971; AVENARD et al, 1974). Cette formation constitue une transition entre la forêt dense semi-décidue située plus proche de l'équateur et la steppe située plus au nord. Cette formation climacique correspondrait à un recul de la forêt dense semi-décidue depuis la dernière phase glaciaire (-20.000 ans). Les espèces ligneuses qui y sont le plus fréquemment rencontrées sont *Anogeissus Leiocarpus*, *Isobertina sp.*, *Khaya senegalensis*, *Uapaca sp.*, *Azelia africana*. Parfois, ce couvert végétal naturel est remplacé par des plantations forestières, telles les teckeraies au Togo (CORNEVIN, 1988).

- plus en aval, la forêt claire disparaît du fait d'une forte pression anthropique (POSS et al., 1990), par défrichage, mise en culture et feux de brousse annuels. Cette anthropisation conduit à deux grands cas de figure : lorsqu'elle est relativement ancienne, on trouve généralement une savane arborée à couvert ligneux très clair et discontinu. Les espèces caractéristiques sont *Daniella Oliveri*, *Parkia biglobosa* et *Lophira Alata*. Lorsque l'anthropisation est récente, la forêt claire laisse la place à une savane arbustive où peuvent apparaître *Hymenocardia acida* et *Detarium senegalense*.

- à l'aval du versant, les conditions édaphiques (engorgement des sols) se conjuguent à la pression anthropique pour donner naissance à une savane herbeuse à *Imperata cylindrica*.

- enfin, à proximité de l'axe de drainage, on trouve une galerie forestière à strate ligneuse élevée (*Cola cordifolia*, *Chlorophora excelsa*, accompagnés d'*Antiaris africana*, *Kaya senegalensis*, *Diospyros sp.*, *Elaeis guineensis*) et de nombreuses espèces de palmier (*Raphia sp.*).

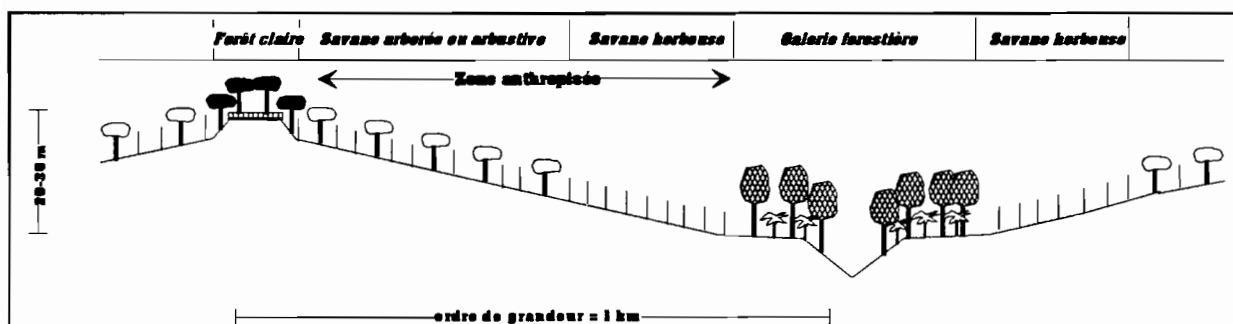


Figure 1-9. Répartition de la végétation le long du versant-type.

1.2.3. La pédoséquence-type

Un certain nombre d'études pédologiques ont été effectuées sur ce type de versant (BOULET, 1974 et 1978; LEVEQUE, 1979; BOULET et al., 1982 et 1984; FAURE et VOLKOFF, 1989; FRITSCH et al., 1986; FRITSCH et al., 1990a; FRITSCH, 1993). Ces études montrent que la couverture pédologique de ce type de versant s'organise selon une séquence topographique. Elle constitue ce que nous appelons une pédoséquence-type¹.

¹ Cette pédoséquence-type est en fait, selon les terminologies, un "système pédologique" (FRITSCH, 1990a; A.F.E.S., 1992) ou un "système-sol" (BRABANT, 1991) qui présente la particularité de s'organiser selon une séquence topographique.

Malgré la diversité de la terminologie et des modes de découpage qui ont été employés lors de ces études, on peut dégager les traits généraux de cette pédoséquence-type. En effet, ces études montrent l'existence de trois domaines étagés sur le versant (cf. figure I-10), dont les limites correspondent à des limites d'unités de modelé (cf. figure I-7).

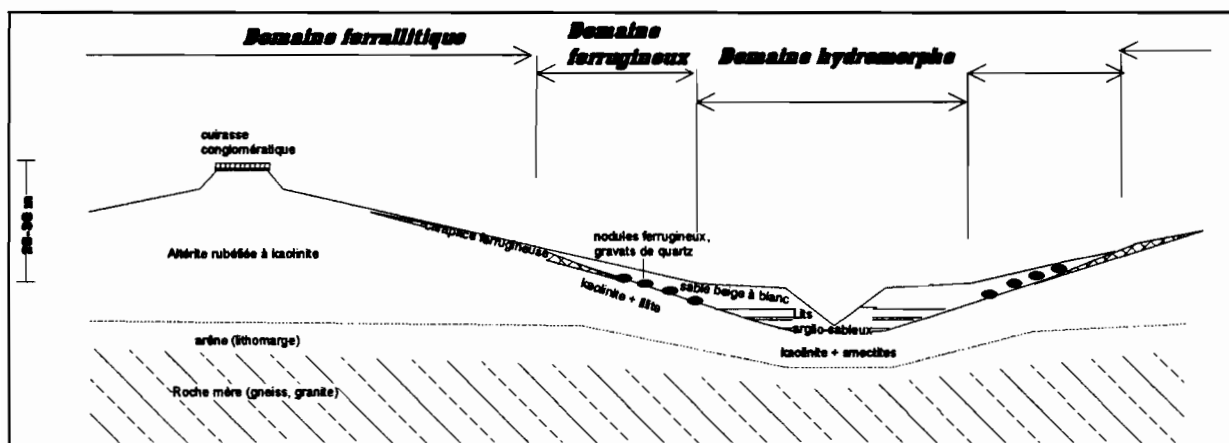


Figure I-10. Organisation pédologique du versant-type.

- **le domaine amont ferrallitique** s'étend sur les surfaces cuirassées et le moyen glaciaire quaternaire (unités de modelé 1 et 2).

Il est caractérisé par d'épaisses altérations (de l'ordre d'une vingtaine de mètres en sommet de versant). L'argile du plasma y est essentiellement constituée de phyllite 1/1 de néoformation (kaolinite principalement). Les minéraux primaires les moins altérables peuvent être conservés sous forme plus ou moins intacte et constituent le squelette de ces altérations (quartz, muscovite, feldspaths potassiques). Enfin, la libération des oxy-hydroxydes de fer (goethite et hématite) confère au matériau une coloration de plus en plus rougeâtre au fur et à mesure que l'on remonte vers la surface du sol.

Ces altérations seraient inactuelles. En effet, les conditions pédoclimatiques actuelles ne permettraient pas la poursuite de cette forme d'altération : le climat serait trop sec pour permettre un drainage important en profondeur, alors que celui-ci est nécessaire pour produire

la désalcalinisation totale (élimination complète du magnésium et des alcalis) et la désilicification partielle des produit d'altération (MILLOT, 1963; PEDRO, 1987; BOURGEON et PEDRO, 1992). Différents essais de corrélation pédologique, géomorphologique et paléoclimatiques suggèrent que ces altération se seraient formées à la fin du tertiaire ou au début du quaternaire, en climat plus humide qu'aucun de ceux qui ont suivi (MICHEL, 1970; GAVAUD, 1970; BOULET, 1970 et 1978; LEPRUN, 1979, GRANDIN, 1976; KALOGA, 1986).

Ces altérations sont " coiffées " par des indurations plus ou moins continues (cuirasse ou carapace), caractérisées par une accumulation de sesquioxides de fer et de manganèse , et éventuellement d'alumine. En sommet de versant, la cuirasse présente souvent un aspect conglomératique. et semble surimposée au profil d'altération kaolinique (GAVAUD, 1967; BOULET, 1970; VOGT, 1968; KALOGA, 1969 et 1986). L'origine de cette cuirasse reste hypothétique. Selon MAIGNIEN (1958) et MILLOT (1963) il y aurait eu, lors de sa formation, accumulation absolue de métaux par voie soluble au sein d'un matériau pédologique (cf. figure I-11). Ces métaux auraient été transportés soit par lixiviation verticale, soit par apport latéral au sein d'une nappe phréatique. Une fois accumulés, les sesquioxides auraient pu s'oxyder et précipiter dans la zone de battement oxygénée de la nappe. Ceci sous-entend que la cuirasse se serait formée dans un modelé ancien, en position topographique basse, et dans des conditions hydrologiques qui ne sont plus celles qui s'observent actuellement. Sa position en sommet de versant serait alors nécessairement liée à un phénomène d'inversion de relief.

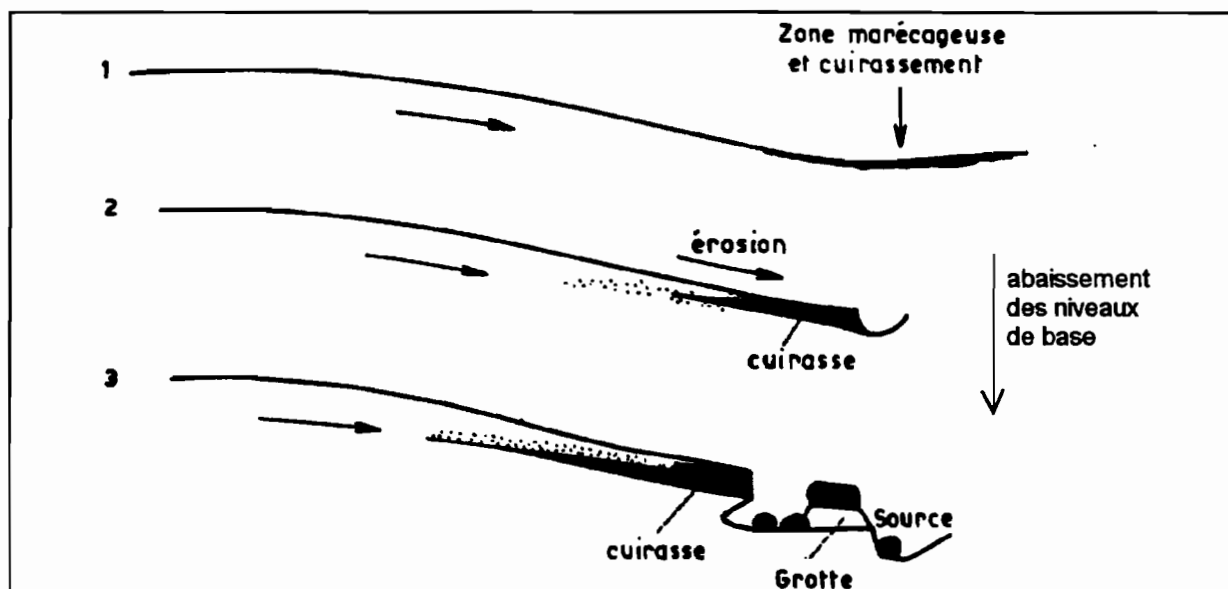


Figure I-11. Hypothèse de la mise en place de la cuirasse par accumulation absolue de fer soluble en bas de versant. D'après MAIGNIEN (1958).

Située sur l'unité de modelé 2 (moyen glacis), la carapace se distingue de la cuirasse ferrugineuse par une moindre induration. Cette induration diminue progressivement en profondeur, mais est plus marquée vers l'aval (LEVEQUE, 1979). Le mode de formation de cette carapace serait différent de celui qui conduit au cuirassement.

- **le domaine médian ferrugineux** s'étend sur l'unité de modelé 3.

La carapace ferrugineuse disparaît dans ce domaine. Elle laisse la place à des nodules ferrugineux individualisés, qui se formeraient par concrétionnement à partir de noyaux résiduels issus de la désagrégation de la carapace (LEVEQUE, 1978 a; BOULET et al., 1982 et 1984; FRITSCH et al., 1986). Ces nodules sont généralement situés sur une nappe de gravats de quartz émoussés, dont l'origine est hypothétique : elle pourrait provenir de l'érosion interne et du fauchage de filons (COLLINET, 1969), ou bien être mise en place sous forme de pavage puis recouverte par colluvionnement ou remontées biologiques de matériau fin (LEVEQUE, 1969).

Les horizons supérieurs de ce domaine sont marqués par la déferrisation et la désargilification des argiles, qui provoquent l'éclaircissement de ces horizons et l'augmentation de la différenciation texturale avec les horizons sous-jacents. Selon certaines études de laboratoire, ce type d'horizon se développerait par disjonction plasma-squelette en conditions d'alternance d'humectation et de fortes dessiccations, puis par déferrisation suivie de désargilification (CHAUVEL, 1977, CHAUVEL et PEDRO, 1978). La désargilification se produirait par lessivage vertical ou oblique, voire par attaque des argiles sous l'action de cations fortement acides tel que Fe (BRINKMAN, 1970; PEDRO, 1987; ROBAIN, 1989). On ignore toutefois l'origine du matériau parental de ces horizons.

- **le domaine aval hydromorphe** correspond au complexe colluvio-alluvial de l'unité de modelé 4. Il s'étend donc sur le bas glaciaire et les formations alluviales "récentes".

Les sols de ce domaine se distinguent de ceux du domaine ferrugineux par plusieurs points :

- l'accentuation des caractères de déferrisation et de désargilification dans les horizons supérieurs (coloration blanche et texture très sableuse). Selon FRITSCH (1993), ces caractères seraient dus à la forte action soustractive d'une nappe.

- l'apparition d'horizons intermédiaires présentant une alternance de "langues", ou de lits sableux et argileux, dont on ignore l'origine exacte. Ces horizons pourraient être dus à la différenciation d'un matériau initialement argileux par éluviation/illuviation verticale et oblique (BOULET, 1975; BOULET et al., 1982), ou encore résulter de dépôts successifs d'origine alluviale.

- l'apparition d'argiles smectitiques dans les horizons de profondeur, dont l'abondance et les caractéristiques varient en fonction de la nature de la roche mère : elles sont plus abondantes sur gneiss basiques, et peuvent y acquérir des propriétés de gonflement à

l'humectation (apparition de montmorillonite). Par ailleurs, on observe généralement dans ces horizons une augmentation de l'abondance des cations, dont la nature dépend de la roche mère (LEVEQUE, 1979). Ainsi, on peut observer des concentrations de carbonate de calcium (les "poupées calcaires") sur gneiss basiques. Sur d'autres types de roches, c'est au contraire le sodium qui se concentre dans ce domaine. Ces deux caractéristiques, présence d'argiles smectitiques et abondance des cations, indiqueraient des conditions de confinement (DUCHAUFOR, 1977).

1.2.4. l'hydroséquence-type

Il n'existe pas encore de modèle hydrologique déterministe de ce type de versant, car son fonctionnement hydrodynamique s'avère complexe (POSS et VALENTIN, 1983; CHEVALLIER, 1988). Les quelques tentatives effectuées pour aller dans ce sens (LANGSHOLT, 1994) restent encore trop réductrices de la réalité.

En revanche, certaines études hydrologiques de ce type de versant ont donné lieu à des schémas inspirés de ceux proposés par CHORLEY, DUNNE et ATKINSON (1980). Ces schémas portent sur les "chemins de l'eau" sur le versant et sur la nature des différents flux dans les zones insaturées et saturées.

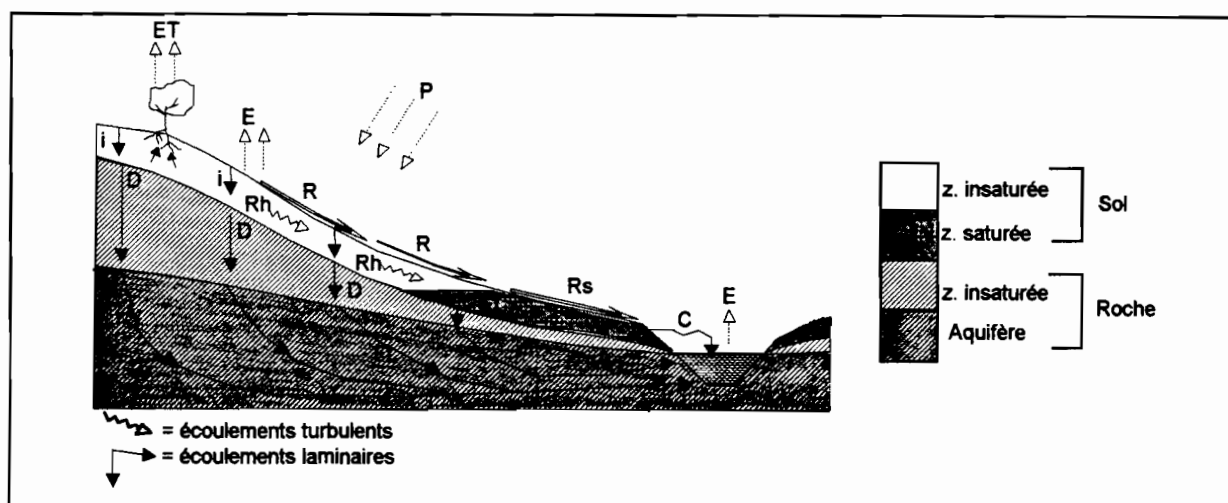


Figure I-12. Schéma général des chemins de l'eau sur un versant. D'après CHORLEY, DUNNE et ATKINSON (1980).

Dans ce type de schéma (cf. figure I-12), on reconnaît généralement l'existence des flux d'eau suivants :

1) à l'interface sol-atmosphère : il y a évaporation (E) et évapotranspiration (Et);

2) à la surface du sol, une partie de l'eau de précipitation (P) est reprise par le ruissellement hortonien (Rh), relayé par du ruissellement sur surface saturée à l'aval (Rs) qui alimente l'écoulement de crue (C). Une partie de l'eau s'infiltré dans le sol (i). Une partie de cette eau peut s'écouler rapidement en subsurface vers l'aval, selon des flux turbulents (Rh). Une autre partie rejoint la nappe par un flux laminaire vertical dans la zone insaturée, le drainage (D).

Dans la nappe (ou les nappes superposées), les flux sont laminaires (FL) et circulent selon le gradient de charge hydraulique, soit principalement de manière oblique (hypothèse de DUPUIT-FORCHEIMER). L'eau rejoint le thalweg par l'écoulement de base (B).

Trois schémas différents existent pour ce type de versant (cf. figure I-13). Ces schémas présentent des points communs en ce qui concerne les mécanismes mis en oeuvre à la surface du sol et en subsurface : le ruissellement hortonien serait maximal sur la carapace ferrugineuse de la partie aval du domaine ferrallitique (CHEVALLIER, 1988; FRITSCH, 1993), puis au passage vers le domaine ferrugineux, une partie de ces eaux de ruissellement s'infiltrerait dans les horizons sableux désargilifiés, afin de produire du ruissellement hypodermique qui rejoindrait la nappe à l'aval.

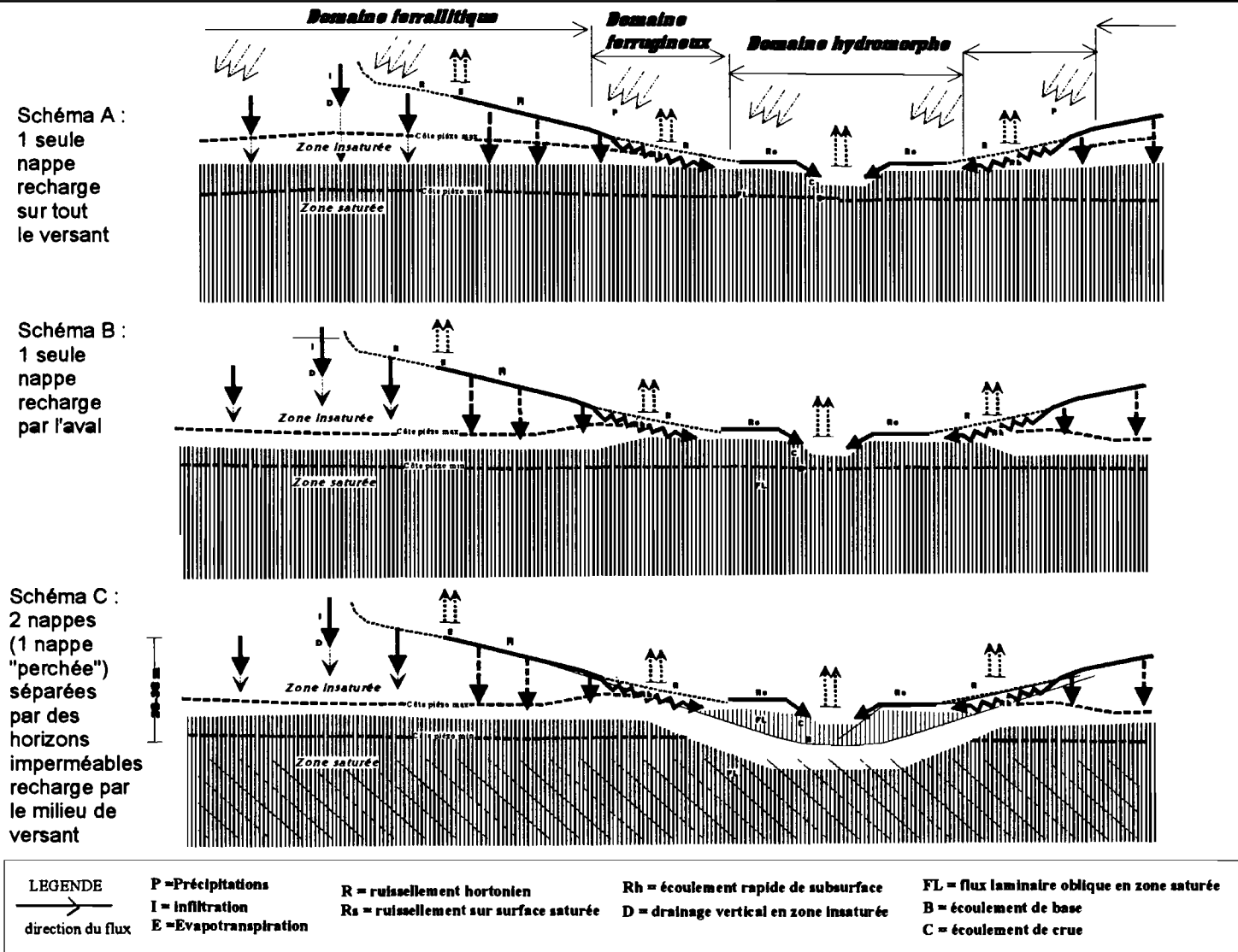


Figure I-13. Trois schémas possibles de fonctionnement hydrodynamique du versant-type.

Toutefois, ces schémas divergent par le nombre de nappes phréatiques reconnues et les modalités de recharge de ces nappes :

- selon un premier schéma (LELONG, 1966; POSS, 1978; CHEVALLIER, 1988), il n'existerait qu'un seul aquifère, et la recharge de la nappe se ferait sur l'ensemble du versant. Le toit de cette nappe formerait un dôme surélevé à l'amont, en concordance avec le mode de recharge. Les flux laminaires latéraux dans la nappe seraient orientés systématiquement vers l'axe de drainage;

- selon un second schéma (LENOIR, 1977), il existerait également un seul aquifère, mais la recharge de cet aquifère se ferait par l'aval et le milieu de versant. Ainsi, l'eau de drainage ne rejoindrait pas la nappe phréatique dans la partie amont du domaine ferrallitique et y serait reprise entièrement par l'évaporation et l'évapotranspiration. L'aquifère serait incurvé à l'amont du versant, et le point de charge hydraulique maximal dans la nappe serait situé à mi-versant (crête piézométrique). Les flux laminaires latéraux dans la zone saturée seraient orientés à la fois vers le sommet de versant et l'aval;

- enfin, selon un troisième schéma (WOROU, 1988; FRITSCH, 1993), il existerait une nappe perchée à l'aval. Cette nappe perchée serait séparée de l'aquifère de profondeur par des horizons argileux à phyllite 2/1 qui seraient quasiment imperméables. Cet aquifère pourrait être en surpression à l'aval, d'où l'apparition de phénomènes d'artésianisme. Dans ce schéma, on ne précise cependant pas si la recharge de l'aquifère de profondeur se fait sur la totalité du versant ou par l'aval.

1.3. Conclusion du chapitre 1

A partir des éléments présentés dans les paragraphes précédents, il est possible de résumer l'état des connaissances hydrologiques et pédologiques sur le paysage de référence (cf. figure I-14).

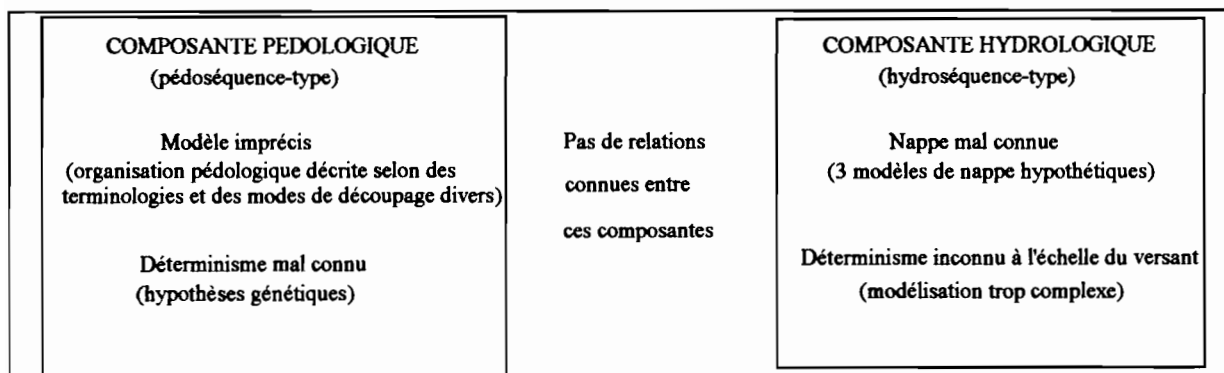


Figure I-14. Résumé de l'état des connaissances sur le paysage de référence.

En ce qui concerne la composante pédologique, les grands domaines pédologiques sont clairement identifiés à l'échelle du versant-type (domaine ferrallitique, ferrugineux et hydromorphe). Toutefois, l'absence de méthodes descriptives standardisées ne permettent pas d'établir un modèle précis de cette couverture pédologique. Il en résulte que les caractéristiques et la genèse de cette couverture pédologique restent à préciser.

En ce qui concerne la composante hydrologique, on connaît relativement bien les mécanismes mis en oeuvre à la surface du sol et en subsurface sur le versant-type. Mais on ne dispose que d'hypothèses sur le nombre de nappes phréatiques et le mode de recharge de ces nappes. Par ailleurs, en raison de la complexité de ce type de versant, on ne dispose pas de modèle hydrologique déterministe.

Enfin, des relations entre les composantes pédologiques et hydrologiques restent à établir, car celles-ci ont généralement été étudiées de manière disjointe.

CHAPITRE 2. CHOIX D'UN VERSANT REPRÉSENTATIF DU PAYSAGE

Ce chapitre est destiné à présenter le choix d'un versant représentatif du paysage de référence, au sein de la zone d'extension présentée au chapitre 1 (cf. figure I-5).

Pour des raisons logistiques : présence d'une infrastructure de recherche, lieu d'affectation, l'étude est localisée au Togo (cf. figure II-1).

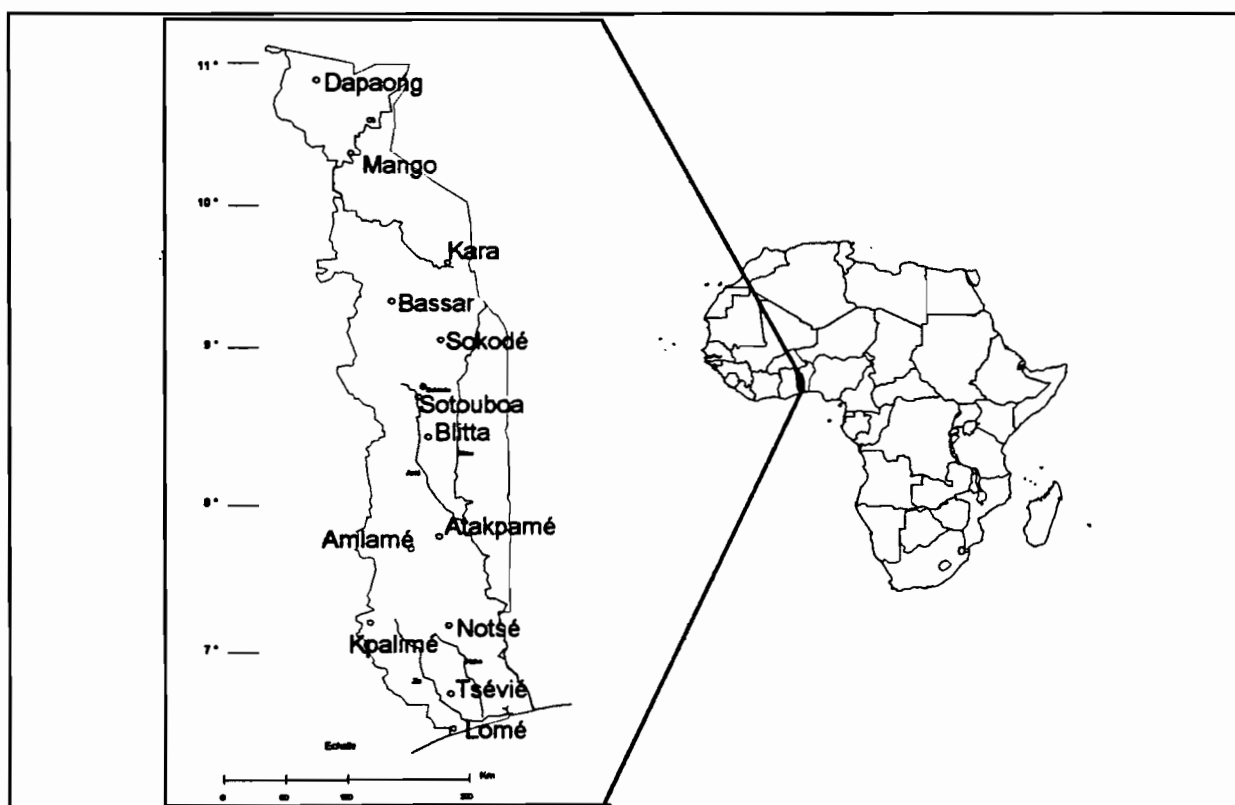


Figure II-1. Carte générale du Togo.

Dans ce cadre, la recherche d'un versant représentatif nous a conduit à déterminer une région géographique représentative du paysage de référence, puis à choisir un versant au sein de cette région.

2.1. Choix et caractéristiques de la région

Nous avons recherché au Togo une région présentant le paysage de référence, en fonction des contraintes géologiques, climatiques et pédologiques qui déterminent ce paysage :

- sur le plan géologique, le socle granito-gneissique s'avère largement représenté au Togo (LOAEC et al., 1982). Il couvre environ 60 pourcent de la superficie du territoire (cf. figure II-2). Ces formations correspondent au panneau oriental métamorphisé du craton granitique ouest africain. Dans une période préalable au métamorphisme birrimien, le granite aurait été partiellement recouvert de formations volcano-sédimentaires (GRANT, 1969, cité par LEVEQUE, 1979). De ce fait, le métamorphisme birrimien a conduit à une certaine diversité lithologique : orthogneiss, paragneiss et migmatites, avec dominance de paragneiss et de migmatites.

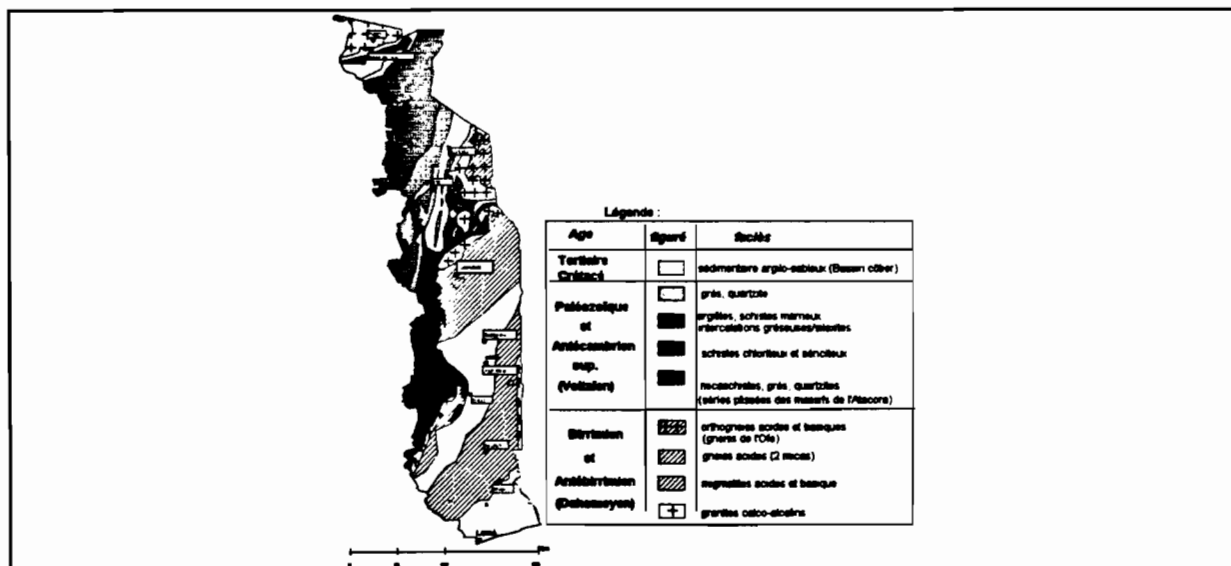


Figure II-2. Esquisse géologique du Togo. D'après LOAEC et al. (1982)

- sur le plan climatique, (cf. figure II-3), nous avons écarté la zone méridionale du Togo qui est en transition entre le climat tropical humide et le climat tropical sec (régime pluviométrique bimodal). Elle est, de plus, affectée par les courants marins côtiers qui en font

une zone particulièrement sèche (pluviosité moyenne annuelle entre 800 et 1100 mm) (WAUTHY, 1983; POSS, 1991). En revanche, la zone située à partir du 7^{ème} parallèle est soumise à un régime pluviométrique monomodal caractéristique du climat tropical à saison sèche (SEGUIS, 1988). Dans cette dernière zone, Il convient toutefois d'écarter les anomalies liées à des facteurs locaux (cf. figure II-4) : ainsi, avec plus de 1300 mm de pluviosité annuelle, les reliefs du Togo central font partie de ces anomalies, car ils attirent les lignes de grains formés au Togo méridional (DENEAU, 1956, in LEROUX, 1980; LOAEC et al. 1982).

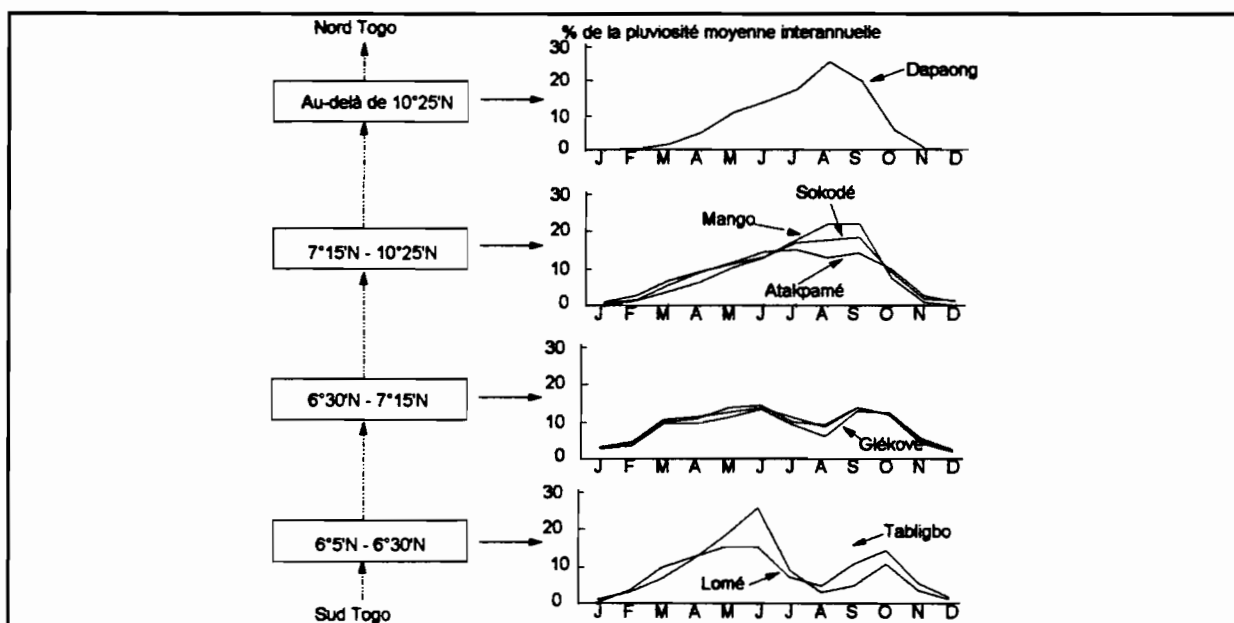


Figure II-3. Variations latitudinales du régime pluviométrique au Togo. d'après SEGUIS (1988).

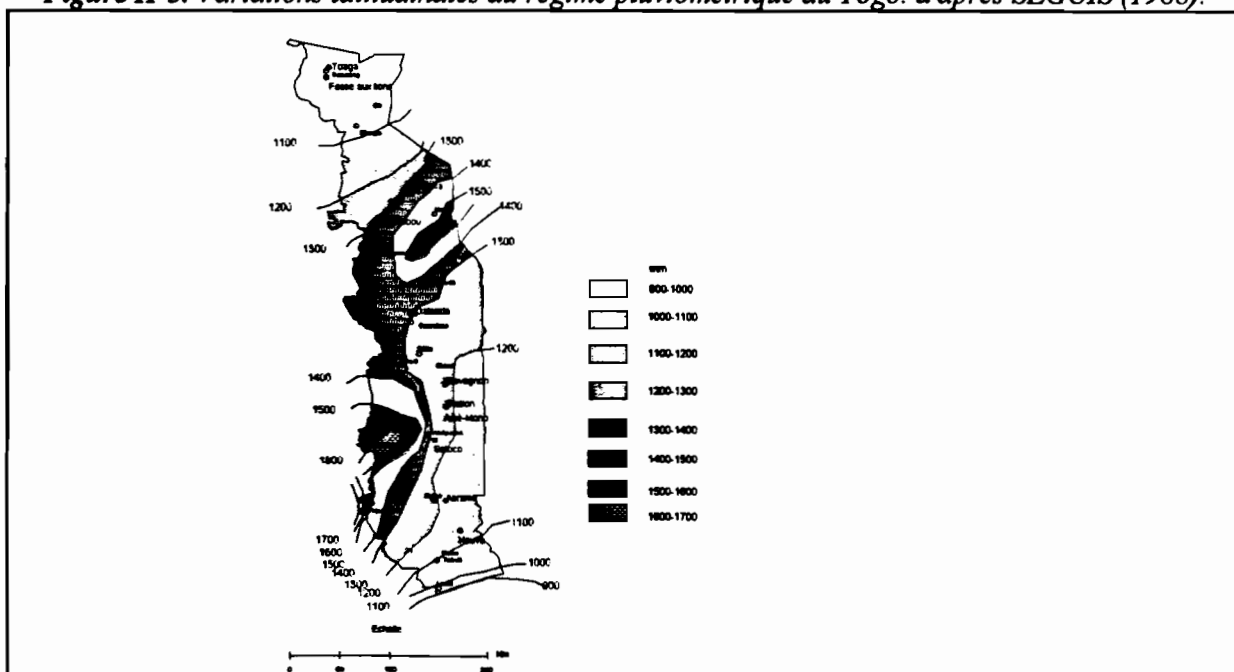


Figure II-4. Pluviosité moyenne annuelle au Togo. D'après LOAEC et al. (1982).

- enfin, sur le plan pédologique, les zones présentant des pédoséquences avec un terme amont ferrallitique sont relativement nombreuses sur le socle granito-gneissique togolais. Leur localisation est connue grâce aux études cartographiques effectuées au 1/200.00 (LEVEQUE, 1969, 1970, 1973; 1979) et au 1/50.000 (FAURE, 1985, 1987). Elles correspondent aux surfaces présentant le haut glacis quaternaire et les témoins ferrallitiques qu'il supporte (cf. figure II-5).

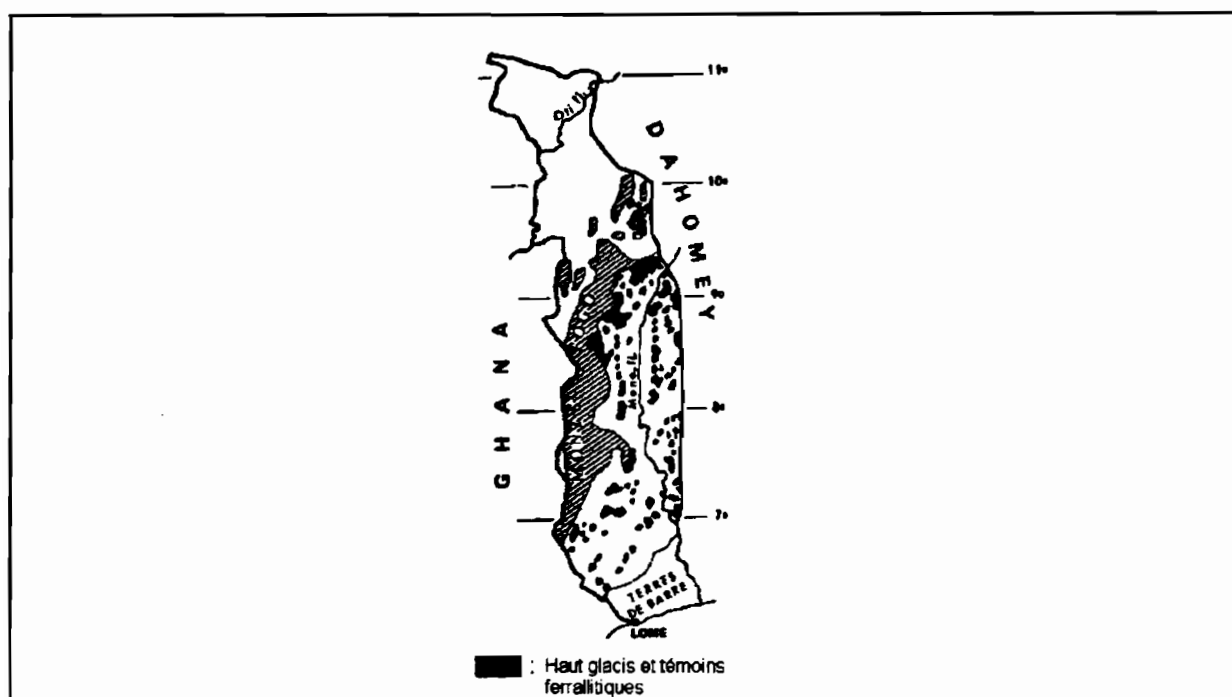


Figure II-5. Localisation des pédoséquences avec terme amont ferrallitique sur le socle granito-gneissique togolais. D'après LEVEQUE (1979).

En définitive, il est apparu que la partie du Togo qui s'étend entre Notsé et Sokodé (cf. figure II-1) pouvait contenir de nombreux versants représentatifs du paysage de référence.

Dans cette partie du pays, trois régions présentant des pédoséquences à terme amont ferrallitique ont alors été prospectées : la région d'Assahoun (entre Kpalimé et Notsé), la région d'Asrama (proximité de Notsé) et la région d'Ayengré (proximité de Sotouboa).

Les résultats de cette prospection ont montré que la **région d'Ayengré** réunissait des conditions particulièrement favorables (présence de versants conformes à la pédoséquence-type avec terme amont ferrallitique et cuirasse ferrugineuse sommitale). Nous nous sommes donc

focalisés sur cette région. Quelques constats ont permis de vérifier que ce choix était judicieux.

Ceux-ci se sont basés sur les données régionales suivantes :

- la climatologie,
- la géologie,
- le modelé,
- la pédologie.

2.1.1. Climatologie de la région d'Ayengré

Les données climatologiques régionales sont fournies par les stations de la météorologie nationale les plus proches, soit la station de Sotouboa située à 10 kilomètres au sud d'Ayengré, et la station de Sokodé située à 40 km au nord. L'existence d'un climat tropical à saison sèche est confirmé par les relevés de la station de Sotouboa effectués au cours de la période 1984-1989 (cf. figure II-6). Le régime pluviométrique est monomodal. La pluviosité moyenne annuelle est de l'ordre de 1200 mm (1223 mm sur la station au cours de cette période). Pour ce qui concerne l'ETP (moyenne annuelle de 1662 mm), le calcul est effectué à partir d'observations complètes à la station de Sokodé (insolation, température, tension de vapeur, vent.). A l'échelle de l'année le déficit hydrique potentiel est donc de l'ordre de 439 mm. La saison des pluies ($P > ETP$) est comprise entre juin et septembre.

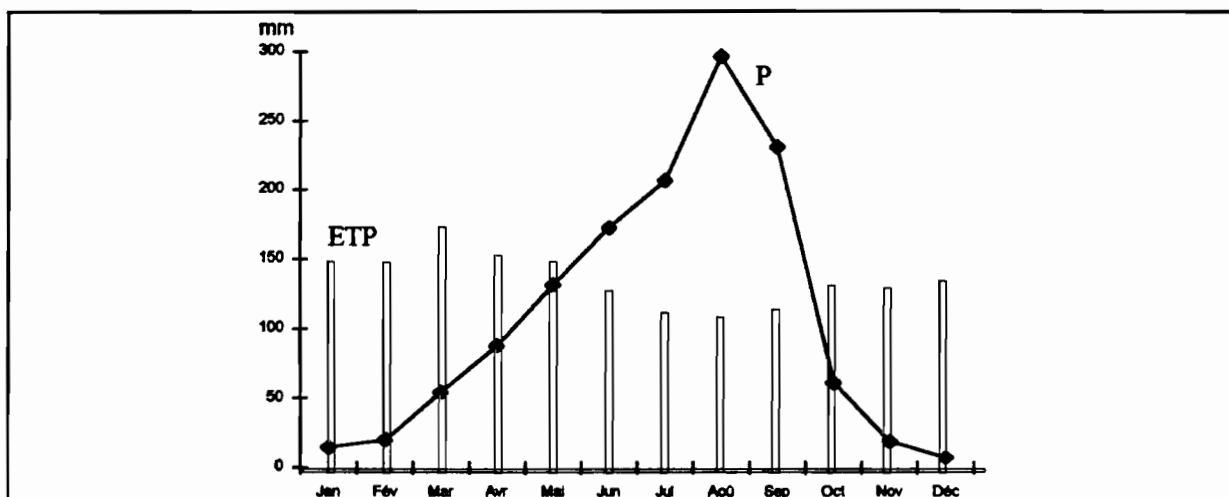


Figure II-6. Pluviométrie relevée à la station de Sotouboa (1984-1989). ETP Penman calculée à partir des relevés de la station de Sokodé (1982-1988; albedo = 0.20; coeff. de Black = 0.18 et 0.62).

2.1.2. Géologie de la région d'Ayengré

Selon la carte géologique au 1/200.000 (cf. figure II-7), le substratum régional est quasiment entièrement constitué de paragneiss antécambrien à biotite et muscovite, dérivé de la métamorphisation de formations volcano-sédimentaires au cours de la phase tectonique birrimienne (vers -2000 Millions d'années).

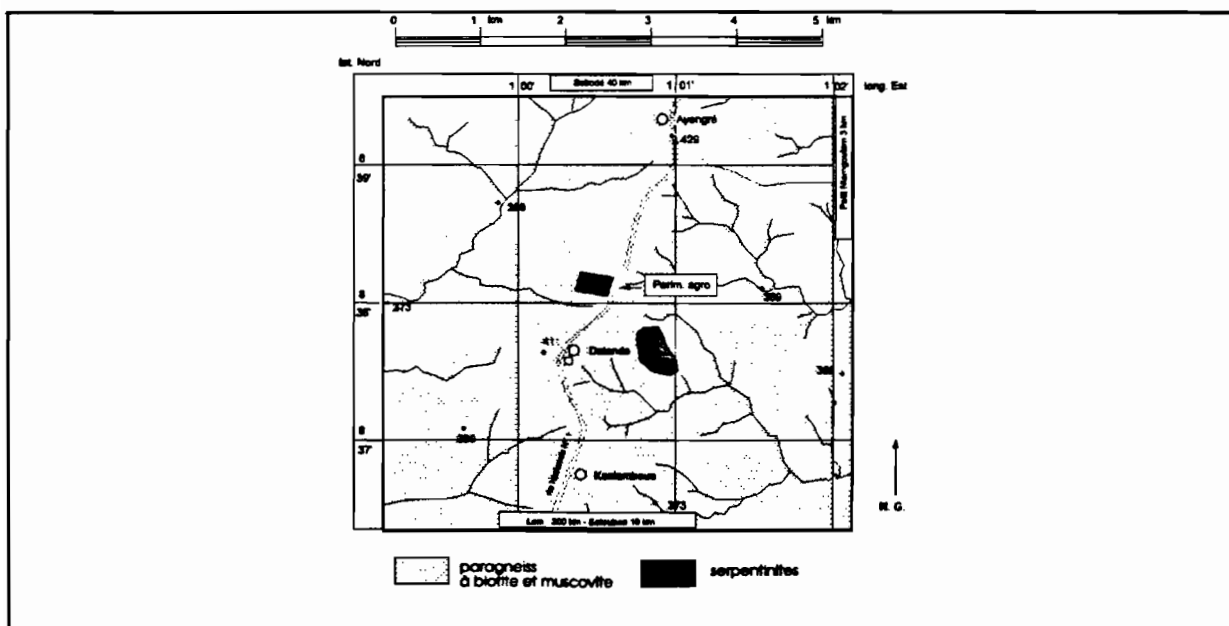


Figure II-7. Géologie de la région d'Ayengré. Extrait de la carte géologique au 1/200.000 ème. Feuille Sokodé.

2.1.3. Modelé de la région d'Ayengré

L'analyse du modelé régional a été effectuée à partir du fond topographique au 1/50.000, de photographies aériennes à 1/30.000 (mission IGN TOG31-300, 1979), et d'agrandissements au 1/5.000 de ces photographies

Le modelé régional s'avère représentatif du modelé sur le socle granito-gneissique togolais (cf. figure II-8) : les interfluves élémentaires se succèdent en moyenne tous les 2 kilomètres, et ne dominent les cours d'eau qui les limitent que de 20 à 25 m au plus.

L'examen stéréoscopique de photographies aériennes agrandies au 1/5.000 ème permet de localiser des buttes témoin, conformément au modelé-type défini au chapitre 1.

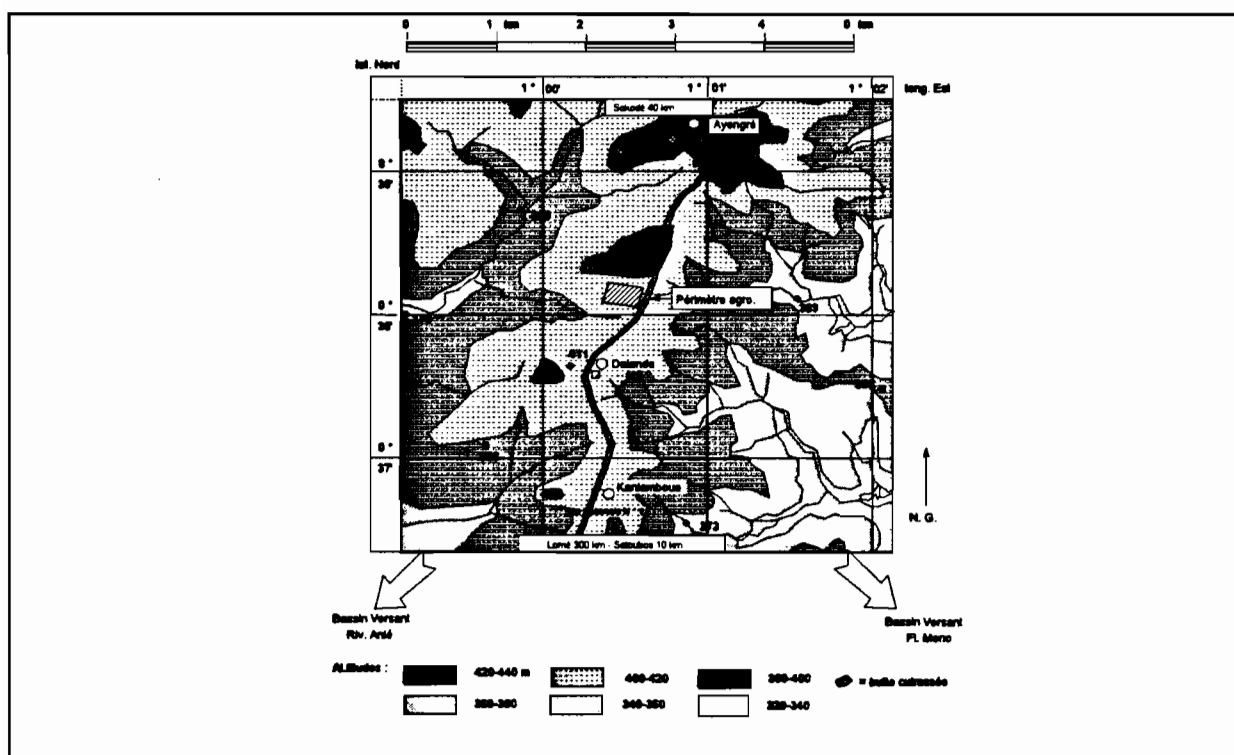


Figure II-8. Esquisse oro-hydrographique de la région d'Ayengré. D'après clichés IGN 1/30.000 ème (mission Tog. 31/300) et feuilles 1/50.000 ème Sokodé 3a et 4b (1969).

2.1.4. Pédologie de la région d'Ayengré

Le document cartographique disponible pour la région est un extrait de la carte pédologique au 1/200.000 ème dressée par A. LEVEQUE (1973). Ce document (cf. figure II-9) permet de relever la présence de sols ferrallitiques dans les zones les plus surélevées, conformément à la carte générale présentée pour le Togo en figure II-5.

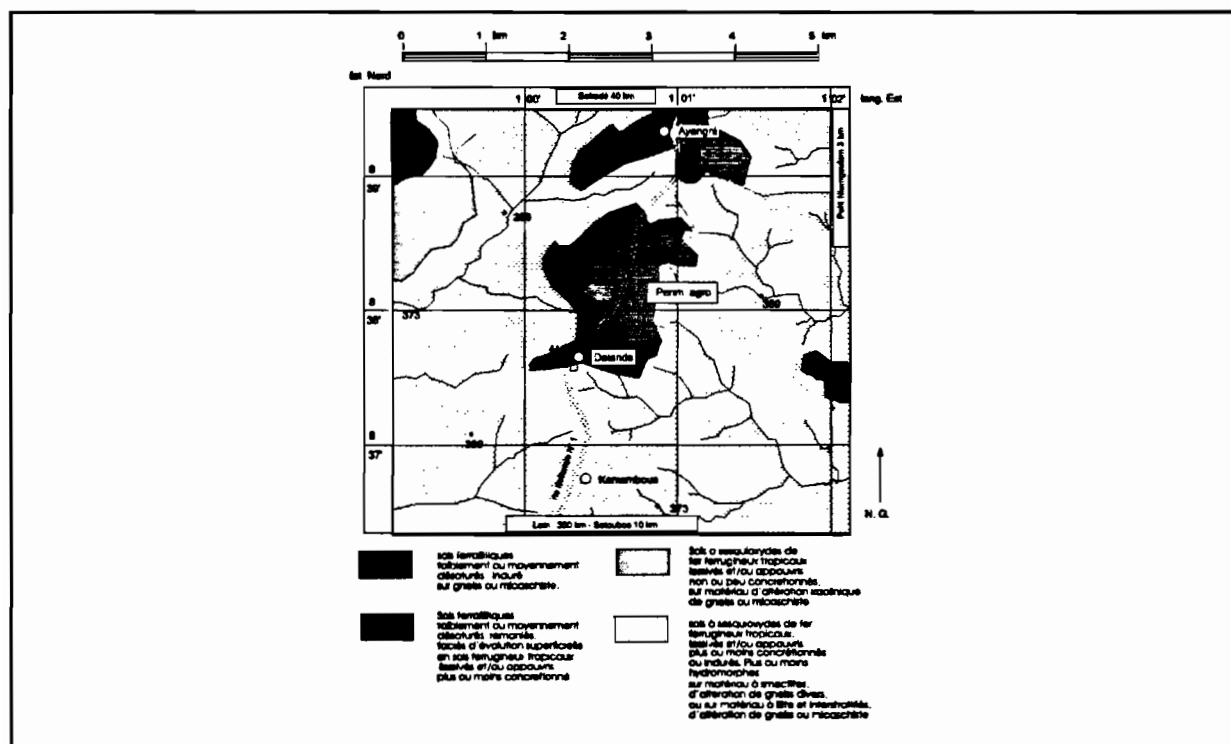


Figure II-9. Extrait de la carte pédologique au 1/200.000 ème. Région d'Ayengré. D'après LEVEQUE (1979).

Pour compléter ce document, un certain nombre de transects pédologiques ont été effectués dans le secteur (BLAVET et al. 1990, AFANOU, 1991; MATHE, 1993). Situés sur une coupe régionale Est-Ouest (cf. figure II-10 a), ces transects révèlent la présence d'altérations rouges sur les sommets surélevés, et la disparition de ces altérations et des cuirasses sur les interfluves les plus surbaissés. Ceci s'accorde avec la théorie, présentée dans le chapitre précédent, de l'ablation d'un manteau kaolinitique rubéfié ancien. Il est alors possible d'esquisser une reconstitution sommaire du modelé régional ancien selon cette théorie (cf. figure II-10 b).

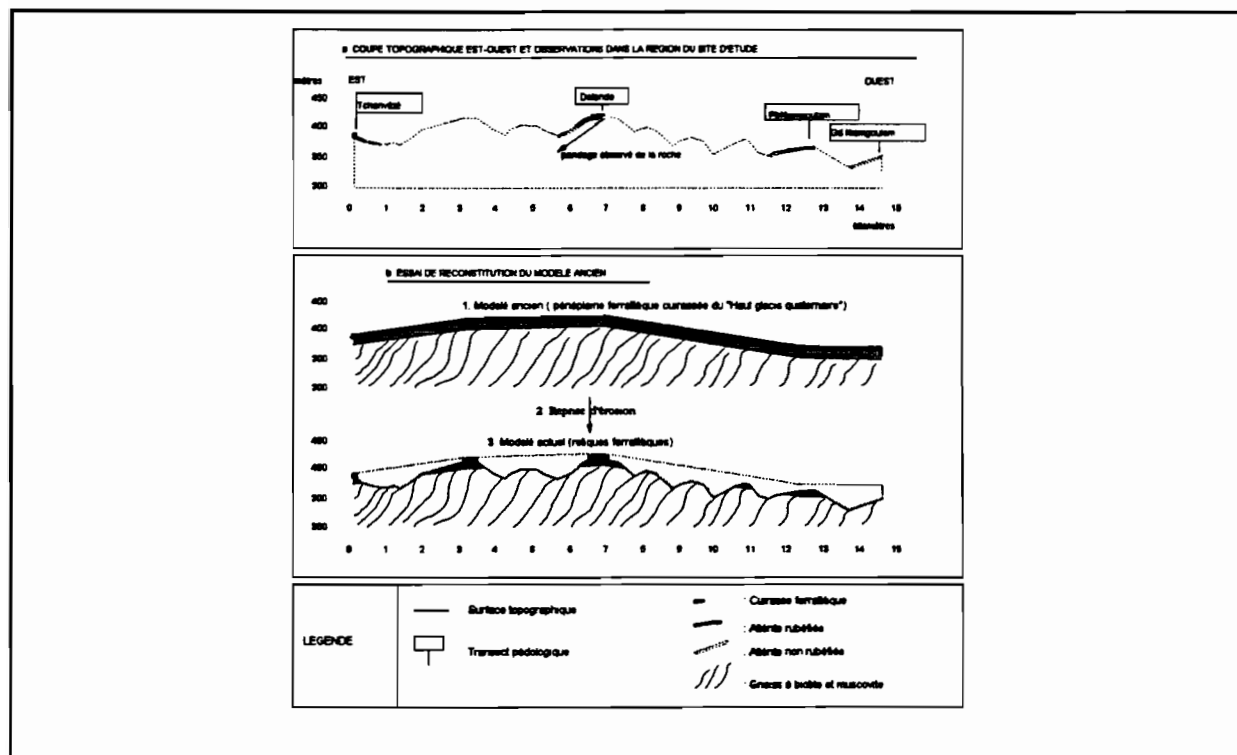


Figure II-10. Transect morpho-pédologique dans la région d'Ayengré et essai de reconstitution du modèle ancien.

2.2. Choix du versant

Au cours de la réalisation des transects de reconnaissance dans la région d'Ayengré, un d'entre eux a été effectué sur un versant englobant une station de culture du cotonnier mise en place par le CIRAD-CA. Ce versant a révélé l'existence d'une organisation morphopédologique conforme au versant-type du paysage de référence (présence d'une butte témoin cuirassée et de sols ferrallitiques en sommet de versant).

Il a finalement été retenu pour les raisons suivantes :

- une bonne représentativité du paysage de référence;
- un intérêt logistique (existence d'une infrastructure d'essai et facilités d'accès par la route).

Ce versant est localisé à Dalanda, à 300 km de Lomé, entre les coordonnées 1°00' et 1°01' de longitude Est, 8°38' et 8°39' de latitude Nord.

2.3. Conclusion du chapitre 2

En conclusion, un versant a été choisi au Togo, dans la région d'Ayengré, à 300 km au nord de Lomé. Ce versant est localisé à Dalanda, entre les coordonnées 1°00' et 1°01' de longitude Est, 8°38' et 8°39' de latitude Nord. Il présente des caractéristiques conformes au versant-type du paysage de référence:

- un climat tropical à saison sèche (régime pluviométrique monomodal; pluviosité de l'ordre de 1200 millimètres et évapotranspiration potentielle de l'ordre de 1700 millimètres);
- une position sur le socle granito-gneissique;
- un modelé peu accentué;
- une organisation des sols toposéquentielle de type "ferrallitique-ferrugineux" avec présence d'une butte témoin cuirassée en sommet de versant.

De plus, comme la plupart des versants de cette région, il fait l'objet d'une mise en valeur agricole.

Enfin, il englobe une station d'essai de culture cotonnière, ce qui nous permet de bénéficier d'une infrastructure de recherche.

CHAPITRE 3. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU VERSANT REPRÉSENTATIF

Ce chapitre traite d'un certain nombre de caractéristiques générales du versant représentatif :

- sa climatologie;
- sa géologie;
- sa topographie;
- sa ^{morpho-} pédologie;
- son occupation du sol.

3.1. La climatologie du versant

Compte tenu d'une certaine variabilité spatiale du climat, les données des stations météorologiques les plus proches doivent être complétées par des relevés sur le site. Aussi, celui-ci est-il équipé d'un pluviomètre, d'un bac d'évaporation d'eau libre, et d'un thermomètre sous abri.

Les paragraphes suivants présentent les résultats obtenus pour l'ensemble des chroniques disponibles.

3.1.1. Pluviosité

Un pluviomètre, de type "association", a été mis en place en 1974. Il est situé en zone dégagée, au milieu du versant, et à 2 mètres de la surface du sol. Les relevés sont effectués quotidiennement à 8 heures du matin. Avec un tel appareillage, l'incertitude absolue sur une

mesure est de l'ordre de 0,1 millimètre, ce qui donne une incertitude sur la pluviosité annuelle de l'ordre de 40 millimètres.

La pluviosité moyenne annuelle est de 1158 mm pour l'ensemble de la période 1974-1992. Le tableau III-1 permet de vérifier le caractère monomodal du régime pluviométrique, centré sur la période juillet-août-septembre. On remarque également que les précipitations cessent assez brutalement à la fin du mois d'octobre.

	jan	fev	mar	avr	mai	jun	jui	aou	sep	oct	nov	déc	Total
P moyen (mm)	3.6	13.4	42.4	93.5	123.4	163.7	208.5	214.4	193.2	84.2	9.6	7.8	1157.7

Tableau III-1. Pluviosités moyennes mensuelles sur le site. Période 1974-1992.

On peut comparer les relevés obtenus sur le site avec ceux qui se rapportent au pluviomètre du Centre de Formation Technique Agricole d'Adjengré (CFTA), situé à 1 km au nord de la station IRCT (cf. figure III-1). Ces deux pluviomètres sont de modèle identique, et sont implantés à la même côte par rapport à la surface du sol. Leurs résultats sont donc à fait comparables. On constate une similarité entre les relevés obtenus sur le site et ceux du pluviomètre voisin. Ceci permet de valider le bon fonctionnement du pluviomètre implanté sur le site. Par rapport à la station météorologique de Sotouboa, la diminution des précipitations en saison des pluies (65 mm /an de moins sur le site qu'à la station météorologique) peut s'expliquer par le gradient latitudinal de pluviosité.

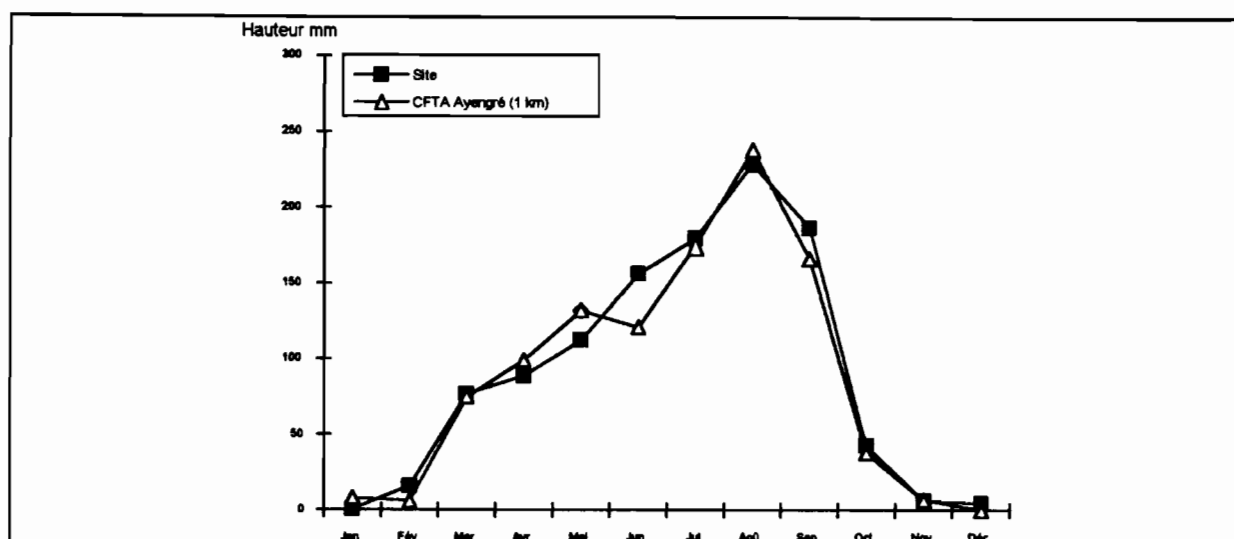


Figure III-1. Comparaison des moyennes mensuelles sur le site et à 1 km du site. Période 1981-1985.

Sur le site, le coefficient de variation interannuel de pluviosité est de 46 % pour l'ensemble de la période 1974-1992, ce qui peut sembler important. Toutefois, aucune tendance particulière dans le temps vers une diminution ou une augmentation des précipitations ne se dégage de cette chronique (cf. figure III-2). On note, d'autre part, que l'ensemble de la période correspondant à l'étude proprement dite, soit 1989-1992, s'écarte peu de la moyenne annuelle (cf. tableau III-2).

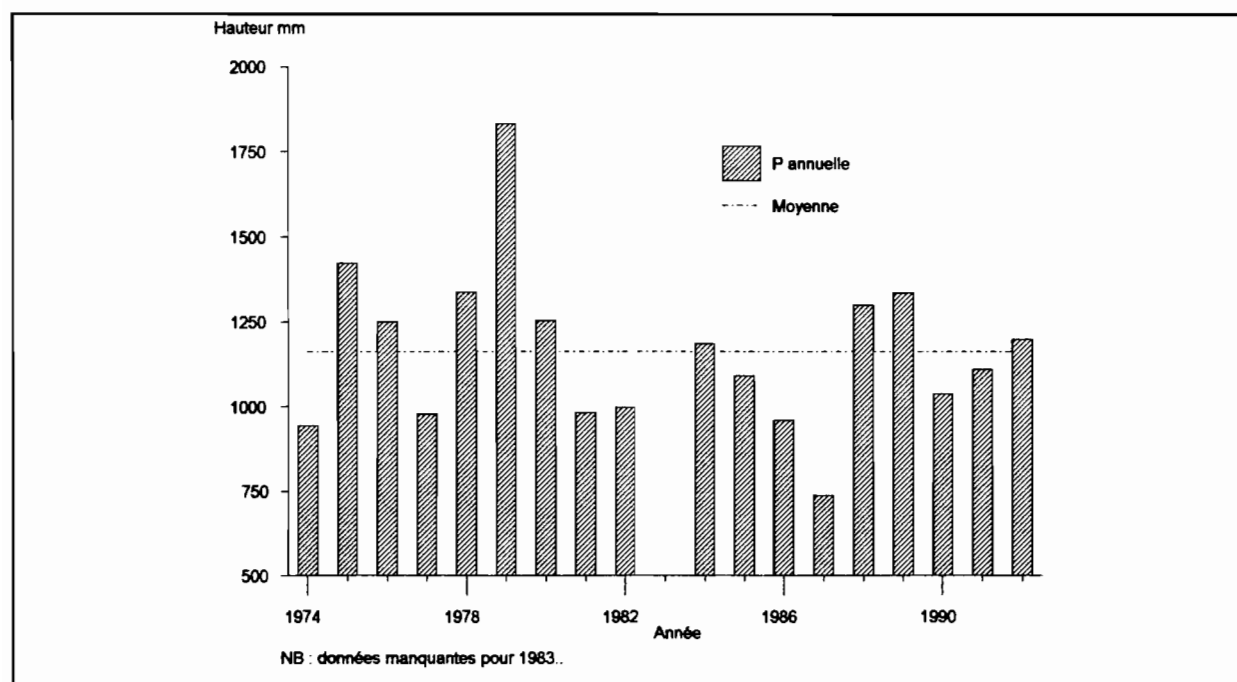


Figure III-2. Variations de la pluviosité totale annuelle sur le site au cours de la période 1974-1992.

Année	P annuel mm	écart relatif à la moyenne (1158 mm)
1989	1349	+16.6 %
1990	1077	-7 %
1991	1207	+4.3 %
1992	1206	+4.2 %

Tableau III-2. Comparaison entre la moyenne de pluviosité annuelle de la période 1974-1992 et les pluviosités annuelles pour la période de cette étude.

Le tableau III-3 présente la variabilité de la pluviosité mensuelle pour la période 1974-1992 (médiane, extréma, quartiles). Les extréma les plus élevés sont enregistrés en Juillet. Ce fait est à relier à l'influence de perturbations orageuses, qui peuvent se manifester sous forme de lignes de grains (WAUTHY, 1983) au Nord de la zone d'activité des pluies tropicales, et en début de la saison la plus pluvieuse. Pour la période 1989-1992 correspondant à cette étude, la figure III-3 montre que la pluviosité moyenne mensuelle s'écarte peu de la médiane. Seul le mois de Septembre est légèrement en dehors de l'intervalle interquartile. Ce phénomène est imputable en grande partie à une seule averse de 105 millimètres, enregistrée en septembre 1989.

	jan	fev	mar	avr	mai	jun	jui	aou	sep	oct	nov	déc
P médiane (mm)	2.3	21.6	45.5	90.5	108.5	163	202	225	188	72.5	6.8	4.6
minimum (mm)	0	0	0	4	50	50	58	104	102	4	0	0
maximum (mm)	27	55	121	172	228	331	518	301	327	202	67	78
amplitude interquartile (mm)	4	33	57	57	105	96	104	98	61	126	11	8

Tableau III-3. Variabilité de la pluviosité mensuelle sur le site. Période 1974-1992.

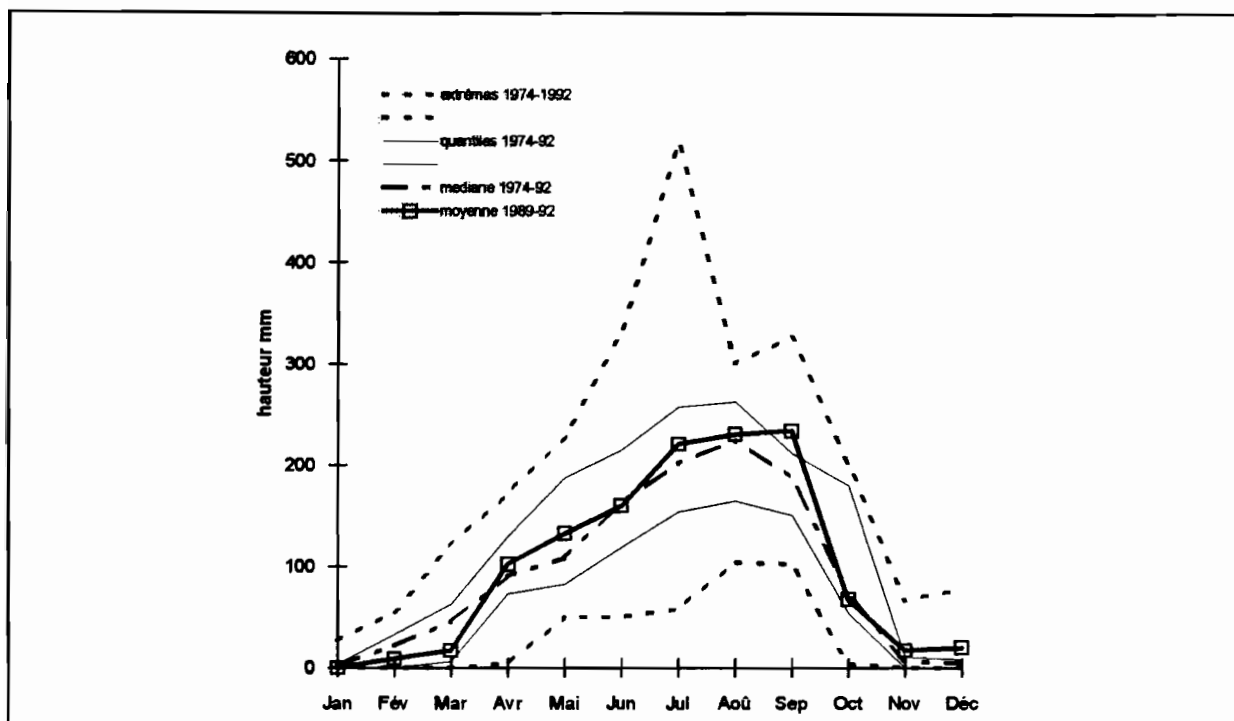


Figure III-3. Comparaison entre le régime pluviométrique au cours des 4 années de l'étude (1989-1992) et celui de la période 1974-1992.

L'histogramme de fréquence des hauteurs quotidiennes précipitées est présenté en figure III-4, pour la période de cette étude et pour la période 1974-1992. Il montre que la distribution des averses au cours de la période de cette étude est conforme au cas général. On notera que la moitié des pluies sont des averses inférieures à 10 millimètres, que les précipitations quotidiennes supérieures à 50 millimètres ne représentent que 3 cas sur 100 jours de pluies, et celles supérieures à 100 millimètres ne représentent que 3 cas sur 1000 jours de pluies.

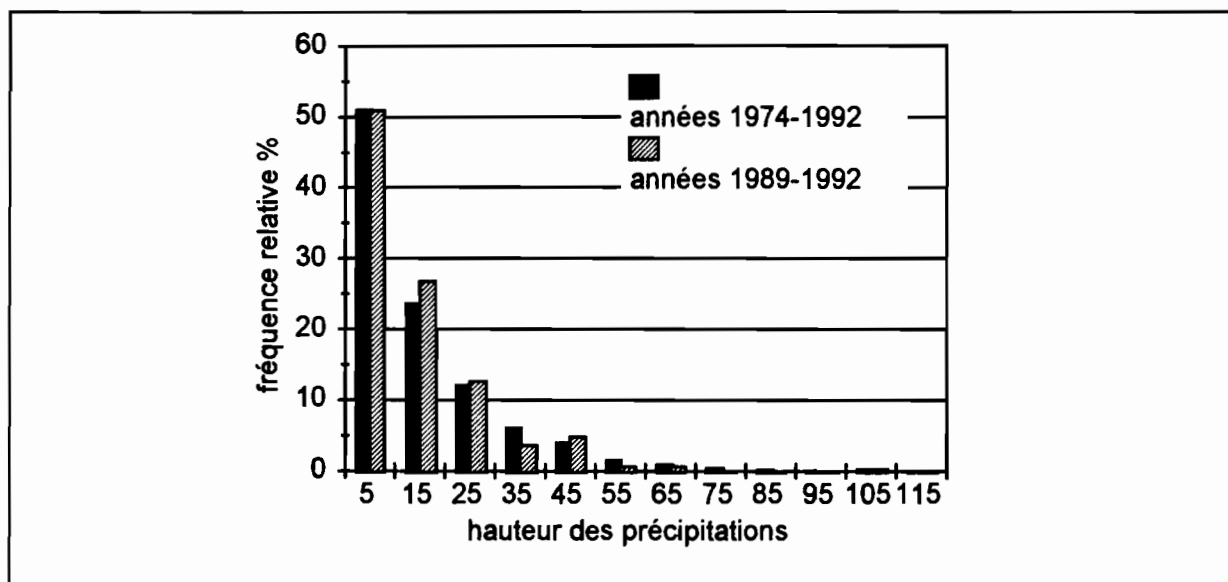


Figure III-4. Comparaison entre les fréquences des hauteurs quotidiennes précipitées pour la période de cette étude (1989-1992) et la période 1974-1992.

En résumé, les 4 années sur lesquelles se sont effectuées cette étude sont représentatives d'une année moyenne, tant sur le plan des précipitations totales annuelles, que sur celui du régime pluviométrique et du type d'averse.

3.1.2. Demande climatique

La détermination in situ de l'évapotranspiration réelle (ETR) peut théoriquement s'effectuer à l'aide d'évapotranspiromètres (RIOU et al., 1985; PETERSCHMITT et KATERJI, 1989), ou encore par des méthodes micro météorologiques (KATERJI et PERRIER., 1983; L'HOMME et al., 1982; PETERSCHMITT et KATERJI, 1989; BOULARD et al., 1991). Mais ces déterminations nécessitent un appareillage délicat et de nombreuses mesures ponctuelles afin d'obtenir des valeurs représentatives au dessus d'un couvert végétal donné. Elles sont donc surtout réservées à des stations bioclimatologiques. Dans les autres cas, on a plutôt recours à une estimation indirecte de l'évapotranspiration par le biais de grandeurs qui sont fonction des conditions climatiques. Ces estimateurs permettent de caractériser une demande climatique qui intervient de manière importante dans l'évapotranspiration réelle. Ils

peuvent être calculés en condition normalisée afin de permettre la comparaison entre sites. Deux estimateurs sont classiquement utilisés : l'évapotranspiration PENMAN (ET_{Penman}) et l'évapotranspiration "potentielle" associée (ETP); l'évapotranspiration "d'équilibre" ou "standard" (ET_o). Toutefois, l'évaporation obtenue à l'aide de bacs d'évaporation standardisés constitue une alternative intéressante, par la relative simplicité de l'instrumentation mise en oeuvre, par la bonne représentativité spatiale des mesures, et par son caractère intégrateur des variations horaires (FUCHS, 1970; RIOU, 1975; DANCETTE, 1983). Cet estimateur représente "l'évaporativité atmosphérique", c'est à dire le flux auquel l'atmosphère vaporise l'eau à partir d'une surface d'eau libre (HILLEL, 1974). Ce flux dépend notamment des conditions atmosphériques (température, humidité de l'air, radiation, vitesse et turbulence du vent). Il tient compte des termes radiatifs et convectifs pris en compte dans les calculs de l'ETP. Dans des conditions normalisées, cet estimateur constitue une valeur de référence pour une région donnée, en permettant de comparer deux situations climatiques indépendamment du type de couvert végétal. On le désigne sous le terme "Evaporation Bac", en précisant le type de bac utilisé (bac "classe A" ou bac "Colorado"). L'évaporation bac s'avère généralement corrélable à l'Evapotranspiration potentielle (ETP) et l'Evapotranspiration standard (ET_o) (SEGUIN, 1975; DANCETTE, 1976; RIOU et al., 1985; POSS, 1991).

Le bac d'évaporation d'eau libre est de type "Colorado modifié ORSTOM". L'instrument est construit selon les normes retenues par l'équipe d'hydrologie de l'ORSTOM (G. DELFIEU, comm pers.). Il se présente sous la forme d'un bac carré de couleur noire de surface unitaire (1 m^2), enfoncé de 60 centimètres de profondeur dans le sol. Il émerge de celui-ci sur une hauteur de 10 centimètres. Une ceinture de 20 cm de large constituée de galets enfouis dans le sol est disposée autour du bac afin d'éviter les effets de rejaillissement d'eau dans le bac lors des pluies. Le bac est entouré d'un couvert herbacé arasé. L'eau, légèrement javellisée, est régulièrement renouvelée avant qu'elle ne commence à se troubler. Chaque jour, le niveau

d'eau dans le bac est remis à une cote de référence, indiquée par un pointeau fixe. La remise à niveau est effectuée au moment où sont effectués les relevés pluviométriques, par simple remplissage ou évacuation d'eau selon qu'il ait plu ou non. Le volume d'eau nécessaire à cette opération est mesuré en éprouvette graduée précise à plus ou moins 10 mm^3 près.

L'évaporation Bac est alors donnée par la formule :

$$E_{\text{bac}} (\text{mm/j}) = V/S + P_{j-1}$$

V = volume d'eau ajouté (terme positif) ou évacué (terme négatif) pour réajuster le niveau d'eau à la cote de référence (mm^3/j);

S = surface d'eau libre (mm^2);

P_{j-1} = précipitations totales des 24 heures précédent la mesure (mm/j).

L'incertitude absolue sur la mesure est alors donnée par la formule suivante :

$$\Delta E_{\text{bac}} = \Delta \left(\frac{V}{S} + P_{j-1} \right) = \Delta \left(\frac{V}{S} \right) + \Delta P_{j-1} = \frac{\Delta V}{|S|} + \frac{|V| \cdot \Delta S}{S^2} + \Delta P_{j-1}$$

avec

$$\Delta V = 10 \text{ mm}^3;$$

V $\cong 3 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$ (ordre de grandeur moyen des valeurs obtenues expérimentalement);

$$S = 10^6 \text{ mm}^2;$$

$\Delta S = 2 \cdot L \cdot \Delta L$ (L = longueur du bac = 10^3 mm) $\cong 4 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$, en considérant une imprécision ΔL sur la longueur du bac de 2 mm.

L'ordre de grandeur du premier terme en S (10^{-5} millimètres) est négligeable devant l'incertitude sur la mesure des hauteurs de pluie (10^{-1} millimètres). De même, le terme en S^2 est de l'ordre de ($4 \cdot 10^3 \times 3 \cdot 10^6 \times 10^{-12}$), soit $12 \cdot 10^{-3}$ millimètres. Ce terme est donc dix fois plus faible que l'incertitude sur la mesure des hauteurs de pluie, qui s'avère finalement constituer la source principale d'incertitude sur E_{bac} . L'évaporation du bac colorado modifié ORSTOM est

donc mesurée avec une incertitude absolue proche de celle obtenue sur P, c'est à dire 0.1 millimètres par jour et 40 millimètres par an.

Les résultats obtenus sont résumés dans les paragraphes suivants.

La valeur moyenne de l'évaporation bac annuelle est de 1734 mm pour la période des relevés (cf. tableau III-4). Elle est minimale au coeur de la saison pluvieuse (90 mm en juillet). On constate que les valeurs d'évaporation quotidienne se situent le plus souvent entre 2 et 9 millimètres (cf. figure III-5).

Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Total
178	194	224	178	132	116	90	105	96	125	148	148	1734

Tableau III-4. Evaporation bac sur le site. Moyenne mensuelle pour la période 1989-1992.

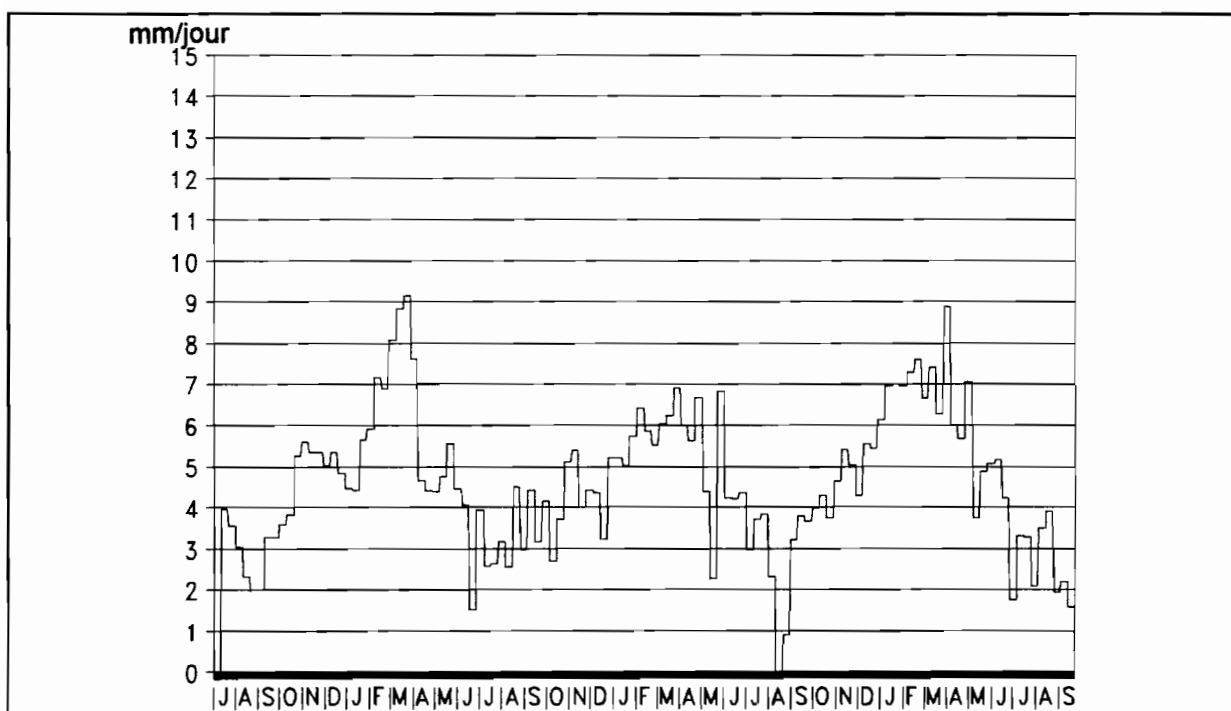


Figure III-5. Evaporation bac sur le site. Moyenne quotidienne par pentade. Période du 1.07.1989 au 31.09.1992.

La corrélation entre l'évaporation bac et l'ETP Sokodé peut se visualiser sur la figure III-6. Ces deux variables peuvent être linéairement corrélées ainsi que le montre la figure III-7.

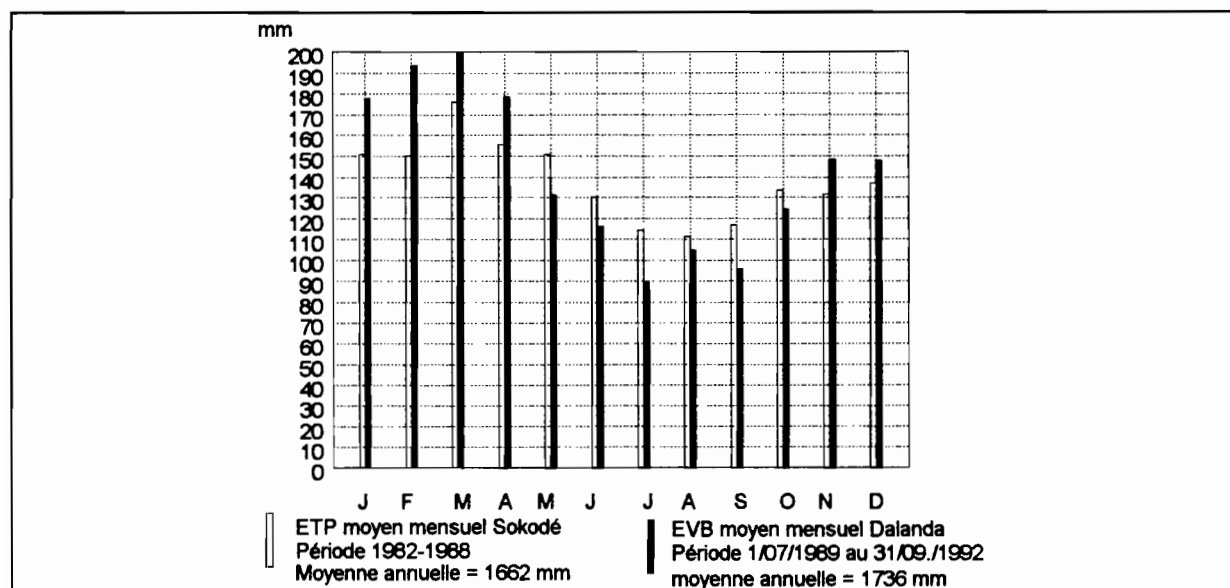


Figure III-6. Comparaison entre l'évaporation bac sur le site et l'ETP calculé à Sokodé.

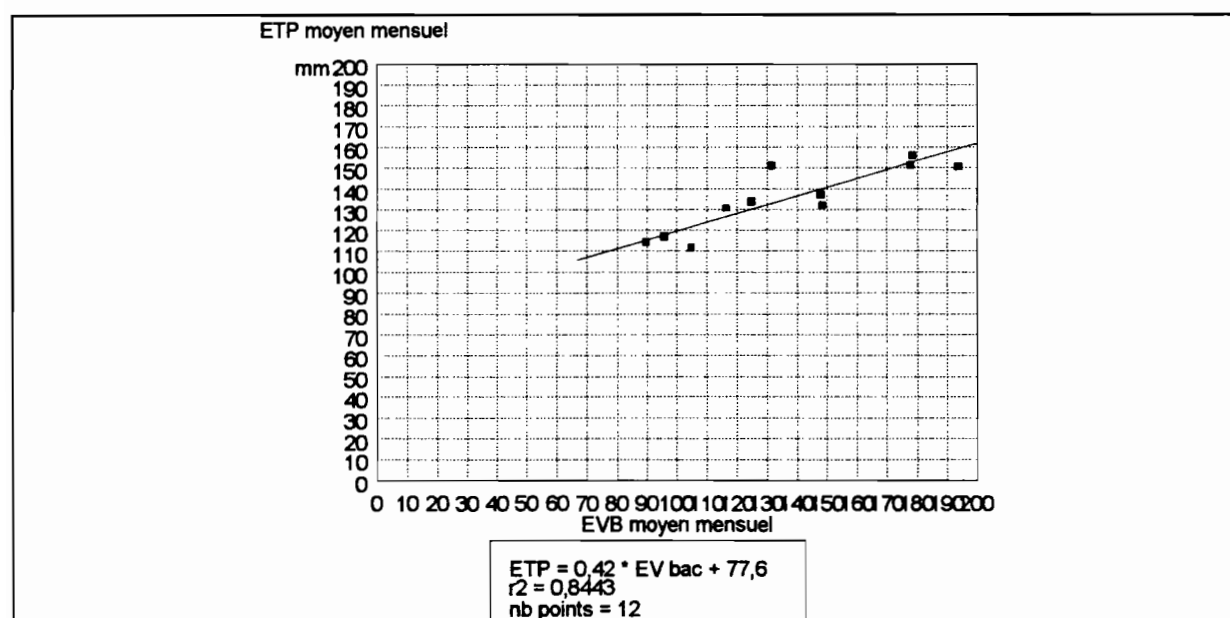


Figure III-7. Relation entre l'évaporation bac mesurée sur le site et l'Etp calculée à Sokodé.

3.1.3. Température

La température a été relevée sous abri au cours de la période 1990-1992. La valeur moyenne annuelle est de l'ordre de 25 ° Celsius, pour des valeurs maximales de l'ordre de 35 °

Celsius et des valeurs minimales de l'ordre de 15 ° Celsius (cf. figure III-8). Ces valeurs se révèlent en bon accord avec les données régionales (cf. tableau III-5).

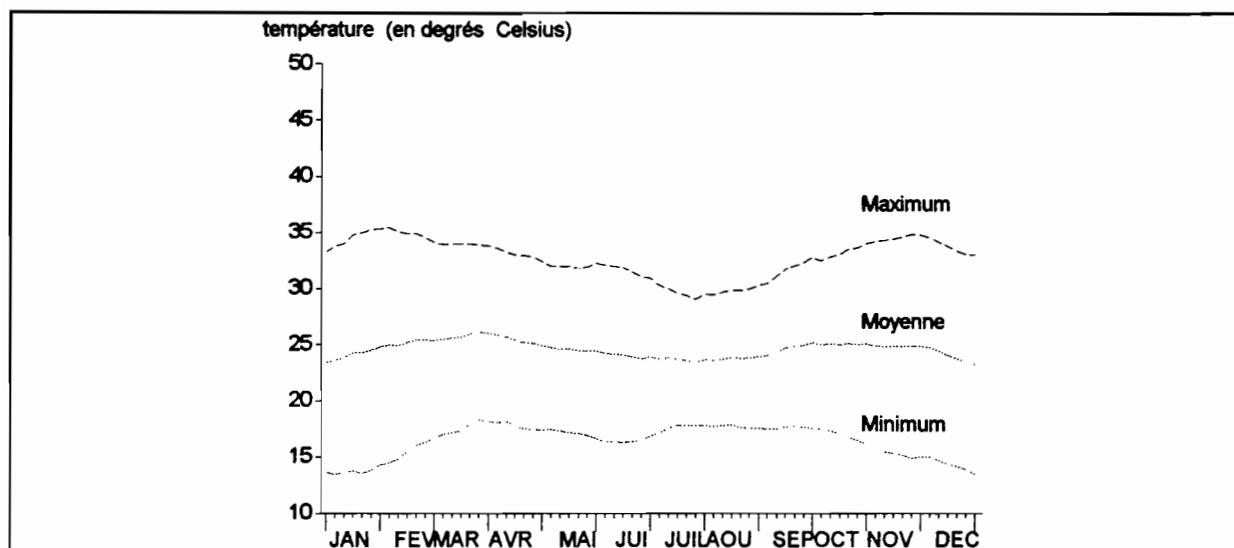


Figure III-8. Température moyenne pentadaire sur le site. Valeurs obtenues par moyenne glissante. Période 1990-1992

Mois	T° Sotouboa 1984-89	T moyen site 1990- 1992	T max site 1990-1992	T min site 1990-1992
Jan	25	24,1	34,4	13,7
Fév	27	25	35,0	15,0
Mar	28,5	26,0	34,5	17,5
Avr	28,3	25,6	33,1	18,1
Mai	27,4	24,6	31,8	17,4
Jun	25,8	24,1	31,8	16,3
Jul	24,7	23,7	30,4	17,1
Aoû	24,8	23,5	30,0	17,0
Sep	25,1	23,7	30,6	16,8
Oct	26,0	24,6	32,8	16,4
Nov	26,1	23,8	33,4	14,3
Déc	24,5	24,2	34,0	14,4

Tableau III-5. Comparaison des températures relevées sur le site (période 1990-1992) et de celles relevées à la station météorologique la plus proche (Sotouboa, période 1984-1989).

3.2. La géologie du versant

Un affleurement rocheux est observé dans la partie Nord-est du sommet d'interfluve. Celui-ci, large de quelques mètres, suit un axe d'allongement selon la direction NNO-SSE, et

montre un faciès lithologique clair, riche en muscovite. La roche, déjà altérée et localement ferruginisée, se débite facilement au marteau, en feuillets irréguliers d'épaisseur centimétrique. On peut également observer des plans de clivage secondaires séparés de quelques dizaines de centimètres. L'ensemble définit un pendage d'environ 45 degrés incliné vers l'Ouest. Ce pendage est subparallèle au plan de surface du versant, ce qui peut avoir une importance dans le mode d'infiltration des eaux. Au microscope, cette roche révèle uniquement la présence de quartz et de muscovite, à l'exclusion de toute autre espèce minérale, et notamment des feldspaths. Ceci la rattacherait aux leptynites du groupe d'Agbandi définies par AICARD (1957).

Par ailleurs, quelques filons de quartz sain de puissance métrique émergent en surface au tiers supérieur du versant dans la partie Nord-Ouest du site. Ces filons s'alignent selon une direction parallèle à l'axe d'élongation de l'affleurement de gneiss, ce qui semble indiquer une orientation assez régulière du pendage de la roche sur tout le versant. Dans les altérations pédologiques à structure conservée, on retrouve aussi fréquemment des filons de quartz non ferruginisés, anguleux et jointifs, de puissance décimétrique, que l'on ne peut confondre avec des alignements de quartz d'origine allochtone ("stone-line").

Enfin, dans les arènes observées à la base des profils au sommet et en milieu de l'interfluve (respectivement à 15 mètres et 6 mètres de profondeur dans le sol), on observe la présence de biotite associée à la muscovite, cette dernière restant cependant toujours largement dominante. Quelques rares plagioclases, reconnus au microscope polarisant, accompagnent également les micas et les quartz. Cette arène se rattache ainsi à un faciès sain à deux micas observé sur des versants fortement érodés situés à quelques kilomètres à l'est du site.

En définitive, on retiendra qu'il existe sur le site une certaine variabilité de la proportion relative de biotite et de muscovite dans le gneiss, difficile à préciser dans le détail. Ceci n'est d'ailleurs pas surprenant pour de telles formations métamorphiques. L'affleurement de sommet à quartz et muscovite pourrait témoigner d'une plus grande résistance à l'altération du faciès leucocrate acide, ce qui expliquerait sa localisation préférentielle en sommet d'interfluve. /ck

3.3. La topographie du versant

Un levé topographique détaillé a été réalisé sur un secteur de 51 hectares s'étendant entre le sommet d'interfluve et l'axe de drainage (cf. figure III-9). Ce secteur englobe les parcelles de la station agronomique, qui sont situées approximativement en milieu de versant. En fonction de la configuration générale du modelé, nous avons choisi une maille planimétrique de 30 mètres, qui représente environ 600 points d'observation (cf. figure III-10). L'altimétrie a été relevée au tachéomètre avec une précision centimétrique. Le relevé a été complété par la recherche systématique de ravines et la localisation des nids de *macrotermes*.

Les points altimétriques figurant sur une maille, nous avons obtenu directement un modèle numérique de terrain (MNT) de type "raster". L'analyse de ce MNT a été effectuée à l'aide du logiciel Demiurge (DEPRAETERE, 1992). Ce logiciel propose deux modes de calcul : un mode dit "centré" (au droit des points initiaux) et un mode dit "maillé" (au centre d'une maille de 4 points). Puisque certains paramètres ne se calculent qu'en mode centré, nous avons choisi ce mode pour tous les fichiers dérivés du MNT.

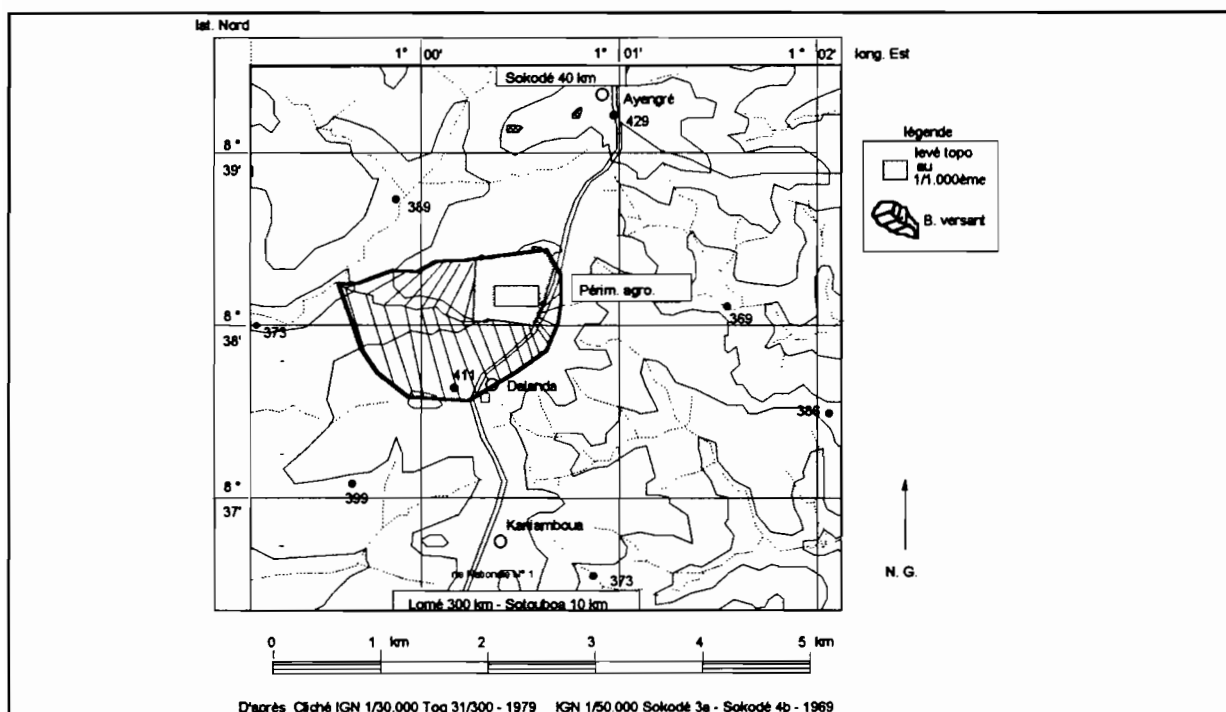


Figure III-9. Délimitation du secteur topographié sur le bassin versant élémentaire

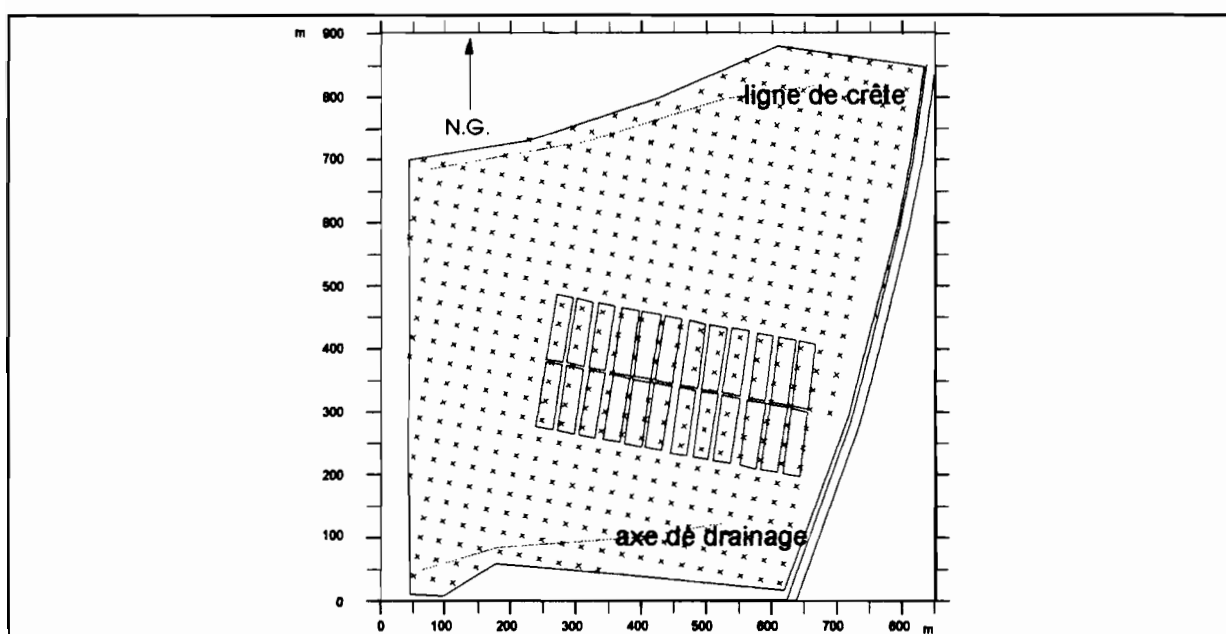


Figure III-10. Maille du levé altimétrique

3.3.1. Altimétrie

La dénivelée absolue entre le sommet d'interfluve et le thalweg est comprise entre 20 et 25 mètres (cf. figure III-11 a). Au nord-ouest du site, une surface surélevée cuirassée apparaît

à la côte absolue de 420 mètres. Elle est séparée du reste de la surface topographique par un escarpement abrupt. Plus en aval, les courbes de niveau présentent une incurvation faible et régulière. Prenant d'abord l'aspect d'une cuvette évasée dans sa partie amont (secteur sud-est), le bas-fond se resserre vers l'aval et s'entaille à l'extrémité sud-ouest en un étroit marigot dont le lit est situé à environ 1 mètre sous la côte altimétrique des berges. En dehors de cet axe de drainage, aucune ravine ne préexistait ou ne s'est développée au cours de la période de cette étude

3.3.2. Formes du terrain

Une première analyse du modelé a été effectuée en se basant sur une typologie des formes basée sur l'altitude relative de la maille centrale par rapport à ses voisines, sur une fenêtre de 3x3 mailles. La typologie proposée dans le logiciel Demiurge fournit pour le MNT 3 formes élémentaires : crête, versant et talweg. Cette analyse permet de retrouver avec précision la ligne de crête (cf. figure III-11 b).

3.3.3. Pente et unités de modelé

La pente correspond à la dérivée première de l'altitude par rapport aux distances. Elle a été calculée par la détermination de plans élémentaires de régression entre 4 points du MNT (cf. figure III-11 c). La carte des pentes obtenue souligne l'escarpement créé, au nord ouest du Secteur, par la butte témoin cuirassée. En dehors de cet escarpement, le sommet de versant apparaît aplani. La pente s'accroît légèrement en milieu de versant, puis diminue à nouveau vers l'aval. Ceci traduit un passage de formes convexes dans la partie supérieure du versant (pentes s'accroissant vers l'aval) vers des formes concaves dans sa partie inférieure (pentes

diminuant vers l'aval). On visualise ce passage sur un profil en long généralisé obtenu en reliant les altitudes à la distance à l'exutoire (cf. figure III-12).

Un relevé altimétrique plus détaillé effectué sur deux transects permet de constater l'existence d'une deuxième rupture de pente atténuée (cf. figure III-13). On retrouve donc, en définitive, les 4 unités de modelé du versant-type présentées en figure I-7.

3.3.4. Convexité

Pour localiser la deuxième rupture de pente à l'échelle du site, il a été nécessaire de procéder à une dérivation supplémentaire en calculant la convexité verticale (cf. figure III-11 d). Pour obtenir cette donnée, nous avons calculé la pente de la droite de régression reliant en abscisse les altitudes aux pentes en ordonnée. Ce calcul a été effectué sur un environnement de 3x3 mailles du MNT. Le résultat obtenu permet bien évidemment de retrouver le passage général de formes convexo-planes à des formes concaves en milieu de versant. Mais il souligne de surcroît l'existence de la deuxième rupture de pente, qui correspond à une étroite bande convexo-plane approximativement parallèle à l'axe de drainage, et située au sein de la zone concave de l'aval.

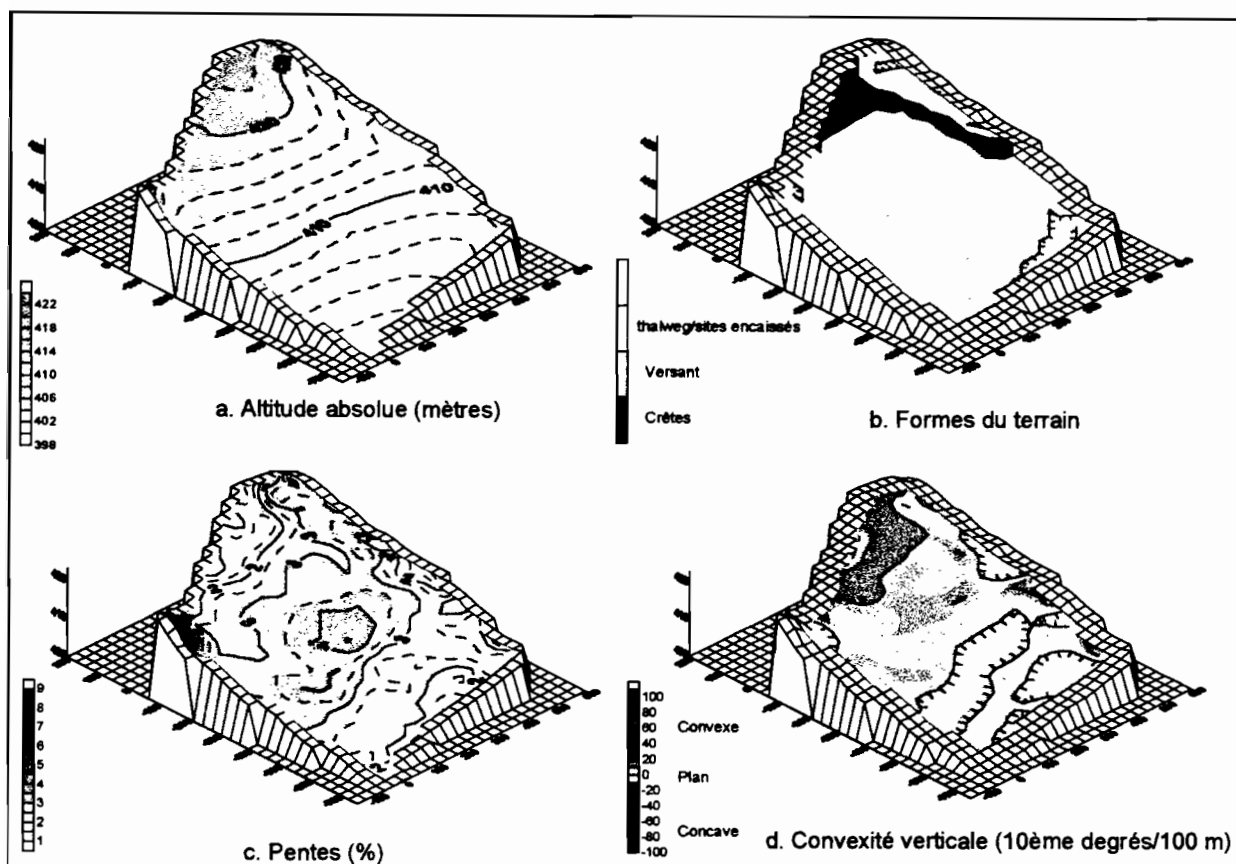


Figure III-11. Caractéristiques topographiques du versant.

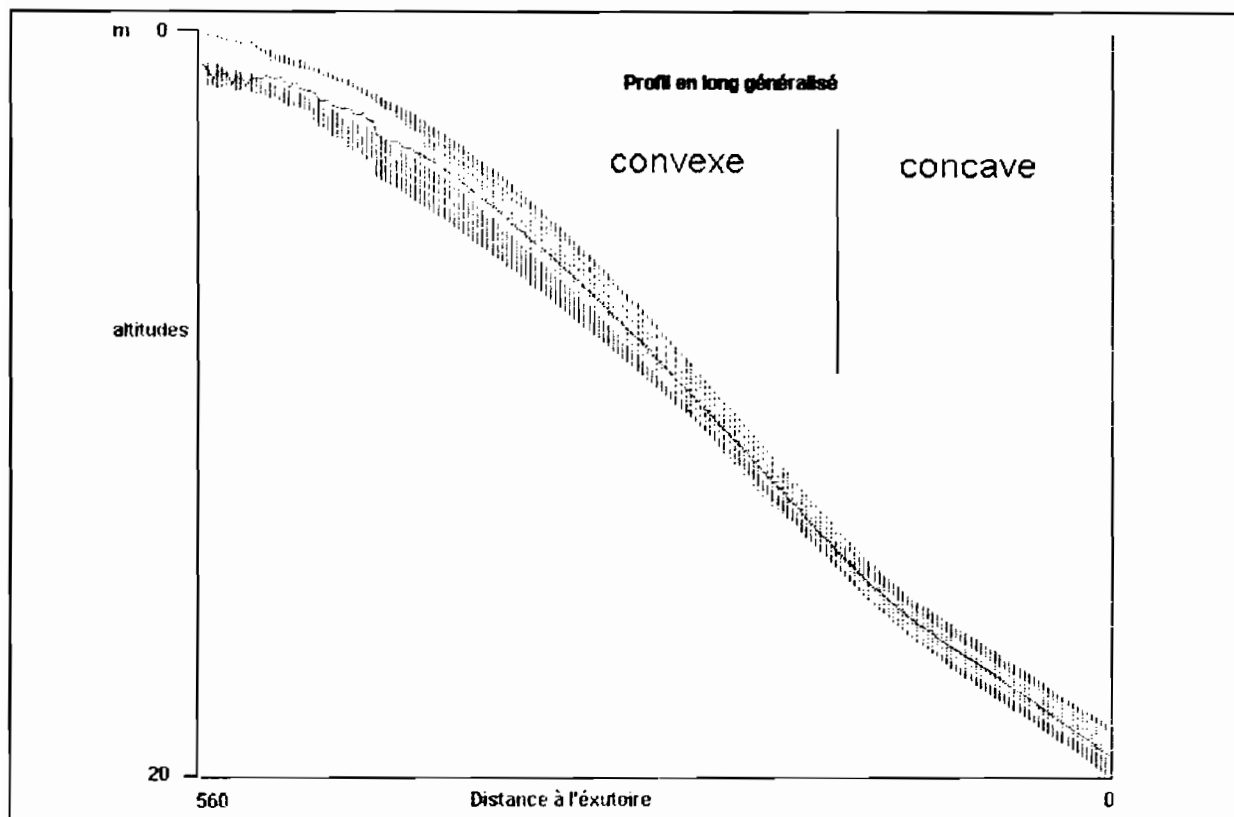


Figure III-12. Profil en long généralisé de la partie centrale du site.

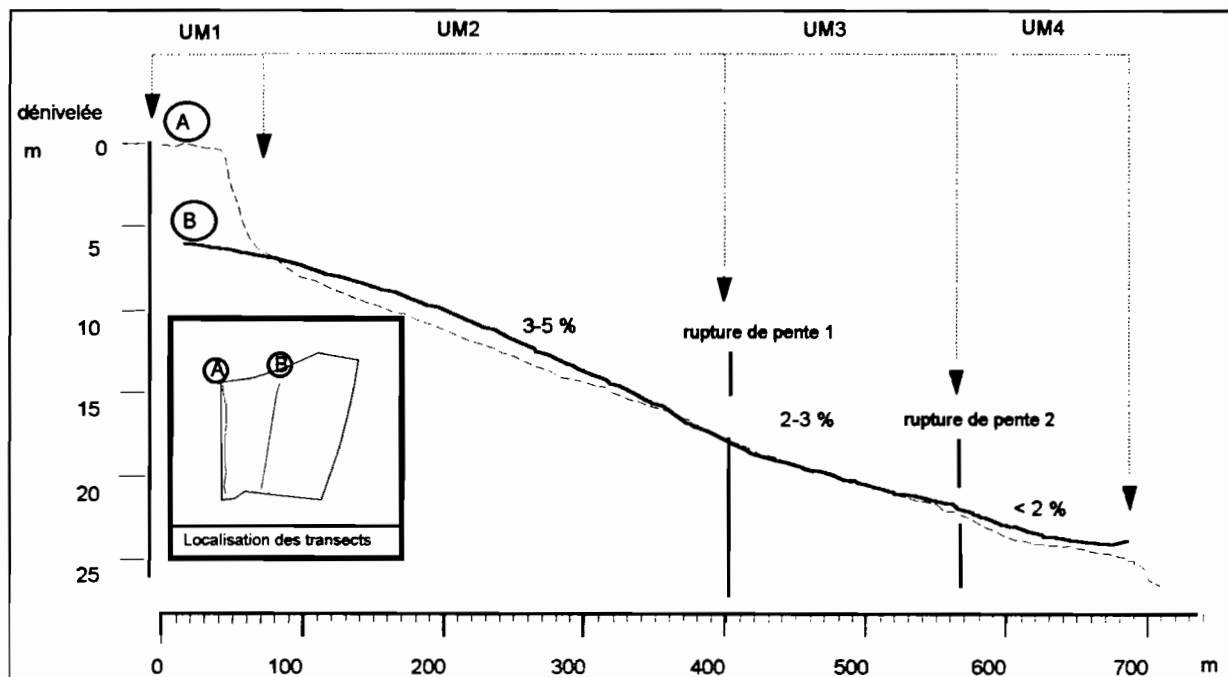


Figure III-13. Profil en long détaillé sur deux transects
(distance moyenne entre 2 relevés altimétriques = 5 mètres)

3.4 La morpho-pédologie du versant

Afin de recouper la majorité des différenciations pédologiques observables sur le versant, quatre transects de fosses pédologiques (cf. figure III-14) ont été implantés suivant l'axe de plus forte pente et l'axe de drainage (soit 35 fosses au total, de 3 à 7 mètres de profondeur).

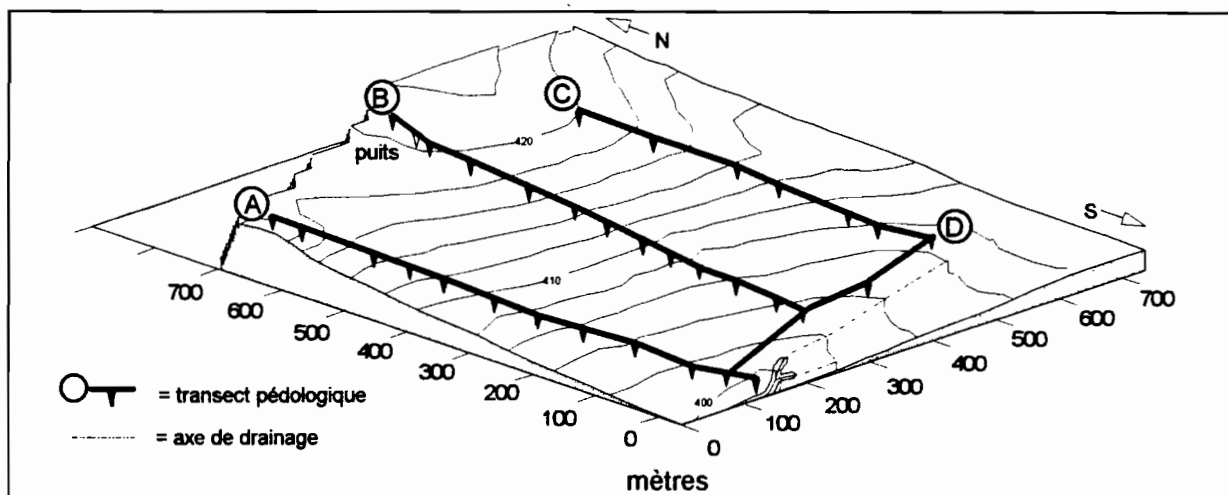


Figure III-14. Implantation en transects des fosses pédologiques

Des unités morpho-pédologiques ont été identifiées à partir de la description des fosses pédologiques, et d'une reconnaissance d'unités de modelé par stéréo-photo-interprétation d'un couple de photographies aériennes (photos de la mission IGN Tog. 31/300 agrandies au 1/5.000 ème).

Cette reconnaissance morpho-pédologique a montré qu'il existe, sur ce versant, trois domaines pédologiques étagés qui sont associés à des unités de modelé (cf. figure III-15). Ainsi, on trouve un premier domaine amont pédologique (domaine ferrallitique) qui s'étend jusqu'à mi-versant, et qui est associé à deux unités de modelé (U.M. 1 et 2). Un deuxième domaine pédologique apparaît plus en aval (domaine ferrugineux), et s'étend sur une troisième unité de modelé (U.M 3). Enfin, associé à une quatrième unité de modelé (U.M. 4), on trouve un troisième domaine pédologique qui ceinture l'axe de drainage (domaine hydromorphe).

En définitive, on retrouve bien sur ce versant l'organisation morpho-pédologique du versant-type.

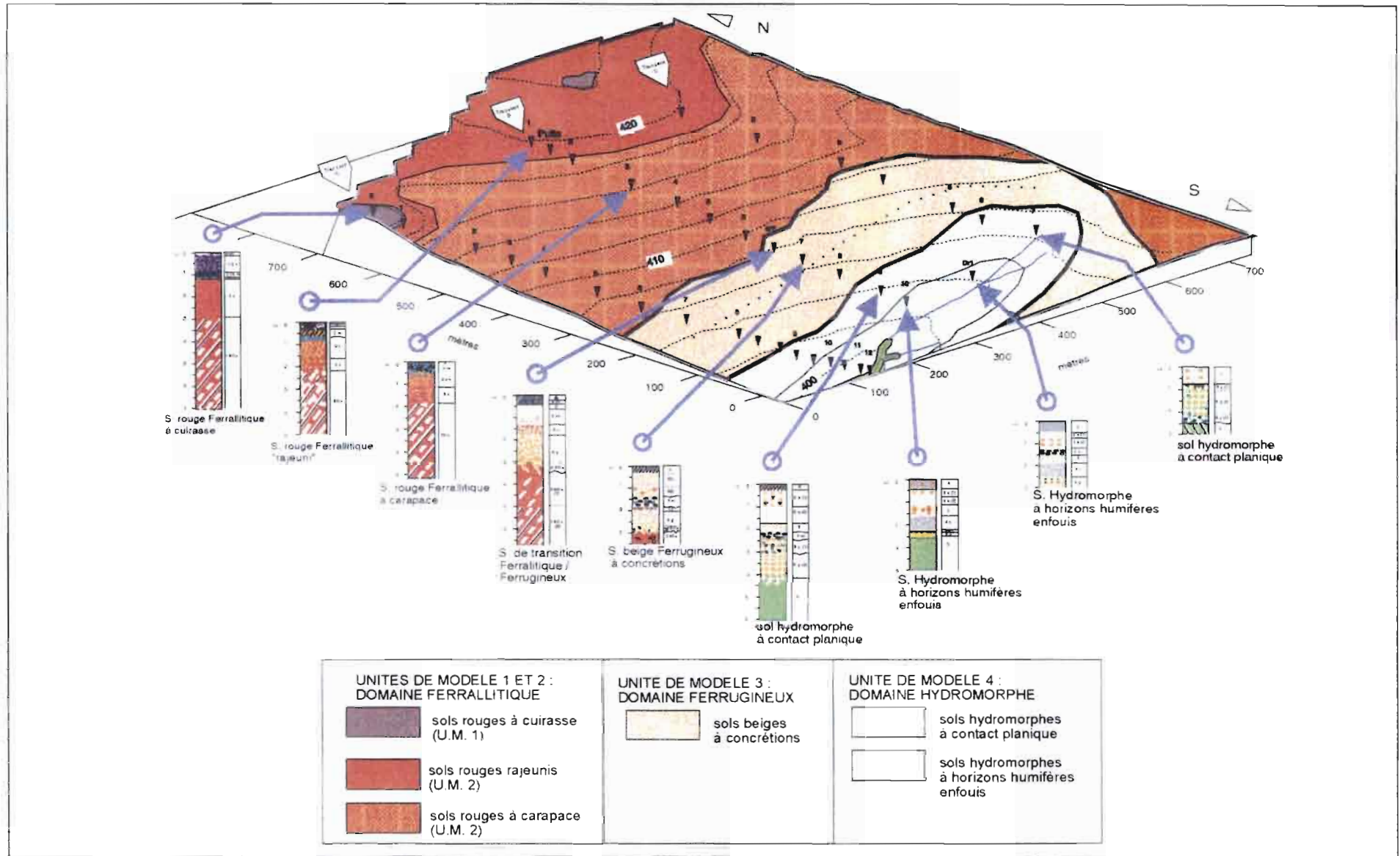


Figure III-15. Bloc-diagramme de reconnaissance morphopédologique sur le versant.

3.5. L'occupation du sol du versant

On peut distinguer deux périodes dans l'occupation du versant : une période ancienne, sans traces d'activités agricoles, et la période agricole actuelle.

3.5.1. L'occupation ancienne

Les premières activités humaines sur le versant apparaissent très anciennes : on trouve, en surface du sol et au pied de la butte cuirassée du sommet de versant, des outils sphériques de quartz saccharoïde d'environ 10 centimètres de diamètre, à surface usée mais non entièrement polie. Ces outils auraient pu servir de meule pour broyer du grain. Lors de l'ouverture d'une fosse pédologique dans la partie aval du site, un tel outil a été également découvert à près de 2 mètres de profondeur, juxtaposé à des fragments de poterie. La datation de ces objets n'a pu être effectuée, mais CORNEVIN (1988 rappelle que DAVIES (1954) décrit des outils de pierre analogues correspondant à une industrie vieille de plus de 10.000 ans (industrie sangoéne). Par ailleurs, on relève les vestiges de plusieurs hauts fourneaux ayant servi à l'extraction du fer (plusieurs amas circulaires d'un à deux mètres de diamètre, constitués de laitiers, c'est à dire de scories résiduelles de fonderie). De tels vestiges d'industrie sidérurgique sont à associer à la présence de la butte ferrugineuse cuirassée de sommet de versant, susceptible de fournir le minerai de fer. Ces "hauts fourneaux" ne sont pas nécessairement très anciens. En effet, la datation au carbone 14 de tels laitiers dans la circonscription voisine de Bassar les situent tout au plus entre 1400 et 1600 de notre ère (POSNANSKY et de BARROS 1979, in CORNEVIN, 1988). En outre, l'extraction du fer se serait poursuivie activement dans la région jusqu'à la fin du siècle dernier et n'aurait été stoppée qu'à partir de la colonisation allemande (PIRAUX, 1986). Compte tenu de la nécessité

d'alimenter les hauts fourneaux en bois, il apparaît donc probable que l'exploitation du couvert forestier aie été initiée de manière relativement précoce.

3.5.2. L'occupation actuelle

L'histoire agricole du versant débute avec la création des deux villages environnants (Dalanda et Ayengré), au cours de la période 1940-1950. Comme pour l'ensemble de la région (AFANOU, 1991), les agriculteurs cultivent donc le versant depuis moins de 50 ans.

La figure III-16 résume l'occupation du sol observée au 15 septembre 1990.

Hors des surfaces cultivées, on constate que la végétation se répartit le long du versant selon le schéma-type présenté en figure I-9 (pour un relevé botanique plus détaillé hors des surfaces cultivées, on pourra se reporter à l'annexe A). Ainsi :

- la partie supérieure du versant est occupée par un couvert forestier constitué, d'une part, d'une forêt claire à *Isoberlinia Doka* , et d'autre part d'une teckeraie. Dans la partie médiane, on trouve une association de surfaces cultivées et d'une savane anthropisée à *Hymenocardia acida*.

- plus en aval, on trouve une zone associant une savane herbeuse à cypéracées (*Fuirena umbellata*) et des cultures d'igname et de riz pluvial.

- enfin, on trouve la galerie forestière.

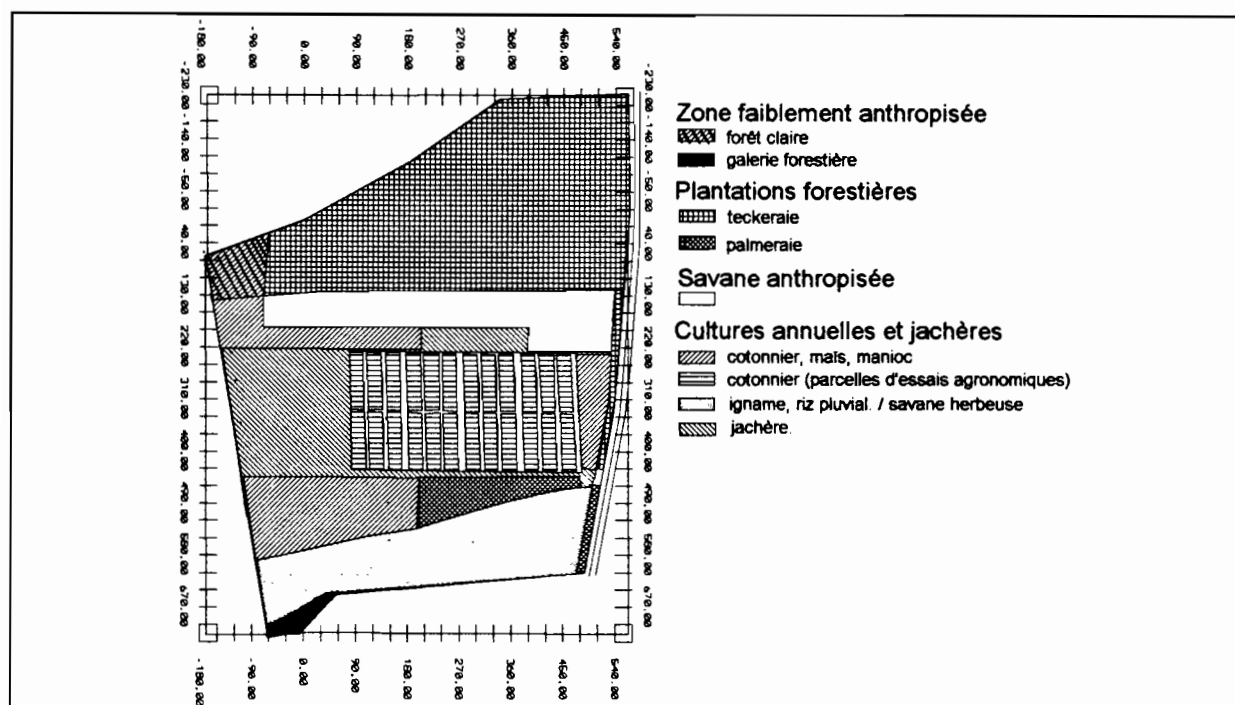


Figure III-16. Occupation du sol au 15/10/1990
09

En ce qui concerne l'occupation actuelle du sol par la faune, un relevé de la position des termitières de *macrotermes* a été effectué (cf. figure III-17). Celui-ci permet de constater que la densité des nids construits par ces espèces est plus importante dans la partie supérieure du versant, soit dans la partie boisée. Ceci n'est sans doute pas sans conséquence sur les possibilités d'infiltration de l'eau dans le sol puisque, d'après TANO et LEPAGE (1990), les galeries formées par ces termitières peuvent être à l'origine d'une macroporosité atteignant des profondeurs supérieures à 5 mètres (cf. figure III-18).

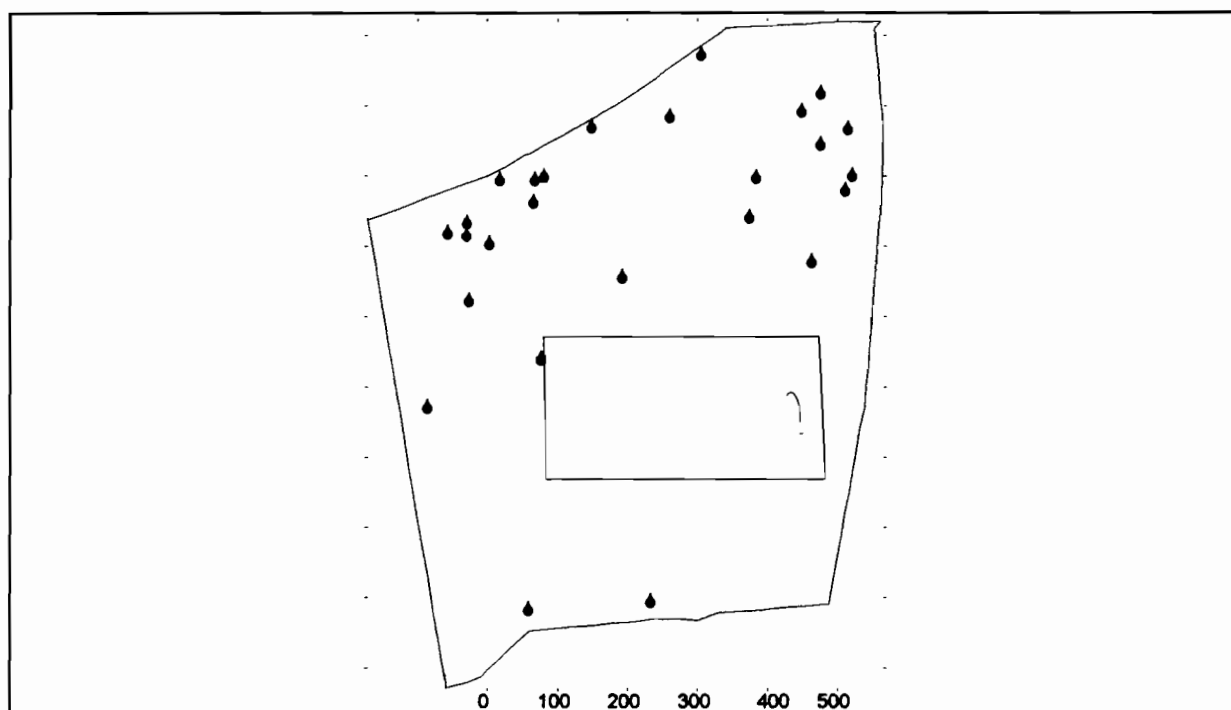


Figure III-17. Relevé des termitières actives de macrotermes

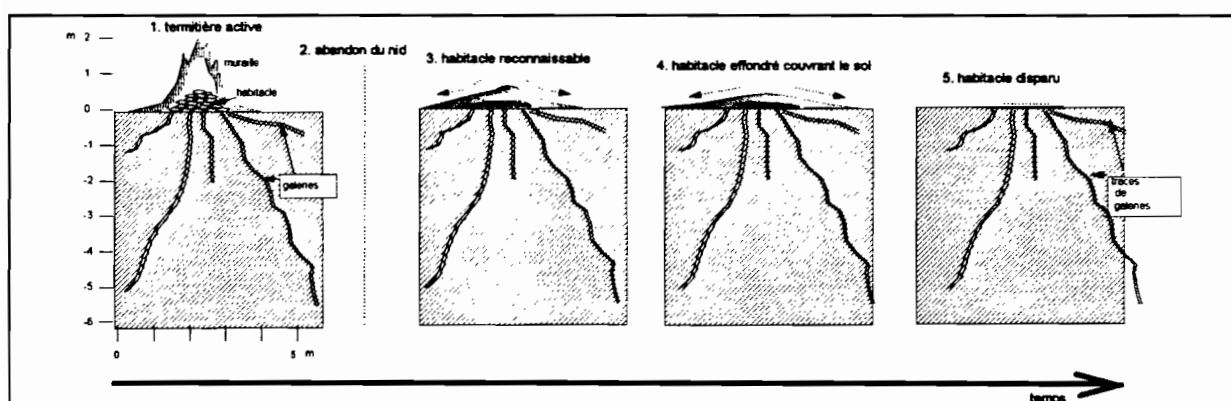


Figure III-18. Séquence d'évolution d'un nid de macrotermes créant une macroporosité tubulaire dans le sol.

3.6. Conclusion du chapitre 3

D'après ses caractéristiques, le versant choisi est bien représentatif du paysage de référence :

- le climat est de type tropical à saison sèche (pluviosité moyenne annuelle de 1158 mm pour l'ensemble de la période 1974-1992; régime pluviométrique monomodal centré sur la

période juillet-août-septembre). L'évaporation bac, bien corrélée à l'évapotranspiration potentielle, indique un déficit hydrique potentiel.

- le substratum appartient au socle granito-gneissique. En ce qui concerne sa variabilité spatiale, elle est limitée à la présence de filons quartzeux au sein d'une leptynite. Il n'y a donc pas de contraintes de cette sorte pour le choix de l'emplacement d'un dispositif de mesures et d'observations hydrogéologiques.

- la topographie révèle l'existence de deux ruptures de pente dans la partie aval du versant, conformément au modèle du versant-type.

- la reconnaissance des sols permet de retrouver les compartiments caractéristiques de la pédoséquence-type.

- enfin, la végétation se différencie le long du versant conformément au schéma-type.

Représenté.

CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

Après avoir précisé les caractéristiques générales du paysage de référence sur socle granito-gneissique à système de sol ferrallitique-ferrugineux et climat tropical à saison sèche, il nous a été possible de choisir un versant représentatif de ce paysage.

Ce versant est situé au Togo, dans la région d'Ayengré, à 300 kilomètres au nord de Lomé. Outre sa bonne représentativité du paysage de référence, ce versant présente des intérêts d'ordre pratique : accès aisé, existence d'une infrastructure de recherche (station agronomique de Dalanda).

L'étude de ce versant doit permettre d'acquérir une meilleure connaissance des composantes pédologique et hydrologique du paysage. En effet, le modèle pédologique reste à préciser à travers les caractéristiques de la couverture pédologique et sa genèse. D'autre part, le schéma hydrologique doit pouvoir être précisé pour ce qui concerne les nappes. Enfin, des relations entre ces deux composantes du paysage restent à établir.

Ceci nous amène, dans la partie suivante, à étudier l'**hydropédoséquence** sur le versant représentatif.

DEUXIÈME PARTIE :

L'HYDROPÉDOSÉQUENCE
SUR LE VERSANT REPRÉSENTATIF

Dans cette partie, il s'agit d'étudier les composantes pédologique (pédoséquence) et hydrologique (hydroséquence) du versant représentatif du paysage de référence, puis d'établir des relations entre ces composantes.

Dans le chapitre 4, nous examinerons **la pédoséquence** sur ce versant;

Le chapitre 5 sera consacré à l'étude de **l'hydroséquence** de ce versant;

Enfin, au chapitre 6, nous tenterons d'établir certaines **relations entre la pédoséquence et l'hydroséquence**.

CHAPITRE 4. LA PÉDOSÉQUENCE

Ce chapitre a pour objet l'étude de la couverture pédologique du versant.

Nous préciserons d'abord les méthodes mises en oeuvre pour l'acquisition, le traitement et la représentation de l'information pédologique. En effet, cet aspect méthodologique ne peut être négligé, car la couverture pédologique est "un objet naturel, continu et tridimensionnel" (BAIZE et al., 1992), dont l'étude et la représentation nécessitent un découpage conceptuel. Or, ce découpage n'est pas normalisé (cf. chapitre 1), de sorte que différents pédologues peuvent fournir différentes représentation du même objet (LEGROS et ARGELES, 1973; GIRARD, 1983).

Par suite, nous exposerons et interpréterons les résultats obtenus à l'aide de ces méthodes.

4.1. Les méthodes d'étude

Pour effectuer le découpage conceptuel de la couverture pédologique, nous avons adopté le concept de "volume élémentaire de résolution" (GIRARD, 1983), et celui, plus classique, d'horizon pédologique :

- le volume élémentaire de résolution (v.e.r.). Ce concept est basé sur le fait qu'à chacun des niveaux de résolution spatiale, on peut considérer qu'il existe des volumes pédologiques homogènes au regard des informations le définissant. Ces volumes sont appelés volumes élémentaires "de résolution". Ils se différencient par l'existence de contrastes par rapport aux

volumes adjacents et sont définis par un contenu (constituants, organisation, caractéristiques analytiques). A l'échelle du terrain, le volume élémentaire "de résolution" est assimilé à une portion homogène de la couverture pédologique observable à partir d'une fosse pédologique ou d'un sondage.

- l'horizon pédologique. L'ensemble des v.e.r. similaires définissent un volume qui, à l'échelle du terrain, est le plus souvent horizontal ou subhorizontal, a une épaisseur qui se mesure en centimètres ou décimètres, alors que ses dimensions latérales se mesurent en hectomètres ou en kilomètres. Ce volume correspond à l'horizon pédologique. On peut étudier la nature des horizons et leur répartition dans l'espace.

En suivant principalement ces concepts, nous avons constitué un outil de stockage de l'information concernant la couverture pédologique du site, puis avons acquis et traité cette information au cours de plusieurs phases sur le terrain et au laboratoire. Les paragraphes suivants en fournissent le détail.

4.1.1. Constitution d'un outil de stockage de l'information

L'informatisation des données pédologiques est utile pour faciliter certaines opérations impossibles à réaliser manuellement. Elle répond à deux soucis majeurs (KING et al., 1989; GIRARD et al., 1989; ARROUAYS et HARDY, 1993; BORNAND et al., 1993) :

- l'extraction de données selon des critères multiples et la visualisation des réponses sous forme textuelle (descriptions d'horizons, de solum) ou graphique (profils, coupes ou cartes discrétisées);

- le croisement des données avec d'autres informations (modèle numérique de terrain, données hydriques, ...).

Dans ce but, des fiches de saisie informatisées ont été conçues pour caractériser les volumes élémentaires de résolution (BLAVET, 1994). Ces fiches ont été créées sous un système de gestion de bases de données relationnel, dont une analyse sommaire est fournie en annexe B. Un exemple de fiche est présenté en annexe C.

Ces fiches utilisent trois tables de données principales reliées entre elles, ainsi que des tables secondaires qui forment un glossaire destiné à la saisie normalisée de l'information (cf. figure IV-1).

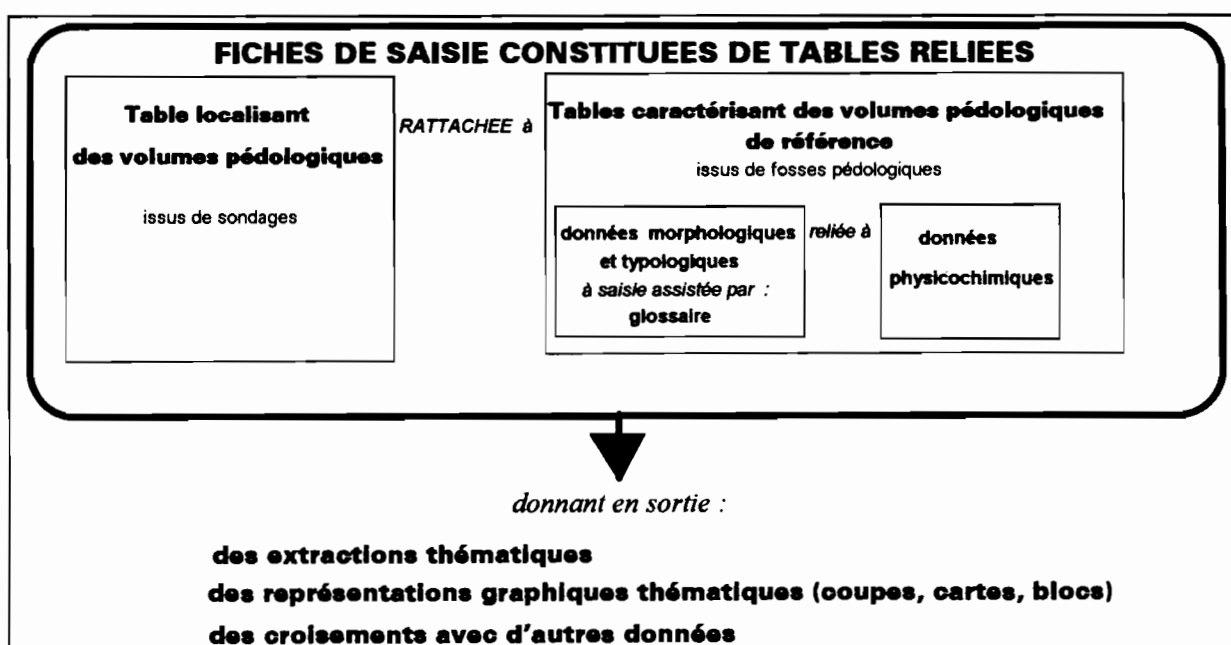


Figure IV-1. Structure générale et fonction des fiches de saisie informatisées.

Ces trois tables de données principales sont les suivantes :

- une table de description de v.e.r. de référence;
- une table de description de v.e.r. par rattachement aux v.e.r. de référence;
- une table de données physico-chimiques.

4.1.1.A. La table de description de v.e.r. de référence.

Cette table contient des champs numériques et alphanumériques servant au repérage, et à la description complète de volumes pédologiques. La description de l'enveloppe de ces volumes (forme, netteté des limites) et de leur contenu (matrice, traits pédologiques et arrangement) peut y être traduite en valeurs numériques et en modalités alphanumériques. Ces dernières utilisent la terminologie classique (MAGNIEN, 1980; LOZET et MATHIEU, 1986; A.F.E.S., 1988), ainsi que certaines précisions adaptées au terrain rencontré. Un résumé des principales variables descriptives prises en compte est présenté au tableau IV-1.

	PRINCIPALES VARIABLES DESCRIPTIVES	TYPE DE DONNEES
REPERAGE	<i>Observat(eur, rice)</i> <i>Date d'observation</i> <i>transect et fosse pédologique</i> <i>coordonnées x,y,z du volume</i>	liste de modalités alpha date numériques numériques
LIMITES	<i>forme</i> <i>netteté</i>	liste de modalités alpha (selon terrain) échelle relative alpha (5 mod)
CONTENU	<p>Racines <i>abondance</i></p> <p>Texture "terrain"</p> <p>Architecture des agrégats <i>Structure dominante</i> <i>Porosité macroscopique</i></p> <p>Comportement mécanique <i>Pénétrabilité (état humide),</i> <i>Cisaillement (état sec),</i> <i>Cimentation du matériau</i></p> <p>Phases meubles <i>couleurs Munsell (terrain, humide, sec)</i> <i>nature</i> <i>forme</i> <i>texture</i> <i>pourcentage</i></p> <p>Eléments grossiers <i>nature</i> <i>pourcentage</i></p> <p>Eléments figurés <i>nature</i> <i>pourcentage</i></p>	<p>échelle absolue alpha (5 mod) liste de modalités alpha (selon terrain)</p> <p>liste de modalités alpha (selon terrain) échelle absolue alpha (4 mod)</p> <p>échelle relative alpha (4 mod) échelle relative alpha (5 mod) idem</p> <p>liste de modalités alpha (selon terrain) idem idem idem échelle absolue alpha (10 mod)</p> <p>liste de modalités alpha (selon terrain) échelle absolue alpha (10 mod)</p> <p>liste de modalités alpha (selon terrain) échelle absolue alpha (10 mod)</p>

Tableau IV-1. Principales variables descriptives d'un v.e.r. de référence.

Certaines rubriques permettent une quantification de terrain par l'utilisation d'une échelle. qui est soit relative (quantification de l'importance d'une propriété), soit absolue (quantification

de l'abondance d'un élément de description). Par exemple, l'échelle de quantification relative employée pour caractériser le comportement mécanique comprend 4 ou 5 modalités selon la variable descriptive (très peu, ..moyennement, ..très). L'échelle de quantification absolue employée pour les phases meubles, les éléments grossiers et les éléments figurés (cf. tableau IV-2), comprend 10 modalités selon des intervalles non constants adaptés à la capacité de quantification de l'observateur (CHATELIN, 1976; BEAUDOU, 1977).

Echelle de terrain	Signification
AUCUN	0 %
TRARE	0-1 %
RARE	1-5 %
PEU	5-15 %
MIN	15-30 %
ASSEZ	30-50 %
NOMBRE	50-75 %
TNOMB	75-95 %
MAJOR	95-100 %
UNIQUE	100 %

Tableau IV-2. Une échelle de terrain de quantification absolue.

Cette table contient également des champs destinés à l'appellation typologique de l'horizon (appellation locale, nomenclature RPF, horizon diagnostique FAO).

4.1.1.B. La table de description de v.e.r. par rattachement aux v.e.r. de référence.

Les principales informations requises sont les coordonnées x,y à la surface du sol, les limites du volume et l'identificateur du v.e.r. de référence auquel se rattache le volume.

4.1.1.C. La table de données physico-chimiques.

Cette table est avant tout destinée à stocker les valeurs numériques correspondant aux analyses physico-chimiques des v.e.r. de référence. On y accède directement à partir des fiches de description de ces v.e.r.

4.1.2. Acquisition de l'information pédologique

L'information pédologique a été recueillie sur le terrain puis a été complétée au laboratoire. Elle concerne les caractéristiques et la position géographique de volumes élémentaires de résolution, ainsi que les caractéristiques de certaines transitions latérales au sein de la couverture pédologique.

4.1.2.A. Etude des volumes élémentaires de résolution

Des volumes élémentaires de résolution ont fait l'objet d'une description morphologique et d'une localisation dans l'espace, puis d'une analyse micro-morphologique, physico-chimique et minéralogique.

4.1.2.A.1. Description morphologique et localisation des v.e.r

La description et la localisation d'un certain nombre de volumes élémentaires de résolution a été effectuée en deux étapes : tout d'abord, à partir de fosses pédologiques, nous avons constitué des v.e.r. de référence. Puis nous avons rattaché des v.e.r. issus de sondage à ces v.e.r. de référence.

1°) constitution de v.e.r. de référence

A l'aide des fiches informatisées présentées au tableau IV-1, nous avons décrit en détail les 35 fosses d'observation disposées en quatre transects qui avaient été ouvertes lors de la reconnaissance morpho-pédologique du versant (la localisation de ces fosses est précisée au chapitre 3, § 3.4). Cette étape a permis de constituer 314 v.e.r. de référence. Les couleurs de ces v.e.r. ont été notées au code Munsell et déterminées sur le terrain, puis au laboratoire sur des échantillons secs illuminés par un tube à néon fixé au plafond de la pièce et par une lampe à filament d'appoint. Un échantillon de chaque v.e.r. de référence a été conservé dans un pédocomparateur de terrain.

Certaines informations n'ont cependant pas pu être traduites à l'aide des variables figurant sur les fiches informatisées (variations verticales continues de certains paramètres; limites complexes de certains v.e.r...). En conséquence, et pour minimiser la perte d'information, nous avons systématiquement complété cette description par des croquis et des prises de vue photographiques de chaque fosse pédologique.

2°) rattachement de v.e.r. aux v.e.r. de référence

Des sondages de raccordement resserrés ont d'abord été réalisés le long de deux transects (A et B) orientés selon l'axe de plus forte pente (cf. figure IV-2). Puis l'ensemble du versant a fait l'objet d'une prospection systématique par sondages de 3 mètres effectués au droit des 600 points de la maille du levé altimétrique (cette maille a été définie au chapitre 3, § 3.3). Ces sondages ont été systématiquement échantillonnés tous les 10 centimètres, ce qui nous a permis d'obtenir, au total, 18.000 échantillons de sondage.

*analyse structurale
informatisée*

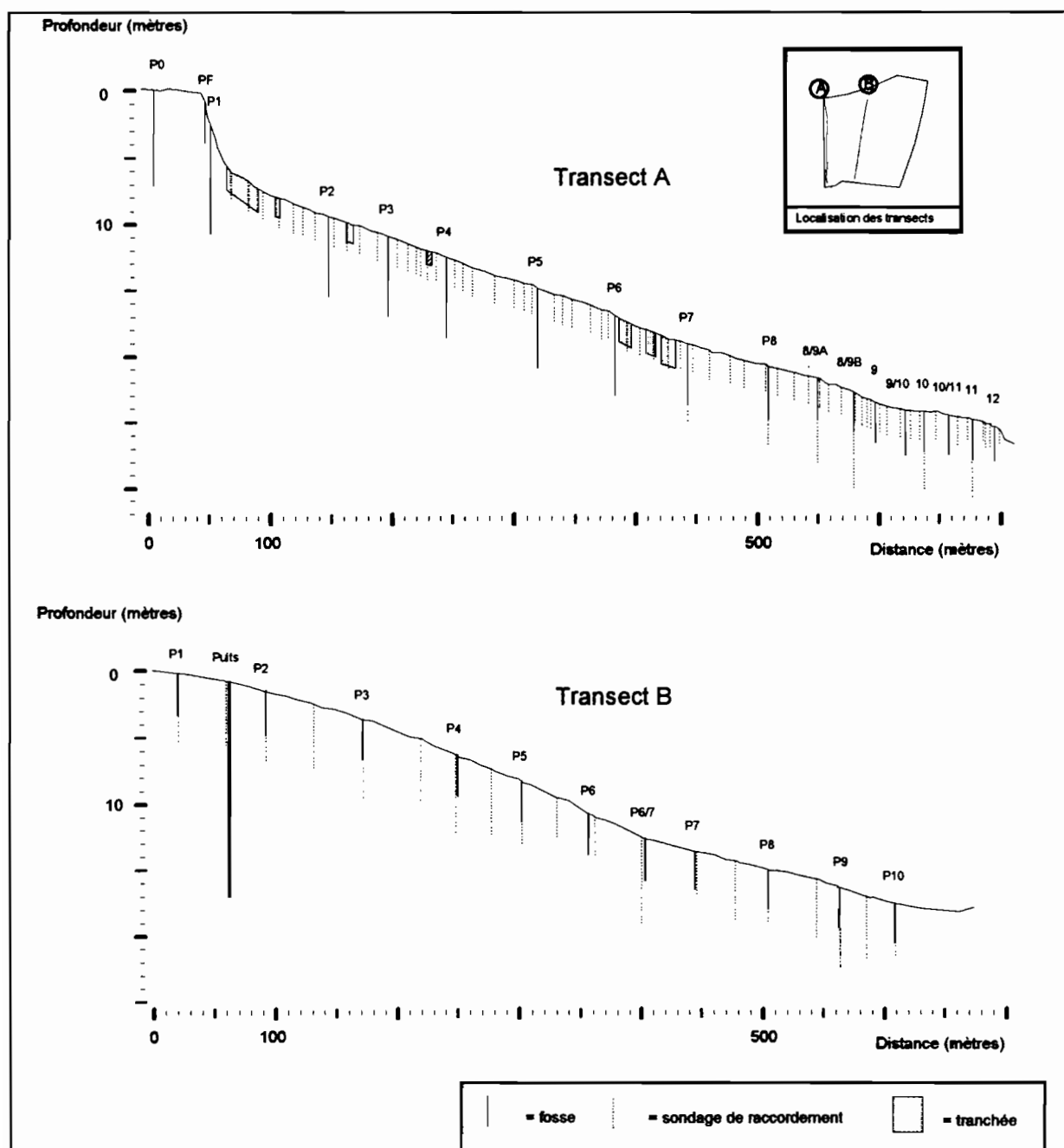


Figure IV-2. Localisation des fosses, des sondages de raccordement et des tranchées sur les transects A et B.

Ces échantillons de sondage ont été placés dans des casiers individuels, et repérés en coordonnées tridimensionnelles (coordonnées planimétriques du sondage et côtes de profondeur de l'échantillon). Nous avons ainsi constitué une "pédothèque".

Au laboratoire, et à l'aide du pédocomparateur de terrain, les sondages stockés dans cette pédothèque ont été rattachés aux v.e.r de référence. En pratique, la démarche de rattachement a été la suivante :

a) à partir de la pédothèque, les échantillons de sondage ont été regroupés en volumes élémentaires de résolution. Environ 3.000 v.e.r ont ainsi été reconstitués au laboratoire, par un balisage au sein de la pédothèque.

b) à partir du pédocomparateur de terrain, un ensemble de variables de rattachement ont été fixés. Il s'agit de la couleur, de la forme et de l'abondance des tâches, de la texture du matériau, de la nature et du pourcentage des éléments grossiers et des éléments figurés.

c) pour chaque v.e.r. de chaque sondage, nous avons recherché le volume élémentaire de référence le plus similaire dans le pédocomparateur, puis transcrit cette information dans une fiche informatisée. La similarité a été établie à partir des variables de rattachement, d'une manière analogue à celle qui est mise en oeuvre lorsque l'on estime une variable telle que la couleur d'un échantillon par comparaison avec le code Munsell (une analyse mathématique des similitudes entre v.e.r. issus de sondages et v.e.r. issus des fosses aurait été théoriquement possible, mais aurait nécessité la description des variables de rattachement concernant plus de 2500 v.e.r. et une transcription informatique de ces variables. Ceci sortait alors de nos possibilités techniques). On notera que la démarche adoptée ne correspond pas à un rattachement à des "horizons-concepts" (BAIZE et al., 1992), mais à un rattachement à des volumes réels (échantillons figurant dans le pédocomparateur de terrain).

Lorsqu'aucun v.e.r. de référence n'a pu servir au rattachement, nous avons créé un nouveau v.e.r de référence et l'avons entièrement décrit à l'aide de la fiche informatisée (ce qui a porté à 338 le nombre de v.e.r. de référence obtenus).

En définitive, ces opérations ont permis de décrire et de localiser 2798 volumes élémentaires de résolution, tout en stockant cette information sous forme de fiche informatisée.

4.1.2.A.2. Analyse chimique, minéralogique, et micro morphologique des v.e.r de référence

Des échantillons des v.e.r. de référence ont été prélevés, pour différentes analyses, sur les transects pédologiques A et B. Le tableau IV-3 résume la liste des analyses effectuées sur ces v.e.r., et précise les méthodes employées.

Les déterminations physico-chimiques ont été effectuées à partir d'échantillons issus des 3 premiers mètres du transect B (laboratoire du Centre Orstom de Lomé; laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés de Montpellier). Les méthodes employées sont normalisées (PETARD, 1993) ou adaptées de méthodes classiques (BLAVET et FARDOUX, 1993).

Des échantillons à structure conservée, issus des transects A et B, ont servi à la fabrication de lames minces (laboratoire de pétrographie de l'Université de Lomé). Ces lames ont été ultérieurement analysées à la loupe binoculaire (laboratoire de micro morphologie des sols de l'Inra - Montpellier).

Enfin, certains échantillons du transect B ont fait l'objet d'analyses minéralogiques (laboratoire de Pétrologie-Minéralogie du Centre Orstom de Bondy).

	Type d'analyse	Méthode utilisée
Micro morphologie	Traits pédologiques fond matriciel minéraux primaires	Microscopie en LN/LP sur lames minces
Caractéristiques et propriétés physiques de la phase solide	<u>Granulométrie</u> 0-2 , 2-20 , 20-50 , 50-200 μ , 200-2000 , refus > 2000 μ	Sédimentométrie sur fraction fine pesée des refus
	<u>Densités apparentes et réelles:</u> <u>Porosité</u>	Volumétrie sur mottes (méthode au pétrole)
	<u>pF terre tamisée < 2 mm</u> 2,5 3 4,2 (pro-partie)	Marmite à pression 316 mmbar 1bar 15 bars
Chimie (fraction < 2 mm)	<u>Matière organique</u> Carbone Azote total	Walkey & Black AFNOR X31111
	<u>Complexe d'échange</u> C.E.C Ca, K, Mg, Na ech P2O5 assimilable	Riehm et Metson - Technicon AFNOR NFX31108 Olsen mod. Dabin - Technicon
	<u>Bases "totales"</u> Ca, K, Mg, Na	Attaque nitrique
	Fer libre Fer "total" Phosphore "total"	DEB.-Technicon Analyse triacide. Attaque nitrique
	<u>pH eau, KCl</u>	sol/solution 1/2.5; pH mètre à électrodes
	Minéralogie (fraction < 2 μ)	argiles et phyllosilicates oxydes et hydroxydes de fer

Tableau IV-3. Analyses de laboratoire sur les v.e.r. de référence.

4.1.2.B. Etude de transitions latérales au sein de la couverture pédologique

Des tranchées de 5 à 10 mètres de long ont été ouvertes à mi-versant, au passage des sols ferrallitiques aux sols ferrugineux (cf. figure IV-2). Ces tranchées nous ont permis d'observer en continu certaines transitions latérales au sein de la couverture pédologique. Nous avons ainsi distingué des transitions graduelles (associées à une transformation interne des matériaux), et des transitions brutales (associées à un dépôt de matériaux allochtones). L'information a été recueillie à l'aide de schémas annotés.

4.1.3. Traitement de l'information pédologique

Au cours d'un premier ensemble d'opérations, le traitement de l'information a permis de déterminer **l'organisation pédologique du versant**. Ces opérations, qui portent sur la reconnaissance d'un certain nombre d'horizons pédologiques, ne sont pas purement numériques.

En revanche, un traitement purement numérique de l'information a permis d'obtenir certaines **séquences analytiques**.

Les paragraphes suivants précisent les méthodes mises en oeuvre pour ces deux types de traitement.

4.1.3.A. Détermination de l'organisation pédologique du versant

La détermination de l'organisation pédologique nous a conduit :

- à identifier des horizons pédologiques, par regroupement des volumes élémentaires de résolution;
- à localiser ces horizons en coupes et plans;
- à les rattacher à des références.

4.1.3.A.1. L'identification des horizons

Les volumes élémentaires de résolution (v.e.r.) ont été regroupés en horizons pédologiques, en déterminant les ensembles homogènes vis à vis des variables suivantes :

- les couleurs et leur arrangement;
- la texture;
- la nature et l'abondance des éléments grossiers;

- l'abondance des lithoreliques (ici, les paillettes de muscovite);
- la cimentation du matériau;
- la présence ou l'absence de revêtements argileux.

La méthode de regroupement mise en oeuvre s'est appuyée sur les descriptions pédologiques, ainsi que sur les photographies de profils et les schémas de coupes pédologiques effectuées sur le terrain.

Cette méthode "manuelle" reste à formaliser plus complètement. Pour aller dans ce sens, nous l'avons comparée, en choisissant un des deux transects pédologiques, à plusieurs modes de regroupement numériques, qui se basent sur l'analyse des distances mathématiques entre les v.e.r. Dans ce but, nous avons codé les variables descriptives en variables numériques comprises entre 0 et 1. Ce codage est détaillé en Annexe D. Compte tenu de ce codage, nous avons choisi de calculer des distances mathématiques selon la métrique euclidienne.

Ainsi, la distance mathématique entre deux volumes élémentaire de résolution v_1 et v_2 caractérisés par n variables ($v_1 = (x_{1v1}, \dots, x_{nv1})$ et $v_2 = (x_{1v2}, \dots, x_{nv2})$) a été déterminée par la distance euclidienne. Celle-ci est donnée par la formule suivante :

$$\text{distance euclidienne entre } v_1 \text{ et } v_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (x_{iv1} - x_{iv2})^2}$$

A partir de la détermination de cette distance mathématique, trois modes de regroupement numérique ont été testés : un mode purement aléatoire, un mode automatique par classification non hiérarchique, de type "nuées dynamiques" avec partition initiale aléatoire (DIDAY, 1971; BENZECRI, 1976; SANDERS, 1989) et, enfin, un mode semi automatique par mesure des distances à des références pré définies (ROBBEZ-MASSON, 1994). Les

variables prises en compte et le nombre de classes retenues pour ces modes de regroupement numériques ont été identiques à celles obtenues lors du regroupement manuel.

Par suite, un indice de similarité a été calculé, afin de comparer le mode de regroupement manuel avec chacun des modes de regroupement numérique. Cet indice est le suivant :

$$I_s = (\text{nombre d'individus classés de manière similaire}) / (\text{nombre d'individus total}).$$

Cet indice de similarité varie entre 0 (regroupements rigoureusement dissemblables) et 1 (regroupements rigoureusement similaires). Lorsque l'un ou les deux modes de regroupements sont purement aléatoires, on peut montrer que cet indice vaut $(1/\text{nombre de classes})$.

Les valeurs obtenues pour cet indice sont présentées au tableau IV-4. Il apparaît qu'un regroupement semi-automatique par mesure de distances à des références préétablies pourrait se rapprocher de la méthode de regroupement manuel utilisée. En effet, l'indice de similarité entre ce mode de regroupement numérique et le mode de regroupement manuel est de 0.46. Cette valeur, largement supérieure à l'indice obtenu par comparaison avec le mode de regroupement aléatoire (0,06), montre qu'aucune de ces deux méthodes de regroupement n'est aléatoire. De plus, il est possible que la similarité soit encore plus élevée en choisissant une autre métrique que la métrique euclidienne ¹. En revanche, avec un indice de similarité de 0,08, le mode de regroupement par nuées dynamiques (obtenu après 11 itérations et stabilisation de la variance interclasse à 59 %) s'avère très éloigné du regroupement manuel.

¹ La métrique de JACCARD (BENZECRI et al., 1973), pourrait notamment être testée, en modifiant le codage numérique en codage logique (0 pour absence d'un caractère, 1 pour présence). Cette métrique permettrait en effet de mesurer la distance entre deux v.e.r., en calculant le rapport entre le nombre de caractères présents qui sont communs à deux v.e.r. et le nombre de caractères présents dans l'ensemble des deux v.e.r. Cette distance entre v.e.r. serait alors $d(v_1, v_2) = 1 - \frac{\text{card}(v_1 \cap v_2)}{\text{card}(v_1 \cup v_2)}$.

nb d'individus	nb de classes	métrique	Mode de classement numérique	Indice de similarité avec classement manuel
144	15	/	purement aléatoire	0.06
144	15	euclidienne	nuées dynamiques 11 itérations	0.08
144	15	euclidienne	semi -automatique avec références préétablies	0.46

Tableau IV-4. Comparaison entre classement manuel des v.e.r. et classements numériques à l'aide d'un indice de similarité.

4.1.3.A.2. La localisation des horizons en coupes et plans

L'organisation en coupes des horizons pédologiques a été restituée à l'aide d'un logiciel de dessin vectoriel (Lotus Freelance). Les graphes concernant la surface topographique ont d'abord été importés dans ce logiciel. Puis, grâce à son outil de cotation, nous avons pu représenter les cotes altimétriques et les cotes des horizons selon une même échelle verticale. Par suite, et afin de permettre une bonne visualisation des coupes, l'échelle verticale a été transformée de manière homothétique à l'aide d'une fonction de base de ce logiciel.

x La constitution de plans tomographiques a été effectuée par une interrogation de la base de données pédologiques, après une liaison de la base de description de v.e.r. de référence à la base de v.e.r. par rattachement, et en extrayant les données selon différentes profondeurs. Pour obtenir une visualisation de ces plans, les horizons ont été désignés par un code numérique, puis chaque plan a été simplement produit par un graphe à coordonnées x,y, dans lequel chaque horizon constitue une série particulière de données.

4.1.3.A.3. Le rattachement des horizons à des références

L'interprétation des traits pédologiques, de certaines caractéristiques morphologiques et analytiques des horizons, ainsi que la prise en compte de l'organisation des horizons dans l'espace nous a conduit à attribuer à chaque horizon un certain nombre de processus pédogénétiques.

Nous avons alors rattaché ces horizons pédologiques à des "horizons concepts" (BAIZE, 1992), qui sont basés sur des références issues d'un référentiel pédologique (A.F.E.S., 1992).

4.1.3.B. Constitution de séquences de caractères analytiques

Des séquences de caractères analytiques ont été obtenues à partir de deux types de variables numériques disponibles sur le transect pédologique B. Il s'agit :

- d'une part, de variables issues de l'analyse physico-chimique;
- d'autre part, de variables dérivées des trois composantes de la couleur Munsell (clarté, pureté et teinte).

Pour chacune de ces variables, une séquence a été obtenue par interpolation entre les points de mesure. Cette interpolation a été effectuée par la méthode géostatistique du krigeage, qui nécessite une analyse préalable de la structure spatiale des variables (MATHERON, 1971; DE MARSILY, 1986). Ces deux opérations (analyse de la structure spatiale et krigeage) ont été effectuées à l'aide du programme informatique Geo-Eas (E.P.A., 1988).

En pratique, la distance verticale entre les points de mesure est largement inférieure à la distance horizontale (ces points sont séparés d'environ 20 cm selon la verticale, alors qu'ils sont distants d'environ 30 m selon l'horizontale). Afin de pouvoir visualiser aisément les séquences,

nous avons choisi d'exagérer l'échelle verticale, ce qui est théoriquement autorisé par le krigeage, dès lors que cette opération est effectuée avant l'analyse de la structure spatiale des variables (DE MARSILY, 1986)

Une fois cette transformation d'échelle effectuée, l'analyse de la structure spatiale des variables a été effectuée en calculant des variogrammes ² selon 2 directions : la direction verticale et la direction parallèle à la pente. L'analyse de ces variogrammes a permis de déterminer les paramètres utiles pour le krigeage (modèle mathématique, pépite, pallier, portée).

Par suite, le krigeage a été effectué en fonction de la différence de portée des variogrammes selon la direction verticale et la direction parallèle à la pente. Ce krigeage est donc anisotrope, dans la mesure où il tient compte de l'anisotropie due à la plus forte variabilité des sols selon la direction verticale.

Les résultats de ce krigeage ont fourni, pour chaque variable, un ensemble de valeurs interpolées qui se localisent dans l'espace selon une maille régulière. Dans certains cas, plusieurs de ces valeurs ont été ultérieurement combinées afin d'obtenir des variables dérivées.

Enfin, ces valeurs ont été traduites dans un format exploitable par un logiciel de cartographie (SURFER, Golden Software Inc.), afin de constituer des coupes sur lesquelles figurent des courbes d'isodifférenciation.

² L'expression mathématique du variogramme est précisée au paragraphe 7.2.1.B.1

4.2. L'organisation pédologique du versant

Cette première approche de la pédoséquence se base sur un découpage conceptuel de la couverture pédologique en 20 horizons, qui ont été identifiés selon les méthodes exposées au § 4.1.3.A.

Dans les paragraphes suivants, nous examinerons l'organisation spatiale et les caractéristiques de ces horizons, puis proposerons une interprétation génétique de ces données.

Pour plus ^{de} lisibilité, nous nommerons ces horizons par un code à lettres dès le § 4.2.1. On gardera toutefois à l'esprit que cette dénomination résulte, en fait, des interprétations présentées au § 4.2.2.

4.2.1. Organisation spatiale et caractéristiques des horizons pédologiques

Pour décrire l'organisation pédologique du versant, nous sommes conduits à présenter les horizons pédologiques selon deux aspects qui sont complémentaires :

- d'une part, **leur distribution dans l'espace;**
- d'autre part, **leurs caractéristiques d'enveloppe et de contenu.**

4.2.1.A. Distribution des horizons dans l'espace

La couverture pédologique étant tridimensionnelle, nous examinerons la distribution des horizons dans l'espace à l'aide de coupes et de plans.

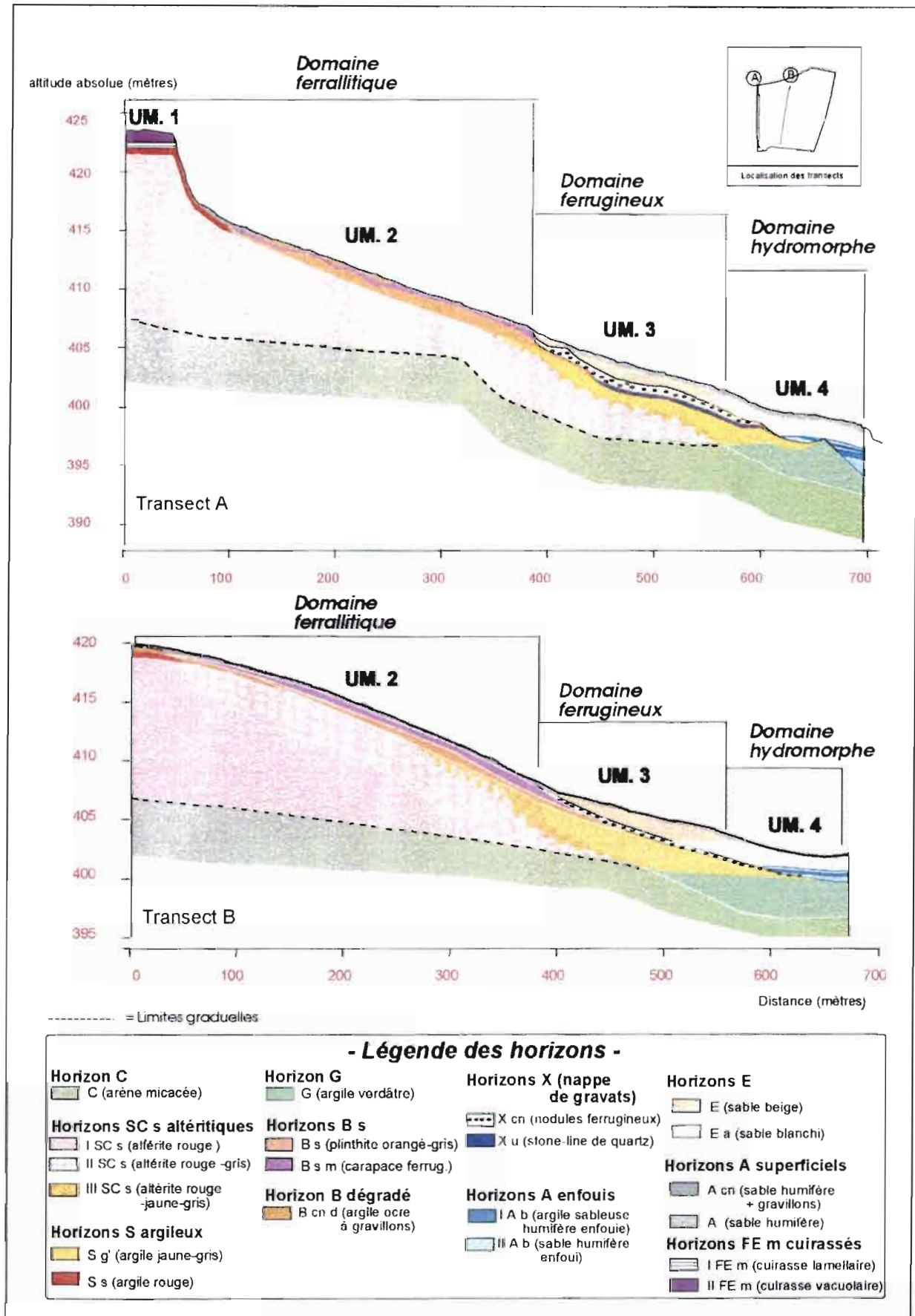


Figure IV-3. Organisation en coupes des horizons pédologiques.
(Nb : les déformations d'échelle sont restreintes à l'échelle latérale)

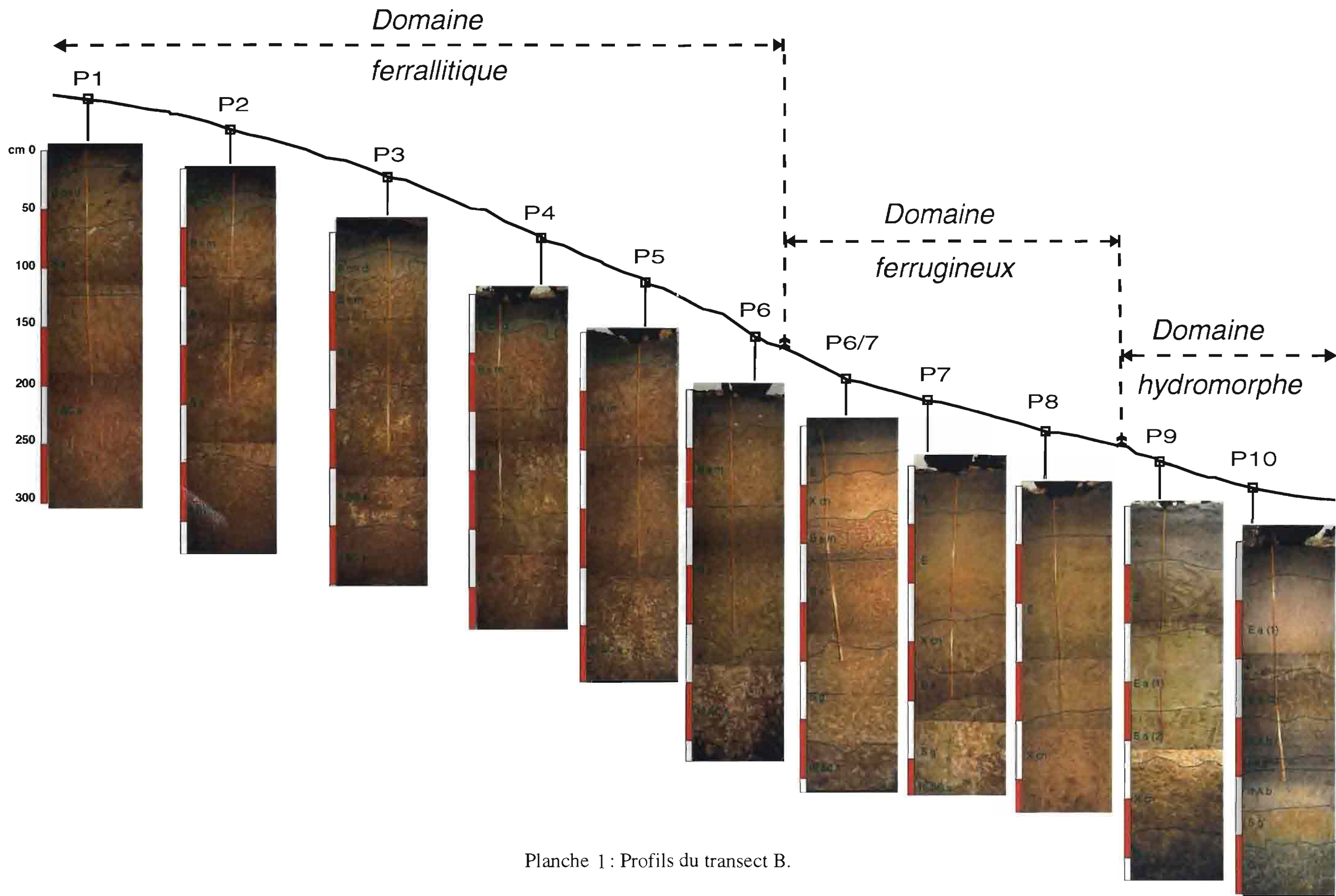


Planche 1 : Profils du transect B.

4.2.1.A.1. Distribution des horizons en coupes

Les coupes présentées en figure IV-3, ainsi que les profils de la planche 1, permettent d'observer la répartition des horizons le long du versant.

Leur examen permet de retrouver les domaines pédologiques et les unités de modelé qui sont caractéristiques de ce type de versant (cf. chapitre 1). Ainsi, on peut observer trois domaines pédologiques depuis l'amont vers l'aval :

- un domaine amont ferrallitique;
- un domaine médian ferrugineux;
- un domaine aval hydromorphe.

1°) Le domaine amont ferrallitique

Ce domaine s'étend sur les unités de modelé 1 et 2. Les sols de ce domaine présentent un certain nombre de variations depuis le sommet vers l'aval :

- *en sommet de versant*, l'unité de modelé 1 présente un profil cuirassé. Celui-ci est caractérisé par la présence en subsurface d'un horizon fortement induré par les oxy-hydroxydes de fer (horizon cuirassé FE m), et séparé des horizons sous-jacents par un banc de quartz fortement émoussés. Le profil type est le suivant :

sable humifère à gravillons (hz A cn)
cuirasse ferrugineuse (hz FE m)
banc de quartz émoussés (hz X u)
argile rouge (hz S s)
altérite rouge (hz I SC s)
arène micacée (hz C)

- après la rupture de pente séparant l'unité de modelé 1 de l'unité de modelé 2, (ou bien dès le sommet de versant, lorsque l'unité de modelé 1 est absente), les horizons cuirassés disparaissent. On observe le profil suivant :

sable humifère à gravillons (hz A cn)
argile rouge (hz S s)
altérite rouge (hz I SC s)
arène micacée (hz C)

- dans la partie aval du domaine ferrallitique, deux horizons indurés par les oxyhydroxydes de fer apparaissent en subsurface (horizon Bs plinthique et horizon B s m à carapace ferrugineuse), à la place de l'horizon argileux rouge (horizon S s) qui disparaît. Leur apparition concorde avec celle, sous-jacente, de plages grises au sein de l'altérite rouge (apparition de l'horizon II SC s), qui se développent dans la partie supérieure de l'altérite rouge. Le profil est constitué comme suit :

sable humifère à gravillons (hz A cn)
carapace ferrugineuse (hz B s m)
plinthite (hz Bs)
altérite rouge-gris (Hz II SC s)
altérite rouge (Hz I SC s)
arène micacée (Hz C)

- enfin, juste avant la rupture de pente séparant le domaine ferrallitique du domaine ferrugineux (passage de l'unité de modelé 2 à l'unité de modelé 3) l'altérite à matrice rouge acquiert, sous les horizons indurés, une coloration partiellement jaunâtre (apparition de l'horizon III SC s constitué d'altérite rouge tachetée de jaune et de gris). Le profil observé est le suivant :

sable humifère à gravillons (hz A cn)
carapace ferrugineuse (hz B s m)
plinthite (hz Bs)
altérite rouge-jaune-gris (hz III SC s)
altérite rouge-gris (hz II SC s)
altérite rouge (hz I SC s)
arène micacée (hz C)

2°) Le domaine médian ferrugineux

Le domaine ferrugineux apparaît après la rupture de pente séparant l'unité de modelé 2 de l'unité de modelé 3.

- *dans la partie amont de ce domaine*, les horizons indurés par les oxy-hydroxydes de fer (horizons B) disparaissent, en concordance avec :

- la disparition des gravillons dans l'horizon humifère (passage de l'horizon A cn à l'horizon A);
- l'apparition d'un horizon sableux beige en subsurface (horizon E);
- l'apparition d'horizons à éléments grossiers individualisés : horizon à nodules ferrugineux (hz X cn), puis sous cet horizon, une stone-line de quartz (hz X u);
- l'apparition d'un horizon argileux jaune-gris (horizon S g').

D'autre part, l'altérite rouge tachetée de gris (horizon II SC s) disparaît progressivement en biseau sous l'horizon argileux jaune-gris (Hz S g'). Le profil devient le suivant :

sable humifère (hz A)

sable beige (hz E beige)

nodules ferrugineux (hz X cn)

stone-line de quartz (hz X u)

argile jaune-gris (hz S g')

altérite rouge-jaune-gris (hz III SC s)

altérite rouge-gris (hz II SC s)

arène micacée (Hz C)

- *à l'aval du domaine ferrugineux*, l'altérite à matrice rouge (horizons II SC s et III SC s) a disparu. En revanche, deux horizons apparaissent en biseau :

- un horizon sableux blanchi (Hz E a) apparaît en subsurface sous l'horizon sableux beige (hz E beige)
- un horizon argileux verdâtre (horizon G) apparaît en profondeur sous l'horizon argileux jaune-gris (Hz S g').

On obtient le profil suivant :

sable humifère (hz A)
sable beige (hz E beige)
sable blanchi (hz E a)
nodules ferrugineux (hz X cn)
stone-line de quartz (hz X u)
argile jaune-gris (hz S g')
argile verdâtre (hz G)
arène micacée (Hz C)

3°) Le domaine aval hydromorphe

Le domaine hydromorphe commence à la rupture de pente séparant l'unité de modelé 3 de l'unité de modelé 4. Cette rupture coïncide avec le développement maximal de l'horizon sableux blanchi (hz E a), et avec l'apparition sous-jacente d'horizons humifères sableux à argileux (hz Ab).

Les horizons à éléments grossiers individualisés (horizons X) disparaissent dans ce domaine. Par ailleurs, l'horizon argileux jaune-gris (horizon S g') disparaît en biseau, sur l'horizon argileux verdâtre (horizon G) qui atteint son développement maximal. Le profil type du domaine hydromorphe est alors le suivant :

sable humifère (hz A)
sable blanchi (hz Ea)
argile sableuse humifère (hz III a b)
alternance de lits de sable humifère (hz II A b) et de lits d'argile sableuse humifère (hz I A b)
argile verdâtre (hz G)
arène micacée (hz C)

4.2.1A.2. Distribution des horizons en plans

La distribution en plans des horizons est présentée sur les tomographies de la figure IV-4.

Ces tomographies permettent, en premier examen, de délimiter précisément les domaines pédologiques sur l'ensemble du versant. Ainsi, dès la cote - 50 cm, on retrouve une limite très nette, à mi-versant, entre les sols du domaine amont ferrallitique et ceux du domaine médian ferrugineux : celle-ci correspond à la disparition d'horizons altéritiques à matrice rouge et d'horizons indurés par les oxyhydroxydes de fer, et à l'apparition de l'horizon sableux beige (horizon E). De même, une limite apparaît nettement au tiers inférieur du versant entre le domaine ferrugineux et le domaine aval hydromorphe : celle-ci correspond à la disparition de l'horizon sableux beige, et à l'apparition d'un horizon sableux blanchi (horizon E albique). Les tomographies de profondeur montrent également clairement les limites entre ces trois domaines. En effet, à la cote -200 cm et aux cotes inférieures, la limite entre le domaine ferrallitique et le domaine ferrugineux est soulignée par la disparition de l'altérite à matrice rouge et l'apparition de l'horizon argileux jaune-gris (horizon S g'). A ces mêmes cotes, la limite entre le domaine ferrugineux et le domaine hydromorphe correspond à la disparition de l'horizon argileux jaune-gris (horizon S g') et à l'apparition de l'horizon argileux verdâtre (horizon G).

En second examen, et par rapport aux coupes, ces tomographies fournissent certaines informations complémentaires :

- elles permettent, d'une part, de préciser la concordance d'apparition entre certains horizons. Ainsi, une concordance entre l'apparition de l'horizon sableux beige (horizon E) et celle de l'horizon argileux jaune-gris sous-jacent se confirme, au vu des tomographies de

subsurface (-50 cm et - 100 cm) et de celles de profondeur. En revanche, et contrairement à ce que les coupes laissaient supposer, l'horizon sableux blanchi n'apparaît pas, sur l'ensemble du versant, en concordance nette avec l'horizon argileux verdâtre (horizon G).

- d'autre part, de nouvelles superpositions d'horizons apparaissent par rapport aux coupes : c'est particulièrement le cas dans l'extrémité sud-est de la zone cartographiée, où l'horizon argileux verdâtre (horizon G) apparaît localement sous l'altérite à matrice rouge.

- enfin, certains aspects de la géométrie des horizons peuvent être précisés. C'est ainsi que l'on note, dans le domaine ferrallitique, que les horizons indurés par les oxy-hydroxydes de fer (horizons B) sont latéralement discontinus. On note également que l'horizon E a sableux blanchi forme des digitations au sein de l'horizon E sableux beige (cf. cotes -50 et - 100 cm). Enfin, on observe que les horizons humifères Ab suivent étroitement le réseau hydrographique.

cf. tomopli
011

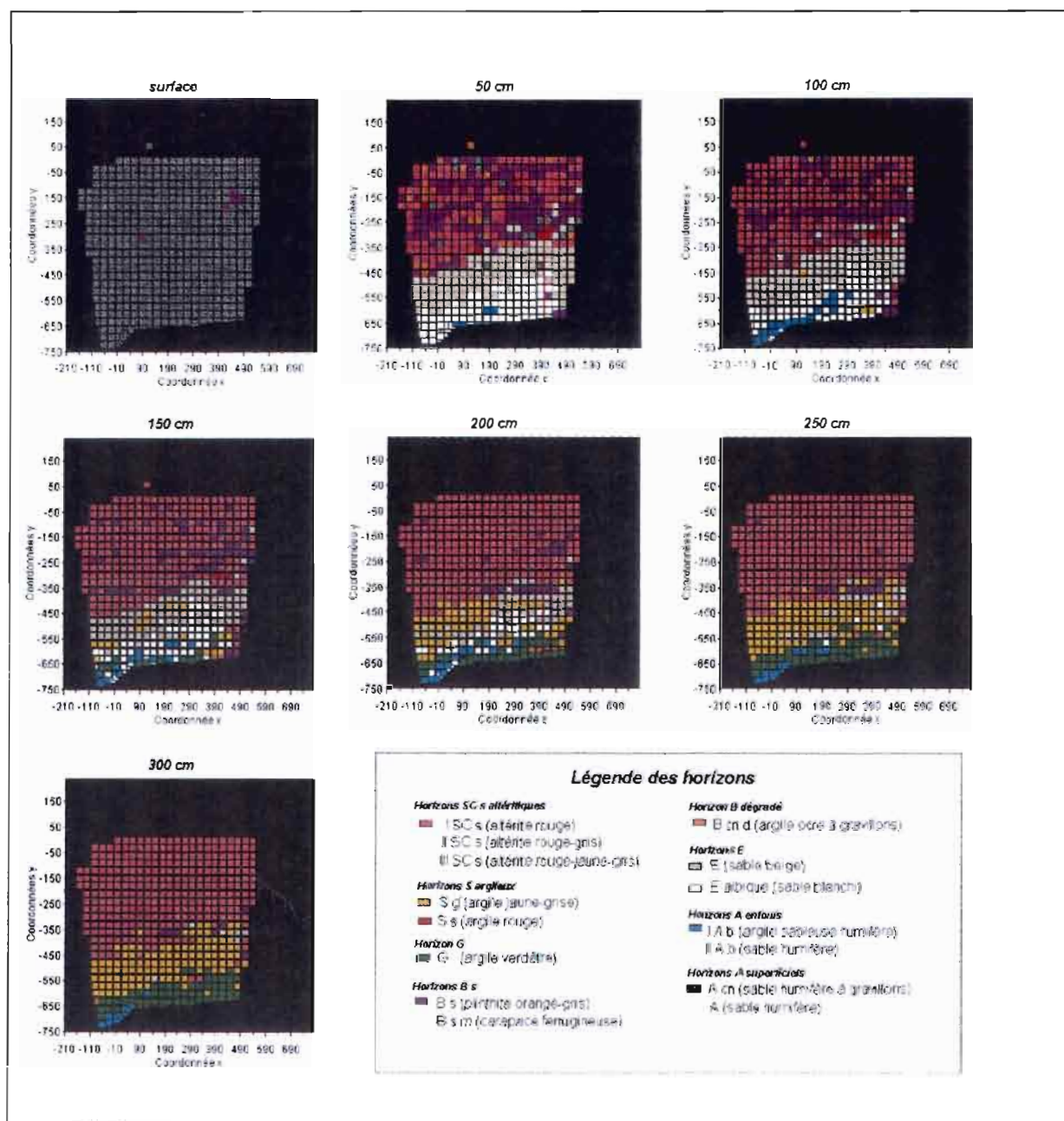


Figure IV-4. Tomographies des horizons pédologiques.

4.2.1.B. Caractéristiques d'enveloppe et de contenu des horizons

L'enveloppe et le contenu des 20 horizons identifiés sont décrits systématiquement dans les paragraphes suivants. Leur aspect macro-morphologique est illustré en planche 2. Quelques données d'analyse complémentaires sont fournies en Annexe E.


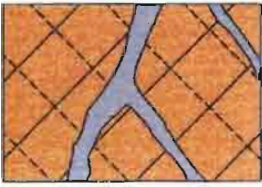

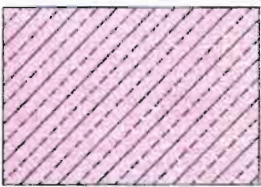





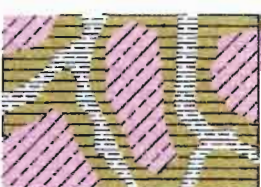
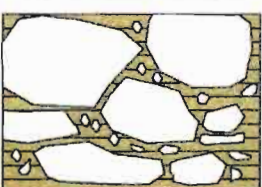





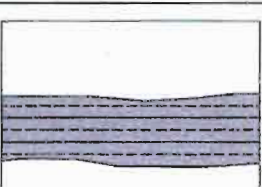
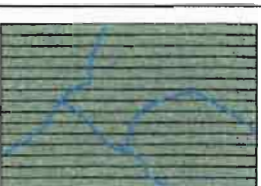
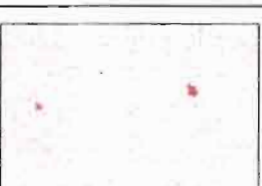
1 <i>Arène micacée</i> C		8 <i>Plinthite</i> B s		16 <i>Sable blanchi</i> E a	
2 <i>Altérite rouge</i> I SC s		9 <i>Carapace ferrugineuse</i> B s m		17 <i>Sable humifère à gravillons</i> A cn	
3 <i>Altérite rouge-gris</i> II SC s		10 <i>argile ocre à gravillons</i> B cn d		18 <i>Sable humifère</i> A	
4 <i>Altérite rouge-jaune-gris</i> III SC s		11 <i>Stone line de quartz</i> X u		19 <i>Cuirasse lamellaire</i> I FE m	
5 <i>Argile jaune-gris</i> S g'		12 <i>Nodules ferrugineux</i> X cn		20 <i>Cuirasse vacuolaire</i> II FE m	
6 <i>Argile rouge</i> S s		13-14 <i>Argile, sable humifères</i> Ab (I,II)			
7 <i>Argile verdâtre</i> G r		15 <i>Sable beige</i> E			

Planche 2. Aspect macro-morphologique des horizons (un rectangle = 10 x 15 cm)

**Horizon 1 :
arène micacée
(horizon C)**

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.1</p>
--

Enveloppe : cet horizon est situé immédiatement au dessus de la roche, et couvre tout le versant. Son épaisseur est supérieure à 3 mètres.

Contenu : il s'agit d'un horizon sans éléments grossiers, très meuble, sans macro-porosité visible. La structure lithologique est entièrement conservée. La matrice est limono-sableuse. Sa couleur est brun jaunâtre clair (10 YR 6/4 en sec) sur la majeure partie du versant, et passe graduellement à l'olive pâle (5 Y 6/4 en sec) dans le domaine aval hydromorphe. De très nombreuses paillettes de muscovite y sont visibles à l'oeil nu. L'analyse micromorphologique montre que les principaux constituants de cet horizon sont des minéraux issus de la roche (muscovite, biotite et quartz).

Ensemble d'horizons 2,3 et 4 : horizons altéritiques à matrice rouge (horizons SC)

Enveloppe de l'ensemble : situé au dessus de l'arène micacée avec laquelle ses limites sont graduelles, cet ensemble d'horizons s'étend depuis le sommet de versant où il atteint une quinzaine de mètres d'épaisseur, jusqu'au sein du domaine ferrugineux où il disparaît en biseau.

Contenu de l'ensemble : il correspond à des horizons sans éléments grossiers, meubles, à structure lithologique partiellement conservée. De nombreuses paillettes de muscovite y sont visibles à l'oeil nu. La matrice est limono-sableuse, de coloration rougeâtre (2.5 YR 3/6 à 2.5 YR 4/6 en sec), en raison de la présence d'un peu d'hématite au sein des oxy-hydroxydes de fer individualisés (goethite et hématite). L'argile minéralogique est constituée de kaolinite et d'illite. Le quartz et la muscovite constituent les minéraux primaires résiduels.

Trois horizons se distinguent au sein de cet ensemble, en fonction des traits pédologiques qui figurent ou non au sein de la matrice :

Horizon 2 :
altérite rouge
homogène
(horizon I SC s)

Aspect macro
10x15 cm :
cf. planche 2.2

Enveloppe : cet horizon se trouve exclusivement dans la partie amont du domaine ferrallitique (unités de modelé 1 et 2). Il est remplacé vers l'aval par une altérite rouge tachetée de gris (horizon 3 : II Sc s).

Contenu : Cet horizon homogène présente quelques macropores tubulaires. Pour le reste, il est entièrement défini par les caractéristiques de l'ensemble, et ne présente pas de traits pédologiques particuliers.

Horizon 3 :
Altérite rouge
tachetée de gris
(horizon II SC s)

Aspect macro
10x15 cm :
cf. planche 2.3

Enveloppe : cet horizon apparaît dans le domaine ferrallitique (unité de modelé 2) en concordance avec des horizons de subsurface indurés par les oxy-hydroxydes de fer (horizons B s m et B s). Il se développe d'abord à partir du sommet de l'altérite puis s'approfondit rapidement et rejoint l'arène à mi-versant. Il se poursuit dans le domaine ferrugineux (unité de modelé 3) où il disparaît sous l'horizon argileux jaune-gris (horizon S g'). Latéralement, il s'intercale entre l'altérite rouge (horizon I SC s) et l'altérite rouge-ocre-gris (horizon III Sc s).

Contenu : il se différencie de l'altérite rouge homogène (horizon I SC s) par la présence de plages pluridécimétriques gris claires (10 YR 8/1 en sec) dans lesquelles on peut trouver des macropores tubulaires. L'analyse minéralogique montre que ces plages claires sont à la fois plus riches en kaolinite et plus pauvres en oxy-hydroxydes de fer que la matrice rouge (plus de 70 % de kaolinite dans la fraction 0-2 μ contre moins de 10 % dans la matrice rouge; moins de 2 % de fer libre dans la fraction 0-2000 μ contre plus de 10 % dans la matrice rouge).

Horizon 4 :
Altérite rouge
tachetée de
jaune et de gris
(horizon III SC
s)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.4</p>
--

Enveloppe : cet horizon apparaît dans la partie aval du domaine ferrallitique (unité de modelé 2) et s'étend dans le domaine ferrugineux. De faible épaisseur (moins d'un mètre) et de forme très irrégulière, il s'intercale avec des limites graduelles entre l'altérite rouge tachetée de gris (horizon 3 : II SC s) et l'horizon argileux jaune-gris (horizon 5 : S g').

Contenu : dans cet horizon, le fond matriciel rouge altéritique est traversé par un réseau d'épaisseur pluricentimétrique qui ceinture de nombreux macropores tubulaires visibles à l'oeil nu. Ce réseau présente deux phases : la phase située immédiatement en périphérie des pores est de couleur gris clair (10 YR 8/1 en sec) et est plus argileuse que la matrice. Ses caractéristiques sont similaires à celles des plages grises de l'horizon 3. La phase externe, qui sépare les plages gris clair de la matrice rouge, se différencie de cette matrice rouge par sa coloration jaune (10 YR 7/8 en sec).

=====

Horizon 5 :
horizon argileux
jaune-gris
(horizon S g')

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.5</p>
--

Ramyun S.

Enveloppe : cet horizon se trouve dans le domaine ferrugineux (unité de modelé 3) et dans la partie amont du domaine hydromorphe (unité de modelé 4). Il apparaît vers 2 mètres de profondeur sous des horizons à nodules ferrugineux et gravats de quartz (horizons X). Dans la partie amont du domaine ferrugineux, il se développe sur l'altérite à matrice rouge (horizon III SC s), avec laquelle ses limites sont graduelles. Il atteint son maximum d'épaisseur dans la partie aval du domaine ferrugineux (de 1,5 à plus de 4 mètres), en même temps que disparaît l'altérite à matrice rouge. Sa disparition en biseau dans le domaine hydromorphe concorde avec le développement de l'horizon sous-jacent argileux verdâtre (horizon G).

Contenu : il s'agit d'un horizon assez cohérent, à structure massive, sans éléments grossiers. La matrice est argileuse, de couleur jaune à jaune brunâtre (10 YR 6/6 à 10 YR 7/8 en sec). Elle est traversée par un réseau centimétrique gris clair (10 YR 8/1 à 5B 6/1 en sec), au sein duquel on peut trouver quelques macropores. Contrairement à l'altérite à matrice rouge, cet horizon ne contient pas d'hématite (présence de kaolinite, d'un peu d'illite, de quartz et de goethite).

Horizon 6 :
horizon argileux
rouge
(horizon S s)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.6</p>
--

Enveloppe : cet horizon de subsurface est localisé dans la partie amont du domaine ferrallitique (unités de modelé 1 et 2). Epais de quelques dizaines de centimètres, il se développe sur l'altérite rouge homogène (horizon I SC s), avec laquelle ses limites sont

graduelles. Il disparaît vers l'aval avec l'apparition de l'ensemble constitué par les horizons indurés par les oxy-hydroxydes de fer (horizons B s m carapacé et B s plinthique) et l'altérite rouge tachetée de gris (horizon II SC s).

Contenu : On observe d'assez nombreux graviers de quartz d'origine filonienne dans l'ensemble de cet horizon. Dans sa partie supérieure, on trouve également quelques nodules ocre-rouges et quelques fragments de cuirasse sommitale. Il s'agit d'un horizon meuble, à structure polyédrique, présentant d'assez nombreux macropores tubulaires. La matrice est argileuse, de couleur homogène rouge à rouge jaunâtre (2.5 YR 5/6 à 5YR 5/8 en sec). La composition minéralogique de cette matrice est analogue à celle de l'altérite rouge sous-jacente (kaolinite, illite, goethite et traces d'hématite; muscovite et quartz résiduels), avec toutefois davantage d'argile et moins de minéraux primaires résiduels.

Horizon 7 :
horizon argileux
verdâtre
(horizon G)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.7</p>
--

Enveloppe : cet horizon de profondeur apparaît à l'aval du versant, dans le domaine hydromorphe (unité de modelé 4). Il s'intercale entre l'arène, avec laquelle ses limites sont graduelles, et l'horizon argileux jaune-gris (horizon S g'), sous lequel il apparaît en biseau à toit sub-horizontal. Il se développe vers l'aval en concordance avec la disparition de l'horizon argileux jaune-gris. Son épaisseur atteint plus de 3 mètres à proximité de l'axe de drainage.

Contenu : On observe, au sein de cet horizon, la présence de quelques nodules à cortex noir, de diamètre inférieur à 3 mm. Il s'agit d'un horizon à structure massive, dans lequel une macroporosité n'apparaît qu'à l'état sec, sous forme de quelques fentes de retrait. La matrice argileuse est gris olive à gris verdâtre foncé (5Y 6/1 à 5GY 4/1 en sec), et est traversée par un

réseau millimétrique gris bleuté (5 BG 7/1) localisé en périphérie des fentes de retrait. Quelques taches rouilles d'oxydation apparaissent au sein de la matrice, au sommet de l'horizon.

L'analyse minéralogique de la fraction argileuse révèle la présence de smectite associée à de la kaolinite et à des traces d'illite. Le principal minéral primaire résiduel est le quartz. Un peu de muscovite s'observe toutefois à la base de l'horizon, à proximité de l'arène. La goethite et l'hématite sont absentes de cet horizon.

Ensemble d'horizons 8 et 9 : horizons indurés
(horizons B s plinthique et B s m carapacé)

Enveloppe de l'ensemble : cet ensemble d'horizons de subsurface apparaît dans le domaine ferrallitique (unité de modelé 2), en concordance avec l'apparition sous-jacente de l'altérite rouge tachetée de gris (horizon II SC s). Il suit sensiblement la surface topographique, puis disparaît dans le domaine ferrugineux sous un horizon nodulaire (horizon X cn).

Contenu de l'ensemble : il est caractérisé par une matrice argileuse de couleur rouge (2.5 YR 4/6 à 2.5 YR 6/8 en sec) ou brun-vif (7.5 YR 4/6 à 5/8 en sec), dans laquelle se trouvent des volumes diffus ferro-manganésifères (coloration noire). Cette matrice est plus ou moins cimentée à l'état sec. Elle est traversée par un réseau inter matriciel limoneux à limono-argileux brun-pâle à gris clair, dans lequel se trouvent des macropores tubulaires.

La cimentation de la matrice, la densité du réseau inter matriciel et sa couleur varient entre le sommet et la base de l'ensemble, ce qui permet de différencier deux horizons.

**Horizon 8 :
plinthite
(horizon Bs)**

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.8</p>
--

Enveloppe : épais d'environ 1 mètre, cet horizon est situé à la base de l'ensemble des horizons B indurés. Il possède des limites graduelles avec les horizons sous-jacents (altérite à matrice rouge dans le domaine ferrallitique, horizon S g' jaune-gris dans le domaine ferrugineux), et avec la carapace sus-jacente (horizon B s m).

Contenu : Quelques graviers de quartz, d'origine filonienne, sont observés au sein de l'horizon. La matrice de cet horizon est faiblement cimentée à l'état sec. Le réseau inter matriciel associé aux macropores est peu dense, de forme tubulaire et de dimension centimétrique. Le matériau constituant ce réseau inter matriciel est relativement pauvre en fer (moins de 3 % de fer libre dans la fraction 0-2000 μ , contre plus de 10 % dans la matrice), de texture argileuse, et de couleur gris clair (10 YR 8/1 en sec).

**Horizon 9 :
carapace
ferrugineuse
(horizon B s m)**

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.9</p>
--

Enveloppe : la carapace ferrugineuse constitue la partie supérieure de l'ensemble des horizons B. Cet horizon au toit ondulé fait moins de 50 cm d'épaisseur, peut affleurer ou être localement interrompu. Sa limite avec l'horizon Bs plinthique sous-jacent est graduelle.

Contenu : d'assez nombreux graviers de quartz et fragments de cuirasse sommitale sont enchâssés au sommet de l'horizon. La matrice est suffisamment cimentée à l'état sec pour que le matériau se débite difficilement à la main. Le réseau inter matriciel associé aux macropores est dense, de forme complexe et de dimension millimétrique à centimétrique. Le matériau

constituant ce réseau est relativement pauvre en fer (environ 3 % de fer libre dans la fraction 0-2000 μ contre plus de 6 % dans la matrice), de texture limono-argileuse, faiblement humifère, et de couleur brun pâle (10 YR 6/3 en sec).

Horizon 10 :
horizon argileux
ocre à gravillons
(horizon B cn d)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.10</p>

Enveloppe : cet horizon est localisé dans le domaine amont ferrallitique (unité de modelé 2). Epais de quelques dizaines de centimètres, il apparaît de manière discontinue sur l'horizon argileux rouge (horizon S s), ou bien sur la carapace (horizon B s m) avec laquelle il présente des interdigitations. La netteté de sa limite inférieure est parfois distincte, parfois graduelle.

Contenu : On y observe quelques îlots de matériau analogue à l'horizon carapacé sous-jacent, de nombreux gravillons ocre-rouge indurés, ainsi que d'assez nombreux graviers de quartz et quelques fragments de cuirasse. Il s'agit d'un horizon meuble, à structure polyédrique peu nette, de texture argileuse. D'assez nombreux pores y sont visibles à l'oeil nu. Sa matrice varie du brun (10 YR 5/3 en sec) au brun jaunâtre clair (10 YR 6/4 en sec) depuis le sommet vers la base de l'horizon. Le fer y est moyennement abondant (7 % de fer total au sein de la fraction 0-2000 μ). Quelques taches rouges argileuses apparaissent au sein de la matrice.

Ensemble d'horizons 11 et 12 : horizons cailloutiques à nodules ferrugineux ou gravats de quartz (horizons X)

Enveloppe de l'ensemble : cet ensemble d'horizons apparaît à mi-versant et s'étend dans le domaine ferrugineux et la partie amont du domaine hydromorphe (unités de modelé 3 et 4).

Il s'intercale avec des limites très nettes entre l'ensemble des horizons issus de l'altération de la roche (horizons B s, S g' et G), et un ensemble d'horizons supérieurs sableux (horizons E). Il se présente sous la forme d'une nappe de moins d'un mètre d'épaisseur, qui épouse la topographie du toit des horizons sous-jacents.

Contenu de l'ensemble : il est caractérisé par une forte charge en éléments grossiers non cimentés entre eux (plus de 50 % du matériau).

Deux horizons se superposent dans cet ensemble, qui se distinguent en fonction de la nature des éléments grossiers :

Horizon 11 :
stone-line de
quartz
(horizon Xu)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.11</p>

Enveloppe : cet horizon s'observe dans la zone de transition entre les unités de modelé 3 à 4. Il se situe à la base de l'horizon à nodules ferrugineux (horizon 12 : X cn).

Contenu : il contient de nombreux graviers et cailloux de quartz à orientation variable et à faces très émoussées. La fraction meuble de cet horizon est analogue à celle de l'horizon argileux jaune-gris sous-jacent (horizon 5 : S g').

Horizon 12 :
horizon à
nodules
ferrugineux
(horizon X cn)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.12</p>

Enveloppe : cet horizon apparaît en concordance avec la disparition de l'horizon B s carapacé.

Contenu : il contient de nombreux nodules pluri-centimétriques, à cortex brun foncé et coeur brun vif. La macroporosité de cet horizon est importante. La nature de la matrice varie entre celle des horizons sus-jacents (horizon sableux E beige ou E albique) et celle de l'horizon sous-jacent (horizon S g' argileux jaune-gris).

Ensemble d'horizons 13 et 14 : horizons humifères enfouis (horizons Ab)

Horizons 13 et 14.

Aspect macro
10x15 cm :
cf. planche 2.13-14

Enveloppe de l'ensemble : cet ensemble d'horizons est situé dans le domaine hydromorphe (unité de modelé 4). La forme de son toit est quasi horizontale. Il s'intercale avec des limites très nettes, entre les horizons sous-jacents (horizons G, S g' et X), et l'horizon sableux blanchi sus-jacent (horizon E a).

Contenu de l'ensemble : ces horizons ne présentent pas d'éléments grossiers. Ils correspondent à une succession verticale d'horizons sans macroporosité visible, dont la matrice est :

- argilo-sableuse et noire (10 YR 2/1 en humide) pour les horizons I A b;
- sableuse et grise foncé (10 YR 6/1 en humide) pour les horizons II Ab.

On remarquera que le taux de minéralisation de la matière organique de ces horizons est plus faible que celui des horizons sus-jacents et sous-jacents (C/N supérieur à 12 pour les

horizons II A b et atteignant 20 pour les horizons I A b, contre 9 pour l'horizon E a sus-jacent et moins de 6 pour les horizons sous-jacents).

Ensemble d'horizons 15 et 16 : horizons sableux peu ou non humifères

(horizons E)

Cet ensemble apparaît dans le domaine ferrugineux et s'étend également dans le domaine hydromorphe. Il se situe sous l'horizon de surface humifère (horizon A). Il repose à l'amont sur les horizons à gravats de quartz et nodules ferrugineux (horizons 11 et 12), et à l'aval sur des horizons humifères enfouis (horizons 13 et 14).

Depuis l'amont vers l'aval, l'éclaircissement de la matrice et le passage à des textures plus sableuses permettent de distinguer deux horizons.

Horizon 15 :
horizon sableux
beige
(horizon E beige)

Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.15
--

Enveloppe : cet horizon apparaît sur la nappe de gravats (horizon X cn) à la limite amont du domaine ferrugineux (unité de modelé 3). D'abord épais de quelques dizaines de centimètres, il atteint près de 2 mètres vers l'aval, puis disparaît en biseau dans le domaine hydromorphe, en concordance avec le développement de l'horizon sableux blanchi (horizon E albique). Ses limites avec horizon humifère sus-jacent sont graduelles. Elles sont en revanche très nettes avec les horizons sous-jacents (horizons X cn et E albique).

Contenu : il s'agit d'un horizon meuble, à structure massive, de texture sableuse à sablo-limoneuse. De très nombreux pores y sont visibles à l'oeil nu. Sa matrice varie de l'orange pâle (7.5 YR 6/6 en sec) au brun très pâle (10 YR 7/4 en sec). Le fer y est peu abondant (moins de 2 % de fer total au sein de la fraction 0-2000 μ). Par ailleurs, on observe quelques taches rouges argileuses au sein de la matrice. Enfin, on peut observer, associées à des fissures, quelques langues verticales de matériau sableux blanchi.

Horizon 16 :
horizon sableux
blanchi
(horizon E a)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.16</p>

Enveloppe : cet horizon apparaît à l'aval du domaine ferrugineux sous forme d'un biseau à toit horizontal naissant sous l'horizon E beige. Il se développe ensuite sur plus d'un mètre d'épaisseur dans le domaine hydromorphe (unité de modelé 4). Il s'intercale entre l'horizon humifère de surface, avec lequel ses limites sont graduelles, et un horizon argilo-sableux (horizon Ab) avec lequel ses limites sont très nettes.

Contenu : Les rares éléments grossiers de cet horizon sont des graviers de quartz et des nodules ocre à cortex. Il s'agit d'un horizon très meuble, à structure massive et de texture sableuse. De très nombreux pores y sont visibles à l'oeil nu. Sa matrice est gris clair (10 YR 7/1 en sec) à blanche (10 YR 8/2 en sec), et est très pauvre en fer (environ 1 % de fer total sur la fraction 0-2000 μ). Quelques taches rouilles d'oxydation s'observent à proximité de l'axe de drainage.

Ensemble d'horizons 17 et 18 : horizons humifères (horizons A)

Cet ensemble correspond à l'épipédon humifié. On peut y distinguer 2 horizons.

Horizon 17 :
horizon sableux
humifère à
gravillons
(horizon A cn)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.17</p>

Enveloppe : cet horizon de surface est localisé dans le domaine ferrallitique (unité de modelé 2). Il s'y développe sur une trentaine de centimètres d'épaisseur. Sa limite inférieure varie en fonction de la nature de l'horizon sous-jacent : lorsqu'il s'agit de l'horizon argileux rouge (horizon S s) ou de l'horizon argileux ocre à gravillons (horizon B cn d), cette limite est graduelle. Lorsque cet horizon est en contact avec l'horizon B s m carapacé, cette limite est distincte et irrégulière. Il pénètre alors en langues dans cet horizon.

Contenu : la partie inférieure de cet horizon contient de nombreux graviers de quartz, des nodules ocre-rouge et des fragments de cuirasse sommitale. Il s'agit d'un horizon meuble, à structure polyédrique subanguleuse, et de texture sableuse. De très nombreux pores y sont visibles à l'oeil nu. La matrice est brun foncé à brun (10 YR 3/3 à 5/3 en sec). Les teneurs en fer sont peu élevées (environ 3 % de fer total dans la fraction 0-2000 μ). On peut y observer d'assez nombreuses boulettes fécales.

Horizon 18 :
horizon sableux
humifère
(horizon A)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.18</p>

Enveloppe : cet horizon de surface s'observe dans les domaines ferrugineux et hydromorphes (unités de modelé 3 et 4). Epais de 30 à 40 centimètres d'épaisseur, sa limite est graduelle avec les horizons E sous-jacents.

Contenu : Il ne présente pas d'éléments grossiers. Il s'agit d'un horizon meuble, à structure polyédrique subanguleuse peu nette, de texture sableuse. De très nombreux pores y sont visibles à l'oeil nu. Sa matrice est gris foncé (10 YR 4/1 en sec) à gris (10 YR 5/1 en sec). Les teneurs en fer sont très peu élevées (moins de 1,5 % de fer total dans la fraction 0-2000 μ). Quelques taches rouilles d'oxydation s'y observent dans la partie aval du versant.

Ensemble d'horizons 19 et 20 : horizons ferriques cuirassés (horizons FE m)

Enveloppe de l'ensemble : cet ensemble de forme tabulaire est localisé dans la partie sommitale du domaine ferrallitique (unité de modelé 1) où il affleure. Il est très nettement séparé du profil d'altération rouge (horizons S s et I SC s), par un banc de cailloux de quartz très émoussés.

Contenu de l'ensemble : il correspond à des horizons très fortement indurés par les oxyhydroxydes de fer, qui ne se débitent qu'au marteau.

**Horizon 19 :
cuirasse
lamellaire
(horizon I FE m)**

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.19</p>

Enveloppe : épais d'une quarantaine de centimètres, cet horizon constitue la base de l'ensemble cuirassé. Il présente une limite très nette avec l'horizon sus-jacent (cuirasse vacuolaire).

Contenu : il se débite en feuillets d'épaisseur pluricentimétrique, à coeur jaune brunâtre et faces violacées.

Horizon 20 :
cuirasse
vacuolaire
(horizon II FEm)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.20</p>

Enveloppe : épais d'environ 1 mètre, cet horizon supérieur affleure en blocs plus ou moins fragmentés.

Contenu : d'assez nombreux cailloux de quartz ferruginisés sont enchâssés dans la partie supérieure de cet horizon. Il est constitué d'un matériau fortement induré brun jaunâtre à brun violacé, au sein duquel on trouve de nombreuses vacuoles centimétriques bordées de ferranes indurés. Sa face affleurante est couverte de pisolithes ferrugineux, soudés à la cuirasse par une pellicule ferrugineuse.

4.2.2. Interprétations génétiques

La distribution des horizons dans l'espace, ainsi que leurs caractéristiques d'enveloppe et de contenu, nous conduisent à formuler un certain nombre d'interprétations génétiques.

Celles-ci seront d'abord examinées à l'échelle individuelle des horizons, puis résumées à l'échelle du versant.

4.2.2.A. Interprétations individuelles des horizons

Dans les paragraphes suivants, nous proposons systématiquement une interprétation pour chaque horizon. Celle-ci porte :

- d'une part, sur l'origine du matériau parental de l'horizon;
- d'autre part, sur certains processus génétiques ayant pu conduire à la différenciation de l'horizon, ainsi que sur les causes potentielles de ces processus.

A l'issue de cette interprétation, chaque horizon est rattaché à une référence (A.F.E.S., 1992) qui est définie sur la base de critères morpho-génétiques.

Horizon 1 : arène micacée (horizon C)

origine du matériau parental

Il s'agit d'un matériau directement issu de l'altération du gneiss, puisqu'on y retrouve entièrement sa structure lithologique.

processus génétiques et causes potentielles

Cet horizon représente un stade d'altération de la roche au cours duquel celle-ci subit essentiellement une désagrégation. En effet, on n'y observe pas de traces d'argilogenèse. D'autre part, sur la majeure partie du versant, sa couleur est directement conférée par les minéraux primaires. La libération d'oxy-hydroxydes de fer y est donc très faible.

On notera toutefois le fait qu'il acquiert graduellement une teinte olive pâle dans le domaine aval hydromorphe. Ceci suggère la présence de fer libre sous forme réduite. Ainsi, pour cette partie du versant, il semble possible d'invoquer l'action réductrice d'une nappe phréatique. / Non

rattachement à une référence

Le fait que cet horizon correspond essentiellement à la désagrégation de la roche nous conduit à le rattacher à la référence C.

Ensemble d'horizons 2,3 et 4 : horizons altéritiques à matrice rouge (horizons SC s)

origine du matériau parental

Cet ensemble d'horizons à structure lithologique partiellement conservée est manifestement constitué de matériau issu de l'altération du gneiss.

processus génétiques et causes potentielles

Par rapport à l'horizon C, cet ensemble a subi une altération plus intense. En effet, on y observe, comparativement :

- le développement de l'argilogenèse (apparition de kaolinite et d'illite);
- la libération d'oxy-hydroxydes de fer (goethite et hématite).

Cela étant, les traits pédologiques qui différencient les trois horizons de cet ensemble altéritique révèlent l'existence de transformations croissantes depuis l'horizon 2 jusqu'à l'horizon 4 :

- **L'horizon 2 (altérite rouge homogène : horizon I SC s)** ne présente pas de traits pédologiques susceptibles d'indiquer une action particulière de l'eau (absence d'indices de circulations préférentielles d'eau; absence d'indices d'engorgement temporaire ou permanent). Il correspond à l'altérite ferrallitique sensu-stricto (matrice de coloration rougeâtre et contenant de la kaolinite), laquelle (cf. chapitre 1), pourrait être inactuelle. Cet horizon constituerait donc une relique de l'altération ferrallitique primitive, dans laquelle les conditions actuelles ne favoriseraient pas de nouvelle évolution.

- **L'horizon 3 (altérite rouge tachetée de gris : horizon II SC s)** correspond à une transformation localisée de l'altérite rouge ferrallitique par formation de plages grises. Si l'on considère la nature de ces plages (moindre richesse en fer, texture plus argileuse que la matrice rouge et absence de traits pédologiques d'illuviation), cette transformation consiste en la déferrisation de la matrice et la poursuite de l'argilogenèse à partir des minéraux primaires résiduels (principalement la muscovite).

La présence de macropores au sein de ces plages grises conduit à l'hypothèse que ce type de transformation pourrait avoir été causé par des circulations préférentielles d'eau dans la macroporosité. De telles circulations (actuelles ou passées) seraient ou auraient été

susceptibles d'entraîner le fer et de favoriser l'argilogenèse à partir des minéraux primaires résiduels.

- **L'horizon 4 (Altérite rouge-jaune-gris : horizon III SC s)** correspondrait à un horizon de transition entre l'altérite rouge tachetée uniquement de gris (horizon 3 : II SC s) et l'horizon 5 argileux à matrice entièrement jaune (horizon S g').

Il présente, en effet, un réseau de plages gris clair analogue à celui de l'horizon 3 : comme pour ce dernier, ce réseau résulte d'une déferrisation de la matrice rouge et d'une poursuite de l'argilogenèse à partir des minéraux primaires. De même que pour l'horizon 3, ce réseau est associé à la macroporosité, de sorte que ce type de transformation pourrait également avoir été causé par des circulations préférentielles de l'eau dans la macroporosité.

Toutefois, par rapport à l'horizon 3, on observe aussi la présence d'une phase altéritique jaune qui se situe en périphérie du réseau gris clair. Sa couleur est semblable à celle de la matrice de l'horizon 5 sus-jacent (horizon jaune-gris S g'), ce que nous interprétons comme étant dû à une composition analogue en oxy-hydroxydes de fer (présence de goethite et absence d'hématite). Par rapport à la matrice rouge, qui contient à la fois de la goethite et de l'hématite, il se serait donc produit une disparition sélective de l'hématite. Cette disparition d'hématite aurait provoqué le passage de la couleur rouge à la couleur jaune, conformément à certains résultats obtenus en laboratoire (SEGALEN, 1969; JEANROY et al., 1991). En ce qui concerne les causes de cette disparition de l'hématite, on peut, comme pour le réseau gris clair, émettre certaines hypothèses concernant l'action de l'eau. En effet, selon l'hypothèse retenue pour les horizons 2 et 3, le réseau gris clair déferrisé et associé à la macroporosité aurait été soumis à des circulations préférentielles d'eau. Cette phase jaune se situant systématiquement en périphérie de ce réseau gris clair, il apparaît donc possible qu'elle ait été indirectement soumise à l'action de ces mêmes circulations préférentielles.

rattachement à une référence

Dans la mesure où la structuration pédologique de cet ensemble d'horizons n'est pas généralisée, nous rattachons l'ensemble à un intergrade (SC) entre un horizon de référence C et un horizon de référence à structure pédologique généralisée (horizon S). La libération d'oxyhydroxydes de fer nous conduit à adopter le suffixe s.

Horizon 5 : horizon argileux jaune-gris (horizon S g')

origine du matériau parental

La présence de limites graduelles entre cet horizon et l'altérite à matrice rouge sous-jacente montre qu'il s'est formé par évolution de cette altérite. Le matériau de cet horizon est donc issu de l'altération de la roche.

processus génétiques et causes potentielles

L'évolution depuis l'altérite vers cet horizon apparaît liée à plusieurs processus, qui peuvent être dégagés par comparaison entre les caractéristiques morphologiques et minéralogiques de cet horizon et celles de l'horizon altéritique sous-jacent (horizon 4 : III SC s) :

- d'une part, la texture plus argileuse de cet horizon et sa composition minéralogique indiquent une poursuite de l'argilification, avec formation de kaolinite et d'illite;
- d'autre part, le jaunissement de la matrice se généralise ici à l'ensemble de la matrice, alors qu'il n'est que partiel dans l'horizon 4 sous-jacent. Comme pour l'horizon 4, ce jaunissement semble correspondre à une disparition sélective de l'hématite.

rattachement à une référence

La poursuite de l'argilification qui s'est effectuée dans cet horizon par rapport aux horizons SC nous permet de le rattacher à un horizon de référence de type structural (horizon S).

Par ailleurs, la juxtaposition de plages jaune et grises apparenterait cet horizon à un type hydromorphe rédoxique (horizon à suffixe g). Toutefois, contrairement à cette référence, il ne semble pas y avoir de ré oxydation du fer dans la matrice jaune, mais disparition sélective de l'hématite. C'est pourquoi nous créons et utilisons ici le suffixe dérivé g'.

Horizon 6 : horizon argileux rouge (horizon S s)

origine du matériau parental

La limite entre cet horizon et l'altérite sous-jacente est graduelle. Il est donc constitué de matériaux issus de l'altération de la roche.

processus génétiques et causes potentielles

La formation de cet horizon semble résulter principalement :

- d'une pédoturbation;
- d'une argilification de l'altérite rouge.

Comme dans l'altérite rouge homogène, il n'y a pas de traits pédologiques susceptibles d'indiquer une action particulière de l'eau (absence d'indices de circulations préférentielles d'eau; absence d'indices d'engorgement temporaire ou permanent).

rattachement à une référence

Les processus de pédoturbation et d'argilification qu'aurait subi cet horizon nous conduisent à le rattacher à la référence S (horizon structural). La présence d'oxyhydroxydes de fer nous conduit, par ailleurs à adopter le suffixe s.

Horizon 7 : horizon argileux verdâtre (horizon G)

origine du matériau parental

La limite graduelle de cet horizon avec l'arène micacée sous-jacente montre qu'il est constitué de matériau issu de l'altération de la roche.

processus génétiques et causes potentielles

La coloration gris-verdâtre de cet horizon est attribuable à une réduction partielle du fer contenu dans les minéraux argileux (SCHWERTMANN, 1993), qui se produirait en conditions anaérobies, et sous l'effet d'un engorgement permanent.

Par ailleurs, la présence de smectite au sein de cet horizon peut s'interpréter comme résultant d'une néosynthèse d'argile en condition de confinement des bases (DUCHAUFOR, 1977).

rattachement à une référence

Il s'agit, typiquement, d'un horizon hydromorphe réductique (FAVROT et VIZIER, 1992), d'où son rattachement à un horizon de référence de type G.

Ensemble d'horizons 8 et 9 : horizons indurés (horizons B s plinthique et B s m)

origine du matériau parental

La présence de graviers de quartz et de fragments de cuirasse sommitale enchâssés au sommet de l'horizon 9 indique l'existence d'apports colluviaux superficiels. Toutefois, la limite de cet ensemble avec l'altérite à matrice rouge est graduelle, ce qui montre qu'il est, pour l'essentiel, constitué de matériau issu de l'altération de la roche.

processus génétiques et causes potentielles

Par rapport à l'altérite à matrice rouge sous-jacente, plusieurs processus transformants peuvent être mis en cause :

- d'une part, la matrice semble avoir été le siège d'un processus d'argilification;
- d'autre part il s'y est accumulé des oxy-hydroxydes de fer et de manganèse. Ces accumulations auraient provoqué la cimentation du matériau;
- enfin, il s'est développé, depuis le haut vers le bas de cet ensemble, un réseau intermatriciel de coloration plus claire et contenant moins de fer que la matrice.

La présence de macropores au sein du réseau clair déferrisé conduit à l'hypothèse que celui-ci s'est formé par des circulations préférentielles d'eau dans la macroporosité.

D'autre part, certaines hypothèses, également liées à l'action de l'eau, peuvent être avancées pour expliquer l'accumulation d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse au sein de la matrice. En effet, il pourrait s'agir d'accumulation absolue par lixiviation verticale ou oblique. Il pourrait également s'agir de redistributions au sein de l'horizon, selon un processus proche de celui qui est décrit dans la formation des horizons rédoxiques (FAVROT et VIZIER, 1992) :

redistribution d'oxy-hydroxydes de fer et de manganèse migrant, lors des périodes de saturation, depuis le réseau vers la matrice, où ils s'immobiliseraient lors du dessèchement.

rattachement à une référence

L'accumulation d'oxy-hydroxydes de fer au sein de la matrice de cet ensemble d'horizon nous conduit à le rattacher à une référence B s. Par ailleurs, les deux horizons de cet ensemble peuvent être distingués en fonction de leur induration (d'où l'emploi du suffixe m pour l'horizon 9 carapacé).

Horizon 10 : horizon argileux ocre à gravillons (horizon B cn d)

origine du matériau parental

La présence de graviers de quartz et de fragments de cuirasse sommitale suggèrent que le matériau parental de cet horizon a été enrichi d'apports colluviaux. Toutefois, deux faits d'observation suggèrent que cet horizon se forme principalement par évolution de la partie supérieure de l'horizon 9 carapacé (horizon B s m) :

- d'une part, l'existence d'interdigitations avec cet horizon;
- d'autre part, la présence d'îlots de matériau analogue à celui de cet horizon.

Ainsi, le matériau parental de cet horizon serait issu de l'altération de la roche, au même titre que l'horizon B s m carapacé.

processus génétiques et causes potentielles

Il s'agirait d'une forme de dégradation de la carapace. Dans ce type de dégradation, une partie du fer semble éliminée (teneurs en fer total de l'ordre de 7 % contre environ 10 % dans

l'horizon B s m carapacé). En revanche, on n'observe pas de perte en argile (teneurs en argile sensiblement équivalentes dans cet horizon et dans la carapace sous-jacente).

Cette forme particulière de dégradation pourrait avoir été causée par les eaux d'infiltration.

rattachement à une référence

Dans la mesure où cet horizon résulterait d'une dégradation de l'horizon B s m, sans qu'il y ait désargilification, nous le rattachons également à une référence B, accompagnée des suffixes cn (pour la présence de gravillons ocre rouge) et d (pour dégradé).

Ensemble d'horizons 11 et 12 : horizons cailloutiques à nodules ferrugineux ou gravats de quartz (horizons X)

origine du matériau parental

L'abondance des éléments grossiers, la forme générale en nappe, et le type de limite que cet ensemble d'horizons présente avec les horizons sous-jacents et sus-jacents, le rattachent à la "nappe de gravats" (LOZET et MATHIEU, 1986), fréquemment observée dans les sols tropicaux. On peut rappeler les hypothèses proposées pour expliquer l'origine de ce type de formation :

- dans une première hypothèse, cette nappe de gravats correspondrait à un pavage d'éléments grossiers sur une ancienne surface topographique, ultérieurement enfouis sous des sédiments plus fins (RIQUIER, 1969);

- une deuxième explication possible serait la destruction in situ de filons de quartz et de la carapace, associée à une exportation de matériau fin (COLLINET, 1969);

- enfin, il pourrait s'agir d'une ségrégation biologique de gravats due à la remontée de particules de terre fine sous l'action des termites (LEVEQUE, 1969).

Ici, l'hypothèse biologique nous paraît la moins plausible. En effet, celle-ci s'accorde mal avec le fait que cette nappe de gravats n'existe pas dans la partie amont du versant, dans laquelle se trouve pourtant la plus grande densité de termitières (cf. chapitre 1). L'hypothèse de la destruction in situ de la carapace est déjà plus plausible, car l'apparition de l'horizon 12 à nodules ferrugineux (horizon X cn) concorde avec la disparition de l'horizon B s m carapacé. Cependant, les quartz de l'horizon 11 X u présentent une orientation variable et des faces très émoussées, ce qui nous suggère qu'ils ont subi un déplacement. En définitive, l'explication que nous retenons, pour l'horizon 11, est donc celle d'un pavage d'éléments grossiers sur une ancienne surface topographique. Dans ces conditions, l'horizon 12 X cn, qui se situe au dessus de l'horizon 11, ne peut être le produit de la désagrégation in situ de la carapace. Il résulterait également d'un pavage d'éléments grossiers.

rattachement à une référence

Les teneurs en éléments grossiers de cet ensemble d'horizons nous conduisent à le rattacher à une référence X. Leur nature nous permettent l'emploi des suffixes u (pour le quartz) et cn (pour les nodules ferrugineux).

Ensemble d'horizons 13 et 14 : horizons humifères enfouis (horizons Ab)

origine du matériau parental

Ces horizons correspondent à un litage organo-minéral à texture alternée. Pour expliquer l'origine de ce litage, l'hypothèse de la différenciation d'un matériau initialement homogène par

éluviation/illuviation verticale et oblique (BOULET et al., 1975 et 1982) est à écarter, dans la mesure où on n'observe aucun caractère d'illuviation au sein des horizons argilo-sableux. L'explication la plus vraisemblable reste que le matériau parental de ces horizons correspond à des dépôts alluviaux successifs, ultérieurement enfouis sous d'autres matériaux.

rattachement à une référence

L'humification de ces horizons nous conduisent à les rattacher à la référence A (horizon organo-minéral). Leur enfouissement explique l'emploi du suffixe b.

Ensemble d'horizons 15 et 16 : horizons sableux non humifères (horizons E)

origine du matériau parental

Cet ensemble d'horizons repose à l'amont sur des horizons qui représenteraient une ancienne surface topographique (horizons X), et à l'aval sur des horizons qui seraient des dépôts alluviaux successifs (horizons A b). En conséquence, le matériau constituant cet ensemble ne serait pas issu de l'altération de la roche, mais serait plutôt d'origine colluvio-alluviale ou alluviale.

processus génétiques et causes potentielles

Cet ensemble d'horizons semble avoir subi un appauvrissement en fer et en argile qui s'intensifie depuis le domaine ferrugineux (horizon 15) vers le domaine hydromorphe (horizon 16) :

- l'**horizon 15 (sable beige: horizon E)** présente des taches rouges argileuses qui constitueraient les volumes relictuels du matériau originel. La matrice, plus pauvre en fer et en

argile que ces volumes, aurait donc subi une déferrisation et une désargilification. Nous avons vu, au chapitre 1, que ce type d'horizon pourrait se développer en conditions d'alternance d'humectations et de fortes dessiccations (CHAUVEL, 1977; CHAUVEL et PEDRO, 1978).

- **l'horizon 16 (sable blanchi : horizon E a)** présente des teneurs en fer et en argile encore plus faibles que l'horizon 15 sableux beige. Contrairement à ce dernier, il ne présente pas de volume relictuel pouvant permettre de préjuger de la nature du matériau originel. Toutefois, certains faits d'observation suggèrent la possibilité d'une filiation génétique entre cet horizon 16 et l'horizon 15. En effet, au vu des plans tomographiques, les limites entre ces deux horizons sont interdigitées. D'autre part, au vu des coupes, l'horizon 16 se développe en biseau sous l'horizon 15. Enfin, on observe, dans l'horizon 15, des volumes sableux blanchis analogues à la matrice de l'horizon 16. L'horizon 16 aurait donc pu se former au dépend de l'horizon 15, par accentuation des processus de déferrisation et de désargilification.

En ce qui concerne les conditions dans lesquelles ce type d'horizon peut se former, on peut se référer à une interprétation antérieure mentionnée au chapitre 1. En effet, l'intensité de la déferrisation et de la désargilification dans ce type d'horizon a été précédemment attribuée à la forte action soustractive d'une nappe (FRITSCH, 1993). Cette interprétation concorde avec certains faits que nous observons ici : forme plane du toit de l'horizon; localisation en périphérie de l'axe de drainage, présence de taches d'oxydo-réduction.

rattachement à une référence

Les processus de déferrisation et de désargilification subis par cet ensemble d'horizon nous conduisent à le rattacher à une référence E (horizons éluviaux appauvris en fer et en minéraux argileux). De plus, l'accentuation de ces processus dans l'horizon 16, ainsi que ses

caractéristiques de texture et de couleur, nous amènent à y ajouter le suffixe a (horizon E a éluvial albique fortement appauvri en fer et en minéraux argileux).

Horizon 17 : horizon sableux humifère à gravillons (horizon A cn)

origine du matériau parental

Au vu de la présence de nombreux graviers de quartz et de fragments de cuirasse sommitale, cet horizon apparaît enrichi en apports colluviaux. Toutefois, sa partie minérale semble essentiellement issue d'une évolution des horizons sous-jacents, eux-mêmes issus de l'altération de la roche. En effet, lorsqu'il repose sur les horizons argileux rouge et ocre (horizons S s et B cn d), sa limite est graduelle. Lorsqu'il est directement en contact avec l'horizon B s m carapacé, il y pénètre en langues, ce qui suggère qu'il représente une dégradation de cet horizon. De plus, on y observe la présence de nodules ocre-rouge qui pourraient constituer des reliques de carapace.

processus génétiques et causes potentielles

Cet horizon se distingue en premier lieu des horizons sous-jacents par une accumulation de matière organique et par sa structuration pédologique d'origine biologique.

Cependant, sa matrice est aussi nettement plus pauvre en fer et en argile que ces horizons sous-jacents. Elle semble donc avoir subi une déferrisation et une désargilification. Comme dans le cas de l'horizon E beige, on peut supposer que des conditions d'alternance d'humectations et de fortes dessiccations soient à l'origine de tels processus.

rattachement à une référence

L'accumulation de matière organique dans cet horizon nous conduit à le rattacher à la référence A (horizon organo-minéral). L'abondance de nodules ocre-rouge (nodules sesquioxydiques) explique l'emploi du suffixe cn.

Horizon 18 : horizon sableux humifère (horizon A)

origine du matériau parental

Si l'on considère que la limite entre cet horizon et les horizons E sous-jacents est graduelle, on peut en déduire qu'ils proviennent du même matériau parental. Il s'agirait, (cf. interprétation des horizons E), d'un matériau d'origine colluvio-alluviale ou alluviale.

processus génétique et causes potentielles

Cet horizon se distingue essentiellement des horizons E sous-jacents par l'accumulation de matière organique.

Comme pour ces horizons E, la matrice de cet horizon semble avoir subi une déferrisation et une désargilification. On peut attribuer à ces processus les mêmes causes que celles qui auraient conduit à la formation des horizons E : alternances d'humectation-dessiccation dans le domaine ferrugineux où cet horizon se développe sur l'horizon E beige; nappe soustractive dans le domaine hydromorphe où cet horizon se développe sur l'horizon E albique.

rattachement à une référence

L'accumulation de matière organique dans cet horizon nous conduit à le rattacher à la référence A

Ensemble d'horizons 19 et 20 : horizons ferriques cuirassés (horizons FE m)

origine du matériau parental

La présence d'un banc de cailloux de quartz très émoussés entre cet ensemble d'horizons et les horizons issus de l'altération de la roche (horizons S s et I SC s) semble montrer que ces horizons cuirassés n'appartiennent pas au profil d'altération. Autrement dit, le matériau parental de cet ensemble d'horizon serait issu d'apports. Ceci va dans le sens de certaines remarques générales, déjà mentionnées en première partie de ce mémoire, à propos de l'origine de la cuirasse (GAVAUD, 1967; BOULET, 1970; VOGT, 1968; KALOGA, 1986).

processus génétiques et causes potentielles

Dans la mesure où cet ensemble d'horizons cuirassés ne semble pas dériver de l'altération de la roche, il reste difficile d'avoir une idée exacte de la nature du matériau originel et, par conséquent, des transformations qu'il a pu subir. On peut toutefois penser qu'il aurait été le siège d'une importante accumulation de fer. Conformément à l'hypothèse de MAIGNIEN (1958) et de MILLOT (1963), cette accumulation pourrait s'être produite par voie soluble, dans des conditions géomorphologiques et hydrologiques qui ont actuellement disparu (cf. chapitre 1).

On remarquera que l'horizon 19, qui constitue la base de cet ensemble, présente un aspect lamellaire qui le distingue nettement d'un horizon à structuration pédologique. En revanche, l'horizon 20 pourrait représenter un horizon pédoturbé, ultérieurement fossilisé par les accumulations de fer.

rattachement à une référence

La forte accumulation de fer dans ces horizons permettent de les rattacher à une référence FE (horizons ferriques). Leur induration justifie l'emploi du suffixe m.

4.2.2.B. Interprétations à l'échelle du versant

Afin d'expliquer la différenciation de la pédoséquence, on peut à présent résumer, à l'échelle du versant, les interprétations proposées individuellement pour chaque horizon.

Ces interprétations portent :

- d'une part, sur l'origine du matériau parental des horizons;
- d'autre part, sur certaines transformations conduisant à la différenciation des horizons.

4.2.2.B.1. Origine du matériau parental des horizons

L'examen de la nature et de la distribution des horizons dans l'espace a fait apparaître **deux grands ensembles**, selon l'origine de leur matériau parental (cf. figure IV-5) :

- d'une part, **un ensemble de matériaux issus de l'altération de la roche**. Cet ensemble, qui recouvre tout le versant, inclut les horizons C, SC, S, B, G et A cn. Sa topographie présente une forte rupture de pente au passage entre l'unité de modelé 2 (moyen glaciaire quaternaire) et l'unité de modelé 3. Ainsi, conformément aux hypothèses de LEVEQUE (1979) et KALOGA (1986), l'unité de modelé 3 correspondrait à une génération de glaciaire intermédiaire entre le moyen glaciaire quaternaire et le bas glaciaire.

- d'autre part, **un ensemble dont le matériau parental serait issu d'apports**. Cet ensemble comprend les horizons FE m, qui constituent un apport d'origine indéterminée, et qui

se surimposent au profil d'altération de l'unité de modelé 1 (haut-glacis quaternaire, domaine ferrallitique). Cette surimposition confirme les observations effectuées sur d'autres versants de ce type (GAVAUD, 1967; VOGT, 1968; BOULET, 1970; KALOGA, 1969 et 1986). D'autre part, à partir de la rupture de pente qui sépare l'unité de modelé 2 (moyen glacis quaternaire, domaine ferrallitique) de l'unité de modelé 3 (domaine ferrugineux), cet ensemble inclut les horizons supérieurs (horizons A, E, X, et Ab), qui sont manifestement d'origine colluvio-alluviale ou alluviale. Par conséquent, les domaines ferrugineux et hydromorphes correspondraient au comblement partiel du bas de versant.

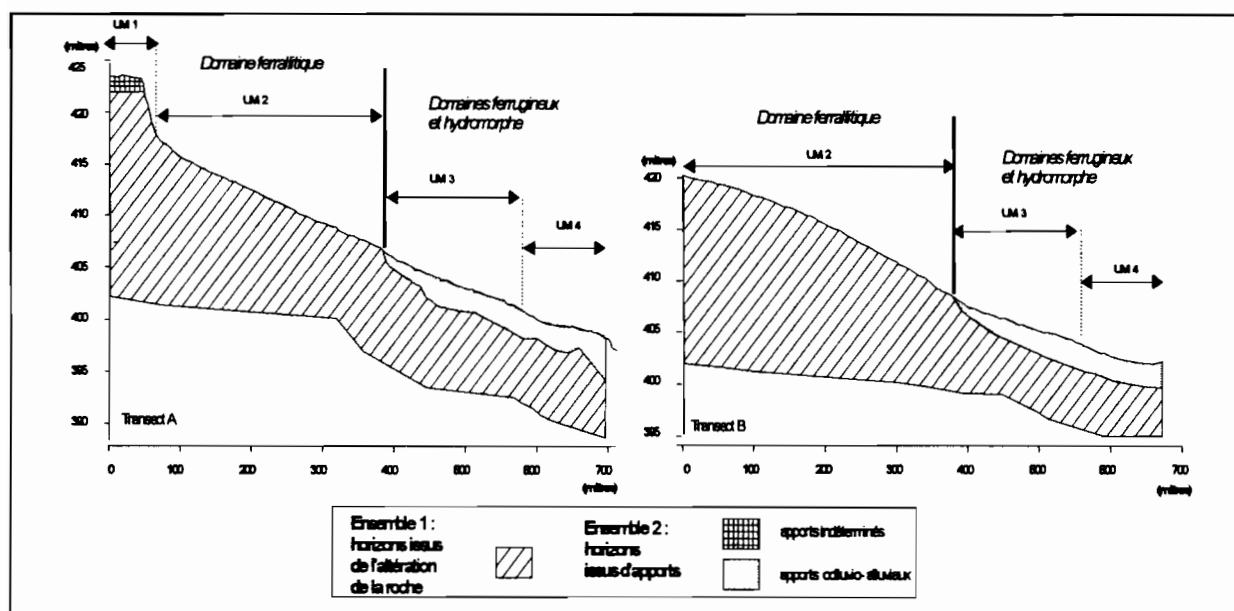


Figure IV-5. Les ensembles d'horizons selon l'origine de leur matériau parental (interprétation).

4.2.2.B.2. Transformations conduisant à la différenciation des horizons

Au sein des ensembles d'horizons définis ci-dessus, nous avons identifié un certain nombre de processus de transformation qui conduisent à la différenciation d'horizons. Ces processus sont résumés en figure IV-6 .

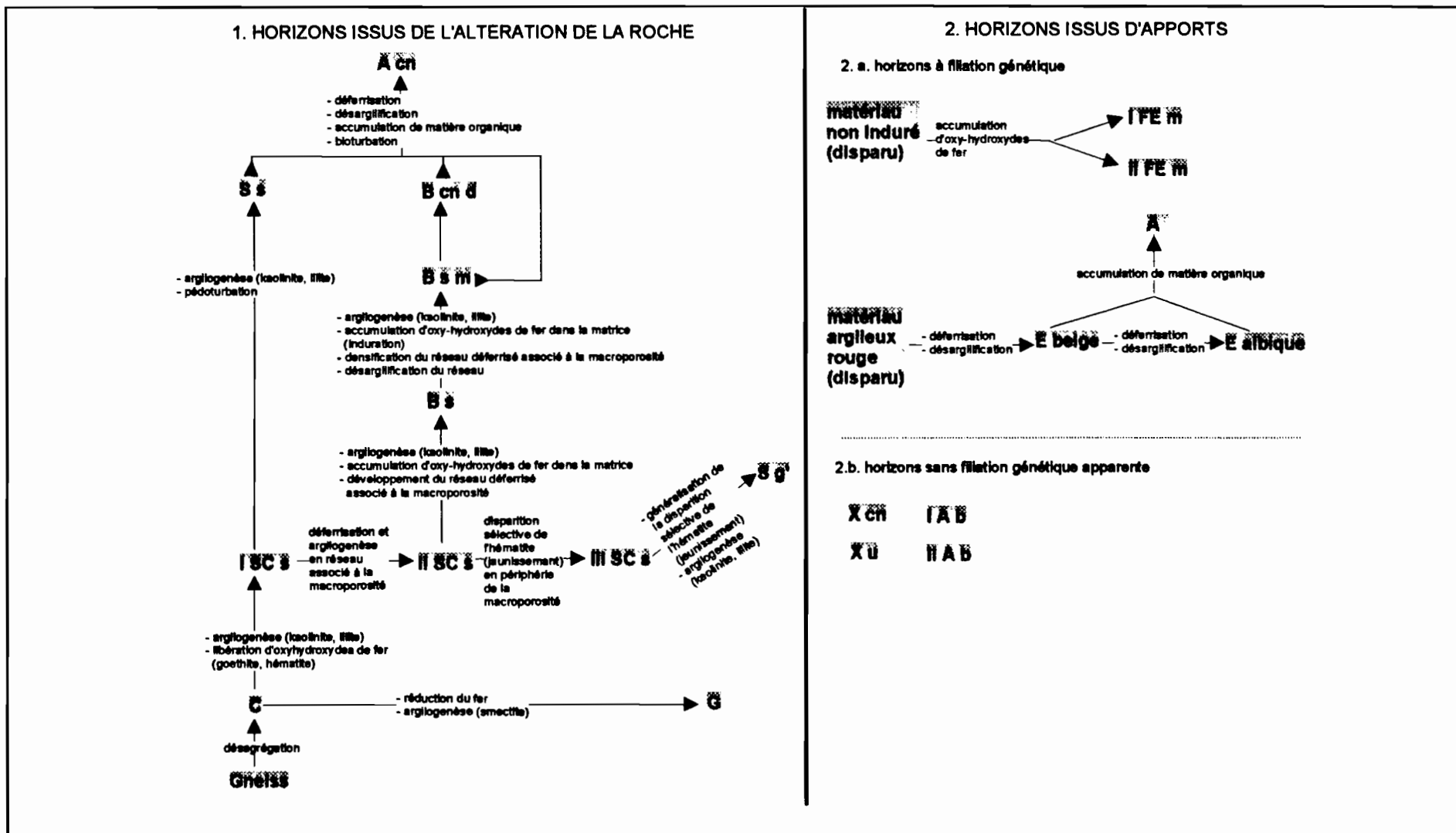


Figure IV-6. Processus génétiques et filiation entre les horizons (interprétation).

Parmi ces processus de transformation, un certain nombre d'entre eux (déferrisation, disparition sélective de l'hématite, réduction du fer, ...) peuvent s'expliquer par l'action de l'eau. Comme les horizons pédologiques se différencient selon les domaines pédologiques, cette action de l'eau varierait selon ces domaines. Ainsi :

- dans le domaine ferrallitique

Nous n'avons pas observé d'indices évident de l'action d'une nappe. Mais il pourrait y avoir des circulations préférentielles indiquées par la déferrisation et la disparition sélective de l'hématite en périphérie de la macroporosité (formation des horizons II SCs et III SC et des horizons B)

- dans le domaine ferrugineux

Nous n'avons pas observé d'indices évident de l'action d'une nappe dans la partie supérieure du sol (horizons E). Toutefois, les horizons S g' sous-jacents sont marqués par des caractères d'hydromorphie particuliers (généralisation du jaunissement par disparition sélective de l'hématite), qui pourraient indiquer l'action d'une nappe.

- dans le domaine hydromorphe

Le caractère extrême de la désargilification et de la déferrisation des horizons E albique semble indiquer la forte action soustractive d'une nappe. En profondeur, la réduction du fer conduisant à la formation de l'horizon G indique également l'action d'une nappe.

En définitive, la différenciation de cette pédoséquence semble fortement conditionnée par l'action de l'eau, actuelle ou passée.

4.3. Les séquences de caractères analytiques

Cette deuxième approche de la pédoséquence vise à compléter l'analyse des horizons pédologiques par celle de quelques séquences de caractères analytiques obtenues selon la méthode de krigeage anisotrope exposée au § 4.1.3.B. Ces séquences concernent le transect B.

(A titre d'information complémentaire, on pourra trouver en Annexe G un ensemble d'autres séquences obtenues selon la même méthode).

4.3.1. Les séquences de couleur

La couleur du sol est généralement peu exploitée de manière analytique. Pourtant, cette caractéristique est importante, puisqu'elle constitue une des clés de la plupart des systèmes de classification. De plus, elle peut être liée à la nature des constituants (SEGALEN, 1969; TORRENT et al., 1983; JEANROY et al, 1991, SCHWERTMAN, 1993), et peut traduire certains effets du fonctionnement hydrique (MOKMA et SPRECHER, 1994). Il nous est donc apparu intéressant d'analyser la distribution dans l'espace de cette caractéristique.

Dans ce but, plusieurs variables quantitatives ont été déterminées à partir des couleurs Munsell des phases meubles des volumes pédologiques (couleurs prises à l'état sec). Il s'agit :

- a) **des trois composantes dissociées de la couleur munsell** : **V** (clarté ou value); **C** (pureté ou chroma); **H** (teinte ou hue). Les valeurs numériques de la clarté et de la pureté ont été directement obtenue à partir du code Munsell. En revanche, l'espace colorimétrique Munsell étant cylindrique, la teinte munsell a été transformée en teinte angulaire, conformément au codage précisé en Annexe E.

- b) **du Red Ratio** (TORRENT et al., 1983), qui se définit comme suit :

$$RR = \frac{(10 - H) \times C}{V}$$

avec C = pureté (chroma)

V = clarté (value)

H = teinte, avec comme convention H = 0 pour 10 R et H = 10 pour 10 YR

Par suite, nous avons tenu compte du fait qu'un volume pédologique peut présenter plusieurs phases meubles de couleurs différentes (jusqu'à trois, dans certains cas). C'est pourquoi, à partir des variables définies ci-dessus, nous avons calculé des variables qui caractérisent la couleur moyenne des volumes pédologiques. Ces dernières tiennent compte à la fois de la couleur des différentes phases meubles des volumes pédologiques, et de la proportion de ces phases meubles, qui a été déterminée à partir du codage numérique de l'échelle de quantification de terrain des phases meubles (cf. annexe D).

Ces variables ont été définies comme suit :

$$\text{- la Clarté moyenne} = \sum \alpha_i \times V_i$$

$$\text{- la Pureté moyenne} = \sum \alpha_i \times C_i$$

$$\text{- la Teinte moyenne} = \sum \alpha_i \times H_i$$

$$\text{- le Red ratio moyen} = \sum \alpha_i \times RR_i$$

où α_i = proportions des différentes phases meubles au sein d'un volume pédologique

V_i , C_i , H_i , RR_i = clartés, puretés, teintes et red ratios des différentes phases meubles

À partir de ces variables, nous avons obtenu les séquences présentées dans les paragraphes suivants.

4.3.1.A. Séquences de teinte, pureté et clarté moyennes

Les séquences de teinte, pureté et clarté moyennes sont présentées en figure IV-7. On observe nettement, pour ces trois séquences, qu'une variation latérale importante apparaît à mi-versant, à partir de la rupture de pente qui sépare le domaine ferrallitique du domaine ferrugineux.

Cette variation latérale se manifeste par le passage d'une teinte moyenne rouge à rouge jaunâtre dans le domaine amont ferrallitique (teinte angulaire inférieure à 63, soit plus rouge que 7.5 YR) à une teinte moyenne plus jaune dans le domaine médian ferrugineux (teinte angulaire comprise entre 63 et 72, soit entre 7.5 et 10 YR). Ce jaunissement s'accroît dans la partie aval du versant (domaine hydromorphe), par le passage à une teinte moyenne plus jaune que 10 YR (teinte angulaire comprise entre 72 et 81). Ce jaunissement très net depuis l'amont vers l'aval pourrait traduire la disparition sélective de l'hématite (SEGALEN, 1969; JEANROY et al. 1991). Il suggère des variations latérales importantes dans les conditions hydriques.

D'autre part, ce passage latéral correspond à une augmentation de la clarté moyenne (passage à des valeurs supérieures à 6), ce qui pourrait s'expliquer en partie par la diminution des teneurs en matière organique (SCHULZE et al., 1993).

Enfin, ce passage latéral correspond nettement à une diminution de la pureté moyenne (passage à des valeurs inférieures à 5). Il reste cependant difficile d'expliquer ce phénomène, car les relations entre cette variable et la nature des constituants ont été peu étudiées jusqu'à présent.

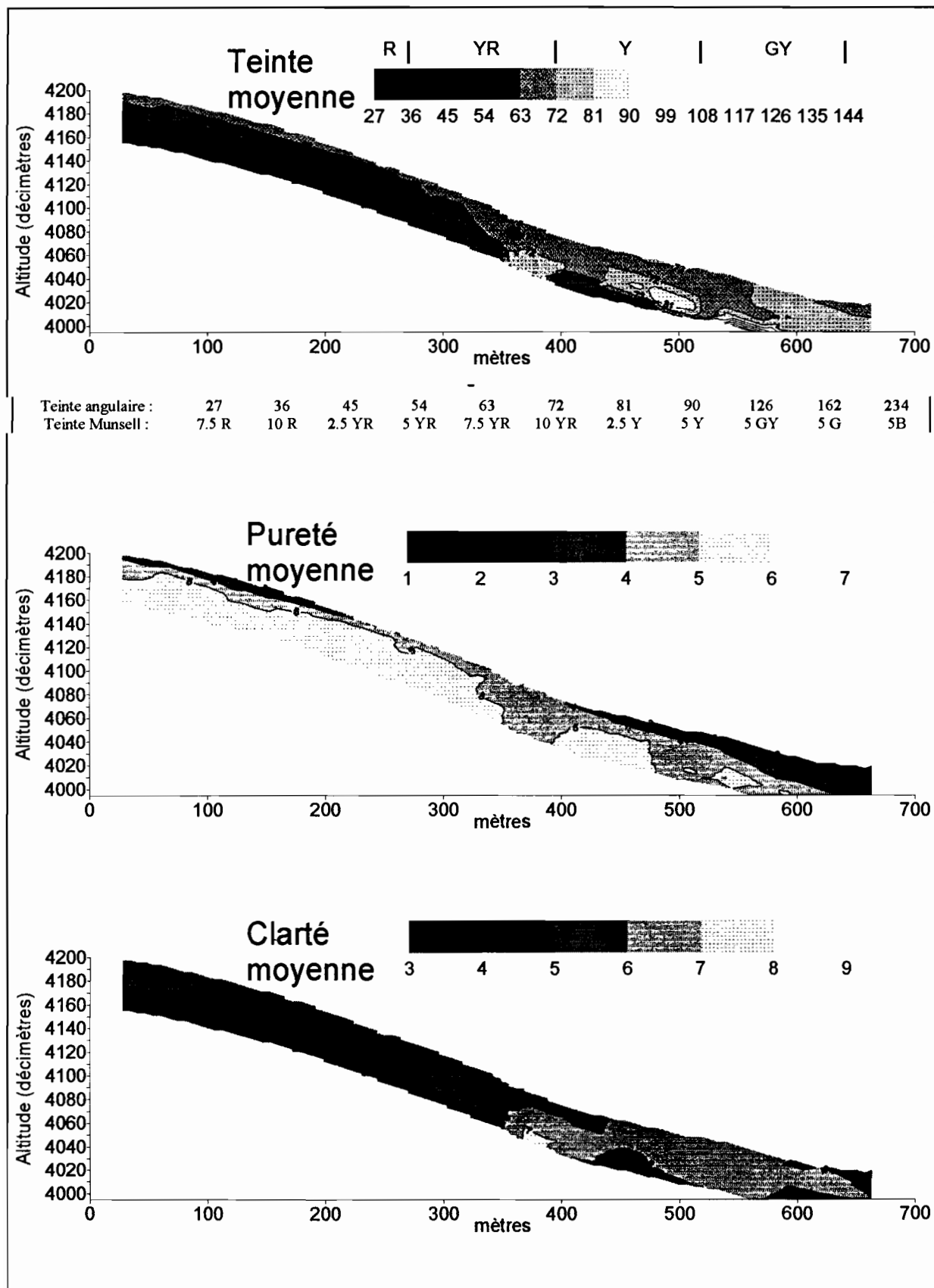


Figure IV-7. Teinte, clarté et pureté moyennes. transect B.

4.3.1.B. La séquence du red ratio moyen

La séquence du Red Ratio moyen est présentée en figure IV-8. On constate, comme pour la teinte, la pureté et la clarté moyenne, qu'il existe une variation latérale importante à partir de la rupture de pente qui sépare le domaine ferrallitique du domaine ferrugineux

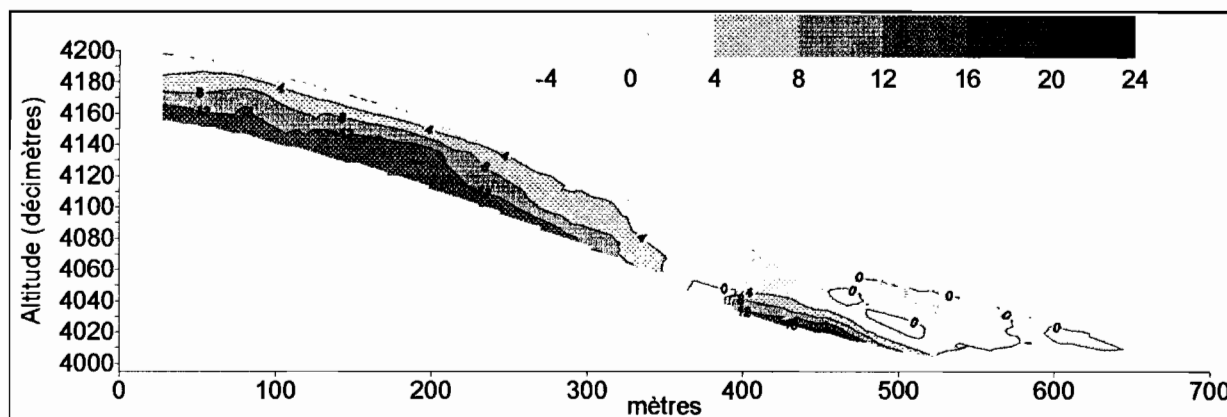


Figure IV-8. Red Ratio moyen. Transect B.

Cette séquence permet d'obtenir une estimation de la distribution des teneurs en hématite. En effet, selon TORRENT et al. (1983) il existe une corrélation significative entre le Red Ratio des sols et la teneur en hématite (R^2 supérieur à 0,8). Pour les sols tropicaux, ces auteurs ont déterminé la relation empirique suivante, à partir de 33 oxysols du Brésil :

$$\text{Hématite (\%)} = (\text{Red Ratio} - 2,45)/0,82$$

En appliquant cette relation, on en déduit la séquence présentée en figure IV-9. Il ne s'agit évidemment que d'une approximation, mais celle-ci indique que les teneurs en hématite restent relativement élevées dans le domaine amont ferrallitique, et qu'elles chutent fortement à partir de la rupture de pente de mi-versant (moins de 5 %). De telles variations latérales suggèrent l'existence d'une modification des conditions hydriques au passage entre le domaine ferrallitique et le domaine ferrugineux.

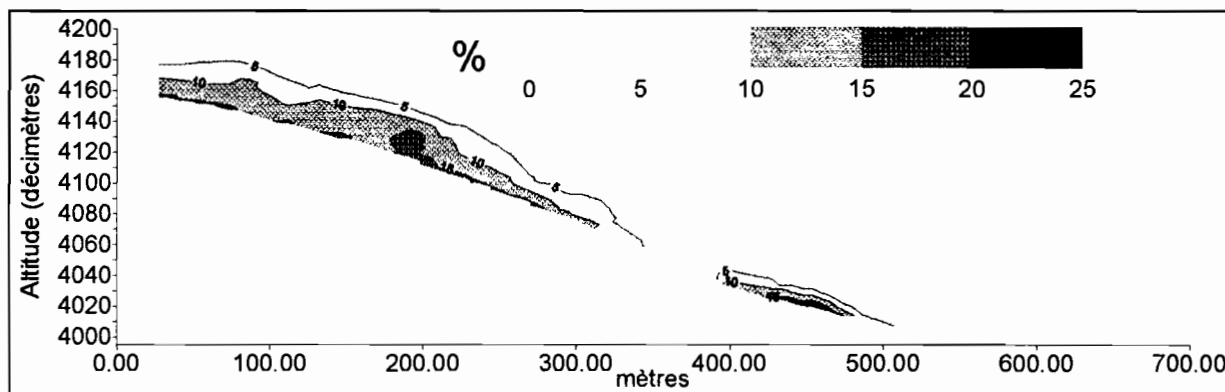


Figure IV-9. Estimation des teneurs en hématite d'après le Red Ratio. Transect B.

4.3.2. Les séquences granulométriques

Les séquences de taux d'éléments grossiers, de sable et d'argile sont présentées en figure IV-10. Elles montrent qu'à partir de la rupture de pente séparant le domaine amont ferrallitique du domaine ferrugineux, la partie supérieure du sol devient particulièrement pauvre en éléments grossiers et en argile (moins de 10 %). Ceci traduit clairement l'apparition des horizons E décrits précédemment. Sous cette partie supérieure du sol, le taux d'éléments grossiers reste élevé, en raison de la présence des horizons X.

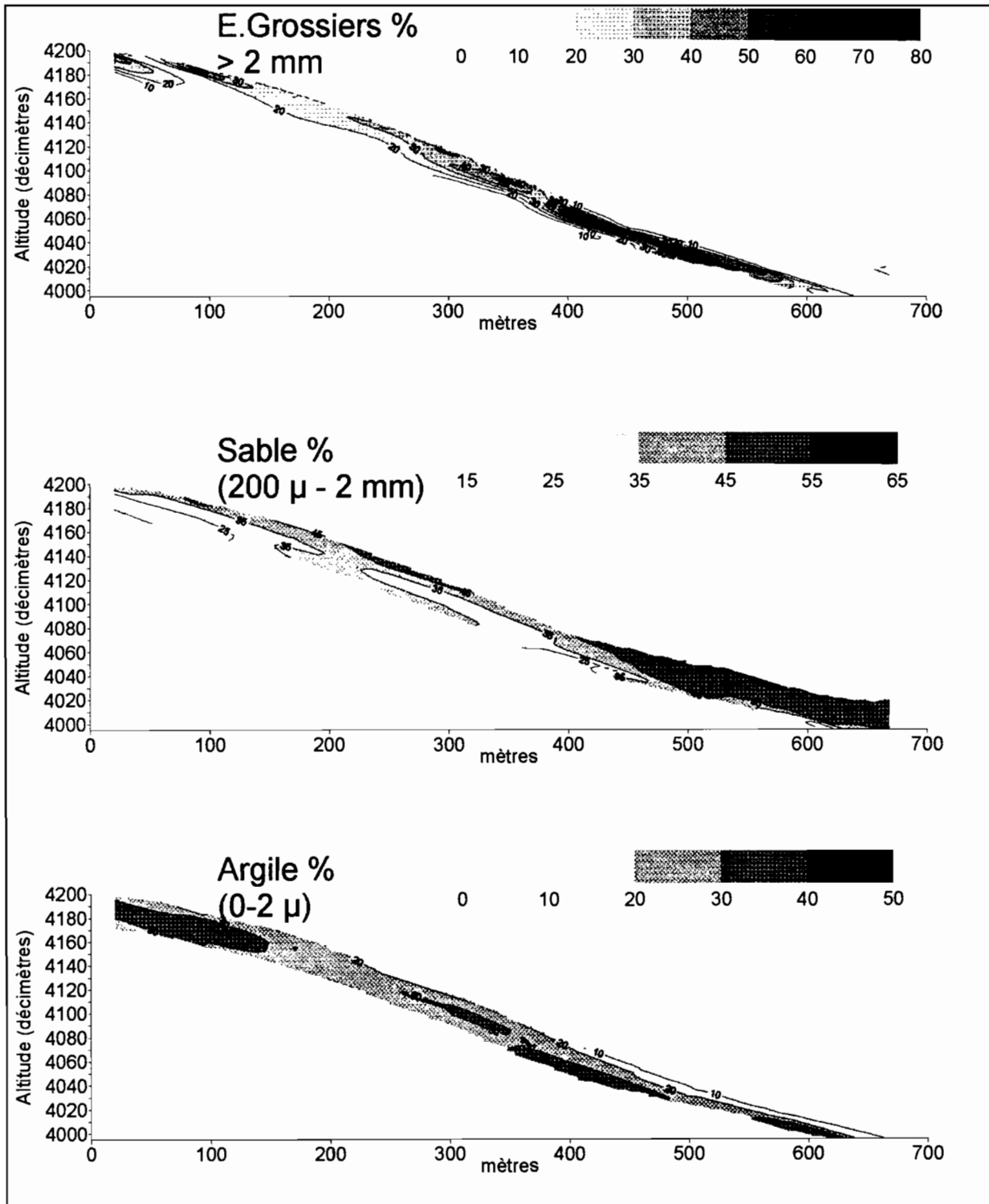


Figure IV-10. Granulométrie. Transect B.

4.3.3. La séquence de porosité

Comme pour les variables précédentes, la porosité ³ présente une variation importante à mi-versant, au passage entre le domaine ferrallitique et le domaine ferrugineux (cf. figure IV-11). En effet, celle-ci diminue vers l'aval sous la partie supérieure du sol (moins de 34 %), ce qui correspond à l'apparition des horizons S g et G. Cette diminution de la porosité implique une diminution des possibilités d'infiltration de l'eau en profondeur : elle peut notamment favoriser l'apparition de nappes phréatiques perchées dans les domaines ferrugineux et hydromorphes.

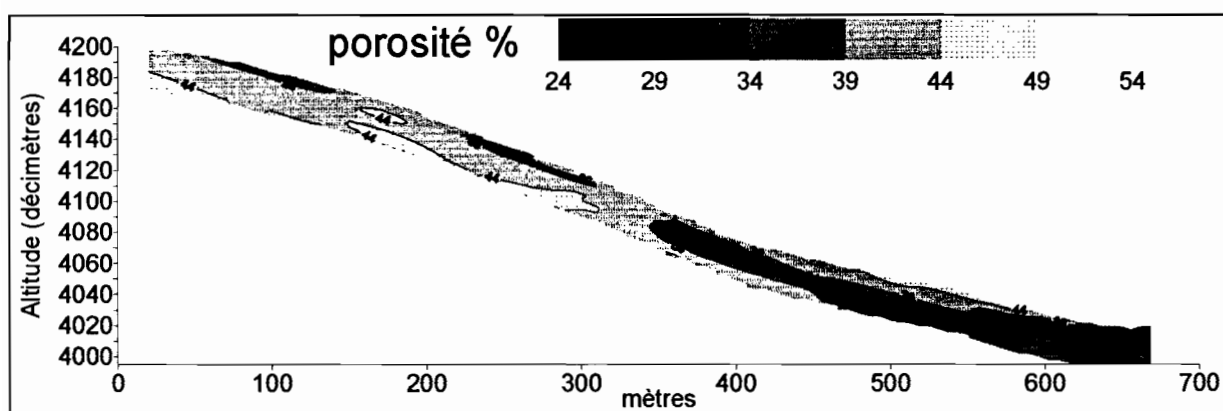


Figure IV-11. Porosité. Transect B

4.3.4. La séquence de perméabilité

En absence de mesures directes de la conductivité hydraulique, nous avons estimé la perméabilité (c'est à dire la conductivité hydraulique à saturation), en fonction de la granulométrie et de la porosité. Nous nous sommes basés, pour cela, sur les résultats

³ La mesure de la porosité ayant été effectuée par volumétrie sur mottes, elle ne tient pas compte des plus grands macropores observés sur le terrain.

statistiques obtenus par RAWLS et al. (1982) et SAXTON et al. (1986) : à partir d'un large échantillon d'horizons pédologiques (2500 échantillons), RAWLS et al. (1982) ont établi des courbes moyennes qui relient, en fonction de la texture, la conductivité hydraulique et la teneur volumique en eau. A partir de ces courbes, SAXTON et al. (1986) ont établi l'équation suivante (équation [1]), par régression non linéaire multiple ($R^2 = 0,95$ pour 230 relevés effectués sur les courbes) :

$$k \text{ (cm / heure)} = e^{12.012 - 0.0755(\text{sable}\%)} \left(\frac{3.895 - 0.03671(\text{sable}\%) + 0.1103(\text{argile}\%) - 8.7546 \times 10^{-4}(\text{argile}\%^2)}{\text{humidité volumique}\%} \right) \quad [1]$$

Cette équation permet notamment d'obtenir une estimation de la perméabilité à partir de la texture et de la porosité, puisque la porosité correspond à l'humidité volumique à saturation. On en déduit donc l'équation [2] :

$$\text{perméabilité (cm/ heure)} = e^{12.012 - 0.0755(\text{sable}\%)} \left(\frac{3.895 - 0.03671(\text{sable}\%) + 0.1103(\text{argile}\%) - 8.7546 \times 10^{-4}(\text{argile}\%^2)}{\text{porosité}\%} \right) \quad [2]$$

L'application de l'équation [2] nous a permis d'estimer, à partir des séquences granulométriques et de porosité, la séquence de perméabilité présentée en figure IV-12.

On constate, sur cette figure, que la partie amont du versant (le domaine ferrallitique) présente de faibles perméabilités sur l'ensemble du profil (perméabilité estimée à moins de 1 cm/heure). En revanche, les couches supérieures du sol de la partie aval du versant (domaines ferrugineux et hydromorphes) présentent une perméabilité atteignant plus de 10 fois celle des couches sous jacentes, dont la perméabilité reste faible (moins de 1 cm/heure comme dans l'ensemble du domaine ferrallitique).

Il en résulte que l'eau peut s'infiltrer aisément dans les couches supérieures du sol des domaines ferrugineux et hydromorphes. Ces couches peuvent ainsi constituer un réservoir pour une nappe phréatique restant perchée sur des couches sous-jacentes moins perméables. En revanche, le fonctionnement hydrique du domaine ferrallitique doit être très différent.

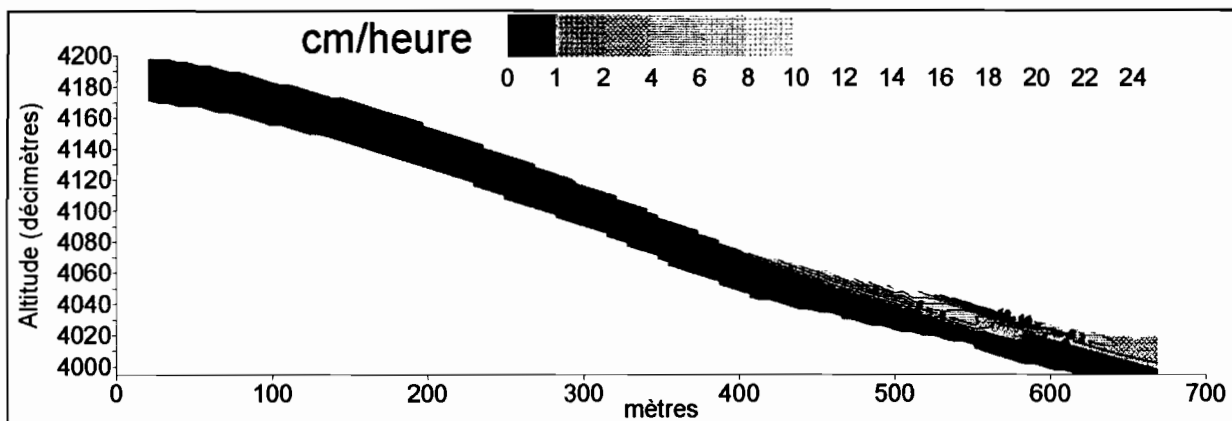


Figure IV-12. Estimation de la perméabilité par la formule de SAXTON (1986).

4.4 Conclusion du chapitre 4

L'analyse de la pédoséquence a permis de préciser le modèle pédologique esquissé en première partie de ce mémoire, à l'aide de deux approches différentes qui ont fourni des résultats convergents :

ameliorer
La première approche, s'est basée sur le découpage conceptuel en 20 horizons pédologiques. Ce découpage en horizons a été effectué en regroupant des volumes élémentaires de résolution (v.e.r.), à l'aide d'une appréciation des similitudes entre ces volumes. Bien que non quantifiée, cette appréciation des similitudes s'est avérée comparable à une mesure des distances mathématiques à des références préétablies. En conséquence, un développement méthodologique serait envisageable, qui viserait à formaliser le choix de

références, et à déterminer la métrique la mieux adaptée à la mesure des distances mathématiques entre les v.e.r..

Cela étant, cette première approche a confirmé l'existence de trois domaines pédologiques (domaines ferrallitique, ferrugineux et hydromorphe), qui sont délimités par des ruptures de pente, et qui se différencient par certaines successions d'horizons pédologiques.

L'analyse des caractéristiques des horizons et de leur distribution dans l'espace a permis d'aboutir à une interprétation génétique. Dans cette interprétation, la différenciation de la pédoséquence serait liée à deux types de facteurs :

- a) *l'érosion en glacis, suivie du comblement partiel du bas de versant au cours du quaternaire*. Ainsi, conformément au modèle esquissé au chapitre 1, le domaine ferrallitique comprend bien deux générations de glacis successives (haut glacis et moyen glacis quaternaire), qui se délimitent aisément par une première rupture de pente du modelé. Grâce au modelé, on retrouve également très clairement un bas glacis quaternaire, qui correspond au domaine hydromorphe. Cependant, il apparaît que le passage entre le domaine ferrallitique et le domaine ferrugineux correspond à une autre génération de glacis, qui serait intermédiaire entre le moyen glacis quaternaire (domaine ferrallitique) et le bas glacis quaternaire (domaine hydromorphe). Dans ce domaine, la mise en place des horizons supérieurs (horizons A, E, X).serait due au comblement partiel de ce glacis par un recouvrement colluvio-alluvial.

-b) *des transformations au sein des horizons* (déferrisation, désargilification, disparition sélective de l'hématite, ...). Ces transformations seraient, pour la plupart, liées à l'action de l'eau.

La seconde approche s'est basée sur la constitution de séquences de caractères analytiques. Employant une méthode numérique indépendante du découpage en horizons (krigeage anisotrope), cette approche a permis de valider l'approche précédente, en confirmant l'existence de variations quantitatives importantes au passage entre le domaine ferrallitique et le

domaine ferrugineux. Ces variations concernent toutes les variables examinées (couleur, granulométrie, porosité, ...).

Par ailleurs, ces deux approches ont fourni plusieurs indices qui permettent de formuler, selon le domaine pédologique, certaines hypothèses concernant les nappes phréatiques. Ainsi :

- dans le domaine ferrallitique, il n'existe pas d'indices évident de l'action d'une nappe, mais les traits pédologiques des horizons suggèrent l'existence de circulations préférentielles d'eau;

- dans le domaine ferrugineux, différents indices suggèrent l'existence d'une nappe phréatique perchée (caractéristiques de l'horizons E, hydromorphie particulière de l'horizon Sg', présence d'un niveau peu poreux, discontinuité dans la conductivité hydraulique, ...);

- enfin, dans le domaine hydromorphe, différents indices suggèrent également l'existence d'une nappe phréatique perchée (hydromorphie des horizons E albique et des horizons G; présence d'un niveau peu poreux; discontinuité dans la conductivité hydraulique, ...)

Il reste donc à vérifier ces hypothèses, en étudiant l'hydroséquence, ce qui nous conduit au chapitre suivant.

CHAPITRE 5. L'HYDROSÉQUENCE

Ce chapitre a pour objet l'étude des nappes phréatiques sur le versant.

Il s'agit ici de vérifier les hypothèses formulées au chapitre 4 à partir des indices pédologiques, tout en précisant un schéma hydrologique qui reste mal connu, selon la bibliographie présentée au chapitre 1.

Nous examinerons d'abord le dispositif mis en oeuvre pour observer ces nappes, puis les résultats obtenus et leur interprétation.

5.1 Le dispositif

Afin de pouvoir établir des relations entre l'hydroséquence et la pédoséquence, nous avons choisi d'étudier un des deux transects ayant fait l'objet d'une caractérisation pédologique détaillée. Les paragraphes suivants précisent le choix de ce transect, puis détaillent l'instrumentation mise en oeuvre.

5.1.1. Choix du transect

Pour déterminer le transect le plus favorable à cette étude, deux paramètres hydrologiques ont été calculés à partir du modèle numérique de terrain (cf. § 3.3.) : la direction des écoulements de surface, et un indice qui exprime la saturation potentielle en eau des sols (BEVEN et al ., 1979). Ces calculs ont été effectués à l'aide du logiciel Demiurge (DEPRAETERE, 1992) :

La direction des écoulements de surface a été déterminée, pour chaque maille du modèle numérique de terrain, selon le principe de "descente maximale" (DEPRAETERE, 1992) : on considère que le drainage sur une maille du modèle numérique de terrain se fait dans la direction de la maille voisine d'altitude inférieure la plus faible. Le résultat obtenu (cf. figure V-1) montre que le transect A est susceptible d'être alimenté par des écoulements de surface latéraux en sommet de versant.

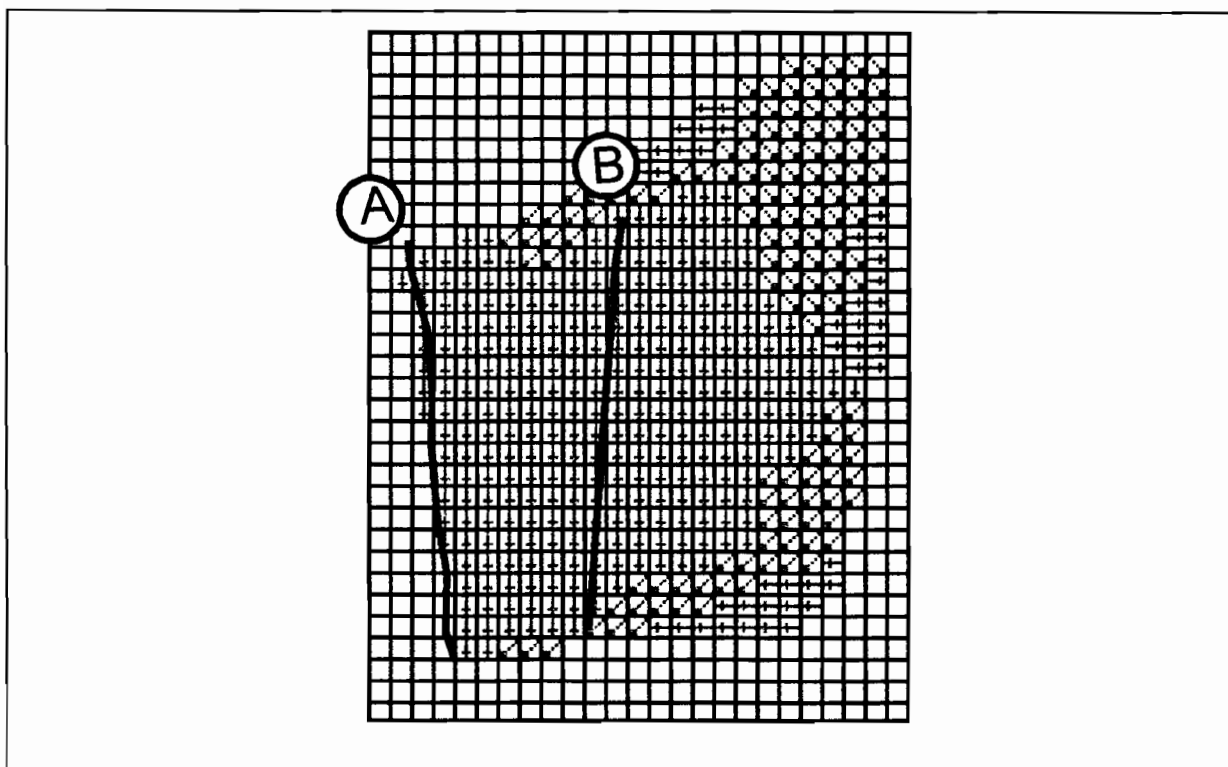


Figure V-1. Orientation des écoulements de surface et localisation des transects.

L'indice I_b de BEVEN (BEVEN et al. 1979) est proportionnel à la surface drainée par une maille du modèle numérique de terrain (α_i), et inversement proportionnel à la pente locale de cette maille ($\tan(\beta)$) : $I_b = \text{Log}(\alpha_i/\tan(\beta))$. La surface drainée par une maille donnée se calcule en fonction de la surface des mailles amont dont la direction d'écoulement rejoint la maille considérée, pondérée par un ratio de transfert d'eau qui dépend de l'altitude de chaque

maille amont par rapport aux mailles environnantes. Quant à la pente locale d'une maille, elle est déterminée par le plan de régression qui relie les quatre points altimétriques formant cette maille.

On peut admettre que cet indice exprime la saturation potentielle en eau des sols. En conséquence, cet indice a été calculé dans la partie du modèle numérique de terrain pour laquelle nous disposons de la topographie en ligne de crête (condition nécessaire pour calculer la surface drainée). Le résultat obtenu est présenté en figure V-2. On remarque que cet indice augmente globalement des lignes de crêtes vers les axes de drainage. Toutefois, sa valeur reste relativement élevée sur l'ensemble du transect A, ce qui confirme l'influence des écoulements latéraux provenant du sommet de versant. En revanche, cet indice augmente régulièrement sur le transect B.

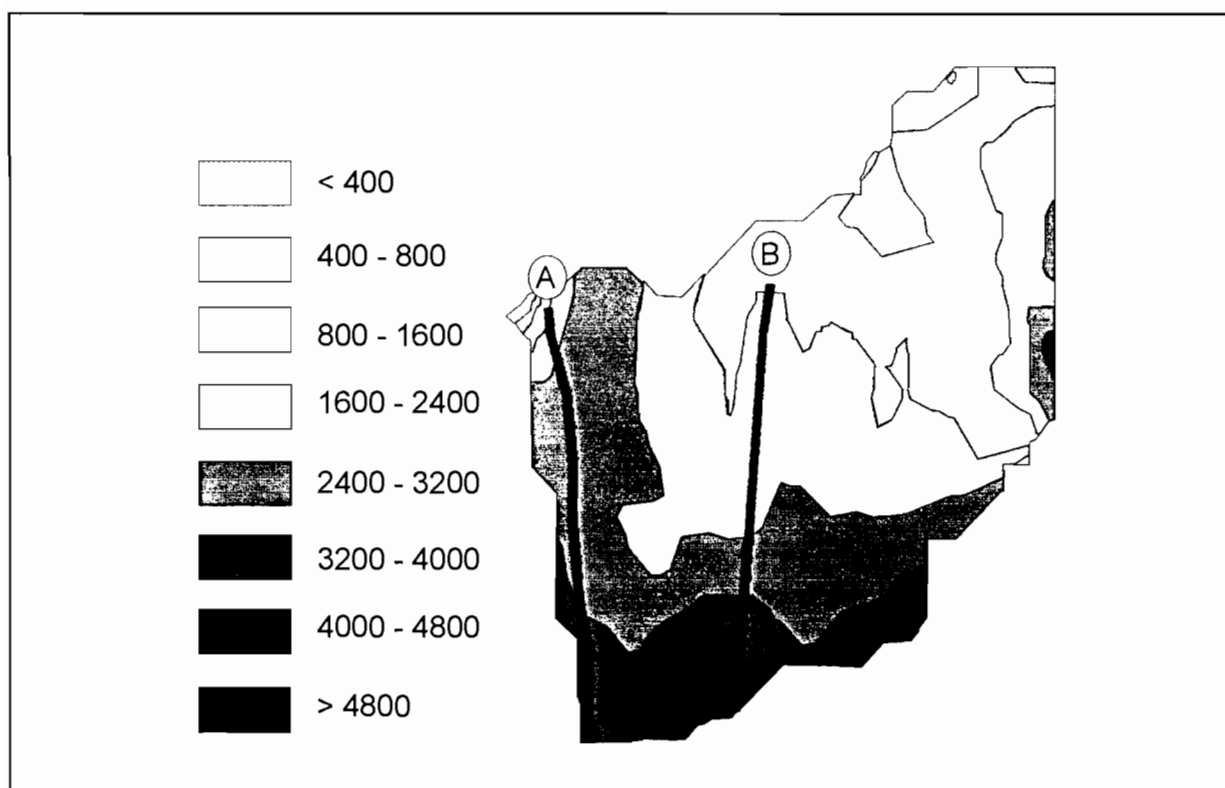


Figure V-2. Indice topographique de Beven et localisation des transects.

En définitive, il apparaît que le transect B ne subit pas l'influence d'écoulements latéraux, contrairement au transect A. Nous avons donc retenu ce transect B, qui nous permet de raisonner selon le seul axe amont-aval.

5.1.2. Instrumentation

L'instrumentation mise en place le long du transect B (cf. figure V-3) comprend 3 types d'appareils :

- 7 fosses d'observations couvertes et ceinturées d'une bordure anti-ruissellement (cf. figure V-4) ;
- un puits couvert atteignant l'arène, et situé en sommet de versant;
- 19 stations piézométriques. Afin de mettre éventuellement en évidence la présence de nappes superposées, chacune de ces stations a été constituée de 2 à 4 tubes piézométriques en pvc (cf. figure V-5), qui ont été implantés à différentes profondeurs. La profondeur maximale d'implantation des tubes a été fonction des possibilités de forage (environ 7 mètres). Nous avons choisi un diamètre de 4 cm pour ces tubes, afin d'obtenir un délai de réponse négligeable par rapport aux fluctuations de la nappe (BRAND et PREMCHITT, 1980). Dans leur partie supérieure, ces tubes ont été entourés d'une gaine colmatante de bentonite, afin d'interdire les infiltrations d'eau par le haut . La base de ces tubes a été percée sur une hauteur de 30 cm. Afin d'éviter le colmatage de cette partie percée, celle-ci a été entourée de graviers et revêtue d'une crépine.

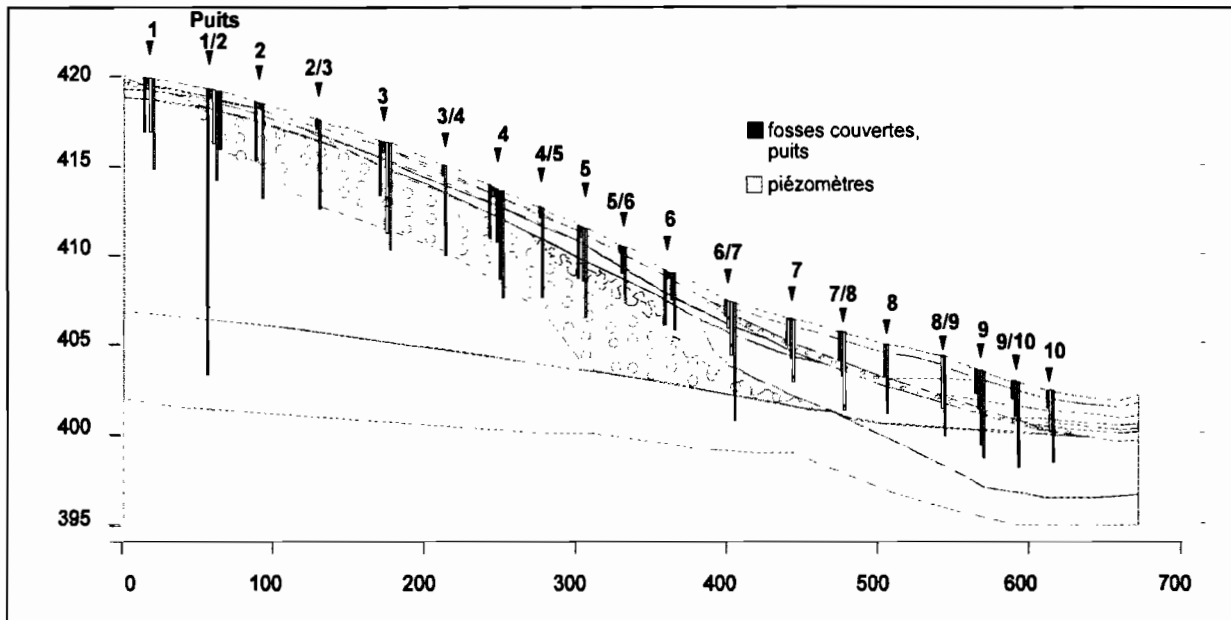


Figure V-3. Dispositif implanté sur le transect B.

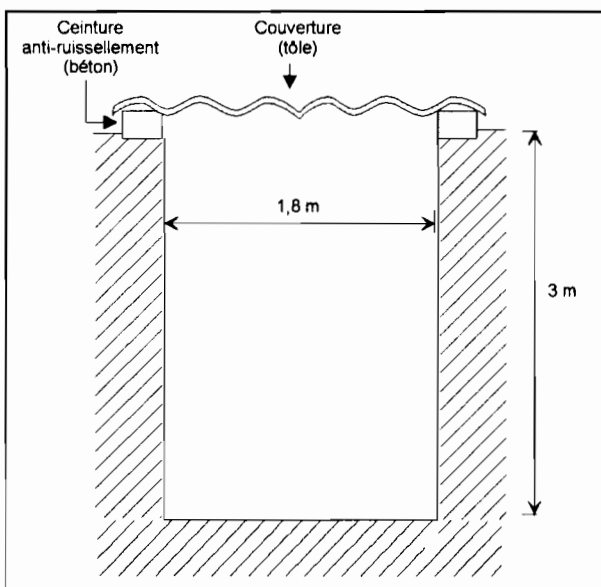


Figure V-4. Schéma d'une fosse couverte.

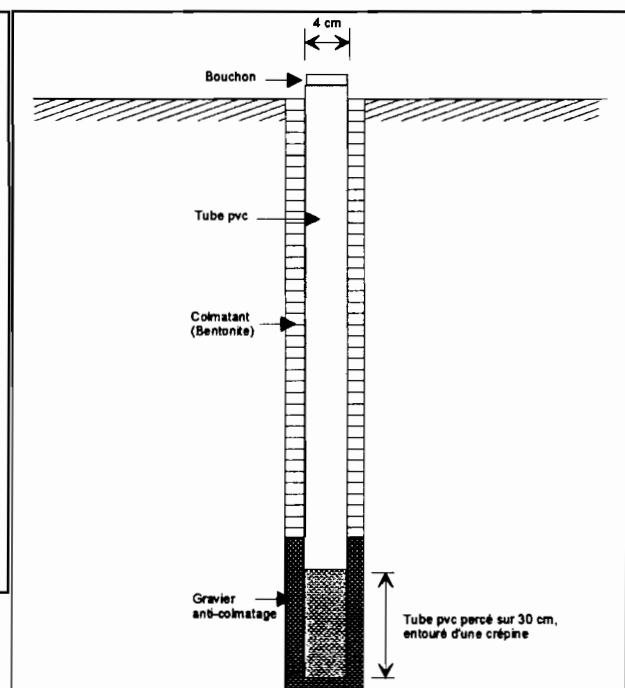


Figure V-5. Schéma d'un tube piézométrique.

5.2 Résultats et interprétations

Les résultats présentés dans les paragraphes suivants tiennent compte des relevés effectués quotidiennement sur l'ensemble du dispositif entre le 10/07/1989 et le 30/09/1992.

5.2.1. Allure générale du toit piézométrique ¹

Un examen global des relevés de la période 1989-1992 montre que le toit piézométrique présente, quelle que soit la position sur le versant, des fluctuations cycliques à crêtes synchronisées (cf. figure V-6). Ces crêtes correspondent clairement aux saisons des pluies.

Ce caractère cyclique et synchronisé des fluctuations du toit piézométrique se visualise également sur un bloc-diagramme localisant ce toit par rapport à la position sur le transect et le temps (cf. figure V-7). On y observe, de plus, que la partie du sol saturée par l'eau est d'autant plus étalée dans le temps que l'on va vers l'aval du transect : il apparaît en effet, sur ce bloc-diagramme, que la partie amont du transect est sujette à des saturations beaucoup plus sporadiques qu'à l'aval. Un plus grand étalement dans le temps de cette saturation apparaît sensiblement à partir de la mi-versant.

¹ Dans cet examen, nous ne tenons pas compte des piézomètres implantés en profondeur sur certaines stations.

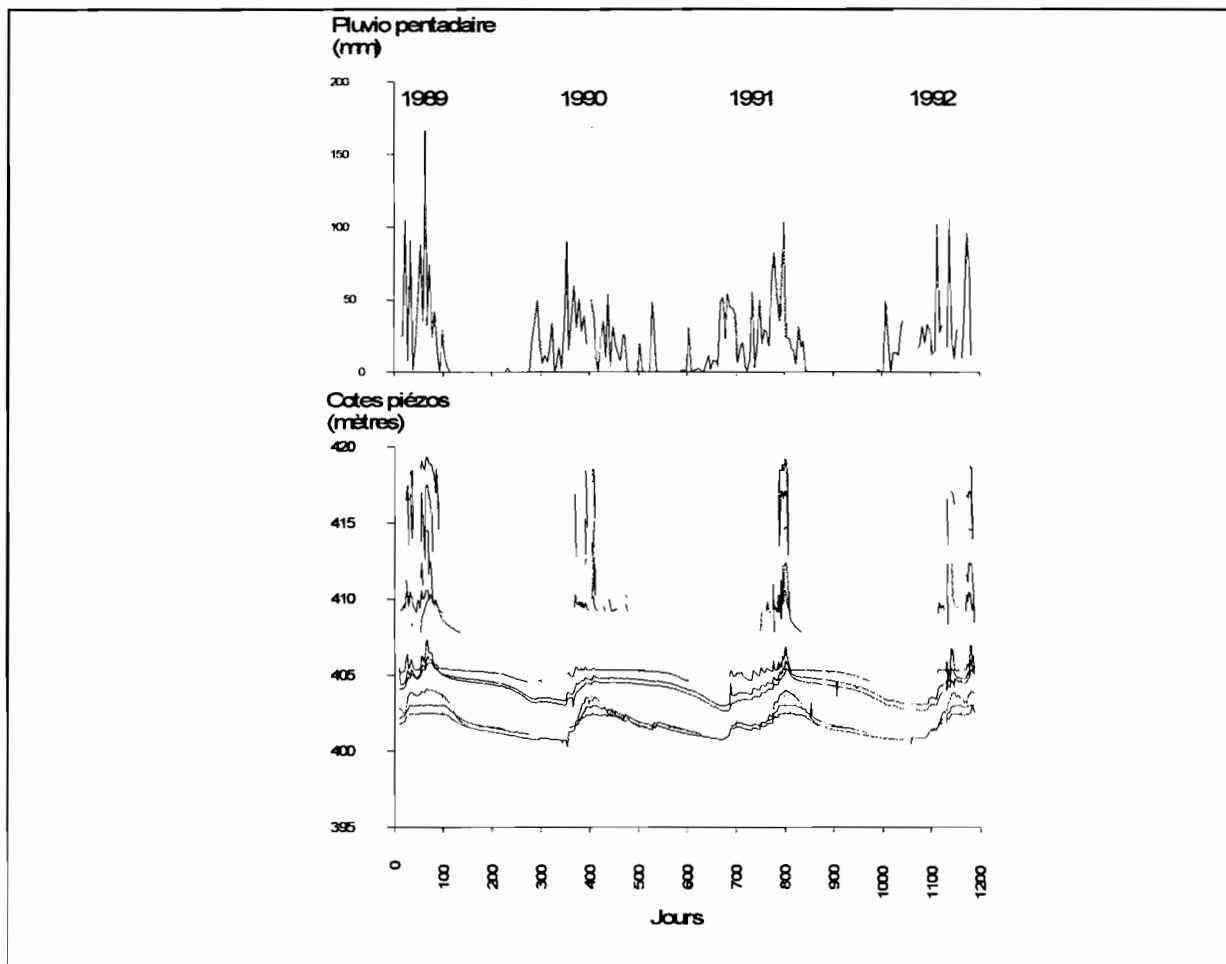


Figure V-6. Relevés piézométriques le long du transect et pluviosité. Période 1989-1992

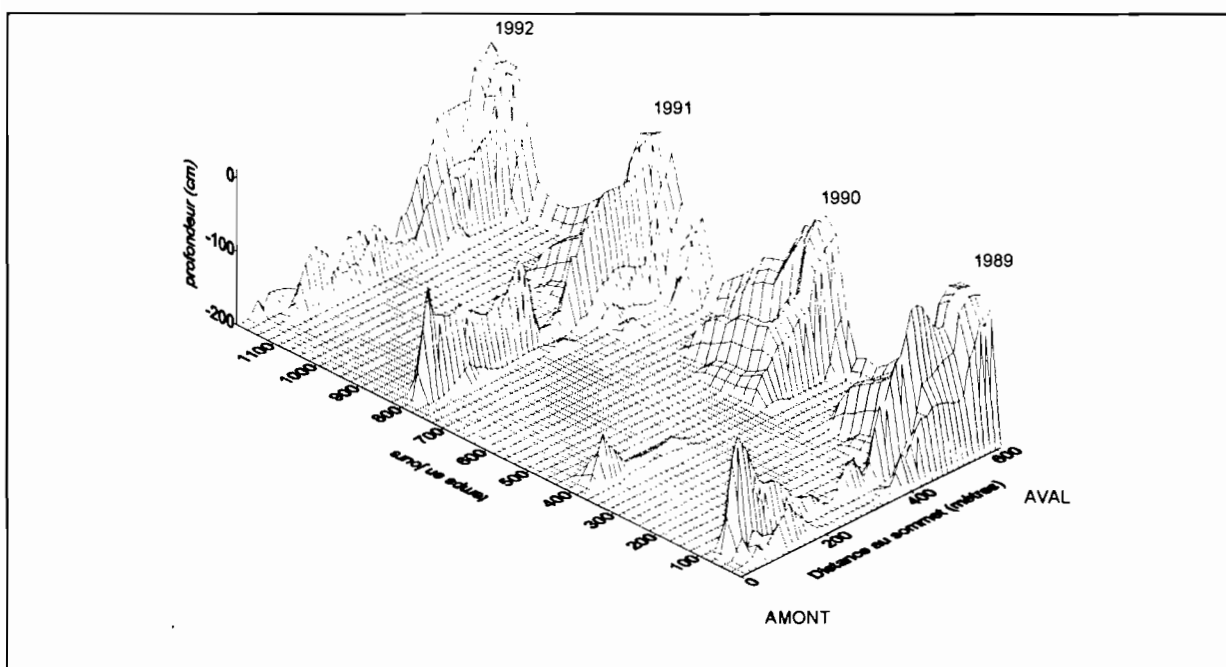


Figure V-7. Variations du toit piézométrique par rapport à la position sur le transect et le temps. Période 1989-1992

5.2.2. Examen de stations piézométriques représentatives des domaines pédologiques

Nous examinons ici les relevés de quelques stations piézométriques qui sont étagées depuis l'amont vers l'aval du transect, et qui sont représentatives des trois domaines pédologiques .

Rappelons que pour mettre éventuellement en évidence la présence de plusieurs nappes superposées, chacune de ces stations est équipée d'un ensemble de piézomètres construits selon le modèle présenté en figure V-5, qui sont implantés à différentes profondeurs dans le sol.

5.2.2.A. Stations du domaine ferrallitique

5.2.2.A.1. Station 1

Cette station est localisée dans la partie amont du domaine ferrallitique (cf. figure V-3). Elle présente un sol rouge ferrallitique sans horizons tacheté. L'instrumentation mise en place comprend :

- un piézomètre de surface implanté à 0,6 mètres
- 2 piézomètres de profondeur implantés à 3 et 6 mètres dans l'altérite rouge (horizon I SC s).

Au cours des 1200 jours consécutifs de relevés, cette station n'a fourni aucun signal piézométrique (cf. figure V-8). En conséquence, on peut en déduire qu'il n'y a jamais de nappe phréatique dans les 6 premiers mètres du sol, pour cette partie du versant. Cette absence de nappe confirme l'hypothèse formulée au chapitre 4, à partir des indices pédologiques.

*Etan, hudi
A. Alimouh
5 mètre (mètre)*

5.2.2.A.2. Station 1/2

Cette station est localisée dans la partie du domaine ferrallitique où apparaissent en subsurface les horizons B et Bs m indurés, et l'horizon II SC s altéritique à plages grises (cf. figure V-3).

Elle comprend :

- une fosse d'observation couverte et ceinturée d'une bordure anti-ruissellement;
- un piézomètre de surface implanté à 0,6 mètres dans l'horizon humifère
- un piézomètre de 3 mètres implanté dans l'horizon altéritique à plages grises (horizon II SC s)
- un piézomètre de 6 mètres implanté dans l'horizon altéritique rouge (horizon I SC s);
- l'ensemble est complété par un puits de 16 mètres atteignant l'arène.

Les relevés piézométriques effectués sur cette station permettent d'observer l'existence de deux niveaux de nappe (cf. figure V-8) :

- d'une part, une "nappe" sporadique à fort battement apparaît dans les horizons supérieurs (cf. réponses des piézomètres 1 et 2). Cette "nappe" disparaît en profondeur (cf. réponse du piézomètre 3), et ne s'observe plus dans l'horizon I SC s altéritique rouge. Le plancher de cette "nappe" serait donc l'horizon altéritique à plages grises. D'après les observations effectuées dans la fosse couverte, cette "nappe" sporadique correspondrait en fait à une saturation localisée aux macropores des horizons B s m, B s et II SC s. Il s'agirait donc davantage de circulations préférentielles d'eau que d'une véritable nappe. Ceci rejoint l'hypothèse formulée au chapitre 4, à partir des indices pédologiques.

- d'autre part (cf. réponse du puits), on observe l'existence d'une nappe à faible battement dans l'arène.

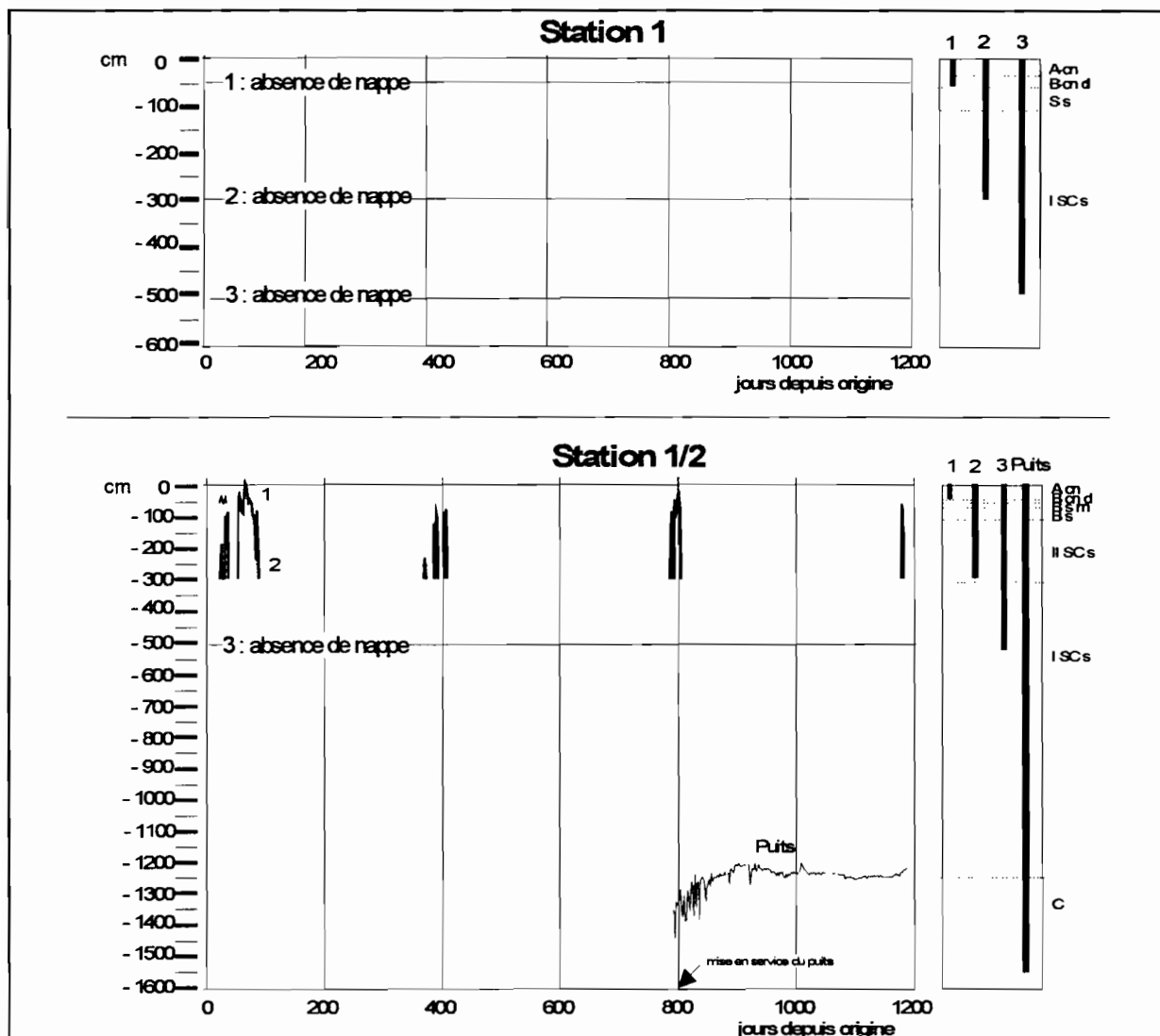


Figure V-8. Relevés piézométriques de deux stations du domaine amont ferrallitique

5.2.2.B. Stations du domaine ferrugineux

5.2.2.B.1. Station 6/7

Cette station se situe dans la partie amont du domaine ferrugineux (cf. figure V-3), où apparaissent en subsurface l'horizon E sableux beige et l'horizon à nodule ferrugineux, ainsi qu'en profondeur l'horizon S g' argileux jaune-gris et l'horizon III SC s altéritique à matrice rouge et taches jaune et grises.

L'instrumentation mise en place comprend 4 piézomètres:

- un piézomètre de surface implanté à 0,9 mètre dans l'horizon X cn à nodules ferrugineux;
- un piézomètre de 1,5 mètres implanté dans l'horizon B s plinthisque;
- un piézomètre de 3 mètres implanté dans l'horizon S g' argileux jaune-gris;
- un piézomètre de 7 mètres implanté dans l'arène.

Les relevés de cette station (cf. figure V-9) fournissent une réponse similaire pour les trois piézomètres les moins profonds, qui enregistrent la présence de la même nappe (cf. réponses des piézomètres 1, 2 et 3). En revanche, le piézomètre 4, implanté dans l'arène, fournit une réponse piézométrique différente, qui est similaire à celle du puits de la station 1/2.

Il apparaît donc clairement deux nappes superposées sur cette station :

- d'une part, une nappe perchée, dont le battement se fait dans la partie supérieure du sol, et dont le plancher serait situé à la base de l'horizon argileux jaune-gris (horizon S g'), au contact de l'horizon altéritique à matrice rouge et plages jaunes et grises (horizon III SC s). L'existence de cette nappe perchée est conforme à l'hypothèse formulée au chapitre 4, à partir des indices pédologiques.
- d'autre part, dans l'arène, une nappe à faible battement.

5.2.2.B.2. Station 7/8

Cette station est située au milieu du domaine ferrugineux (cf. figure V-3), dans lequel ont disparu les horizons B indurés.

Elle comprend 2 piézomètres :

- un piézomètre de surface de 1,6 m, implanté dans l'horizon sableux E beige
- un piézomètre implanté à 4,5 mètres de profondeur, implanté dans l'horizon argileux jaune gris (horizon S g').

Les relevés (cf. figure V-9) montrent que ces deux piézomètres fournissent une réponse similaire. Ils indiquent la présence d'une seule nappe dans cette partie du sol, qui apparaît identique à la nappe perchée de la station 6/7.

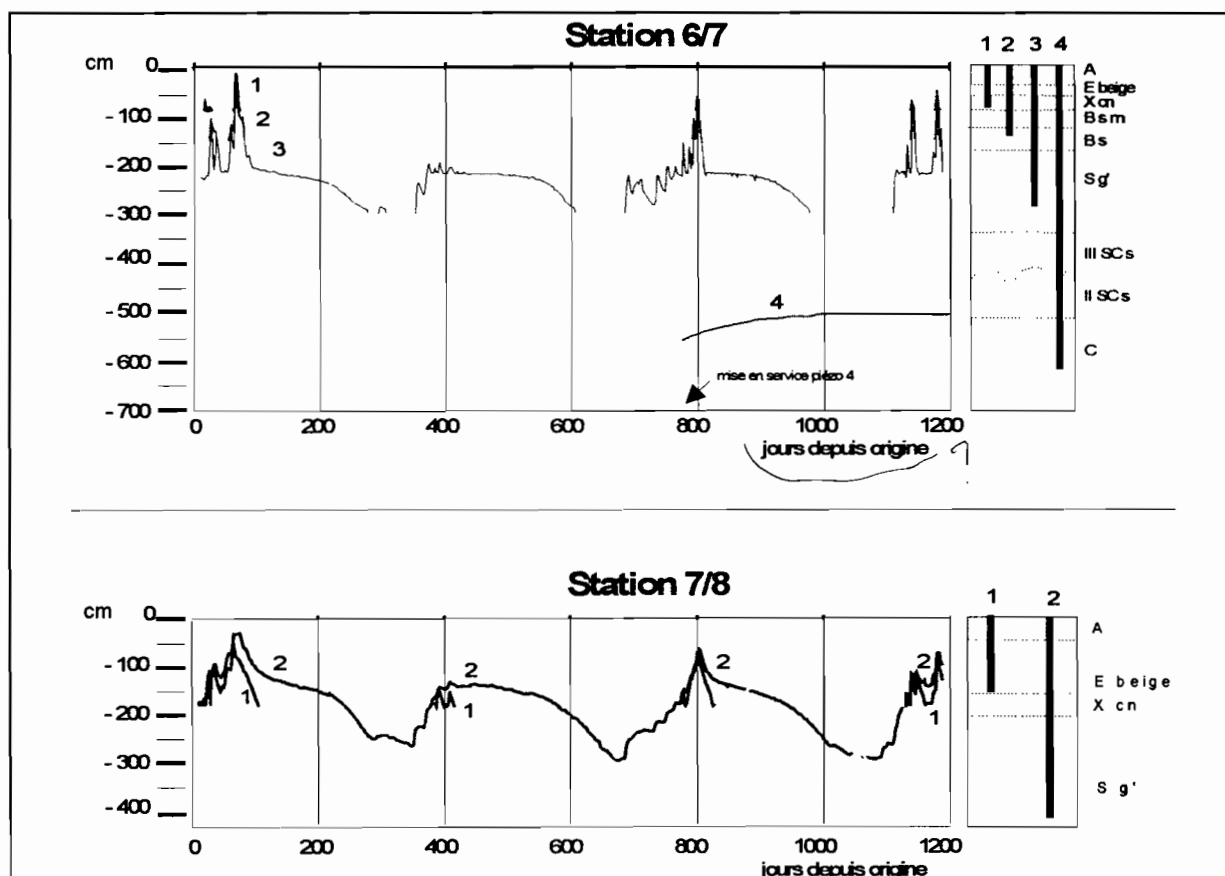


Figure V-9. Relevés piézométriques de deux stations du domaine médian ferrugineux

5.2.2.C. Stations du domaine hydromorphe

5.2.2.C.1. Station 9

Cette station se situe dans la partie amont du domaine hydromorphe (cf. figure V-3). Dans cette partie du versant, apparaissent l'horizon sableux blanchi (horizon E albique) et l'horizon argileux verdâtre (horizon G).

L'instrumentation sur cette station comprend 4 piézomètres :

- deux piézomètres supérieurs de 1,4 mètres et 2,2 mètres implantés dans les horizons sableux (respectivement dans l'horizon sableux beige et dans l'horizon sableux blanchi);
- deux piézomètres de profondeur implantés à 4,2 et 4,9 mètres dans l'horizon argileux verdâtre (hz G).

Les chroniques présentées en figure V-10 indiquent l'existence de deux nappes :

- d'une part (cf. réponses des piézomètres 1 et 2), les piézomètres implantés dans les horizons sableux enregistrent l'existence d'une nappe, conformément à l'hypothèse formulée au chapitre 4, à partir des indices pédologiques. Les fluctuations de cette nappe sont synchronisées avec celles qui sont observées sur les stations du domaine ferrugineux (cf. stations 6/7 et 7/8). Il semble donc que l'on retrouve ici la même nappe perchée que dans le domaine ferrugineux.

- d'autre part (cf. réponses des piézomètres 3 et 4), les deux piézomètres de profondeur, qui sont implantés dans l'horizon argileux verdâtre G, enregistrent la présence d'une nappe dont les fluctuations sont nettement décalées dans le temps par rapport à la nappe de surface. Il ne s'agit vraisemblablement pas d'un artefact. En effet, ce phénomène s'observe dans deux piézomètres (le piézomètre 4 rejoint assez rapidement la cote du piézomètre 3 après sa mise en service), ce qui indique que l'on est bien en présence d'une seconde nappe. De plus, le toit libre de cette nappe se situe, en phase de recharge, au dessus du toit de la nappe de surface. Il s'agirait donc d'une nappe confinée dans l'horizon argileux G, qui serait en surpression par rapport à la nappe perchée. Cette surpression pourrait s'expliquer par le gonflement du matériau argileux de l'horizon G (ZIMMER, 1990), ou par des phénomènes d'artésianisme (CHEVALLIER et al. ,1990).

On observe donc, sur cette station, l'existence de deux nappes superposées :

- une nappe perchée située dans les horizons sableux;
- une nappe de profondeur, située dans les horizons G, qui serait en surpression.

5.2.2.C.2. Station 10

Cette station se situe dans la partie aval du domaine hydromorphe (cf. figure V-3), où a disparu l'horizon sableux beige, et où apparaissent les horizons sablo-argileux humifères enfouis (horizons A b).

L'instrumentation mise en place comprend 3 piézomètres :

- un piézomètre de surface implanté à 1 mètre de profondeur, dans l'horizon sableux blanchi
- un piézomètre de 2,3 mètres, implanté dans les horizons sablo-argileux humifères enfouis;
- un piézomètre de profondeur, implanté à 4 mètres dans l'horizon argileux verdâtre (horizon G)

Les chroniques présentées en figure V-10 sont très analogues à celles de la station 9. On observe donc ici les deux mêmes nappes superposées qu'en station 9 :

- d'une part, une nappe perchée en surface, siégeant dans les horizons sableux et dans les horizons humifères (cf. piézomètres 1 et 2)
- d'autre part, une nappe de profondeur confinée dans l'horizon argileux verdâtre G (cf. piézomètre 3), dont les fluctuations sont décalées dans le temps par rapport à la nappe de surface, et qui serait en surpression par rapport à la nappe perchée.

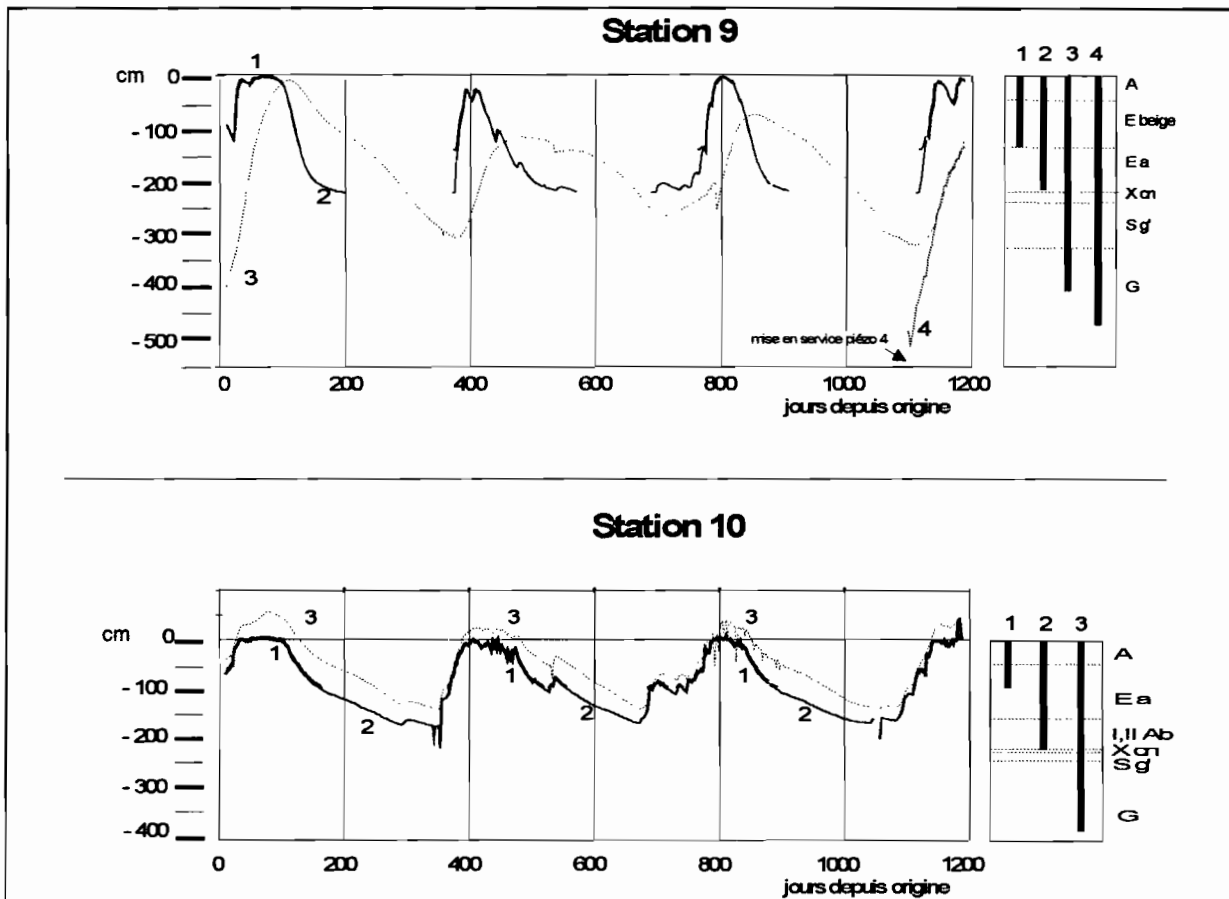


Figure V-10. Relevés piézométriques de deux stations du domaine aval hydromorphe

5.2.3. Séquences de fréquences d'engorgement

Afin d'examiner l'ensemble du transect, nous avons recherché un paramètre synthétique aisément interprétable, qui puisse tenir compte de l'ensemble des relevés disponibles. (soit 1200 jours de relevés pour 50 piézomètres)

Compte tenu du caractère cyclique des fluctuations piézométriques qui a été mis en évidence au paragraphe 5.2.1., il est alors apparu significatif de calculer des "fréquences d'engorgement" à partir des relevés piézométriques. De telles fréquences, qui peuvent être calculées pour chaque station du dispositif et à différentes cotes, ont été définies comme suit :

$$F_{xi zi} = N/T$$

avec

x_i , z_i = coordonnées spatiales du point considéré (en l'occurrence, position de la station sur le transect, et cote verticale du point)

N = nombre de jours où une nappe atteint le point considéré

T = période (en jours) sur laquelle s'étend le calcul (cycle annuel ou partie de ce cycle).

Ces fréquences s'interprètent aisément : elles varient de 0 lorsqu'il n'y a jamais de nappe au point considéré, à 1 lorsque la nappe y est permanente. De plus, elles nous permettent d'examiner l'hydroséquence selon différentes périodes :

- la période annuelle, qui caractérise globalement l'hydroséquence;
- des périodes mensuelles, à partir desquelles on peut examiner la dynamique saisonnière de l'hydroséquence.

5.2.3.A. Séquence de fréquences annuelles d'engorgement

Des fréquences annuelles d'engorgement ont été calculées à différentes profondeurs de chaque station du dispositif, selon un maillage vertical de 10 centimètres. Ce calcul a été effectué à l'aide d'un programme informatique conçu sous le système de gestion de bases de données utilisé. Il a porté :

- d'une part, sur la période annuelle du 30/09/1991 au 30/09/1992, afin de pouvoir tenir compte de l'instrumentation mise en place courant 1991 (puits et certains piézomètres de profondeur).
- d'autre part, sur l'ensemble des 3 années de relevés (période du 30/09/1989 au 30/09/1992).

Par suite, les fréquences obtenues ont été regroupés en classes isoamples, puis ont été reportées sur le transect selon leurs coordonnées spatiales. Ces opérations ont permis de visualiser des séquences de fréquences annuelles d'engorgement.

fréquence?

La séquence de fréquence annuelle d'engorgement présentée en **figure V-11** correspond au calcul effectué sur la période annuelle du 30/09/1991 au 30/09/1992.

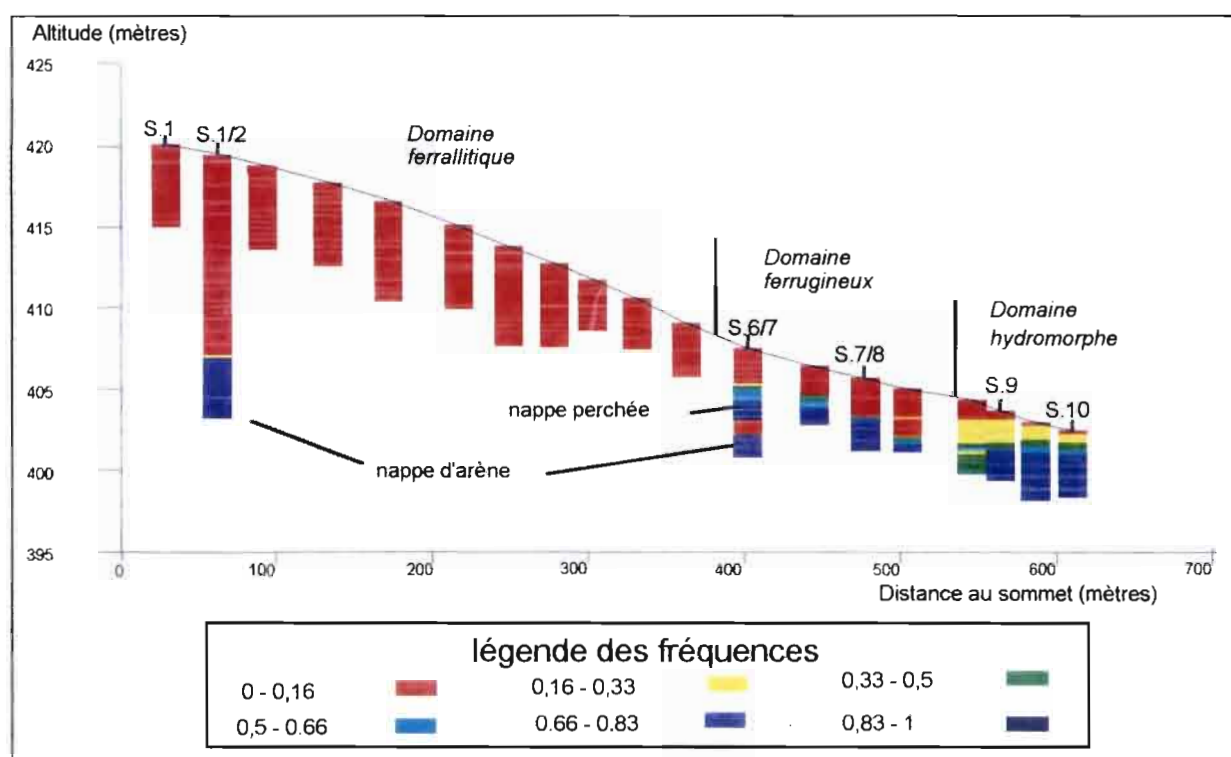


Figure V-11. Séquence des fréquences annuelles d'engorgement (calcul sur la période du 30/09/1991 au 30/09/1992)

On y observe que le domaine ferrallitique est le siège d'une nappe permanente à partir de 13 mètres de profondeur (fréquence annuelle de 1) : il s'agit de la nappe d'arène mise en évidence en 5.2.2.. En revanche, pour toute la partie supérieure du sol de ce domaine, la fréquence annuelle d'engorgement reste très faible (0 à 0,16).

Dans le domaine ferrugineux, apparaît vers 2 mètres de profondeur la nappe perchée mise en évidence en 5.2.2 (cf. station 6/7). Cette nappe est semi-permanente (fréquence

annuelle d'engorgement comprise entre 0,3 et 0,8). Elle est clairement séparée de la nappe d'arène par une zone à fréquence d'engorgement faible. La partie supérieure du sol reste peu fréquemment engorgée dans ce domaine (fréquence annuelle d'engorgement inférieure à 0,16).

Enfin, le domaine hydromorphe est le siège d'engorgements quasi permanents à permanents en profondeur (fréquence annuelle d'engorgement entre 0,83 et 1). Les battements de nappe s'étendent ici jusqu'en surface (fréquence annuelle d'engorgement supérieure à 0,16).

En définitive, si l'on exclut la nappe d'arène que l'on retrouve dans les différents domaines pédologiques, cette séquence indique l'existence d'une relation entre les domaines pédologiques et les profils de fréquences annuelles d'engorgement.

Pour résumer cette relation, nous avons calculé, pour chacun des domaines pédologiques, un profil moyen de fréquence annuelle d'engorgement, à partir des différents profils de fréquence relevés sur la pédoséquence au cours de la période du 30/09/1989 au 30/09/1992, et pour la partie supérieure du sol (tranche 0-5 mètres).

Les résultats de ce calcul, présentés en figure V-12, permettent d'aboutir aux correspondances suivantes, :

- le domaine ferrallitique correspond à une faible fréquence annuelle d'engorgement sur l'ensemble du profil;
- le domaine ferrugineux correspond à un engorgement annuel fréquent limité à la partie inférieure du profil;
- enfin, le domaine hydromorphe correspond à un engorgement annuel permanent en profondeur, et relativement important jusqu'en subsurface.

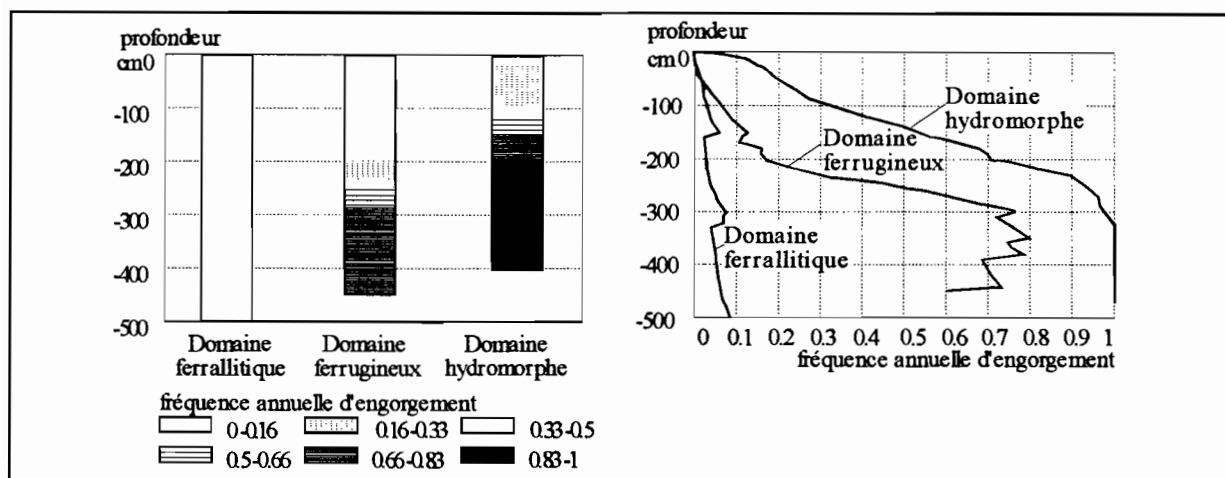


Figure V-12. Profils moyens de fréquences annuelles d'engorgement selon les domaines pédologiques. (Calculés sur la période du 30/09/1989 au 30/09/1992).

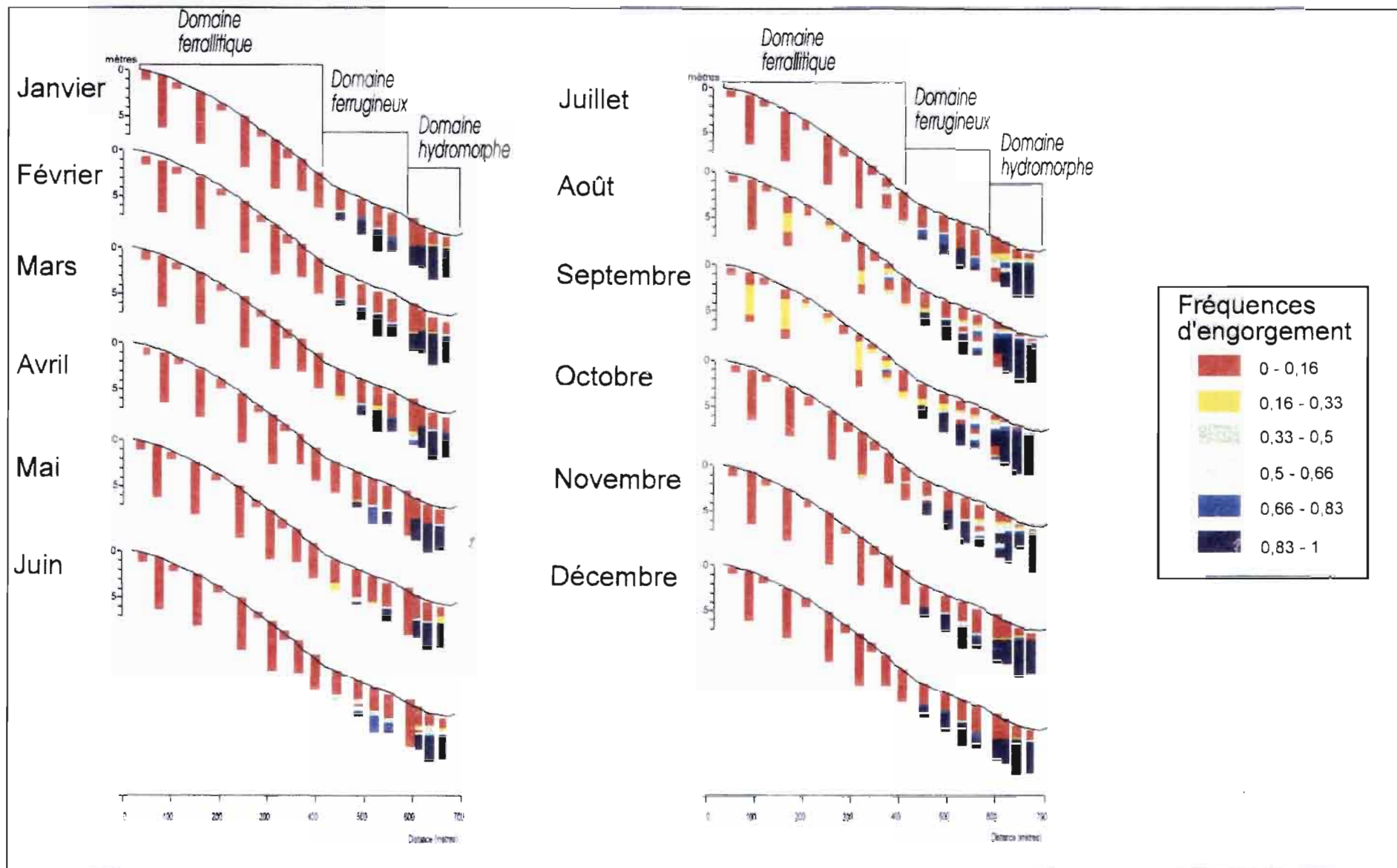
5.2.3.B. Séquences de fréquences mensuelles d'engorgement et dynamique saisonnière des nappes

Afin de déterminer la dynamique saisonnière des nappes, des fréquences mensuelles d'engorgement ont été calculées par un procédé analogue à celui mis en oeuvre pour le calcul des fréquences annuelles (utilisation d'un programme informatique sous le système de gestion de bases de données utilisé, maillage vertical de 10 centimètres pour chaque station du dispositif).

Le calcul a porté ici sur l'ensemble des 3 cycles annuels (période du 30/09/1989 au 30/09/1992). Ce calcul ne tient pas compte de la nappe d'arène, qui n'a pu être observée qu'à partir de 1991.

Comme pour les fréquences annuelles, les fréquences mensuelles d'engorgement ont été regroupées selon 6 classes de fréquence isoamples, puis ont été reportées sur le transect selon leurs coordonnées spatiales.

Les résultats obtenus pour chaque mois de l'année sont présentés en figure V-13 : on y observe que le début de la recharge de la nappe perchée se produit en juin, alors que l'engorgement maximal se prolonge durant août et septembre (cœur de la saison des pluies). Ce n'est qu'au cours de cette période que le domaine ferrallitique subit un engorgement temporaire de subsurface (fréquence d'engorgement inférieur à 0,5), qui correspond à la "nappe" sporadique mise en évidence au paragraphe 5.2.2.A. A partir du mois d'octobre, seuls les domaines ferrugineux et hydromorphes sont engorgés. La nappe y connaît un certain battement dans la partie supérieure du sol (fréquence d'engorgement supérieur à 0,33 dans cette partie du sol). A partir du mois de novembre, ce battement de nappe disparaît et le niveau de base est sensiblement atteint. Ce niveau diminue toutefois encore au cours des mois suivants, pour atteindre un minimum en avril-mai. Au cours de cette période, seuls l'aval du domaine ferrugineux et le domaine hydromorphe restent engorgés, avec une zone d'assèchement à la transition entre ces deux domaines.



5.3 Conclusion du chapitre 5

L'analyse de l'hydroséquence a pu être effectuée durant 3 cycles annuels, à l'aide de piézomètres implantés à différentes profondeurs le long du transect B. Cette analyse a mis en évidence l'existence de deux nappes superposées, dont les fluctuations cycliques dépendent des cycles pluviométriques saisonniers. Une de ces nappes n'est localisée que dans les deux domaines pédologiques situés à l'aval du transect. Ainsi, et en résumé :

- dans le domaine ferrallitique, on trouve, en profondeur, une nappe d'arène permanente à faible battement. Cependant, dans la partie supérieure du sol, on observe une pseudo-nappe sporadique, qui n'apparaît qu'au cours de la saison des pluies, et qui se limite aux horizons indurés (horizons B) et à l'horizon altéritique tacheté (horizon II SC s). Cette pseudo-nappe correspond, en fait, à des circulations préférentielles d'eau dans la macroporosité.

- dans le domaine ferrugineux, on retrouve la nappe d'arène permanente en profondeur. Par contre, contrairement au domaine ferrallitique, une nappe perchée se maintient durant la majeure partie de l'année (nappe semi-permanente). Le plancher de cette nappe est situé à la base de l'horizon argileux jaune-gris (horizon S g').

- enfin, dans le domaine hydromorphe, on trouve, dans les horizons G, une nappe permanente qui semble être sous pression, et qui pourrait correspondre à la nappe d'arène. Dans la partie supérieure du sol, on retrouve la nappe perchée semi-permanente, qui se localise dans les horizons A et E.

Du fait de l'existence de deux nappes superposées, il apparaît que cette hydroséquence correspond au schéma hydrologique de type C présenté au chapitre 1.

De plus, cette analyse confirme les hypothèses concernant les nappes, qui ont été formulées au chapitre précédent à partir de certains indices pédologiques. Ces indices pédologiques traduisent donc effectivement les conditions hydriques actuelles, ce qui montre qu'il existe des relations entre la pédoséquence et l'hydroséquence. Il reste toutefois à quantifier de telles relations , ce qui nous amène au chapitre suivant.

CHAPITRE 6. RELATIONS ENTRE PÉDOSEQUENCE ET HYDROSÉQUENCE

L'objet de ce chapitre est l'établissement de certaines relations quantitatives entre la pédoséquence et l'hydroséquence.

Notons d'emblée que *nous ne pouvons pas établir ici de relations quantitatives et déterministes entre les propriétés hydrodynamiques du sol et l'hydroséquence*. En effet, ceci supposerait que nous disposions d'un modèle hydrologique quantitatif qui soit adapté au versant étudié, comme certaines approches développées en matière d'hydrologie de versant (FREEZE, 1980). Or, nous avons vu qu'un tel modèle n'existe pas pour ce type de versant, du fait de la complexité de son fonctionnement hydrodynamique (cf. chapitre 1, § 1.4). De plus, l'existence d'une macroporosité importante au sein de certains horizons pédologiques (cf. chapitre 4, § 4.2.1) accentue cette complexité, car elle entraîne très vraisemblablement des conditions de flux turbulent, pour lesquelles on ne connaît pas de loi déterministe en mécanique des fluides (HILLEL, 1974).

En revanche, *nous pouvons établir certaines relations quantitatives et statistiques entre la pédoséquence et l'hydroséquence*. En effet, nous disposons, le long du transect B, de variables pédologiques et hydrologiques qui peuvent être mises en relation numérique. Il s'agit :

- d'une part, de variables pédologiques qualitatives et quantitatives issues de l'analyse de la pédoséquence;
- d'autre part, d'une variable hydrologique quantitative qui caractérise bien l'hydroséquence : **la fréquence annuelle d'engorgement**.

De plus, grâce à la configuration du dispositif hydropédologique, l'appariement entre ces variables ne nécessite pas l'emploi d'interpolateurs géostatistiques (RIPLEY, 1981; CRESSIE, 1991). En effet, la localisation des profils pédologiques se superpose à celle des profils de fréquences annuelles d'engorgement. Il suffit donc de discrétiser les profils pédologiques au même pas que celui des profils de fréquences annuelles d'engorgement, afin de pouvoir relier ces profils.

De cette manière, nous avons établi différentes relations statistiques qui sont présentées dans les paragraphes suivants. Nous avons distingué les relations établies entre la fréquence annuelle d'engorgement et :

- d'une part, le type d'horizon pédologique;
- d'autre part, des variables pédologiques quantitatives.

6.1. Relations statistiques entre la fréquence annuelle d'engorgement et le type d'horizon pédologique

La superposition graphique des séquences illustrée en figure VI-1 suggère, de manière visuelle et qualitative, qu'il peut exister une relation entre le type d'horizon et les fréquences annuelles d'engorgement.

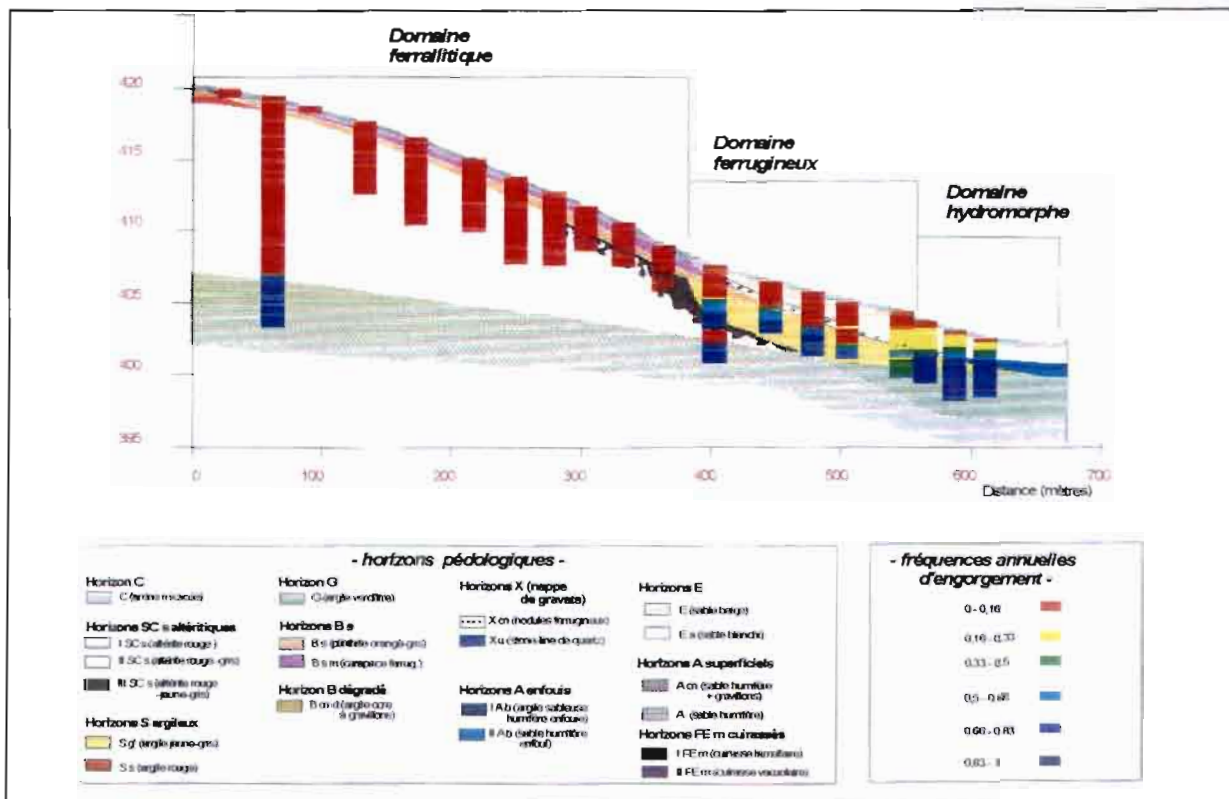


Figure VI-1. Superposition graphique de la pédoséquence et de la séquence de fréquences annuelles d'engorgement calculée sur la période du 30/09/1991 au 30/09/1992.

Pour quantifier cette relation, nous avons discrétisé les descriptions de profils pédologiques au même pas que celui des profils de fréquences annuelles d'engorgement. Ainsi, nous avons pu faire correspondre à chaque horizon un ensemble de valeurs de fréquences annuelles d'engorgement. Nous avons obtenu, de cette façon, les paramètres statistiques présentés au [tableau VI-1](#), qui correspondent aux fréquences calculées sur la période du 30/09/1989 au 30/09/1992.

	B cn d	A cn	B s s	B s m	H SC s	S s	A	E	III SC s	I SC s	X cn	X u	E a	S g	II A b	I A b	G
moyen	4,6 10 ⁻⁴	1,2 10 ⁻³	2,1 10 ⁻²	2,6 10 ⁻²	3,6 10 ⁻²	4,7 10 ⁻²	4,9 10 ⁻²	5,7 10 ⁻²	5,8 10 ⁻²	6,9 10 ⁻²	1,8 10 ⁻¹	3,6 10 ⁻¹	3,8 10 ⁻¹	7,3 10 ⁻¹	9,8 10 ⁻¹	9,9 10 ⁻¹	1
mini.	0	0	9 10 ⁻⁴	0	1,3 10 ⁻²	1,4 10 ⁻²	0	2,7 10 ⁻³	8,3 10 ⁻³	6 10 ⁻²	3,6 10 ⁻³	3,6 10 ⁻³	1,1 10 ⁻¹	1,6 10 ⁻²	9,2 10 ⁻¹	9,9 10 ⁻¹	1
maxi.	2,7 10 ⁻³	1 10 ⁻²	9,8 10 ⁻²	1,3 10 ⁻¹	1,2 10 ⁻¹	6 10 ⁻²	2,4 10 ⁻¹	1,7 10 ⁻¹	2 10 ⁻¹	8,4 10 ⁻²	7,4 10 ⁻¹	6,8 10 ⁻¹	1	1	1	1	1
varian ce	1,3 10 ⁻⁶	4,7 10 ⁻⁶	2,7 10 ⁻⁴	9,1 10 ⁻⁴	5 10 ⁻⁴	2,4 10 ⁻⁴	5,7 10 ⁻³	2,3 10 ⁻³	3,8 10 ⁻³	4,3 10 ⁻⁵	5,5 10 ⁻²	6,4 10 ⁻²	6,4 10 ⁻²	7,7 10 ⁻²	1,4 10 ⁻³	4,2 10 ⁻⁷	0
nb ech	6	31	56	42	59	13	39	38	27	32	28	6	65	116	4	2	25

Tableau VI-1. Fréquences annuelles d'engorgement pour chaque horizon pédologique.

Ce tableau permet de classer ces horizons en fonction de leur fréquence moyenne d'engorgement. Cependant, on constate que les intervalles définis par les valeurs extrêmes de fréquence d'engorgement se chevauchent d'un horizon à l'autre. On ne peut donc pas, au seul vu de ce tableau, affirmer que les moyennes de fréquences annuelles d'engorgement sont, de manière systématique, significativement différentes d'un horizon à l'autre. Pour lever cette incertitude, nous avons effectué un test statistique de comparaison de moyennes qui tient compte de la moyenne, de la variance et du nombre de valeurs (BAILLARGEON, 1989). Les résultats de ce test sont présentés au tableau VI-2.

H1																		
A cn	=																	
B s	>	>																
B s m	>	>	=															
II SC s	>	>	>	>														
S s	>	>	>	>	=													
A	>	>	>	>	=	=												
E	>	>	>	>	>	=	=											
III SC s	>	>	>	>	>	=	=	=										
I SC s	>	>	>	>	>	=	=	=	=									
X cn	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>								
X u	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	=							
E a	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>						
S g	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>					
II A b	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>				
I A b	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	=		
G	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	=	=	
B cn d	A cn	B s	B s m	II SC s	S s	A	E	III SC s	I SC s	X cn	X u	E a	S g	II A b	I A b			
H2																		

> la fréquence moyenne d'engorgement de H1 est significativement supérieure, au seuil de probabilité de 95 %, à la fréquence moyenne d'engorgement de H2
= la fréquence moyenne d'engorgement de H1 n'est pas significativement différente, au seuil de probabilité de 95 %, de la fréquence moyenne d'engorgement de H2

Tableau VI-2. Comparaison statistique des moyennes de fréquence annuelle d'engorgement par horizon.

Ce tableau VI-2 permet d'identifier des ensembles d'horizons entre lesquels les fréquences moyennes annuelles d'engorgement sont significativement différentes, au seuil de probabilité de 95 %, et au sein desquels ces fréquences ne sont pas significativement différentes. On obtient ainsi les ensembles présentés au tableau VI-3.

Ensemble A	Ensemble B	Ensemble C	Ensemble D	Ensemble E	Ensemble F	Ensemble G
A cn B cn d	B s B s m	I SC s II SC s III SC s S s A E	X cn X u	E a	S g'	I A b II A b G

Tableau VI-3. Regroupement des horizons en ensembles après le test de comparaison des moyennes de fréquence annuelle d'engorgement.

Au sein de chacun de ces ensembles, on peut observer des groupes d'horizons qui présentent des caractéristiques pédologiques communes. En effet, :

- les horizons de surface et de subsurface du domaine ferrallitique (horizons A et B cn d) sont regroupés au sein de l'ensemble A;

- les horizons indurés du domaine ferrallitique (horizons B s et B s m) constituent l'ensemble B;

- l'ensemble C regroupe les horizons à matrice rouge de ce domaine pédologique (horizons SC et S);

- l'ensemble D correspond aux horizons constituant la nappe de gravats (horizons X);

D'autre part, l'horizon Ea sableux blanchi (groupe 5) et l'horizon S g' argileux jaune-gris (groupe 6) se distinguent des autres horizons par des fréquences moyennes annuelles d'engorgement spécifiques.

En conséquence, nous avons défini les groupes d'horizons présentés au tableau VI-4, qui présentent certaines caractéristiques pédologiques communes, et qui se distinguent par des valeurs moyennes de fréquences annuelles d'engorgement significativement différentes, au seuil de probabilité de 95 %:

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5	Groupe 6	Groupe 7
A cn B cn d	B s B s m	I Sc s II SC s III SC s S s	X cn X u	E a	S g'	G

Tableau VI-4. Groupes d'horizons pédologiques au sein des ensembles définis par le test de comparaison de moyennes

Nous avons calculé les fréquences annuelles moyennes d'engorgement de chacun de ces groupes, qui sont présentées au tableau VI-5. Un second test de comparaison de moyennes a

alors montré que ces fréquences moyennes sont significativement différentes entre elles au seuil de probabilité de 95 %.

	groupe 1	groupe 2	groupe 3	groupe 4	groupe 5	groupe 6	groupe 7
moyenne	1,1 10 ⁻³	2,3 10 ⁻²	5,0 10 ⁻²	2,1 10 ⁻¹	3,8 10 ⁻¹	7,3 10 ⁻¹	1
variance	4,1 10 ⁻⁶	5,4 10 ⁻⁴	1,2 10 ⁻³	5,9 10 ⁻²	6,4 10 ⁻²	7,7 10 ⁻²	0
nb ech	37	98	131	34	65	116	25

Tableau VI-5. Fréquences annuelles d'engorgement par groupe d'horizons

Nous avons donc pu établir, de manière statistiquement significative, une correspondance entre chacun de ces groupes d'horizons pédologiques et une valeur de fréquence moyenne annuelle d'engorgement. Cette correspondance, assortie du calcul de l'intervalle de confiance à 95 % sur la moyenne, est présentée en figure VI-2.

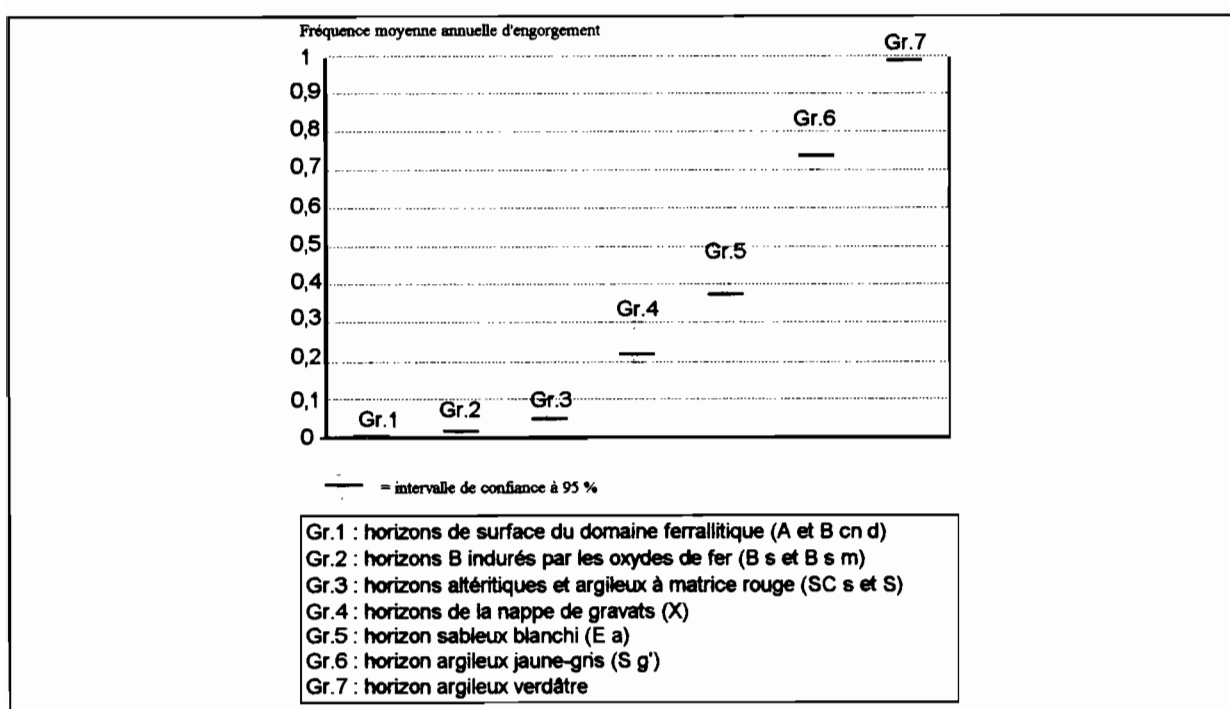


Figure VI-2. Correspondance entre groupes d'horizons pédologiques et fréquences moyennes annuelles d'engorgement.

6.2. Relations statistiques entre la fréquence annuelle d'engorgement et les variables pédologiques quantitatives

La caractérisation de la pédoséquence nous fournit un certain nombre de variables pédologiques quantitatives, que nous avons mis en relation avec la séquence de fréquences annuelles d'engorgement. Il s'agit :

- d'une part, de variables physico-chimiques qui peuvent être influencées par la durée de saturation du sol;

- d'autre part, de variables qui dépendent de la couleur du matériau. En effet, en théorie, cette couleur dépend beaucoup de la composition en oxydes et hydroxydes métalliques (SCHWERTMANN, 1993), qui peut elle-même dépendre de la durée de saturation du matériau. De plus, en pratique, certaines études antérieures ont montré une bonne corrélation entre des indices quantitatifs basés sur la couleur du matériau et sa durée de saturation (MOKMA et SPRECHER, 1994).

Dans les paragraphes suivants, nous examinons les relations statistiques établies entre ces deux groupes de variables et les fréquences annuelles d'engorgement calculées sur la période du 30/09/1989 au 30/09/1992.

6.2.1. Relations entre la fréquence d'engorgement et les variables physico-chimiques

La discrétisation des profils d'analyse physico-chimique nous a permis d'obtenir, pour 17 variables disponibles (cf. tableau VI-6), 215 valeurs spatialement appariées avec des valeurs de fréquence annuelle d'engorgement.

<p style="text-align: center;">Bases totales Ca tot, Mg tot, K tot, Na tot S/T Bases échangeables Ca ech, Mg ech, K ech, Na ech pH eau, pH KCl P205 total, P205 assimilable Fe203 total, Fe203 libre</p>
--

Tableau VI-6. Liste des variables physico-chimiques testées

La relation entre chacune de ces 17 variables et les fréquences annuelles d'engorgement a été testée en construisant les diagrammes de dispersion correspondants.

Pour la plupart de ces variables, les diagrammes obtenus se présentent sous la forme de nuages de points à structure aléatoire. Autrement dit, aucune relation linéaire ou non linéaire n'apparaît entre ces variables physico-chimiques et les fréquences annuelles d'engorgement.

Seuls les diagrammes de dispersion obtenus avec les cations échangeables (Ca, Mg, K, Na) (cf. figure VI-3) révèlent une certaine tendance. En effet, comme pour les autres variables, ces diagrammes présentent une structure aléatoire pour les faibles teneurs en cations échangeables. Toutefois, les teneurs les plus élevées apparaissent liées aux fréquences d'engorgement les plus élevées (fréquences proches de 1). On notera que ces teneurs élevées correspondent à l'horizon G argileux verdâtre, ce qui va dans le sens de l'interprétation effectuée au chapitre 4 selon laquelle cet horizon subirait un confinement des bases.

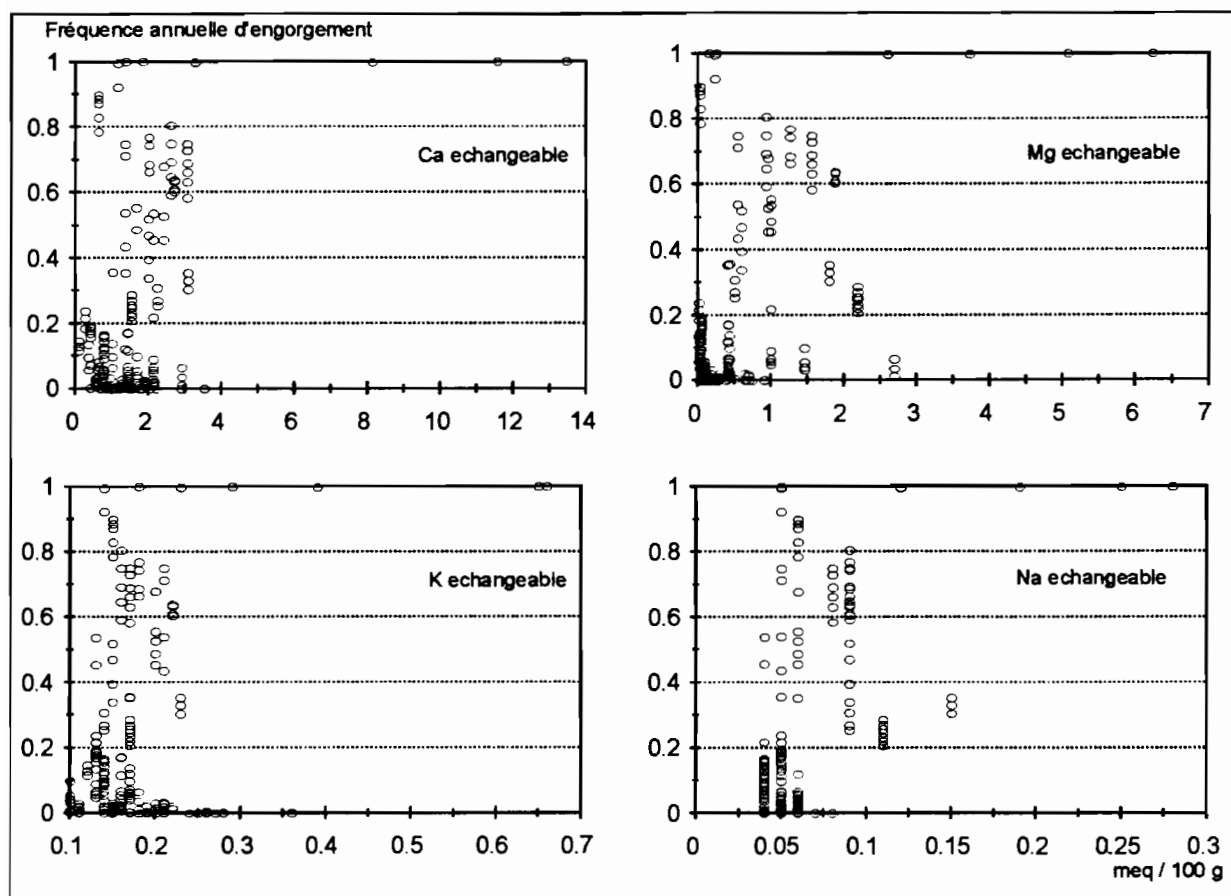


Figure VI-3. Diagrammes de dispersion des bases échangeables en fonction de la fréquence annuelle d'engorgement.

En définitive, les relations entre les variables physico-chimiques testées et les fréquences annuelles d'engorgement apparaissent statistiquement très faibles. Ceci ne doit toutefois pas conduire à une généralisation de principe, car d'autres variables physico-chimiques pourraient être en meilleure relation avec la fréquence annuelle d'engorgement. On peut notamment penser à la teneur en fer ferreux dont la présence est souvent associée aux conditions réductrices rencontrées dans les sols hydromorphes (BACHELIER, 1969; VIZIER, 1969 et 1974).

6.2.2. Relations entre la fréquence d'engorgement et la couleur des matériaux

La discrétisation des descriptions des profils pédologiques nous a permis d'obtenir 550 couples de valeurs, appariant spatialement les couleurs munsell des volumes pédologiques avec les valeurs de fréquence annuelle d'engorgement. Nous avons alors repris les variables quantitatives suivantes, calculées lors de l'analyse de la pédoséquence :

- **les trois composantes de la couleur munsell de la phase principale meuble: V** (clarté ou value); **C** (pureté ou chroma); **H** (teinte ou hue).

- **le Red Ratio** (TORRENT et al., 1983) **de la phase principale meuble**, soit le rapport $\frac{(10 - H) \times C}{V}$

- **la Clarté moyenne, la Pureté moyenne, la Teinte moyenne, et le Red ratio moyen du volume pédologique**, soit, respectivement $\sum \alpha_i \times V_i$, $\sum \alpha_i \times C_i$,

$\sum \alpha_i \times H_i$ et

$\sum \alpha_i \times RR_i$, avec α_i = proportions des différentes phases meubles au sein du

volume pédologique et V_i , C_i , H_i , RR_i = clartés, puretés, teintes et red ratios des différentes phases meubles

En comparant ces variables avec les fréquences annuelles d'engorgement, nous avons obtenu les résultats présentés aux paragraphes suivants.

6.2.2.A. Relations entre la fréquence d'engorgement et la pureté (chroma)

Tous les diagrammes de dispersion obtenus par comparaison des variables de pureté avec les fréquences moyennes annuelles d'engorgement présentent une structure aléatoire.

Autrement dit, aucune relation linéaire ou non linéaire n'apparaît entre ces variables et les fréquences moyennes annuelles d'engorgement.

6.2.2.B. Relations entre la fréquence d'engorgement et la clarté (value)

Pour les variables de clarté, nous avons d'abord écarté les horizons humifères, puisque la clarté est d'abord souvent fortement corrélée aux teneurs en matière organique (SCHULZE et al., 1993). Malgré cette précaution, et comme pour la pureté, aucune relation linéaire ou non linéaire n'apparaît entre les variables de clarté et les fréquences moyennes annuelles d'engorgement.

6.2.2.C. Relations entre la fréquence d'engorgement et la teinte

Contrairement aux variables précédentes, la teinte de la phase principale meuble et la teinte moyenne du volume pédologique apparaissent bien corrélées à la fréquence moyenne annuelle d'engorgement. En effet, les diagramme de dispersion obtenus par comparaison de ces variables avec les fréquences moyennes annuelles d'engorgement révèlent l'existence de relations non linéaires (cf. figures VI.4 a et b). D'après l'allure sigmoïdale de ces diagrammes, ces relations non linéaires correspondent à un modèle de type logistique (JOLIVET, 1983;

TOMASSONE et al, 1992), de forme générale $y = \frac{a}{1+(b \times e^{-cx})}$.

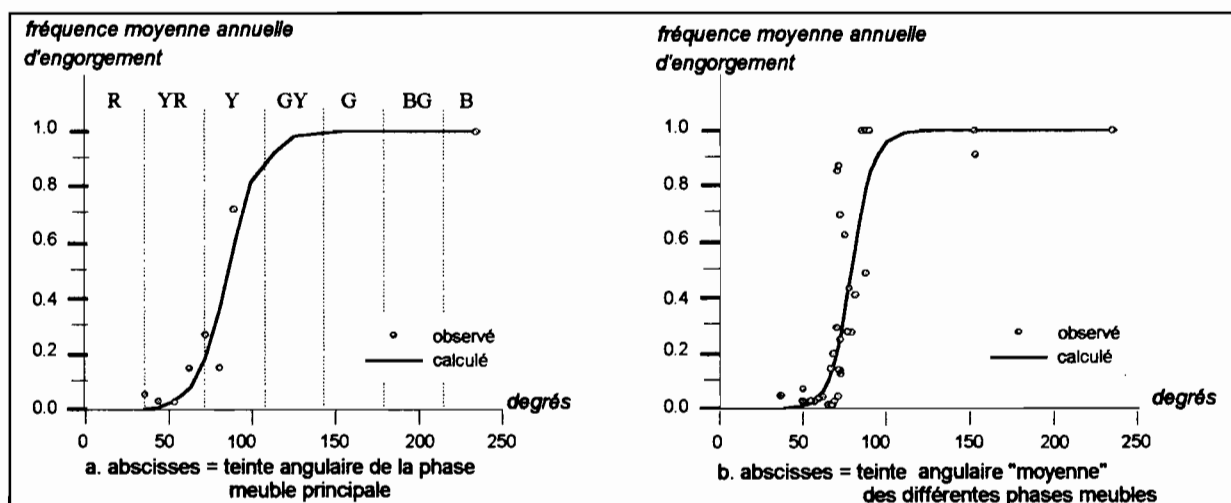


Figure VI-4. Relations entre teintes (phase principale, teinte "moyenne") et fréquence moyenne annuelle d'engorgement.

Une régression non linéaire (effectuée à l'aide du logiciel Statitcf) permet d'obtenir les paramètres a, b, c de ce modèle dans le cas de chacune des deux variables de teinte. On obtient, en définitive, les relations numériques et les coefficients de détermination (R^2), suivants :

$$\text{Fréquence moyenne annuelle d'engorgement} = \frac{1}{1 + (8872 \times e^{-0.10 \times \text{teinte phase principale}})}$$

($R^2 = 0.95$ pour 13 observations - significatif à 99 %)

$$\text{Fréquence moyenne annuelle d'engorgement} = \frac{1}{1 + (180538 \times e^{-0.15 \times \text{teinte "moyenne"}})}$$

($R^2 = 0.82$ pour 38 observations - significatif à 99 %)

On constate un ajustement significatif, au seuil de probabilité de 99 %, entre les fréquences d'engorgement observées et les fréquences prédites par ces relations.

En pratique, ces relations expriment quantitativement le fait que les teintes les plus rouges (R et YR) correspondent aux fréquences d'engorgement les plus faibles, que les teintes jaunâtres (Y) correspondent aux fréquences d'engorgement intermédiaires, et que les teintes verdâtres à bleuâtre (GY à B) correspondent aux fortes fréquences d'engorgement.

6.2.2.D. Relations entre la fréquence d'engorgement et le Red ratio

Comme pour les variables de teinte, le Red Ratio de la phase principale meuble et le Red Ratio moyen du volume pédologique apparaissent bien corrélés à la fréquence moyenne annuelle d'engorgement. En effet, on retrouve également ici (cf. figures VI.5 a et b) des relations non linéaires se calant sur un modèle logistique.

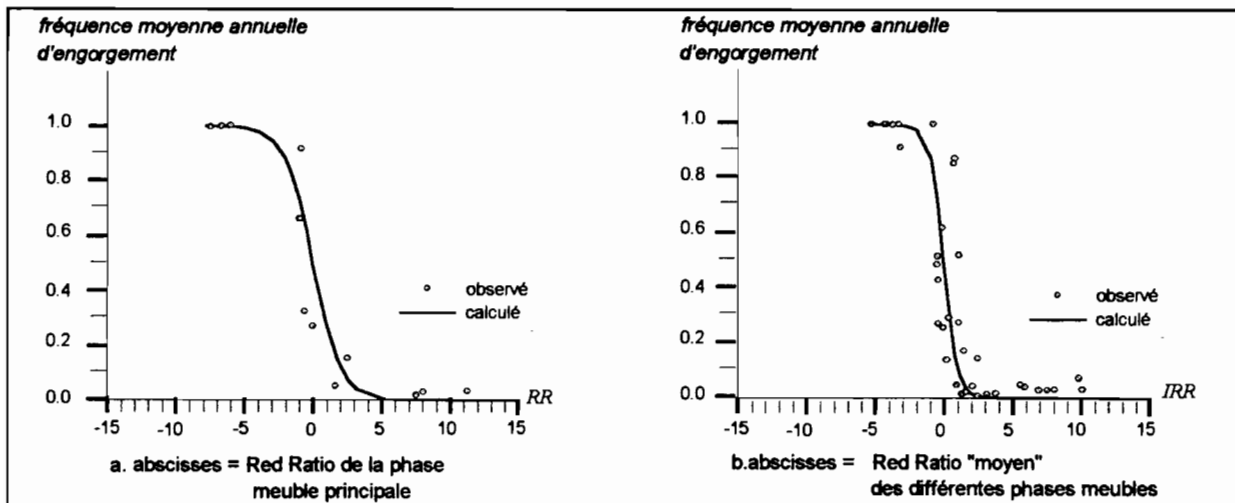


Figure VI-5. Relations entre Red ratios (phase principale, Red ratio "moyen") et fréquence moyenne annuelle d'engorgement.

Les régressions non linéaires effectuées permettent de déterminer les relations numériques et les coefficients de détermination suivants :

$$\text{Fréquence moyenne annuelle d'engorgement} = \frac{1}{1 + \left(2,24 \times e^{0,36 \times \text{RR phase principale}} \right)}$$

($R^2 = 0.89$ pour 13 observations - significatif à 99 %)

$$\text{Fréquence moyenne annuelle d'engorgement} = \frac{1}{1 + \left(2,69 \times e^{0,60 \times \text{RR "moyen"}} \right)}$$

($R^2 = 0.78$ pour 43 observations - significatif à 99 %)

De même que pour les relations établies à partir de la teinte du matériau, ces relations établies à partir du Red ratio montrent un ajustement significatif, au seuil de probabilité de 99 %, entre les fréquences d'engorgement observées et les fréquences prédites.

fonction hydrique?

6.3. Conclusion du chapitre 6

L'analyse effectuée au cours de ce chapitre a permis d'établir deux types de relations statistiquement significatives entre la pédoséquence et l'hydroséquence :

- d'une part, des relations entre le type d'horizon et les fréquences moyennes annuelles d'engorgement,
- d'autre part, des relations entre ces fréquences moyennes annuelles d'engorgement et deux variables basées sur la couleur des matériaux : la teinte et le Red Ratio.

Ceci montre qu'il est possible, sur ce type de versant, de prévoir la fréquence moyenne annuelle d'engorgement du matériau si l'on connaît son type d'horizon pédologique ou si l'on mesure sa couleur.) OK

Or, comparativement au suivi de la dynamique de la nappe durant de longues période, l'acquisition de ces variables pédologiques reste relativement aisée. En conséquence, ces variables s'avèrent particulièrement intéressantes, en tant qu'indicateur hydrologique. Il conviendrait, par suite, de procéder au même type d'analyse sur d'autres hydropédoséquences, afin de voir si ce principe peut être généralisé.

En revanche, il n'apparaît pas de relation statistiquement significative entre les fréquences annuelles d'engorgement et les variables physico-chimiques que nous avons pu tester. Ceci implique que ces variables ne peuvent servir d'indicateur hydrologique. Toutefois, il serait intéressant d'examiner les relations obtenues entre les fréquences annuelles d'engorgement et d'autres variables physico-chimiques (teneur en fer ferreux, notamment).

CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE

L'étude de l'hydropédoséquence du versant représentatif conduit aux deux conclusions suivantes :

1°) Le modèle pédologique et le schéma hydrologique du paysage de référence peuvent être précisés.

L'analyse de la **pédoséquence** nous a conduit à identifier et à localiser 20 horizons pédologiques. L'analyse du contenu et de l'enveloppe de ces horizons a permis de différencier deux grands ensembles : un ensemble d'horizons issu de l'altération de la roche et un ensemble d'horizons issus d'apports. En localisant ces ensembles à l'échelle du versant, le mode de formation du domaine ferrugineux a pu être précisé par rapport au modèle de la pédoséquence-type : celui-ci correspond à un glacis partiellement comblé par des dépôts alluvio-colluviaux, d'âge intermédiaire entre le moyen-glacis quaternaire du domaine ferrallitique aval et le bas glacis quaternaire du domaine hydromorphe.

Au sein des deux grands ensembles d'horizons, plusieurs processus de transformation ont été identifiés, qui permettent d'établir des filiations génétiques entre les horizons : déferrisation, désargilification, disparition sélective de l'hématite, Ces processus apparaissent, pour la plupart, liées à l'action de l'eau.

D'autre part, certaines séquences de caractères analytiques ont permis de préciser la pédoséquence à l'aide d'une méthode numérique indépendante du découpage en horizons pédologiques. Tous les caractères analytiques étudiés ont présenté des variations importantes au passage entre le domaine ferrallitique et le domaine ferrugineux.

A partir de ces deux approches de la pédoséquence (découpage conceptuel en horizons et établissement de séquences de caractères analytiques), plusieurs indices ont alors permis de

formuler les hypothèses suivantes concernant les nappes phréatiques : absence de nappe dans le domaine ferrallitique; présence de nappes perchées dans les domaines ferrugineux et hydromorphe.

Par suite, l'analyse de l'**hydroséquence**, effectuée durant 3 cycles annuels, a montré le bien fondé des hypothèses issues de l'analyse de la pédoséquence. Cette hydroséquence présente, en effet, une nappe perchée semi-permanente exclusivement localisée dans les domaines ferrugineux et hydromorphe. Toutefois, cette analyse a également révélé l'existence d'une nappe d'arène permanente, sur l'ensemble du versant. On a donc pu préciser le schéma hydrologique de ce type de versant, qui s'avère être un schéma à deux nappes superposées.

2°) Deux relations quantitatives ont été établies entre la pédoséquence et l'hydroséquence.

Il s'agit de deux relations statistiquement significatives. D'une part, entre le type d'horizon et les fréquences moyennes annuelles d'engorgement. D'autre part, entre les fréquences moyennes annuelles d'engorgement et deux variables basées sur la couleur des matériaux : la teinte et le Red Ratio.

Ces relations montrent qu'en déterminant le type d'horizon pédologique ou en mesurant sa couleur, on peut prévoir la fréquence moyenne annuelle d'engorgement du matériau.

TROISIÈME PARTIE :

RELATIONS ENTRE L'HYDROPÉDOSÉQUENCE ET LE COMPORTEMENT D'UNE PLANTE CULTIVÉE.

L'hydropédoséquence présente d'importantes variations hydro-pédologiques qui s'étagent le long du versant. Dans le cadre de l'évaluation de l'aptitude agricole de ce versant, on peut se demander quelles sont les relations entre ces variations et le comportement des plantes cultivées. *Bywell*

Dans cette partie, nous prendrons l'exemple d'une plante dont on connaît mal les contraintes : le cotonnier. Cette plante présente un intérêt économique particulier pour le Togo, puisqu'elle constitue la deuxième ressource à l'exportation pour ce pays (SO.TO.CO, 1990, 1991, et 1992).

CHAPITRE 7. RELATIONS ENTRE L'HYDROPÉDOSÉQUENCE ET LE COMPORTEMENT DU COTONNIER

Ce chapitre présente les résultats d'une étude effectuée durant trois campagnes agricoles (1989, 1990 et 1991), en condition de traitement agronomique homogène (BLAVET et al., 1990; AUDEBERT et BLAVET, 1992; AUDEBERT, 1993). Ces résultats permettent de mettre en relation les variations hydro-pédologiques observées le long d'une partie du versant et les variations de comportement du cotonnier.

Au cours de cette étude, la culture de cotonnier a été conduite, pour des raisons logistiques et foncières, au sein du périmètre de la station d'essais du CIRAD-CA. Ce périmètre comporte 26 parcelles expérimentales d'une surface de 2500 m² (25 x 100 m) chacune, qui sont orientées selon la ligne de plus forte pente du versant. En superposant ce parcellaire sur un bloc-diagramme de reconnaissance des sols (cf. figure VII-1), on constate qu'il se localise dans deux des trois domaines pédologiques qui ont été décrits au chapitre 4. En effet, ce parcellaire comprend deux grands secteurs : un secteur amont qui est situé dans le domaine ferrallitique, et un secteur aval qui s'étend sur le domaine ferrugineux. Ces deux secteurs correspondent à des conditions hydrologiques très différentes, puisque nous avons vu, au chapitre 5, que le domaine ferrallitique est caractérisé par la présence d'une nappe sporadique, alors que le domaine ferrugineux se caractérise par la présence d'une nappe perchée semi-permanente.

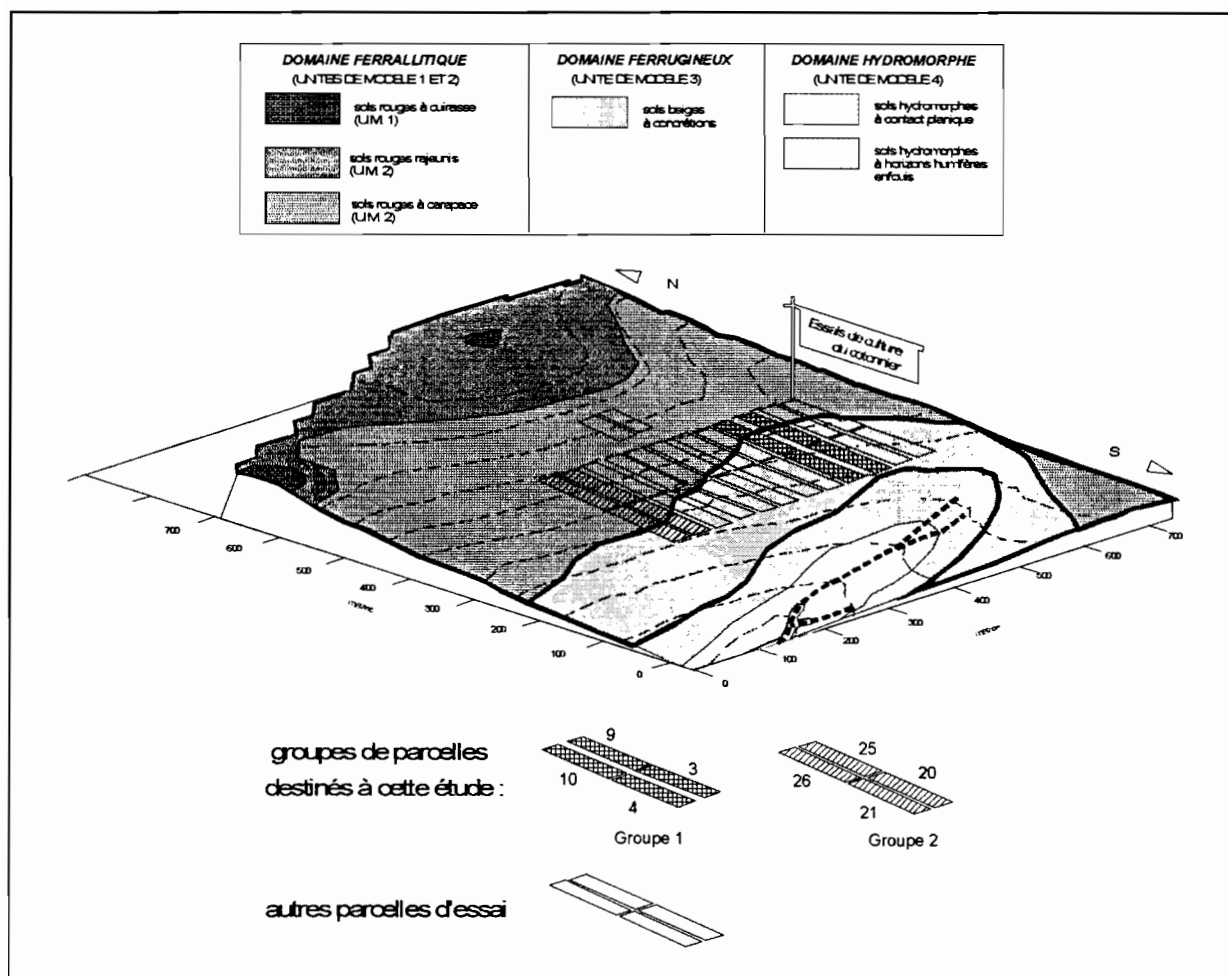


Figure VII-1. Localisation du périmètre de la station d'essai de culture cotonnière par rapport aux domaines pédologiques

Nous préciserons d'abord le matériel et les méthodes avec lesquelles l'étude a été menée, puis nous examinerons les résultats obtenus.

7.1. Matériel et méthodes

Les paragraphes suivants précisent les conditions dans lesquelles la culture a été effectuée, ainsi que les méthodes mises en oeuvre.

7.1.1. Les conditions de la culture

7.1.1.A. les surfaces mises en culture et leurs caractéristiques

Au sein du périmètre de la station d'essais, deux groupes de 4 parcelles chacun ont été mis à notre disposition afin de recouvrir l'ensemble des variations hydro-pédologiques observables sur cette partie du versant (cf. figure VII-1). Ces groupes se situent dans les parties Est (groupe 1) et Ouest (groupe 2) de la station .

Pour ces deux groupes de parcelles, la limite entre les deux domaines pédologiques a été précisée à l'aide d'indicateurs de surface (cf. § 7.1.2-A.). Cette délimitation montre que le domaine ferrallitique s'étend sur les deux tiers amont du groupe de parcelles 2, alors qu'il est restreint au tiers amont du groupe de parcelles 1 (cf. figure VII-2).

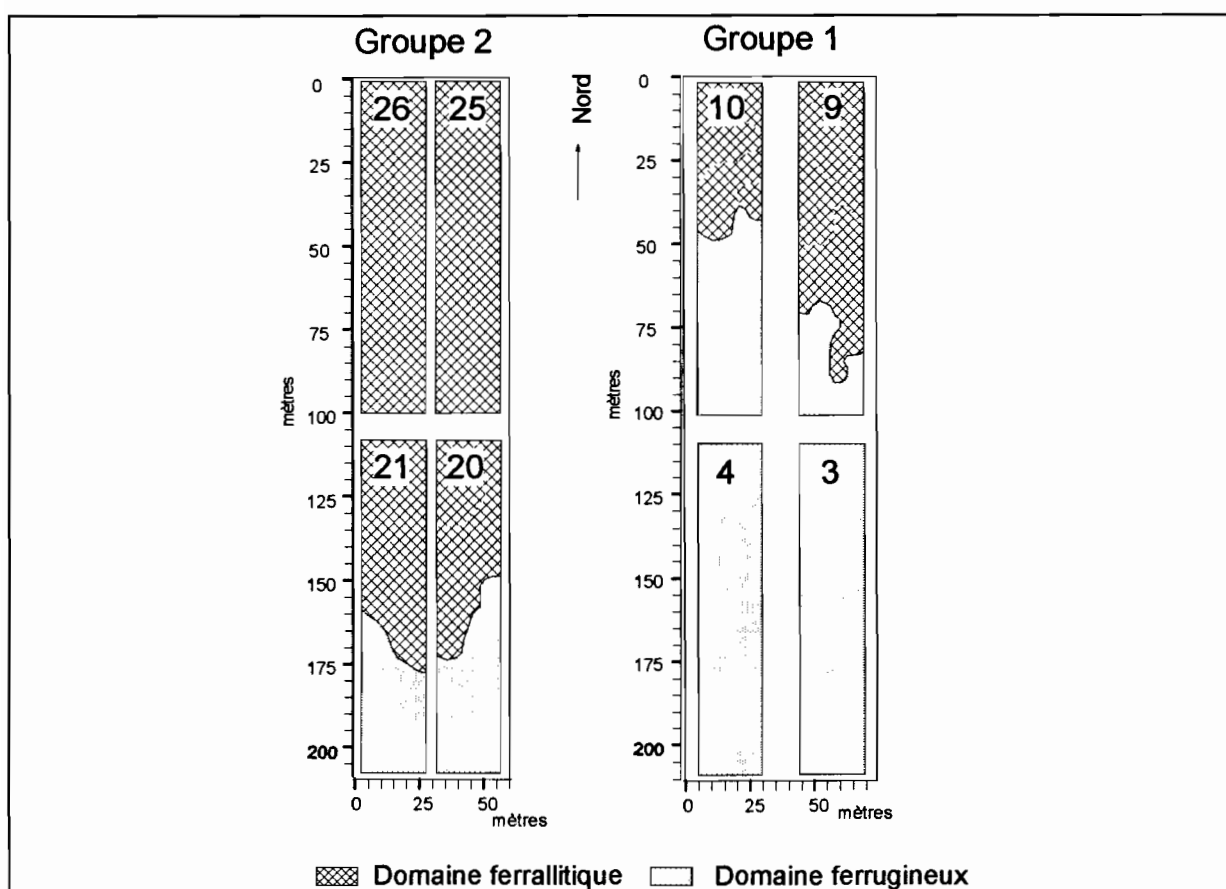


Figure VII-2. Délimitation des domaines pédologiques sur les deux groupes de parcelles

Les antécédents culturaux de ces deux groupes de parcelles sont présentés au tableau VII-1. On notera que les quatre parcelles du groupe 1 ont été cultivées en cotonnier l'année précédant le début de l'étude (1988), ce qui permet de limiter les causes anthropiques d'hétérogénéité des sols. En revanche, deux parcelles du groupe 2 (parcelles 25 et 26) n'avaient jamais été cultivées avant le début de cette étude (1989). On ne peut donc pas exclure, au moins pour la première année de mise en culture, l'existence d'une certaine hétérogénéité anthropique au sein de ce groupe 2.

	Groupe de parcelles 1				Groupe de parcelles 2			
	3	4	9	10	20	21	25	26
1981	C	C	S	S	C	A	J	J
1982	M/N	M/N	A	A	A	C	J	J
1983	S	S	C	C	C	A	J	J
1984	A	A	M/N	M/N	A	C	J	J
1985	C	C	S	S	C	M/N	J	J
1986	M/N	M/N	A	A	M/N	C	J	J
1987	J	J	C	C	C	C	J	J
1988	C	C	C	C	C	C	J	J

Légende : C : Coton
A : Arachide
S : Sorgho
M/N : Mais-Niébé
J : Jachère

Tableau VII-1. Antécédents culturaux des 8 parcelles agronomiques utilisées pour l'étude.

7.1.1.B. le matériel végétal et les techniques culturales

La variété de cotonnier qui a été choisie est le *Gossypium hirsutum* L., Stam 45 E, mise au point par la section de génétique de la station IRCT d'Anié-Mono. Ce choix correspond à une variété qui est actuellement vulgarisée au Togo, en raison d'un bon rendement en fibres et d'une production économiquement rentable de graines.

En ce qui concerne les techniques culturales mises en oeuvre, les 8 parcelles retenues pour cette étude ont fait l'objet d'un seul traitement agronomique qui est précisé au tableau VII-2.

Dans ce traitement, la préparation et l'entretien du sol, ainsi que le mode de semis et le désherbage ont suivi les recommandations vulgarisées par la Société Togolaise du Coton (SO.TO.CO, 1986 et 1988). En revanche, afin de mettre à la disposition de la plante un potentiel alimentaire suffisant pour s'affranchir au maximum des antécédents culturaux, la fumure a été plus forte que celle qui est recommandée par la SO.TO.CO. Afin de gommer d'éventuelles disparités dues aux attaques parasitaires, la protection phytosanitaire a également été accrue par rapport à ces recommandations.

Préparation du sol	
Force de travail	: Manuelle
Travail du sol	: Billons
Mode semis sur parcelle	: En ligne (inter billon de 0,80 m)
Mode semis en ligne	: En poquet (distance de 25 cm)
Dates de semis	: 18-25/06/89; 20-21/06/90; 19-20/06/91
Densité	: 50 000 /ha (1 plant/poquet)
Fumure	
Type 1er apport engrais	: 12-22-12-5-1.1 NPKSB + KCl
Dose 1er apport engrais	: 300 kg/ha NPKSB + 50 kg/ha KCl
Localisation 1er apport	: Saignée refermée
Date 1er apport	: 15 jours après semis
Type 2e apport engrais	: Urée
Dose 2e apport engrais	: 75 kg/ha
Localisation 2e apport	: Saignée refermée
Date 2e apport	: 40 jours après semis
Entretien	
Désherbage chimique	: Cotodon 400 + Gramoxone 250
Dose herbicide	: 4 l/ha + 1 l /ha
Date de désherbage	: 1 jour après semis
Types de sarclages	: Manuels à la houe
Nombre de sarclages	: 2
Type de buttage	: Manuel à la daba (grande houe)
Type de trait. insecticide	: Pyréthrianoïde + organophosphoré acaricide
Nb de trait. insecticides	: 12 (hebdomadaire)
Dose trait. insecticides	: 3 l/ha
Date 1er trait. insecticide	: 45 ème jour après semis
Récolte	
Récoltes successives	: 130, 145, 160 jours après semis
Surface récoltée	: 16 x 120 x 8 = 15360 m ²
Gestion des résidus	: Exportation (brûlis à côté des parcelles)

Tableau VII-2. Traitement agronomique sur les 8 parcelles étudiées.

7.1.2. Les méthodes

L'analyse des relations entre l'hydropédoséquence et le comportement du cotonnier a été effectuée à deux échelles, et selon deux approches successives :

- *à l'échelle des groupes de parcelles* retenues pour cette étude. Cette échelle englobe la variabilité spatiale hydro-pédologique et agronomique d'une partie du versant. A cette échelle, l'approche a été de caractériser les variations spatiales de la récolte, et de comparer ces variations spatiales avec les variations spatiales édaphiques. A l'issue de cette approche, différentes situations agro-hydro-pédologiques ont été identifiées.

- *à l'échelle intraparcellaire*. A cette échelle, nous avons choisi quelques sites représentant les différentes situations agro-hydro-pédologiques identifiées à l'échelle des groupes de parcelles. L'approche a été de suivre la croissance de la plante dans chacune des situations, et d'identifier certaines contraintes.

7.1.2.A. méthodes utilisées à l'échelle des groupes de parcelles

Afin de pouvoir comparer les variations spatiales de la récolte et les variations spatiales édaphiques, les 8 parcelles retenues pour cette étude ont d'abord été divisées en 120 micro parcelles carrées d'une surface de 16 m² (cf. figure VII-3). Les limites de ces micro parcelles ont été matérialisées sur le terrain par des jalons fixés à leurs quatre coins. Chacune de ces micro parcelles a été identifiée par un code (numéro de parcelle, numéro de colonne, numéro de rangée). Le centre de ces micro parcelles a été repéré dans l'espace par ses coordonnées en x,y.

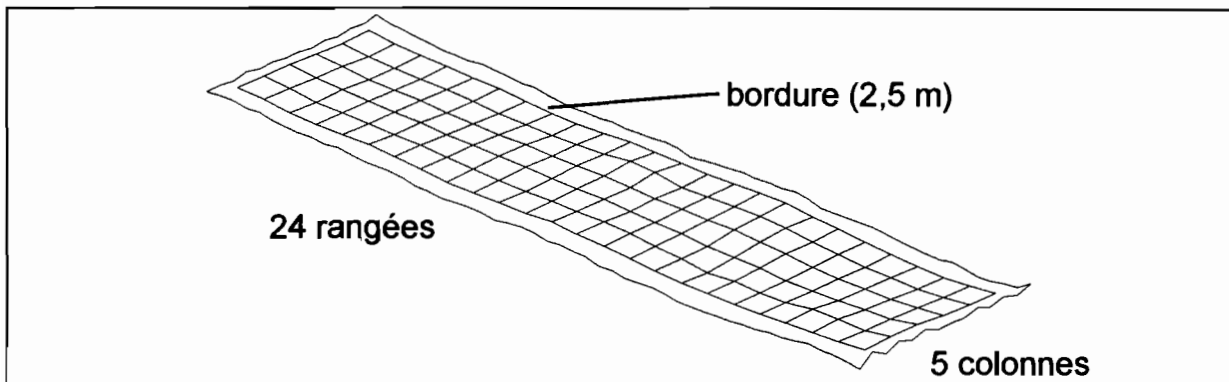


Figure VII-3. Subdivision d'une parcelle en 120 micro parcelles

Par suite, la caractérisation des variations spatiales de la récolte a fait l'objet de deux type d'opérations :

- d'une part, sur chacune des micro parcelles, la production en coton-graine a été pesée à l'issue de chacune des trois récoltes annuelles. Nous avons ainsi obtenu le rendement individuel de chaque micro parcelle, qui correspond au poids, rapporté à l'unité de surface, du coton graine issu des capsules arrivées à maturité après 160 jours de culture .

- d'autre part, lors de l'arrachage des plants effectué à l'issue de la première récolte (1989), des échantillons de 10 plants de cotonnier ont été prélevés sur chaque micro parcelle, après analyse d'échantillonnage. A partir de ces échantillons, certaines mesures anatomiques ont été effectuées sur le système aérien et le système racinaire : hauteur des plants, diamètre au collet du pivot et profondeur du pivot.

Enfin, pour compléter les données pédologiques obtenues à l'échelle du versant, certaines précisions sur les variations spatiales édaphiques ont été recherchées au sein des parcelles, à l'aide de méthodes non destructives : une cartographie détaillée des états de surface a été effectuée sur chacune des parcelles en saison sèche, peu avant la récolte de 1989 (C. PLEUVRET). Cette cartographie a permis de décrire un ensemble d'éléments observables à la

surface du sol : micro relief, aspect du billon, présence ou absence d'affleurements indurés, activité mésofaunique, texture, structure et porosité de l'horizon de surface, abondance des éléments grossiers, couleur du sol, nature des organisations pelliculaires selon la typologie de CASENAVE et VALENTIN (1989). Elle a permis d'assigner à chaque micro parcelle un état de surface caractéristique (état de surface dominant). De plus, à l'aide de certains des éléments de cette cartographie (charge grossière en surface, présence ou absence d'affleurements de carapace, couleur du sol), il a été possible de délimiter avec précision la zone à horizons A_{cn} et B_{sm} qui correspond au domaine ferrallitique, et la zone à horizon A qui correspond au domaine ferrugineux. Ainsi, le domaine pédologique auquel appartient chaque micro parcelle a pu être précisé.

7.1.2.B. méthodes utilisées à l'échelle intraparcellaire

Trois sites étagés depuis l'amont vers l'aval ont été choisis au sein du groupe de parcelles n° 1 (cf. figure VII-4 a). Ce choix a été effectué à l'issue de la première année de culture, à l'aide de cartes détaillées précisant la limite entre les domaines ferrallitique et ferrugineux, la nature des états de surface, et le niveau de rendement. Il répond à plusieurs critères :

- les sites choisis devaient être représentatifs des deux domaines hydro-pédologiques rencontrés, et des principaux niveaux de rendement du cotonnier;
- ces sites devaient être homogènes sur le plan hydro-pédologique et agronomique (au sein d'un site : même domaine pédologique, même état de surface, même niveau de rendement).

Selon ces critères, un premier site a été choisi dans le domaine ferrallitique. Dans le domaine ferrugineux, nous avons retenu deux sites (sites "ferrugineux amont" et "ferrugineux aval") car, lors de l'étude effectuée à l'échelle des groupes de parcelles, nous avons observé des niveaux de rendement très différents entre la partie amont et la partie aval de ce domaine. Ces

trois sites ont été placés en bordure de parcelle, afin de minimiser les perturbations liées aux passages répétés entre les rangs de cotonnier

Chacun de ces trois sites a été constitué de 6 micro parcelles adjacentes, ainsi que de la bordure cultivée de la parcelle (cf. figure VII-4 b). Pour chaque site, le dispositif a été le suivant :

- dans l'allée adjacente à la parcelle, une fosse d'observation pédologique a permis de caractériser le profil de sol correspondant au site, sans détruire la surface d'essai. Cette fosse a servi également à des prélèvements de sol pour analyse physico-chimique;

- sur la micro parcelle centrale du site, un piézomètre a été implanté jusqu'à 2,5 mètres de profondeur afin de suivre l'évolution de la nappe dans la zone prospectée par les racines (notons qu'un seul piézomètre était suffisant pour cette partie du sol, puisque, d'après l'étude de l'hydroséquence, il n'y existe qu'une seule nappe). Ce piézomètre a été construit selon le modèle employé à l'échelle du versant (cf. § 5.1.2.);

- réparti sur l'ensemble des 6 micro parcelles, un échantillon de 10 plants marqués a servi au suivi du développement des parties aériennes du cotonnier (hauteur des plant, architecture, et surface foliaire);

- enfin, localisée dans la bordure cultivée de la parcelle, une zone destructible a été destinée au suivi du développement racinaire. A différents stades d'évolution de la plante, l'étude du système racinaire a été effectuée dans cette zone selon une méthode mise au point par CHOPART (1989) : après avoir coupé la partie aérienne d'un plant de cotonnier, le sol a été progressivement dégagé par tranches horizontales à partir d'une fosse. Une grille appliquée sur ces tranches a permis de compter le nombre de racines, de déterminer leur diamètre et leur localisation. L'opération a été effectuée à différentes profondeurs (-10, -30, -50, -70, -90, -110 et -130 cm), ce qui a permis de définir, entre autre, la profondeur du front racinaire.

Par ailleurs, on notera que chaque site a été équipé d'un dispositif complémentaire (tensiomètres, tubes d'accès pour humidimétrie neutronique et capteurs de solution de sol), qui était destiné, pour sa part, à étudier les conditions de l'alimentation hydrique et minérale de la plante (AUDEBERT, 1993) .

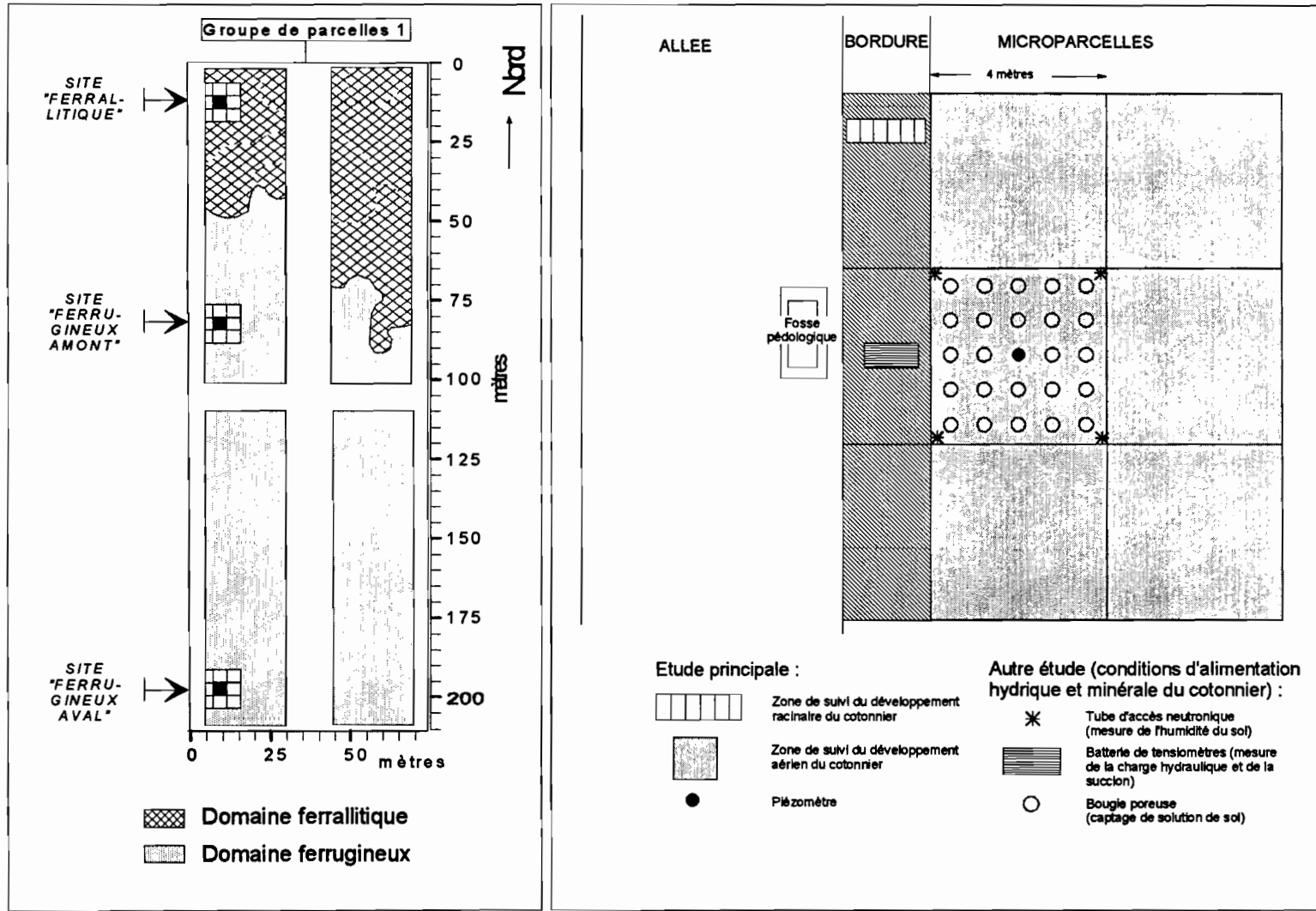


Figure VII-4. Localisation des sites étudiés et détail du dispositif.

7.2. Résultats et interprétations

Nous examinerons successivement les résultats obtenus à l'échelle des groupes de parcelles, puis à l'échelle intraparcellaire.

7.2.1. Résultats et interprétations à l'échelle des groupes de parcelles

Les résultats obtenus à l'échelle des parcelles portent sur les variations temporelles et spatiales de la récolte, ainsi que sur les relations entre les variations spatiales de cette récolte et les variations spatiales édaphiques.

Avant d'analyser les variations spatiales de la récolte, il convient de vérifier que ces variations sont relativement stables d'une année sur l'autre. Par conséquent, et dans la mesure où nous disposons de 3 années de relevés pour la variable rendement (1989, 1990, 1991), nous analyserons d'abord, pour les deux groupes de parcelles d'essais, les variations inter annuelles du rendement.

Par suite, nous examinerons les variations spatiales de la récolte, à partir des différentes variables disponibles (rendement, hauteur des plants, diamètre du pivot au collet et profondeur du pivot).

Enfin, nous mettrons en relation ces variations spatiales de la récolte avec les variations spatiales édaphiques.

7.2.1.A. Les variations inter annuelles du rendement des micro parcelles

La figure VII-5 présente une carte des différences relatives du rendement de chaque micro parcelle entre la première et la deuxième récolte annuelle (1989 et 1990).

On constate, sur cette figure, que deux parcelles du groupe 2 (parcelles 25 et 26) se distinguent nettement des autres par une forte variation inter annuelle du rendement (en moyenne, le rendement a augmenté de 64 % en 1990 pour la parcelle 26, et de 50 % pour la parcelle 25). Or, parmi les 8 parcelles mises à notre disposition, ces deux parcelles sont les seules qui sortent de jachère de longue durée (cf. § 7.1.1. A). Cette figure traduit donc un effet direct des antécédents culturels. En conséquence, ce groupe de parcelle 2 ne peut être retenu pour la suite de l'analyse, puisqu'on ne peut pas y négliger la variabilité des antécédents culturels.

En revanche, au vu de cette figure, les variations inter annuelles du rendement des micro parcelles restent relativement faibles et homogènes sur les parcelles du groupe 1 (moins de 50 % entre 1989 et 1990 pour la plupart des micro parcelles de ce groupe). Ceci se confirme en mettant en relation deux à deux les rendements annuels des micro parcelles de ce groupe (cf. figure VII-6) : on constate, en effet, une bonne relation linéaire proche de la médiatrice ($R^2 > 0.7$) entre les rendements des micro parcelles d'une année à l'autre.

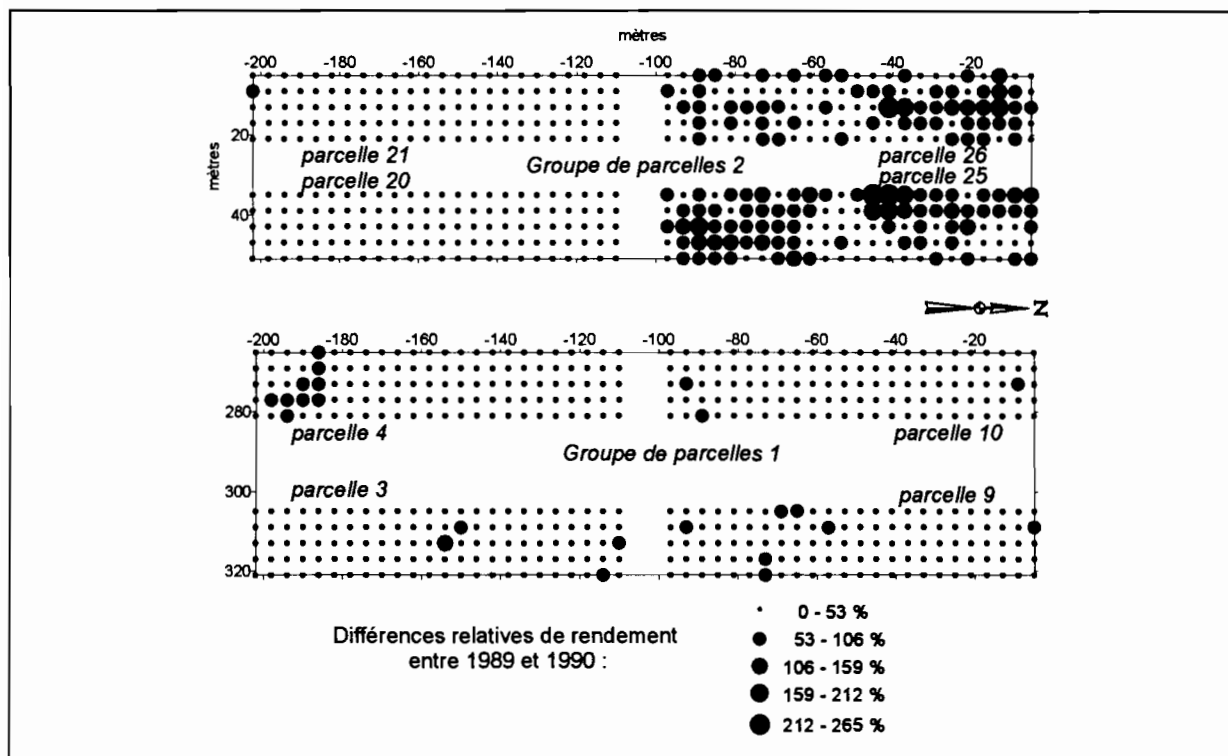


Figure VII-5. Variabilité inter annuelle du rendement des micro parcelles.

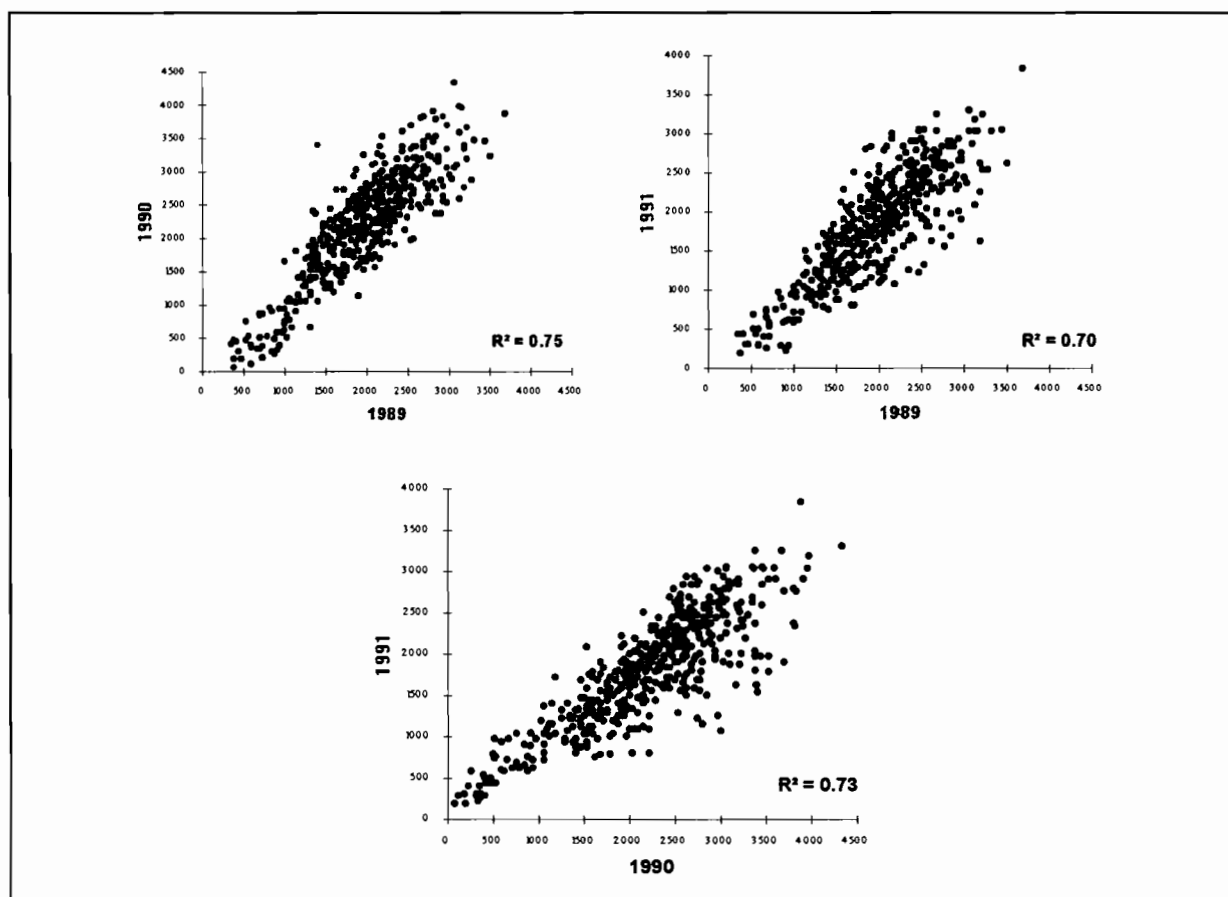


Figure VII-6. Relations entre les rendements 1989, 1990 et 1991 des micro parcelles (kg/ha). Groupe de parcelles 1.

En définitive, pour le groupe de parcelles 1, et contrairement au groupe de parcelles 2, la variabilité inter annuelle du rendement ne révèle pas "d'effet parcelle" imputable aux antécédents culturaux. Ce fait, ainsi que la bonne stabilité des rendements obtenus d'une année sur l'autre, autorisent l'analyse des variations spatiales de la récolte au sein de ce groupe de parcelles.

7.2.1.B. Les variations spatiales de la récolte

Compte tenu des remarques effectuées lors de l'analyse des variations inter annuelles du rendement, seuls sont présentés ici les résultats obtenus pour le groupe de parcelles 1 lors de la récolte de 1989.

Au sein de ce groupe de parcelles, les variations spatiales de la récolte apparaissent importantes, malgré l'homogénéité du traitement agronomique. En effet, si l'on considère les paramètres statistiques obtenus à partir des mesures effectuées sur chaque micro parcelle (cf. tableau VII-3), on peut constater que les coefficients de variations sont élevés pour toutes les variables mesurées (de l'ordre de 30 % pour les rendements, de 15 % pour la hauteur des plants, de 20 % pour le diamètre du collet au pivot et pour la profondeur du pivot).

	Distribution	Moyenne	Coeff. variation
Rendement 1989	Normale	1950 kg/ha	32 %
Hauteur des plants 1989	Normale	103 cm	14 %
Diamètre du pivot 1989	Normale	1,2 cm	21 %
Profondeur du pivot 1989	Normale	16 cm	19 %

Tableau VII-3. Variations spatiales de la récolte de 1989. Groupe de parcelles 1.

En première approche, ces variations spatiales peuvent être visualisées à l'aide des cartes présentées en figure VII-7. Celles-ci localisent chaque micro parcelle et indiquent, à l'aide de symboles distinctifs, les valeurs de rendement, de hauteur des plants, de diamètre du pivot et de profondeur du pivot qui ont été mesurées sur ces micro parcelles (pour plus de lisibilité, ces valeurs ont été regroupées en quatre classes isoamples d'individus, dont les limites représentent 25, 50, 75 et 100 % de la population).

Au vu de ces cartes, on peut observer, tout d'abord, que le rendement et la hauteur des plants s'organisent dans l'espace de manière assez similaire : pour ces variables, les valeurs les plus faibles semblent préférentiellement localisées dans la partie aval du groupe de parcelles (partie inférieure des parcelles 3 et 4). Pour le diamètre du pivot, cette localisation à l'aval des faibles valeurs se retrouve dans une moindre mesure, car la variabilité latérale (variabilité Est-Ouest) semble plus importante pour cette variable. Enfin, aucune organisation dans l'espace n'apparaît nettement pour la profondeur du pivot, dans la mesure où des valeurs faibles et des valeurs fortes se côtoient sur l'ensemble des parcelles.

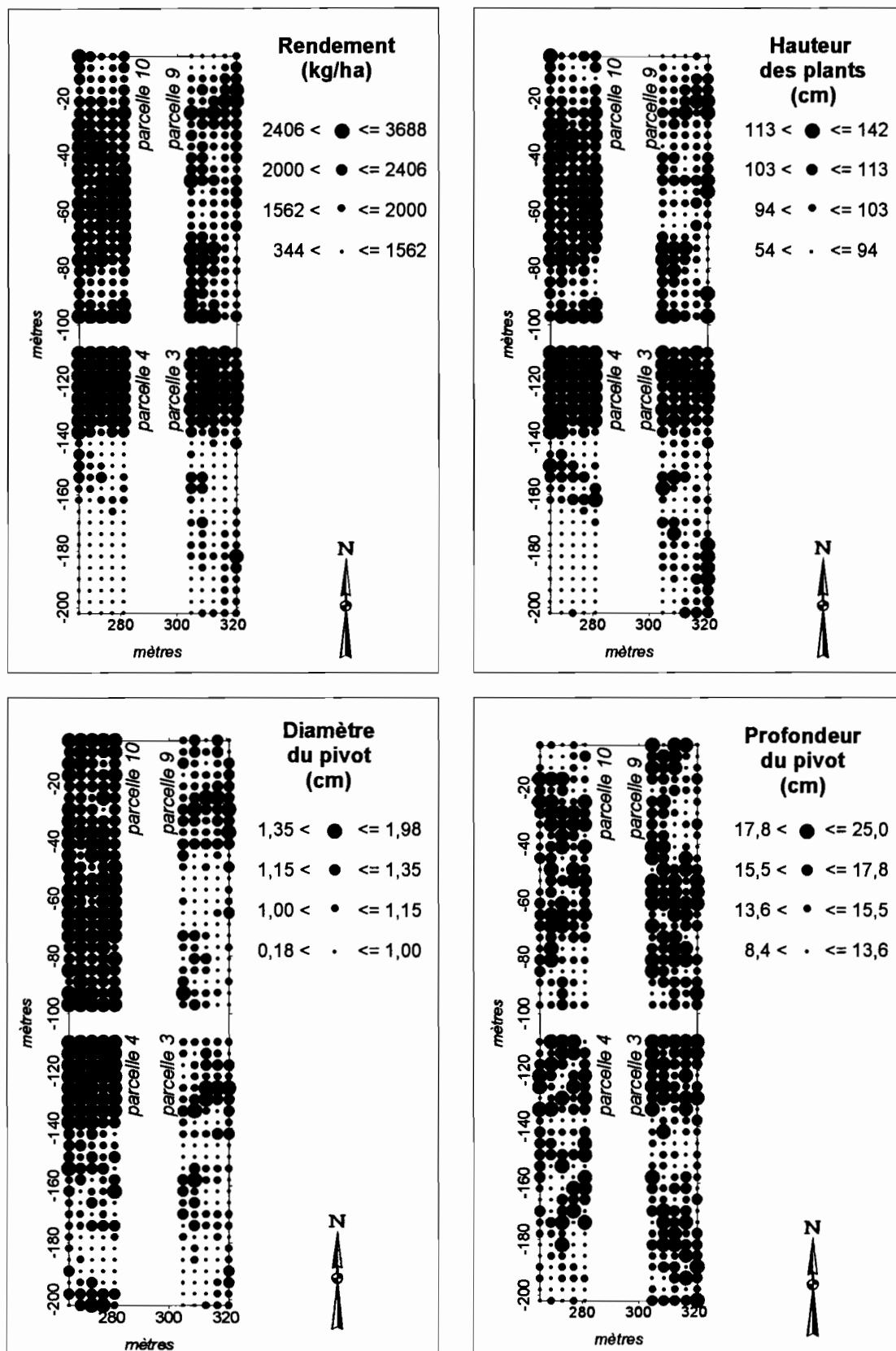


Figure VII-7. Cartes des variables agronomiques de la récolte de 1989 pour le groupe de parcelles 1. Codage en classes isoamples d'individus (quartiles).

Les variations spatiales de la récolte mises en évidence par ces cartes restent toutefois visuelles et globales, et il convient d'analyser plus finement ces variations.

Pour cela, nous avons utilisé un estimateur classique en géostatistique : le variogramme (MATHERON, 1971; PETITGAS et al., 1993).

Pour une variable Z , un variogramme se définit comme suit :

$$\text{variogramme} = \gamma(h) = \frac{\sum_i (Z(x_i) - Z(x_i+h))^2}{2n(u, h)}$$

avec

$Z(x_i)$ et $Z(x_i+h)$ = valeurs mesurées aux points x_i et x_i+h

h = distance

$n(u, h)$ = nombre de couples de points séparés de la distance h dans la direction u

De ce fait, un variogramme correspond à une mesure de la variance entre des points séparés d'une distance donnée, et selon une direction donnée.

Dans les paragraphes suivants, nous présentons l'analyse de divers variogrammes, ce qui nous a permis :

- 1°) de déterminer les variables agronomiques qui sont *régionalisées*, c'est à dire les variables qui ne sont pas distribuées aléatoirement dans l'espace;
- 2°) de déterminer l'orientation préférentielle de la variabilité spatiale des variables régionalisées.

7.2.1.B.1. Détermination des variables agronomiques régionalisées

L'analyse de variogrammes omnidirectionnels (c'est à dire de variogrammes qui prennent en compte des couples de points indépendamment de l'orientation dans l'espace) permet de déterminer les variables qui ne sont pas aléatoirement distribuées dans l'espace. En effet, pour ces variables, deux points proches se ressemblent plus que deux points éloignés. Dans ce cas, le variogramme omnidirectionnel croît en fonction de la distance séparant les points, et cette fonction peut être approchée par un modèle mathématique. En revanche, si une variable est distribuée aléatoirement dans l'espace, deux points proches ne se ressemblent pas plus que deux points éloignés. Dans ce cas, le variogramme omnidirectionnel ne croît pas avec la distance séparant les points, et le graphe de la fonction présente un aspect plat.

En conséquence, nous avons calculé des variogrammes omnidirectionnels pour chacune des variables rendement, hauteur des plants, diamètre au collet du pivot et profondeur du pivot. Par suite, nous avons cherché le modèle mathématique correspondant. Cette opération a été effectuée à l'aide du programme informatique Geo-Eas (E.P.A., 1988). Les résultats obtenus sont présentés en figures 8, 9, 10 et 11.

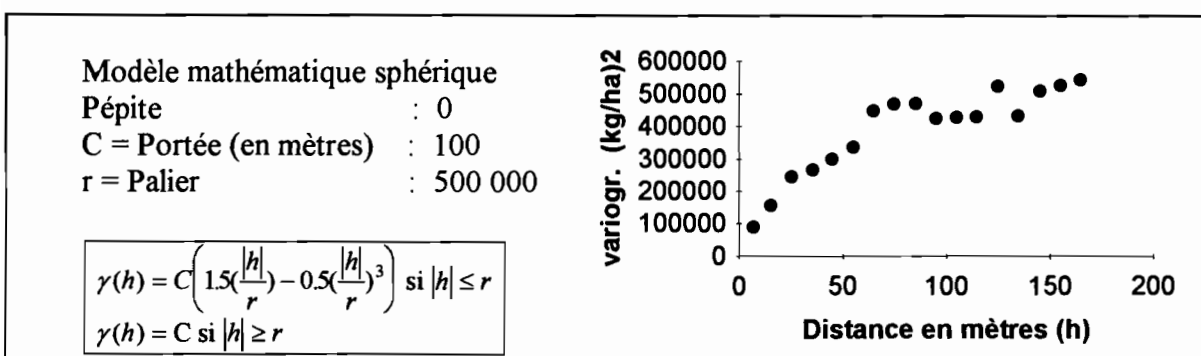


Figure VII-8. Variogramme omnidirectionnel du rendement (1989). Groupe de parcelles 1.

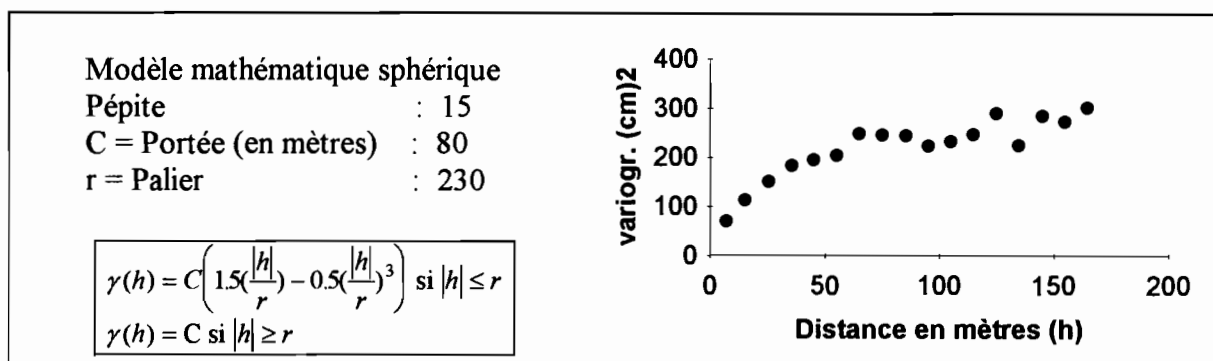


Figure VII-9. Variogramme omnidirectionnel de la hauteur des plants (1989). Groupe de parcelles 1.

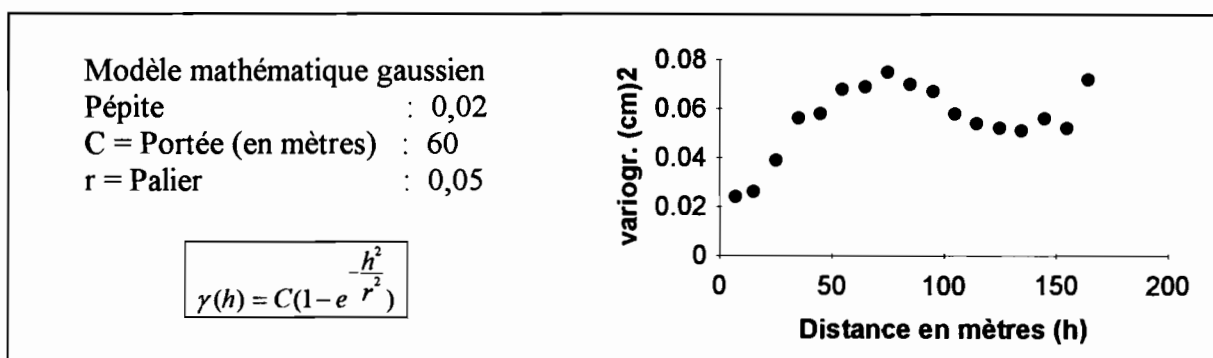


Figure VII-10. Variogramme omnidirectionnel du diamètre du pivot (1989). Groupe de parcelles 1.

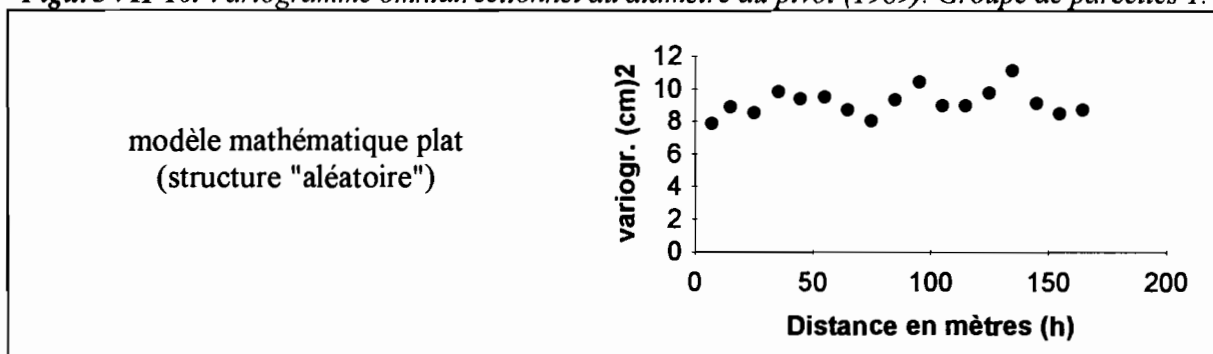


Figure VII-11. Variogramme omnidirectionnel de la profondeur du pivot (1989). Groupe de parcelles 1.

Ces résultats permettent de constater que les variables rendement, hauteur des plants et diamètre du pivot sont structurées de manière non aléatoire dans l'espace. En effet, pour ces variables, le variogramme omnidirectionnel croît selon la distance entre les points, et il est possible d'y associer un modèle mathématique (modèle sphérique ou gaussien, selon le cas).

En revanche, on constate que la profondeur du pivot présente une structure spatiale "aléatoire", puisque le variogramme omnidirectionnel ne croît pas avec la distance (modèle

"plat"). Comme cette structure est "aléatoire", elle n'est donc pas liée à la variabilité spatiale des conditions hydro-pédologiques qui est, pour sa part, ordonnée selon l'axe de la toposéquence (cette structure "aléatoire" pourrait être due, par exemple, à la variabilité génétique du cotonnier, ou encore à d'autres facteurs locaux indépendants de l'organisation hydro-pédoséquentielle). En conséquence, on peut écarter cette variable de la suite de notre analyse.

7.2.1.B.2. Orientation préférentielle de la variabilité spatiale des variables agronomiques régionalisées

Le calcul de variogrammes directionnels (qui ne prennent en compte que les couples de valeurs dans une direction donnée) permet d'analyser l'orientation dans l'espace de la variabilité spatiale. En conséquence, pour les trois variables régionalisées (rendement, hauteur des plants et diamètre du pivot), nous avons calculé des variogrammes selon deux directions privilégiées de l'espace : l'axe Nord-Sud, qui correspond à l'axe de la toposéquence, et l'axe transversal Est-Ouest. Les résultats de ce calcul sont présentés en figure VII-12.

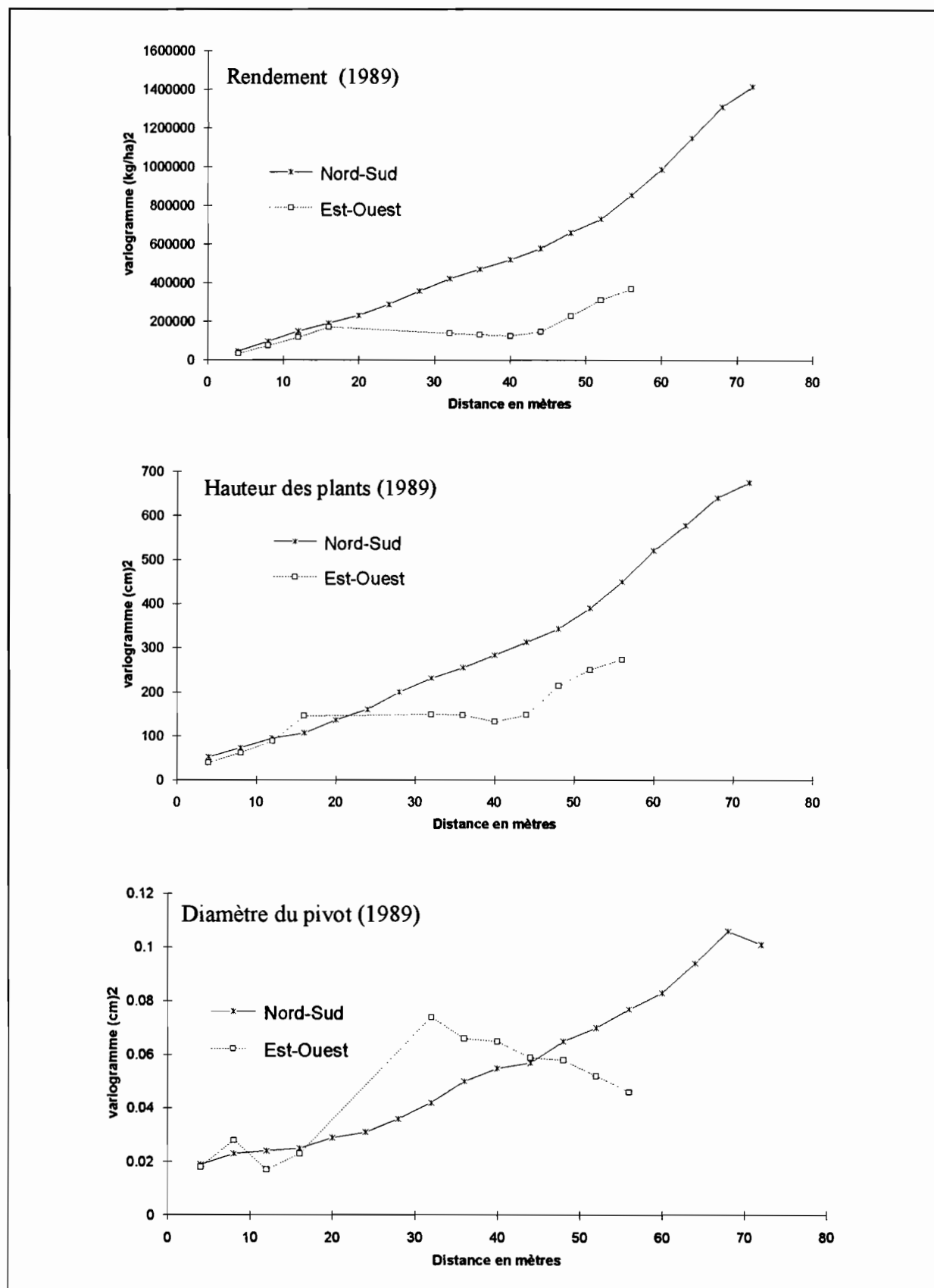


Figure VII-12. Variogrammes de la récolte selon l'axe de la toposéquence (Nord-Sud) et l'axe transversal (Est-Ouest). Groupe de parcelles 1.

On constate, sur cette figure, que les variogrammes du rendement et de la hauteur des plants sont systématiquement plus élevés dans la direction Nord-Sud que dans la direction Est-Ouest. Autrement dit, la variabilité spatiale de ces variables est systématiquement plus importante selon l'axe de la toposéquence que selon l'axe transversal.

En revanche, on observe que le variogramme du diamètre du pivot dans la direction Est-Ouest peut être plus élevé que celui dans la direction Nord-Sud. Ceci confirme que le diamètre du pivot varie de manière importante selon l'axe perpendiculaire à la toposéquence. .

7.2.1.C. Les variations spatiales de la récolte en fonction des domaines pédologiques

L'analyse des variogrammes a montré que la profondeur du pivot est aléatoirement distribuée dans l'espace, et que le diamètre du pivot varie de manière relativement importante selon l'axe perpendiculaire à la toposéquence. Il en résulte que l'influence des variations hydropédoséquentielles ne peut être prépondérante sur ces variables.

Par contre, cette même analyse a montré que le rendement et la hauteur des plants s'orientent préférentiellement selon l'axe de la toposéquence, ce qui suggère une influence prépondérante des variations hydropédoséquentielles sur ces deux variables. On peut donc analyser ces variations en fonction des différents domaines pédologiques.

Pour cela, nous avons distingué les micro parcelles situées dans le domaine ferrallitique et celles situées dans le domaine ferrugineux. Au sein de chacun de ces deux domaines, nous avons calculé les valeurs moyenne de hauteur des plants et de rendement en fonction de la

distance séparant chaque micro parcelle de l'amont du groupe de parcelle. Les résultats obtenus sont présentés en figure VII-13.

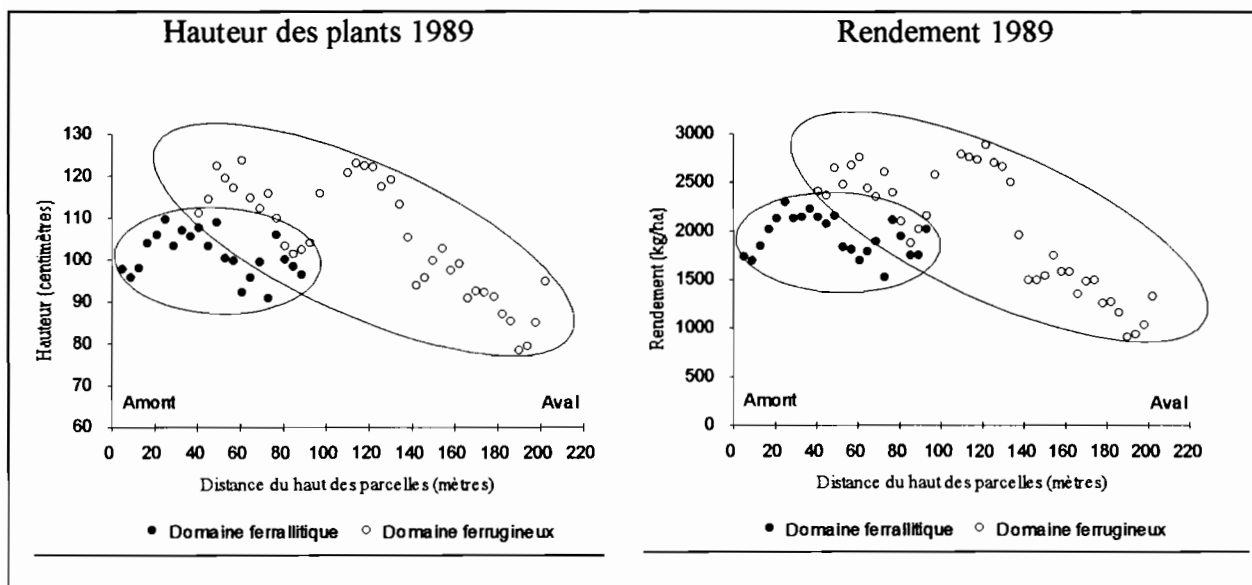


Figure VII-13. Variations de la hauteur des plants et du rendement le long de la toposéquence, selon les domaines pédologiques. Groupe de parcelles 1.

Cette figure permet tout d'abord de vérifier, conformément au constat effectué à partir des cartes de rendement et de hauteur des plants, que les variables rendement et hauteur des plants présentent des variations très similaires selon l'axe de la toposéquence (en fait, ces deux variables sont fortement corrélées linéairement puisque le coefficient R^2 est de 0,85 pour les 480 micro parcelles, et de 0,96 pour les 48 valeurs moyennes obtenues en fonction de la distance depuis l'amont du groupe de parcelles).

Mais cette figure révèle surtout l'existence d'un comportement très différent de la plante selon le domaine pédologique. Ainsi :

- pour le domaine ferrallitique, l'ellipse de dispersion des valeurs montre, pour le rendement comme pour la hauteur des plants, qu'il n'y a pas de tendance particulière à l'augmentation ou à la diminution de ces valeurs selon la distance depuis l'amont du groupe de parcelles. Dans ce domaine, le rendement et la hauteur des plants restent moyennement élevés (la hauteur moyenne des plants est de 102 cm, et le rendement moyen est de 1985 kg/ha). Ces variables varient relativement peu (le coefficient de variation est de 8,7 % pour la hauteur des plants, et de 15,9 % pour le rendement).

- par contre, dans le domaine ferrugineux, les ellipses de dispersion des valeurs sont inclinées, et montrent que le rendement et la hauteur des plants obéissent à un gradient amont-aval. En effet, les valeurs de ces variables sont d'abord particulièrement élevées dans la partie amont du domaine, où la hauteur des plants peut dépasser 120 cm, et le rendement peut atteindre plus de 2500 kg/ha. Puis ces valeurs diminuent graduellement pour atteindre, dans la partie aval du domaine, les valeurs les plus faibles observables sur le groupe de parcelles (hauteur des plants de l'ordre de 80 cm; rendement inférieur à 1000 kg/ha). Le rendement et la hauteur des plants varient donc davantage, dans ce domaine, que dans le domaine ferrallitique (le coefficient de variation est de 17,1 % pour la hauteur des plants, et de 37,5 % pour le rendement).

7.2.2. Résultats et interprétations à l'échelle intraparcellaire

L'analyse des variations spatiales de la récolte (cf. § 7.2.1) a montré l'existence d'une orientation préférentielle de certaines variables (rendement et hauteur des plants) selon l'axe de la toposéquence. Cette analyse révèle également l'existence d'un comportement de la plante qui varie selon le domaine pédologique.

Afin d'examiner les causes de ces variations, et ainsi que nous l'avons précisé en décrivant les méthodes mises en oeuvre au paragraphe 7.1.2.B, nous avons été conduits à analyser plus finement trois sites représentatifs au sein du groupe de parcelles n°1. Un de ces trois sites est localisé dans le domaine ferrallitique. Il correspond à un rendement et une hauteur des plants qui sont relativement élevés. Les deux autres sites sont localisés dans le domaine ferrugineux, en raison du gradient amont-aval des variables rendement et hauteur des plants dans ce domaine. Ainsi, le premier de ces deux sites, localisé à l'amont du domaine ferrugineux, correspond à un rendement et une hauteur des plants particulièrement élevés. En revanche, le second site, localisé à l'aval de ce domaine, correspond à un rendement et à une hauteur des plants particulièrement faibles.

Dans les paragraphes suivants, après avoir précisé les caractéristiques hydro-pédologiques de ces trois sites, nous comparerons la croissance du cotonnier selon le site, à partir des données obtenues au cours de la campagne de 1991. Enfin, la mise en relation de ces données nous indiquera quelles sont les contraintes hydro-pédologiques sur la croissance de la plante.

7.2.2.A. Les caractéristiques hydro-pédologiques des sites.

Le dispositif implanté sur chacun des trois sites (cf. § 7.1.2.B.) permet de fournir certaines précisions sur les caractéristiques pédologiques et hydrologiques de ces sites. Ces précisions complètent la description générale de l'hydro-pédoséquence effectuée dans la deuxième partie de ce mémoire.

7.2.2.A.1. Caractéristiques pédologiques

Les profils pédologiques correspondant à chaque site sont présentés en figure VII-14. Conformément à leur position sur la pédoséquence, ces profils se distinguent par la présence

ou l'absence d'un certain nombre d'horizons dont les caractéristiques ont été précisées au chapitre 4. Ainsi, le profil du site ferrallitique est caractérisé par la présence, à partir de 50 cm de profondeur, de l'horizon induré B sm (carapace ferrugineuse), suivi par l'horizon Bs plinthe et par l'altérite rouge-jaune-gris (horizon III SC s). En revanche, ces horizons ne s'observent pas dans les profils des sites ferrugineux, qui sont caractérisés par la présence de l'horizon E sableux beige et de l'horizon à nodules ferrugineux (horizon X cn). Par ailleurs, la présence de l'horizon E a sableux blanchi distingue le profil du site ferrugineux aval de celui du site ferrugineux amont.

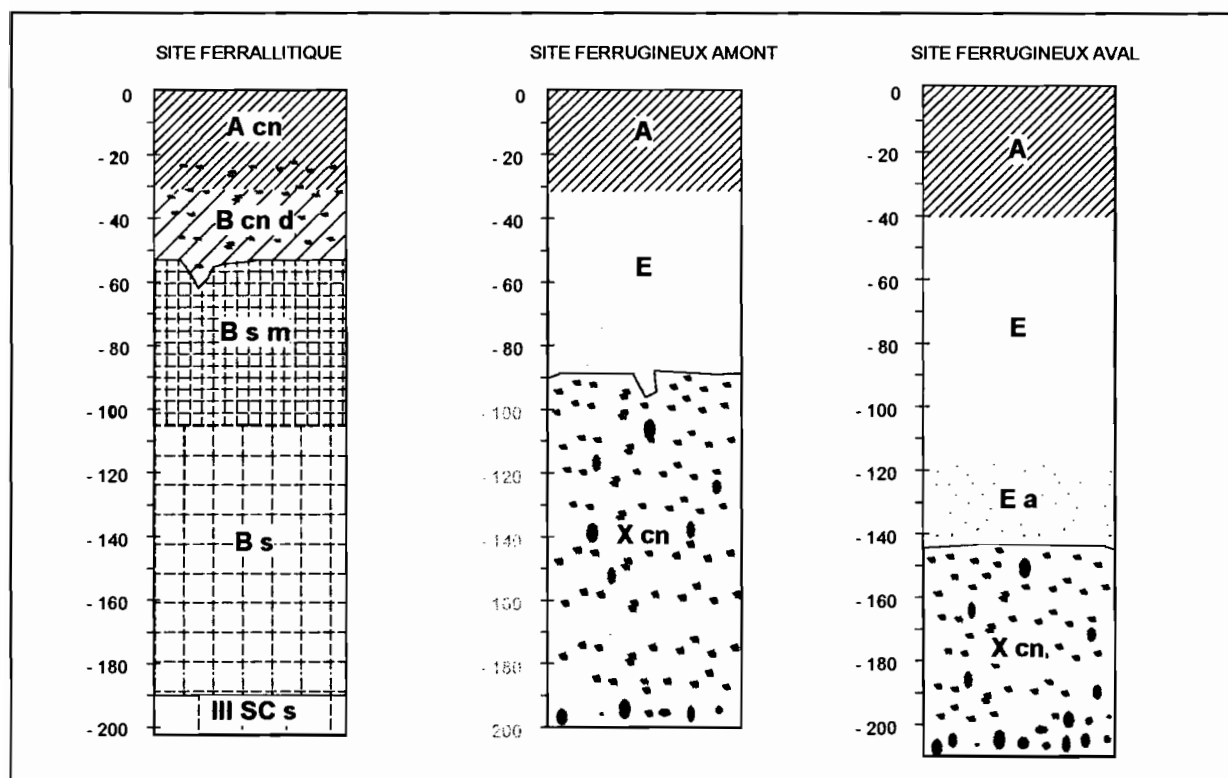


Figure VII-14. Profils pédologiques des 3 sites.

Pour les 3 sites, des profils de résistance mécanique à la pénétration ont été obtenus en saison sèche (janvier 1991), à l'aide d'un pénétromètre dynamique standard, et par application de la formule dite "des hollandais" (AUDRY et al., 1973). Ces profils sont présentés en figure VII-15. On constate que la résistance mécanique à la pénétration est relativement faible dans

la partie supérieure du sol (moins de 50 kg/cm²), quel que soit le site. Cependant, cette résistance augmente fortement à partir d'une certaine profondeur, qui varie selon le site :

- pour le site ferrallitique, une forte augmentation de la résistance à la pénétration se produit dès 50 centimètres de profondeur (jusqu'à plus de 250 kg/cm²). Ceci correspond, d'après le profil pédologique, à l'apparition de l'horizon B s m carapacé.

- pour le site ferrugineux amont, la résistance à la pénétration augmente fortement au delà de 80 centimètres de profondeur (plus de 100 kg/cm²), ce qui correspond à l'apparition de l'horizon X cn à nodules ferrugineux.

- enfin, pour le site ferrugineux aval, la résistance à la pénétration augmente fortement entre 120 et 140 centimètres de profondeur, et atteint plus de 100 kg/cm². Ceci correspond, comme pour le site ferrugineux amont, à l'apparition de l'horizon X cn à nodules ferrugineux.

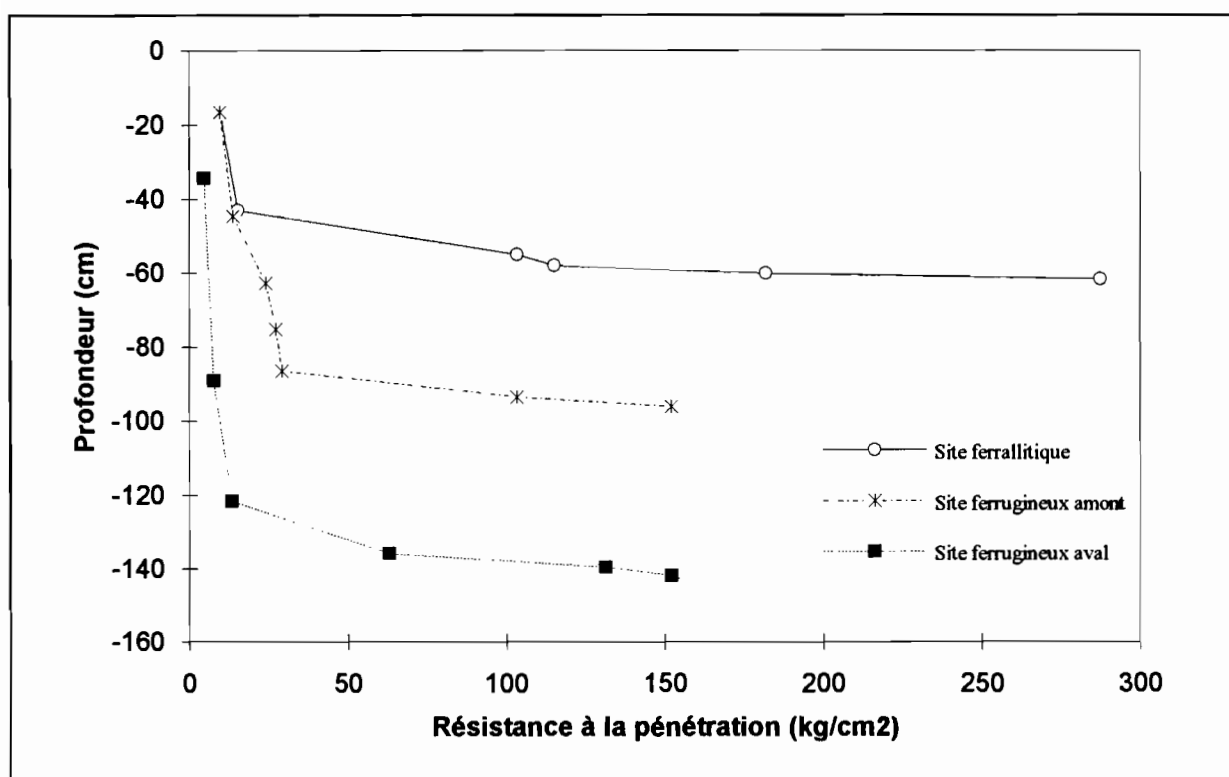


Figure VII-15. Profils de résistance mécanique à la pénétration des 3 sites.

L'analyse physico-chimique des trois profils est détaillée en annexe H. Il ressort de ces données qu'il n'existe pas de contraintes physico-chimique particulière pour la plante, dans le cas des profils du site ferrallitique et du site ferrugineux amont (AUDEBERT, 1993). En revanche, le profil du site ferrugineux aval se distingue par deux points qui peuvent, à priori, constituer des contraintes pour la plante :

- d'une part, le complexe adsorbant présente une très faible capacité d'échange sur l'ensemble du profil (moins de 1 meq/100 g contre 2 à 3 meq/100 g dans les autres sites), ce qui traduit de faibles possibilités d'alimentation minérale pour la plante;

- d'autre part, il existe une concentration relativement importante d'aluminium soluble dans l'horizon A (plus de 115 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$, contre moins de 40 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ dans les autres sites). Or, en conditions de culture, le pH de ce profil peut descendre jusqu'à 4,3 (AUDEBERT, 1993). Dans ces conditions, les concentrations d'aluminium sous forme Al^{3+} deviennent supérieures à 5 $\mu\text{mole}/\text{l}$, ce qui entraîne un risque non négligeable de toxicité aluminique.

7.2.2.A.2. Caractéristiques hydrologiques

La figure VII-16 permet de comparer, selon les sites, l'évolution du toit des nappes phréatiques dans les deux premiers mètres du sol, durant la campagne 1991.

On constate que la remontée maximale des nappes se produit simultanément sur les trois sites, ce qui est conforme aux observations effectuées à l'échelle du versant (cf. chapitre 5). Cette remontée maximale s'effectue au coeur de la saison des pluies, vers le 250^{ème} jour calendaire (mi-septembre). Toutefois, pour ces deux premiers mètres du sol, le site ferrugineux aval se distingue notablement des deux autres sites. En effet, la nappe perchée y remonte jusqu'en surface, alors que la cote piézométrique ne dépasse pas -120 cm pour les deux autres sites. De plus, contrairement à ce site, l'engorgement du site ferrallitique n'est que de très brève durée, ce qui concorde avec l'existence d'une nappe ~~perchée~~ ^{sporadique} (cf. chapitre 5).

Enfin, l'engorgement est également de brève durée dans le site ferrugineux amont, car on n'y observe que la crête de la nappe perchée du domaine ferrugineux.

Ainsi, en ce qui concerne l'évolution du toit des nappes phréatiques, les sites ferrallitique et ferrugineux amont apparaissent similaires sur les deux premiers mètres du sol (bien que les nappes y soient de nature différente). En revanche, ces sites diffèrent nettement du site ferrugineux aval. Ce constat se retrouve à travers les profils de fréquence annuelle d'engorgement présentés en figure VII-17 : ces profils apparaissent très similaires pour les sites ferrallitiques et ferrugineux amont (fréquence annuelle d'engorgement voisine de 0 sur l'ensemble du profil), alors que le profil du site ferrugineux aval se distingue des précédents par des fréquences nettement supérieures.

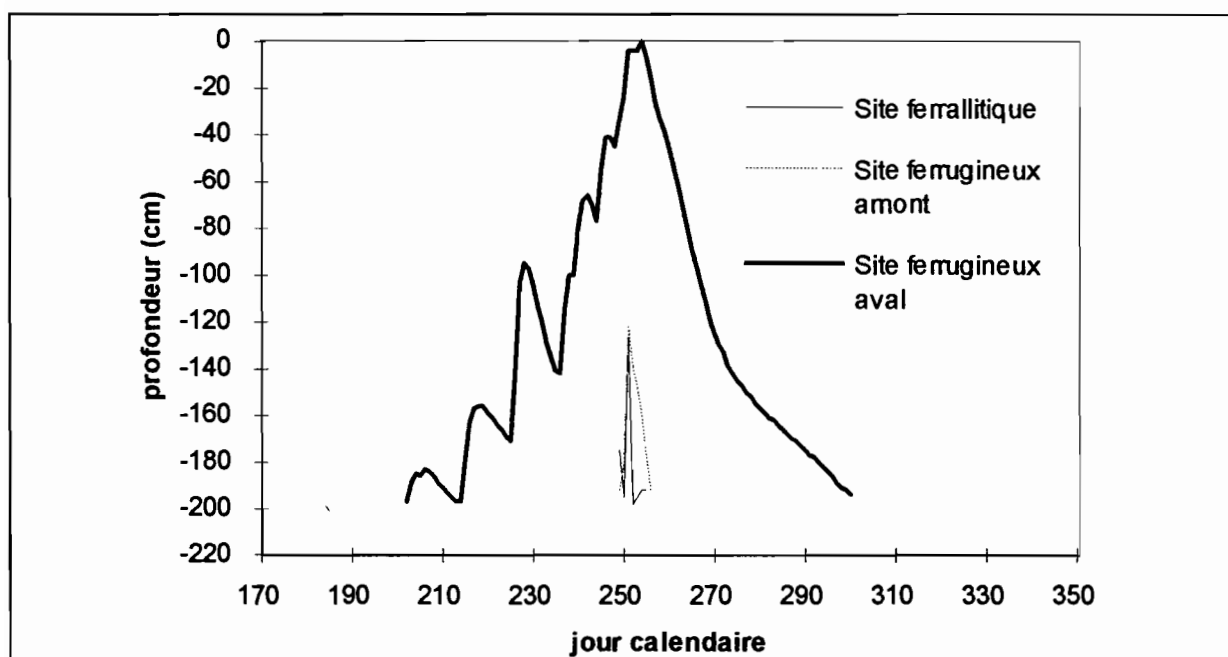


Figure VII-16. Evolution du toit de la nappe selon le site. Campagne 1991.

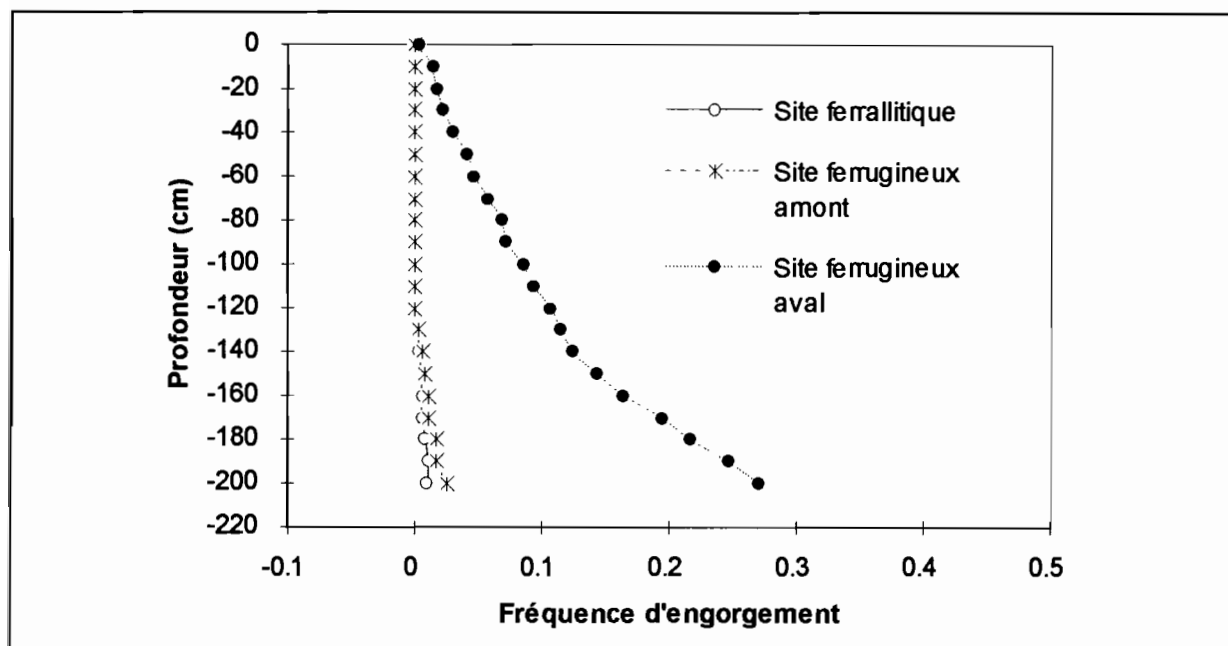


Figure VII-17. Profils de fréquence annuelle d'engorgement selon le site. Année 1991.

7.2.2.B. La croissance du cotonnier selon le site

Les méthodes mises en oeuvre à l'échelle intraparcellaire (cf. § 7.1.2.B.) nous permettent de comparer la croissance du cotonnier selon le site. Nous comparerons, d'une part, l'évolution du système aérien de cette plante, et, d'autre part, celle de son système racinaire.

7.2.2.B.1. Evolution du système aérien

Certaines caractéristiques du système aérien évoluent différemment selon le site.

La première de ces caractéristiques est la hauteur de la tige principale, dont l'évolution au cours de la campagne de culture de 1991 est présentée en figure VII-18. Globalement, l'allure sigmoïdale des courbes de croissance de la tige apparaît typique du développement de cette plante en condition de culture annuelle (AUDEBERT, 1993). Il y a, en effet,

augmentation de la vitesse de croissance au stade de préfloraison, puis cessation de la croissance en fin de floraison (période dite du "cut out").

D'autre part, si l'on compare les différents sites entre eux, on constate peu de différences entre la croissance de la tige sur le site ferrallitique et celle sur le site ferrugineux amont. Pour ces deux sites, la croissance de cette tige principale reste élevée (environ 2,5 cm/jour en période de croissance maximale). La hauteur à la récolte dépasse 125 centimètres, avec toutefois des hauteurs légèrement supérieures pour le site ferrugineux amont (environ 150 centimètres). En revanche, pour le site ferrugineux aval, la croissance de la tige principale apparaît nettement plus faible à tous les stades du cycle de culture (c'est à dire, dès le stade plantule, et jusqu'au "cut out"). Elle n'atteint que 1 cm/jour en période de croissance maximale. Pour ce site, la hauteur à la récolte ne dépasse guère 50 centimètres.

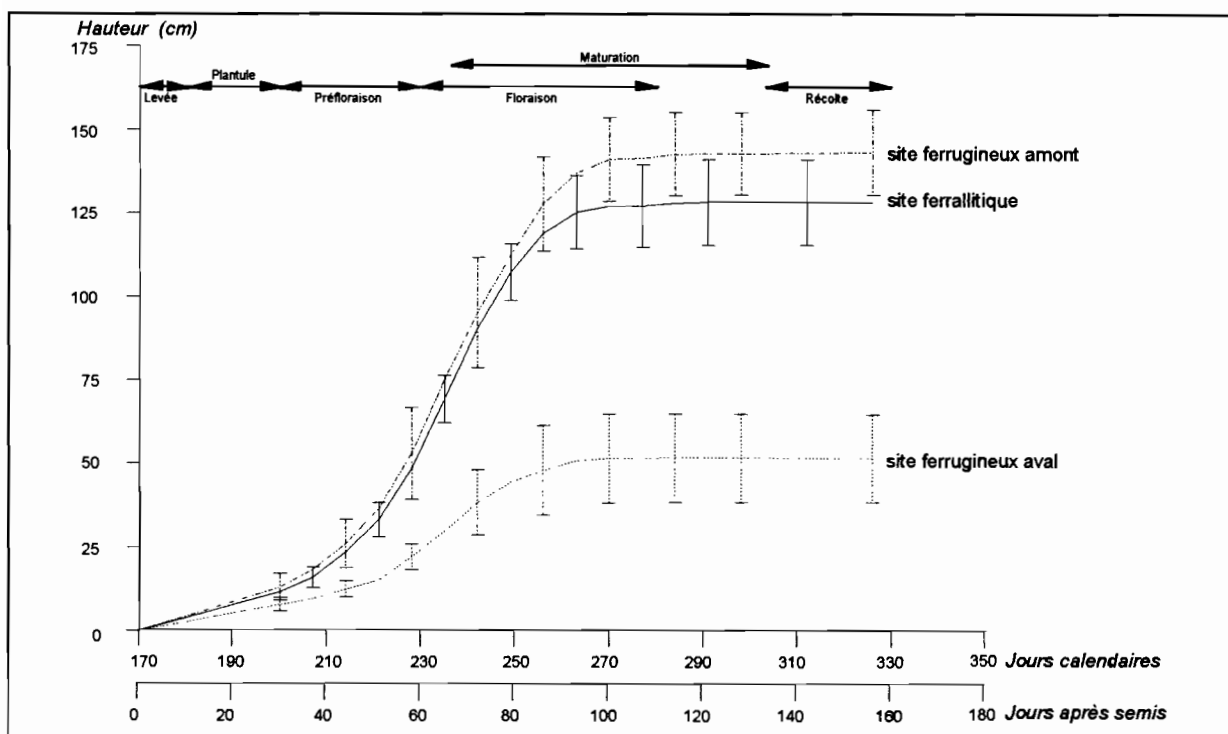


Figure VII-18. Evolution de la hauteur de la tige principale selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).

Une autre caractéristique qui distingue les sites est l'indice foliaire (L.A.I), dont l'évolution est présentée en figure VII-19. Globalement, et tous sites confondus, l'allure

générale des courbes d'indice foliaire est conforme aux données bibliographiques (AUDEBERT, 1993) : l'indice foliaire augmente jusqu'au stade de la floraison, puis il diminue en raison d'une chute générale des feuilles lors de l'arrêt de la croissance du plant de cotonnier.

Si l'on compare l'évolution de cet indice selon le site, on constate qu'il existe, comme pour la hauteur des plants, une similarité d'évolution pour le site ferrallitique et pour le site ferrugineux amont (avec des valeurs légèrement plus élevées pour le site ferrugineux amont). Dans ces deux situations, le L.A.I dépasse la valeur de 4 en période de floraison. Cependant, le L.A.I du site ferrugineux aval reste nettement inférieur à celui de ces deux sites, et ne dépasse pas 1.5.

D'autre part, pour les trois sites, une chute des feuilles se produit dès le 250^{ème} jour calendaire (chute de plus de la moitié des feuilles), ce qui se traduit par une diminution importante du L.A.I. Cette diminution du L.A.I. est irréversible pour le site ferrugineux aval, alors qu'elle est suivie d'une remontée du L.A.I pour les deux autres sites. Il semble donc que cette période corresponde à un incident majeur, qui n'a pu être surmonté que dans les sites ferrallitiques et ferrugineux amont.

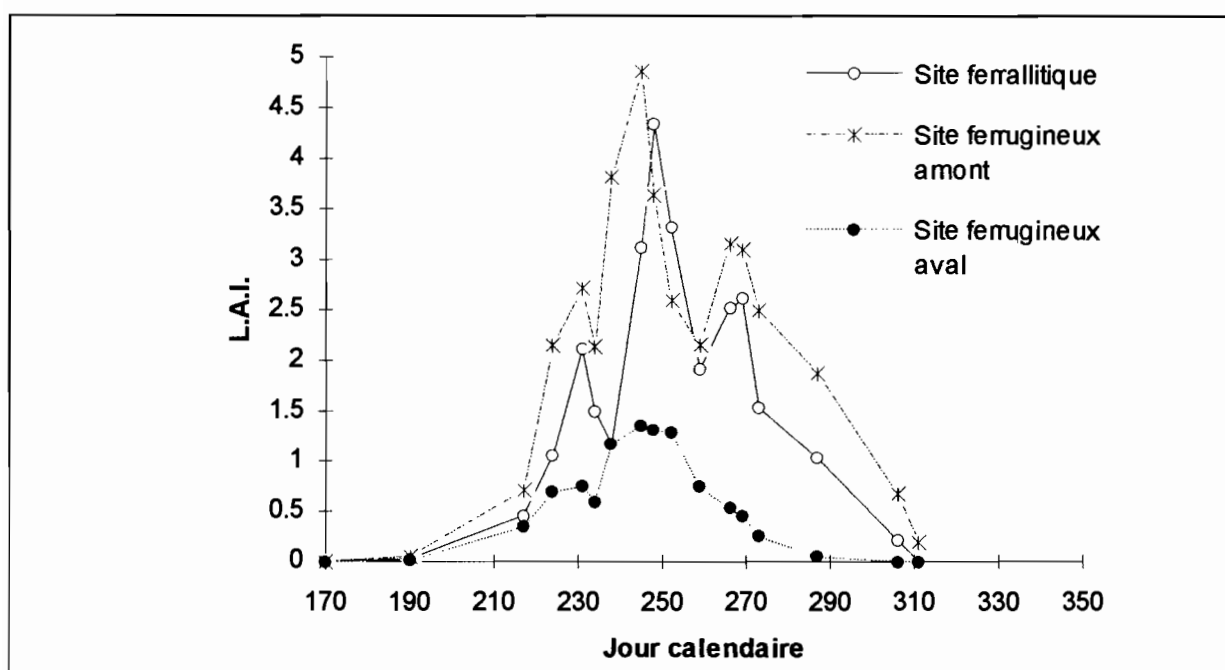


Figure VII-19. Evolution de l'indice foliaire (L.A.I) selon le site. campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).

L'évolution de la production de matière sèche au cours du cycle de culture diffère également selon le site, ainsi que le présente la figure VII-20. Cette évolution peut être mise en parallèle avec l'évolution de l'indice foliaire. En effet, le même type de comparaison peut être fait entre les trois sites :

- d'une part, on constate une production élevée de matière sèche et une similarité d'évolution entre les sites ferrallitique et ferrugineux amont (avec une production légèrement plus élevée pour le site ferrugineux amont). Ceci diffère nettement du cas du site ferrugineux aval, où la production de matière sèche reste faible;

- d'autre part, il apparaît, pour tous les sites, une diminution de la production de matière sèche vers le 250^{ème} jour calendaire, ce qui traduit l'existence d'un incident majeur. Cette diminution est suivie d'une remontée de la production pour les sites ferrallitique et ferrugineux amont, ce qui indique que cet incident a pu être surmonté pour ces deux sites, contrairement au cas du site ferrugineux aval.

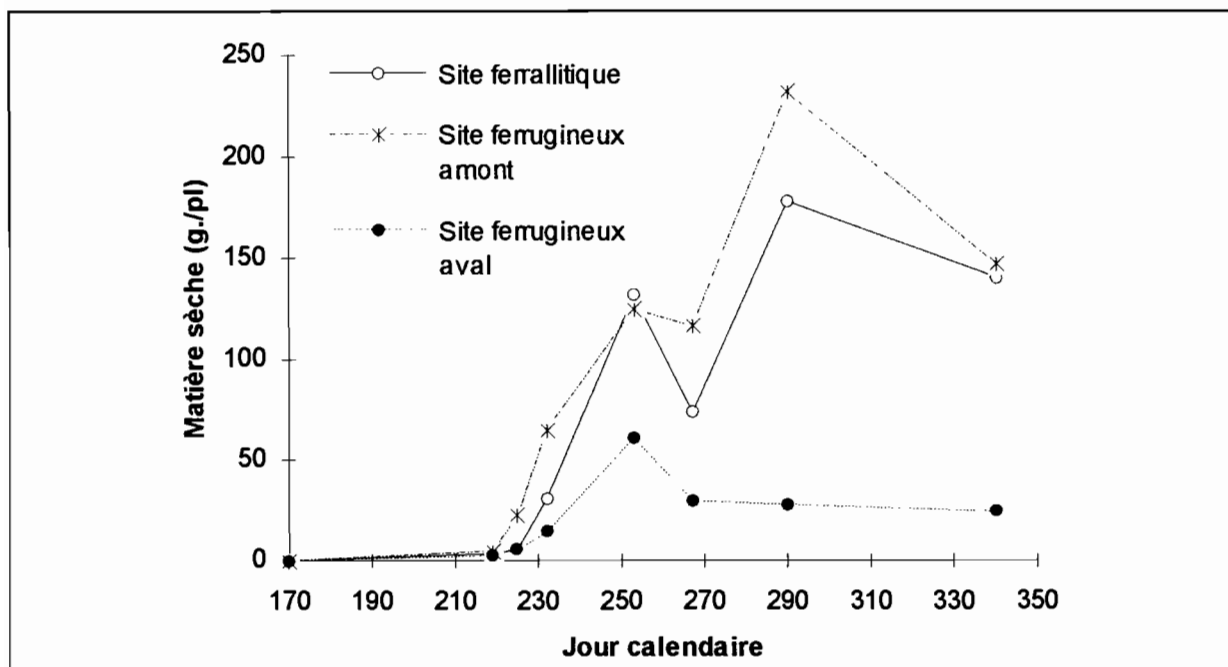


Figure VII-20. Production de matière sèche selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).

Enfin, une dernière caractéristique qui distingue les sites est l'aspect des tiges et des pétioles. En effet, dans la période qui suit le 250^{ème} jour calendaire, les tiges et les pétioles acquièrent une coloration brun-rouge sur le site ferrugineux aval. Elles restent, par contre, de coloration verte sur les sites ferrallitique et ferrugineux amont.

7.2.2.B.2. Evolution du système racinaire

De même que l'évolution du système aérien diffère selon le site, des différences notables peuvent s'observer au niveau du système racinaire.

Ces différences se manifestent d'abord par l'aspect général des racines. Ainsi :

- dans le site ferrallitique, la croissance du système racinaire est manifestement bloquée par l'horizon B s m carapacé. Au niveau de cet horizon, le pivot se transforme : il se coude ou bien dégénère et plusieurs racines secondaires prennent le relais. De nombreuses racines se développent alors à la surface de cet horizon, qui présentent un aspect très tourmenté en raison du grand nombre de gravillons présents dans les horizons A cn et B cn d. Ces racines secondaires portent de nombreux poils absorbants. Leur couleur est ocre vif.

- dans le site ferrugineux amont, le développement du système racinaire n'est pas stoppé en profondeur, et peut atteindre parfois jusqu'à 150 centimètres (La densité des racines secondaires est toutefois plus importante dans la couche supérieure du sol). Le pivot est rarement coudé. Les racines portent un grand nombre de radicelles et de poils absorbants. Comme dans le site ferrallitique, la couleur des racines lignifiées est ocre vif.

- dans le site ferrugineux aval, les racines ne sont pas stoppées en profondeur. Comme dans le site ferrugineux amont, elles peuvent descendre, dans certains cas, jusqu'à plus de 150 centimètres. Le pivot est rarement coudé, et les racines sont très linéaires. Toutefois, ces racines ne portent que peu de radicelles et de poils absorbants. Leur couleur est moins vive

que dans les autres sites (ocre grisâtre). Enfin, on notera que de nombreuses racines se nécrosent (couleur foncée, décollement de l'endoderme) au cours du cycle de culture.

Ces différences se manifestent également dans l'évolution du front racinaire actif, ainsi que le montre la figure VII-21. En effet, la profondeur de ce front racinaire reste limitée à 60 cm dans le site ferrallitique, alors qu'elle continue d'augmenter dans les deux sites ferrugineux. Pour ces sites, l'évolution du front racinaire est d'abord similaire. Cependant, le site ferrugineux aval se distingue par une remontée du front racinaire actif vers le 250^{ème} jour calendaire, ce qui correspond à la nécrose de racines en profondeur.

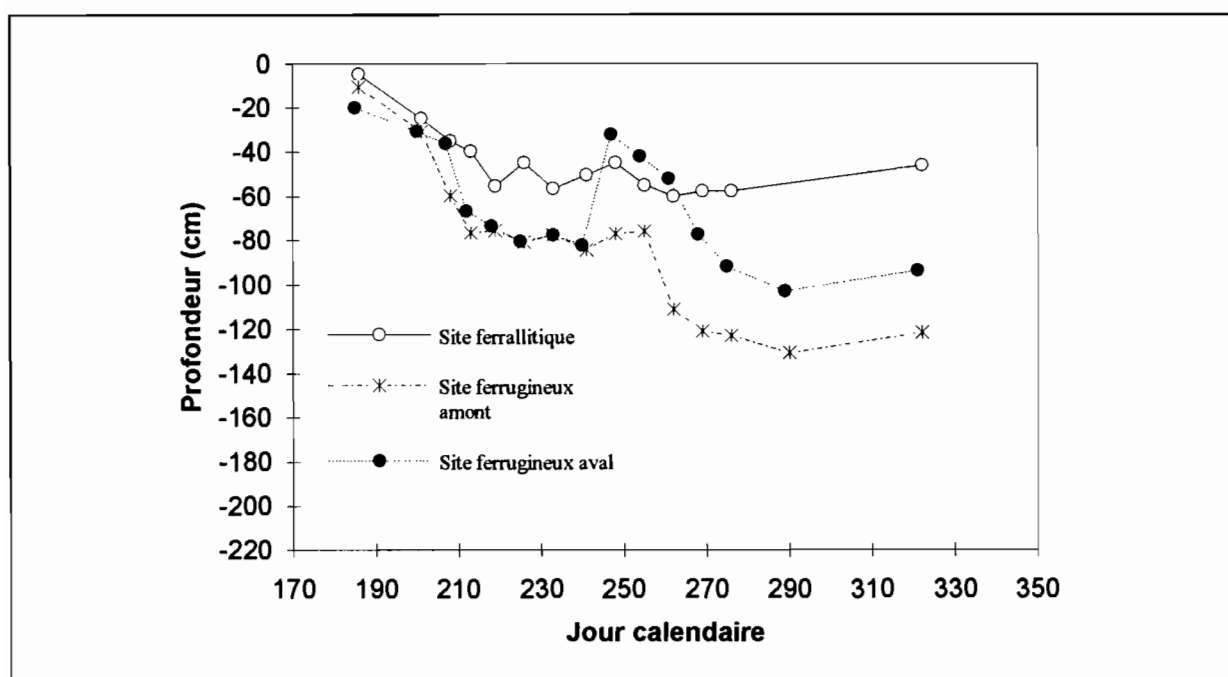


Figure VII-21. Evolution du front racinaire actif selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).

7.2.2.C. Les contraintes hydro-pédologiques selon le site

En mettant en relation les données hydro-pédologiques et agrophysiologiques présentées dans les paragraphes précédents, il est possible de déterminer, selon le site, les différentes contraintes hydro-pédologiques sur l'évolution des systèmes aériens et racinaires du cotonnier.

7.2.2.C.1. Les contraintes dans le site ferrallitique

Dans le site ferrallitique, l'évolution du système aérien ne révèle pas de contraintes hydro-pédologiques particulières. En effet, on constate une bonne évolution de la hauteur des plants, de l'indice foliaire et de la production de matière sèche tout au long du cycle de culture. Ceci traduit une bonne alimentation de la plante, et de ce fait, l'absence de contraintes physico-chimiques. Si un incident se produit aux environs du 250^{ème} jour calendaire (baisse du L.A.I et de la production de matière sèche), celui-ci n'est que temporaire puisqu'il y a reprise de l'évolution normale de la plante au cours de la période suivante. Cet incident est à imputer à un orage violent qui s'est produit au cours de cette période, et non à une contrainte hydro-pédologique. De plus, l'aspect des tiges et des pétioles (couleur verte) indique une oxygénation correcte de la plante.

En revanche, une contrainte apparaît très nettement sur le système racinaire si l'on examine l'évolution du front racinaire actif par rapport à la nappe et la barrière mécanique constituée par l'horizon B s m carapacé (cf. figure VII-22). En effet, le front racinaire est bloqué à partir de 60 centimètres de profondeur par la barrière mécanique constituée par l'horizon B s m carapacé. Toutefois, cette barrière mécanique intervient bien au dessus de la cote piézométrique, de sorte que la nappe ne risque jamais d'asphyxier les racines.

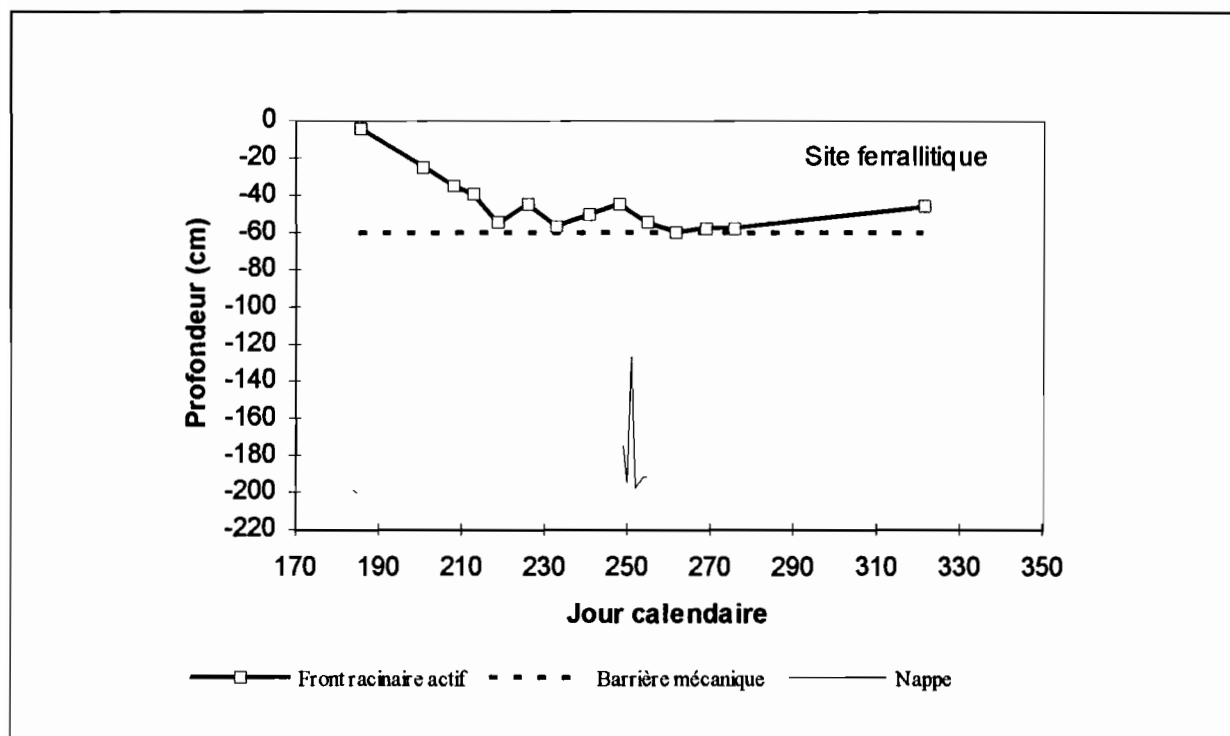


Figure VII-22. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydro-pédologiques sur le site ferrallitique.

7.2.2.C.2. Les contraintes dans le site ferrugineux amont

De même que pour le site ferrallitique, aucune contrainte hydro-pédologique n'apparaît sur l'évolution du système aérien dans le site ferrugineux amont. La croissance de la plante est excellente tout au long du cycle de culture, ce qui traduit l'absence de contraintes physico-chimiques. Comme pour le site ferrallitique, la baisse du L.A.I et de la production de matière sèche enregistrée aux environs du 250^{ème} jour calendaire n'est que temporaire, et serait due à un orage violent enregistré durant cette période. La couleur verte des tiges et des pétioles indique également une bonne oxygénation de la plante.

Toutefois, si l'on relie l'évolution du front racinaire avec la nappe et la barrière mécanique constituée par l'horizon X_{cn} (cf. figure VII-23), on constate l'existence d'une contrainte mécanique temporaire. En effet, l'évolution du front racinaire actif apparaît ralentie, entre le 210^{ème} et le 260^{ème} jour calendaire. En revanche, et comme dans le site ferrallitique, ce

front racinaire se situe toujours au dessus de la cote piézométrique, de sorte que la nappe ne peut asphyxier les racines.

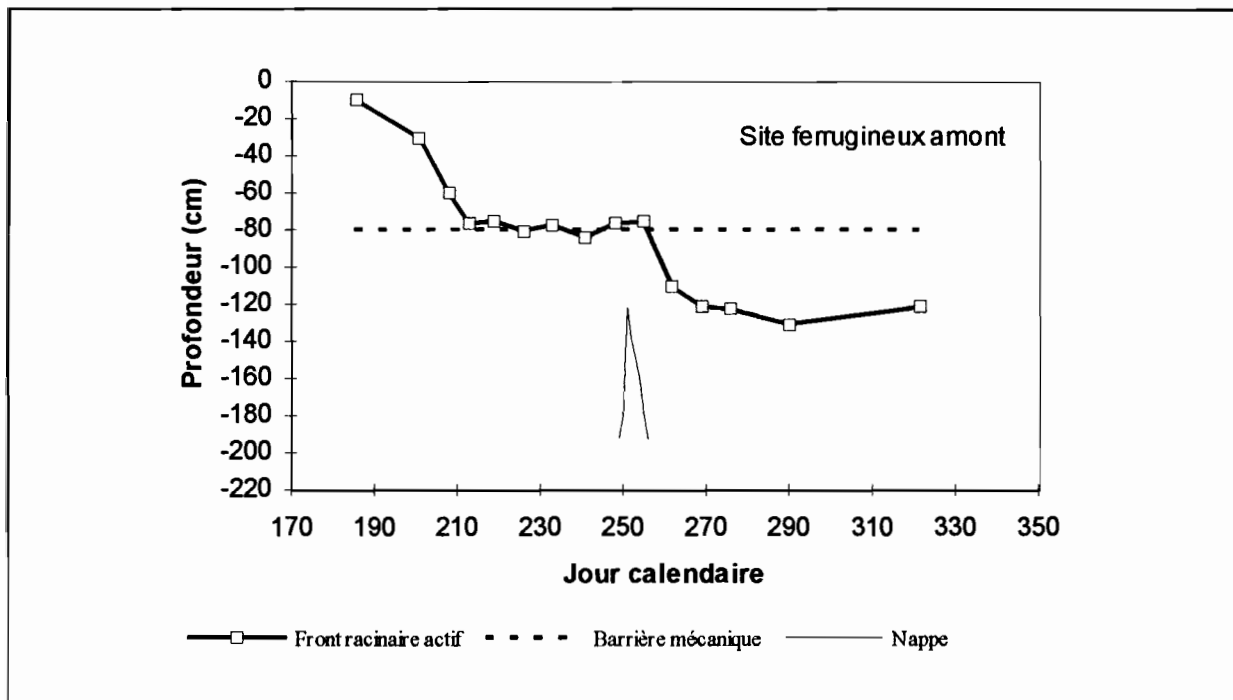


Figure VII-23. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydro-pédologiques sur le site ferrugineux amont.

7.2.2.C.3. Les contraintes dans le site ferrugineux aval

Par rapport aux sites ferrallitique et ferrugineux amont, l'évolution du système aérien du cotonnier (hauteur des plants, indice foliaire, production de matière sèche) apparaît ici ralentie à tous les stades du cycle de culture. Il existe donc, sur ce site, des contraintes permanentes, qui sont certainement liées aux caractéristiques physico-chimiques de ce site (faible capacité d'échange, risque de toxicité aluminique).

D'autre part, l'asphyxie de la plante se manifeste nettement sur le système aérien dans la période suivant le 250^{ème} jour calendaire. En effet, il y a apparition d'un aspect brun-rouge

des tiges et des pétioles, ce qui est caractéristique d'un excès d'eau (MOUSTAFA, 1959). D'autre part, la sénescence et l'abscission des feuilles, qui conduisent à la baisse irréversible du L.A.I au delà du 250^{ème} jour calendaire, peut s'expliquer également par un excès d'eau (JORDAN, 1986; CHRISTIANSEN, 1986; MAUNEY, 1986).

Enfin, si l'on examine l'évolution du front racinaire par rapport à la nappe et la barrière mécanique constituée par l'horizon X cn (cf. figure VII-24), on constate très nettement l'existence d'une contrainte hydrique par excès d'eau. En effet, la remontée du front racinaire actif (due à la nécrose des racines profondes) se produit simultanément avec la remontée de la nappe. En revanche, la barrière mécanique constituée par l'horizon X cn se situe bien en dessous du front racinaire.

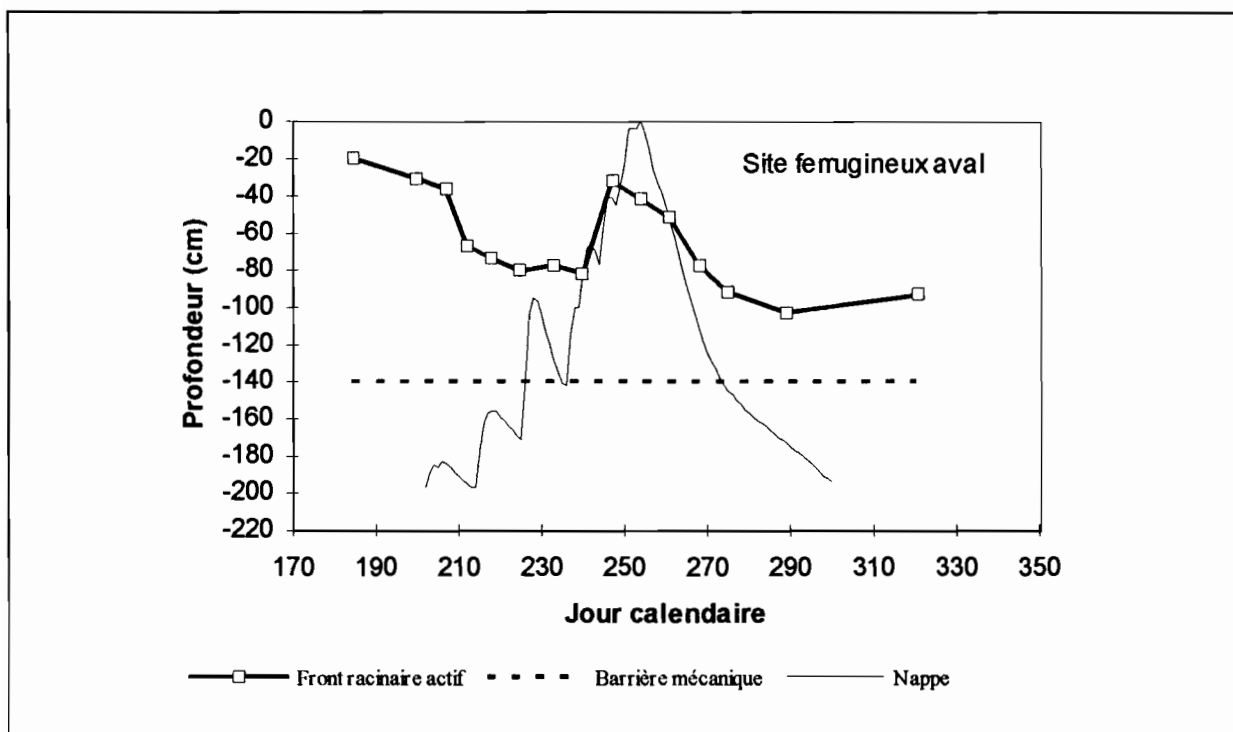


Figure VII-24. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydro-pédologiques sur le site ferrugineux aval.

7.3. Conclusion du chapitre 7

Cette étude montre que le comportement du cotonnier varie fortement le long du versant. Ce comportement résulte de différences dans le mode de croissance de la plante, qui peuvent s'expliquer par une **séquence de contraintes hydro-pédologiques**. Cette séquence est déterminée par l'hydro-pédoséquence. Ainsi :

- dans le domaine ferrallitique, il existe une contrainte mécanique qui bloque l'évolution du front racinaire, et qui est constituée par l'horizon B s m carapacé. Cette contrainte n'empêche toutefois pas une bonne évolution du système aérien, de sorte que le niveau de rendement reste élevé sur cette partie du versant.

- dans la partie amont du domaine ferrugineux, il existe une contrainte mécanique qui ralentit l'évolution du front racinaire, et qui est constituée par l'horizon X cn à nodules ferrugineux. Comme dans le domaine ferrallitique, cette contrainte n'empêche pas la bonne évolution du système aérien. Le niveau de rendement est finalement excellent sur cette partie du versant.

- dans la partie aval du domaine ferrugineux, il existe deux contraintes hydro-pédologiques qui ralentissent fortement la croissance de la plante, et qui conduisent à un niveau de rendement beaucoup plus faible. Il s'agit, d'une part, d'une faible fertilité physico-chimique, qui agit durant tout le cycle de culture sur la croissance de la plante. D'autre part, la plante subit une contrainte hydrique (excès d'eau) qui est due à la remontée de la nappe perchée en saison des pluies. Cette contrainte provoque l'asphyxie de la plante et détruit une partie de ses racines.

Cette séquence de contraintes hydro-pédologiques conduit à proposer, afin d'optimiser la production de cotonnier, une mise en oeuvre d'itinéraires techniques différents en fonction de la position sur le versant :

- dans le domaine ferrallitique, une amélioration de la production de cotonnier pourrait être apportée par un accroissement du volume de sol exploitable par les racines. Dans ce but, on devrait envisager d'augmenter la hauteur des billons;

- dans la partie amont du domaine ferrugineux, les contraintes hydro-pédologiques sont finalement très faibles, de sorte que les techniques culturales actuelles apparaissent satisfaisantes;

- enfin, l'amélioration de la production dans la partie aval du domaine ferrugineux passe par plusieurs modifications des techniques culturales. Il conviendrait, d'une part, de corriger les caractéristiques physico-chimiques du sol, en diminuant les risques de toxicité aluminique et en augmentant la capacité d'échange cationique. Dans ce but, un amendement et un apport de matière organique seraient nécessaires. D'autre part, il s'avère nécessaire de réduire l'engorgement par la nappe perchée. Le drainage du sol serait envisageable, mais il supposerait la mise en oeuvre d'aménagements importants. Il serait donc plus économique d'envisager un billonnage de grande dimension, qui permettrait d'augmenter le volume de sol situé au dessus de la nappe.

CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE

L'exemple du cotonnier montre que le comportement des plantes cultivées peut varier fortement le long du versant. Ces variations peuvent s'expliquer par une séquence de contraintes hydro-pédologiques qui est déterminée par l'hydro-pédoséquence, d'où l'intérêt agronomique d'une bonne caractérisation de cette dernière. Pour le cotonnier, cette séquence de contraintes est d'abord mécanique (domaine ferrallitique et partie amont du domaine ferrugineux), puis physico-chimique et hydrique (partie aval du domaine ferrugineux). Pour cette plante, une telle séquence de contraintes a conduit à proposer la mise en oeuvre d'itinéraires techniques différents en fonction de la position sur le versant.

En ce qui concerne cette plante, il serait intéressant, à l'avenir, de créer une zone d'essais sur l'ensemble du versant. En effet, la disposition du parcellaire d'essais n'a pas permis d'analyser le comportement de la plante dans la partie amont du domaine ferrallitique (où disparaissent les horizons B indurés), ni sur l'ensemble du domaine hydromorphe. S'il est probable que le cotonnier rencontre une forte contrainte par excès d'eau dans le domaine hydromorphe, les conditions dans lesquelles cette plante se développe dans la partie amont du domaine ferrallitique restent inconnues. De plus, il serait préférable de mener cet essai à partir de parcelles nouvellement mises en culture, afin d'éliminer la variabilité des antécédents culturels.

Plus généralement, il reste à étudier le comportement d'autres plantes cultivées le long de ce versant (et notamment celui des cultures vivrières telles que le maïs, le manioc, et le mil). Pour une telle étude, on pourrait conserver le principe d'un traitement agronomique homogène, tout en éliminant les facteurs non édaphiques pouvant faire varier le comportement des plantes.

Cette étude plus générale justifierait la mise en oeuvre d'un programme de recherche-développement spécialement consacré à ce sujet.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Cette étude comportait deux thèmes complémentaires :

- **un inventaire des ressources naturelles en terre et en eau**, dont l'objectif était, à partir d'un versant représentatif, d'étudier les composantes hydro-pédologiques d'un paysage de référence qui couvre plus de 500.000 km² en Afrique de l'Ouest.

- **une première évaluation de l'aptitude agricole de ces ressources**, qui consistait à établir des relations entre les composantes hydro-pédologiques de ce versant représentatif et le comportement d'une plante cultivée.

Nous pouvons à présent en tirer quelques conclusions, et quelques perspectives.

1. L'inventaire des ressources naturelles en terre et en eau

La première conclusion de cette partie de l'étude est qu'elle a permis de préciser le modèle pédologique du paysage de référence.

On savait, à partir des études antérieures, que la couverture pédologique de ce paysage présente trois domaines pédologiques (domaines ferrallitique, ferrugineux et hydromorphe), qui s'étagent sur le versant et qui sont associés à différents niveaux de glaciaires quaternaires. Cependant ce modèle pédologique restait imprécis.

En identifiant 20 horizons pédologiques, et en détaillant leurs caractéristiques et leur distribution en coupes et en plans, l'étude de *la pédoséquence* du versant représentatif a d'abord permis de préciser l'organisation de cette couverture pédologique.

Par suite, l'interprétation génétique de ces données a permis d'apporter des réponses à plusieurs questions soulevées lors des études antérieures. Ainsi, et notamment, il est apparu : - que la cuirasse ferrugineuse (horizon FE m) du domaine ferrallitique est surimposée au profil d'altération; - que la nappe de gravats (horizon Xu) et les horizons sus-jacents (Xcn, E et A) du

domaine ferrugineux sont d'origine colluviale; - que les horizons à alternance texturale (Ab) du domaine hydromorphe sont d'origine alluviale. De plus, cette interprétation génétique a permis d'expliquer la différenciation de la pédoséquence par plusieurs facteurs. Le premier facteur de différenciation serait l'*érosion en différents niveaux de glacis*, parmi lesquels nous avons pu identifier, dans le domaine ferrugineux, un glacis intermédiaire entre le moyen glacis quaternaire et le bas glacis quaternaire. Dans les domaines ferrugineux et hydromorphe, *ces glacis auraient été postérieurement comblés par un recouvrement colluvio-alluvial*. L'autre grand facteur de différenciation serait un ensemble de *transformations au sein des horizons* (déferrisation, désargilification, disparition sélective de l'hématite, ...), qui seraient dues essentiellement à l'action de l'eau.

La deuxième conclusion de cette partie de l'étude est qu'elle a permis de préciser le schéma hydrologique du paysage de référence.

Les mécanismes de ruissellement et d'infiltration mis en oeuvre à la surface et en subsurface du sol avaient été déterminés par des études précédentes. En revanche, on connaissait mal le schéma hydrologique concernant les nappes phréatiques. Cependant, l'interprétation de la pédoséquence avait permis de formuler certaines hypothèses à ce propos. Par suite, l'étude de *l'hydroséquence* durant trois cycles annuels a permis de confirmer ces hypothèses, tout en précisant que le schéma hydrologique du versant est un schéma à deux nappes : une première nappe d'arène, qui s'observe dans tous les domaines pédologiques, et une seconde nappe perchée qui apparaît uniquement dans les domaines ferrugineux et hydromorphes.

Enfin, la troisième conclusion est qu'il existe certaines relations quantitatives entre les composantes pédologiques et hydrologiques du paysage. En analysant les *relations entre*

pédoséquence et hydroséquence, nous avons montré qu'il existe une liaison statistique significative entre un paramètre hydrologique quantitatif : la fréquence moyenne annuelle d'engorgement, et deux variables pédologiques : le type d'horizon et la couleur des matériaux. Il en résulte, en pratique, que le type d'horizon et sa couleur sont des éléments de diagnostic intéressants puisqu'ils permettent de prévoir la durée de saturation du matériau.

Cela étant, on peut envisager deux perspectives, en prolongement direct de cette partie de l'étude :

- La première perspective serait la recherche d'un modèle hydrologique déterministe adapté au versant étudié. Un tel modèle n'existe pas encore, et il resterait donc à le mettre au point. Au moins deux types de modèles seraient envisageables :

- un modèle entièrement déterministe, à l'instar de certaines approches développées en matière d'hydrologie de versant (FREEZE, 1980). Un tel modèle reste toutefois difficile à concevoir. En effet, il faudrait d'abord connaître précisément les propriétés hydrodynamiques de tous les horizons pédologiques identifiés. De plus, un tel modèle devrait tenir compte des flux turbulents provoqués par la macroporosité qui a été mise en évidence dans certains horizons pédologiques.

- un modèle au déterminisme volontairement simplifié, type modèle SOURCE (GIRARD et DUFAURE, 1988; GUILLET, 1991). Compte tenu de la complexité de ce type de versant, il est probable que ce type de modèle soit ici mieux adapté.

- La seconde perspective serait la transposition des résultats obtenus sur des superficies plus larges. Il faudrait à présent passer de l'échelle du versant à des échelles plus petites, en délimitant les différents domaines pédologiques identifiés sur des superficies plus

larges. Une telle délimitation permettrait, entre autre, de connaître la limite amont de la zone à nappes perchées, du fait de la relation entre le domaine pédologique et la présence ou l'absence de nappes perchées.

Pour effectuer cette délimitation, il convient de trouver des indicateurs cartographiques pertinents. La clarté de la surface du sol augmente nettement au passage entre le domaine ferrallitique et le domaine ferrugineux, ce qui permettrait, théoriquement de délimiter le domaine ferrallitique et les domaines suivants. Mais cette surface du sol est généralement masquée par la végétation, de sorte qu'elle n'apparaît pas sur des images aérospatiales. En revanche, le relief pourrait être un indicateur cartographique très intéressant. En effet, nous avons vu que les domaines pédologiques sont délimités par des ruptures de pente, qui peuvent être localisées sur des cartes de convexité verticale issues de l'analyse d'un modèle numérique de terrain (MNT). Dans ces conditions, la constitution et l'exploitation d'un MNT régional pourrait être envisagée, à condition toutefois que la résolution de ce MNT soit excellente (résolution inférieure ou égale à 50 mètres). Ce MNT devrait sans doute être complété par des images aérospatiales de végétation, qui permettraient notamment de localiser la galerie forestière correspondant au domaine hydromorphe.

Il reste, par ailleurs, envisageable de calibrer des techniques géophysiques de prospection sur ce versant, puis de mettre en oeuvre ces techniques sur des superficies dépassant celle du versant. En effet, certaines techniques géophysiques de prospection électrique ou électromagnétique pourraient éventuellement permettre de délimiter les domaines pédologiques, voire de détecter la présence de nappes (MEROT et al. 1986; ENGMAN et GURNEY, 1991; SCANVIC, 1991; COOK et KILTY, 1992; BONN et ROCHON, 1992; SMITH et al., 1992 ; NETTLETON et al. 1994).

Par ailleurs, certaines limites rencontrées durant cette étude nous suggèrent *trois perspectives méthodologiques plus générales en matière d'acquisition, de stockage et de traitement de l'information.*

- *la première perspective, en matière d'acquisition de l'information, serait de mettre en oeuvre ou de concevoir certains instruments de mesure de terrain précis.* En effet, certaines lacunes métrologiques ont été rencontrées lors de cette étude :

- *en matière de transcription de certaines observations morphologiques.* Certaines observations morphologiques (traits pédologiques, formes d'éléments grossiers ou certaines limites entre volumes pédologiques) n'ont pu être transcrites dans une fiche de description. Il en résulte une perte importante d'information entre ce que voit effectivement le pédologue et ce qu'il décrit. Pour combler cette lacune, on peut imaginer, par exemple, d'employer des méthodes de reconnaissance des formes afin de quantifier cette information.

- *en matière de mesure de la couleur du sol, et plus généralement de ses propriétés optiques.* La couleur des sols reste quantifiée par une méthode assez peu précise, et qui n'offre qu'une palette de choix limitée (le code Munsell). Or, nous avons vu que ce paramètre offre des possibilités de diagnostic intéressantes. Il serait intéressant de pouvoir disposer d'un colorimètre ou d'un spectrocolorimètre de terrain (TOUVE, 1991).

- *en matière de piézométrie.* Les piézomètres que nous avons utilisé nous sont apparus relativement peu précis pour délimiter le plancher de la nappe perchée. Ils pourraient être remplacés par d'autres instruments de mesure à plus fort pouvoir de résolution vertical, qui restent toutefois à concevoir.

- *la seconde perspective, serait, en matière de stockage de l'information, d'utiliser une banque de données pédologiques et un système d'information géographique.*

Manquant initialement d'outil de ce type, nous avons tenté de combler partiellement cette lacune en constituant des fiches informatisées, et en utilisant un pédocomparateur basé sur un système de gestion de bases de données relationnelles. Mais il serait intéressant de disposer d'outils plus puissants, à l'instar de certains systèmes développés en Europe (BORNAND et al., 1993).

- enfin, la troisième perspective serait, en matière de traitement de l'information, de formaliser davantage les méthodes de découpage conceptuel en horizons de la couverture pédologique. En effet, il nous est apparu que ces méthodes de découpages ne sont pas encore suffisamment formalisées. De ce fait, il reste encore pratiquement impossible, à l'heure actuelle, que deux pédologues décrivent de la même manière la même couverture pédologique. Aussi, il serait bon d'aller plus avant dans le sens d'une "plus grande rigueur et d'une meilleure répétabilité des opérations" (GIRARD, 1983). Pour cela, une aide logicielle à la reconnaissance des horizons serait intéressante. Celle-ci pourrait se baser sur des méthodes de taxonomie mathématique pour définir les horizons pédologiques à partir du regroupement de volumes élémentaires de résolution. A ce titre, nous avons vu que des méthodes de classification semi-automatiques seraient utilisables (cf. chapitre 4). On pourrait développer ces méthodes semi-automatiques, en définissant les volumes pédologiques de référence, ainsi que la métrique et le mode de classification qui permettraient de fournir un découpage en horizons proche de celui fourni par le pédologue.

2. L'évaluation de l'aptitude agricole des ressources

La principale conclusion de cette partie de l'étude est qu'il existe, dans le paysage de référence, une séquence étagée sur le versant de contraintes hydro-pédologiques pour les plantes cultivées. Cette séquence de contraintes a été mise en évidence à travers la réponse

d'une plante cultivée, le cotonnier, dont le comportement varie fortement le long du versant. Les principales contraintes que nous avons identifiées sont des contraintes mécaniques dans le domaine ferrallitique (résistance à la pénétration), et des contraintes physico-chimiques (faible fertilité) et hydriques (excès d'eau lié à la remontée de la nappe) dans le domaine ferrugineux.

Toutefois, l'évaluation de l'aptitude agricole du versant n'a été que partielle, puisque nous n'avons examiné que le cas d'une seule plante, et pour une partie du versant. *Le prolongement direct de cette partie de l'étude pourrait donc être une évaluation plus complète de l'aptitude agricole du versant.* Pour cela, on pourrait étudier la réponse d'autres plantes cultivées sur l'ensemble du versant, en conservant la méthodologie employée dans le cadre de cette étude (traitement agronomique homogène et analyse des variations spatiales du comportement des plantes). Ce prolongement justifierait la mise en oeuvre d'un programme de recherche-développement plus spécialement consacré à ce sujet.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A.F.E.S., 1988.- Référentiel pédologique français. 2ème proposition. AFES-INRA, Paris, 251 p. multigr.
- A.F.E.S., 1992.- Référentiel pédologique. Principaux sols d'Europe. *Coll. Techniques et pratiques*, INRA, Paris, 222 p.
- ADJANOHOOUN (E.), 1964.- Végétation des savanes et des rochers découverts en Côte d'Ivoire centrale. *Mémoires Orstom* n° 7, Orstom, Paris, 178 p.
- AFANOU (K.M.), 1991.- Identification et évaluation des terres selon les approches traditionnelle et scientifique. Cas du sous-secteur d'Ayengré. Centre Togo. *Mémoire 90/03/PV, Univ. Bénin - E.s.a.*, Lomé, 101 p.
- AICARD (P.), 1957.- Les terrains précambriens du Togo et leur extension vers le Nord-Est. *Mém. Dir. Mines et Géol., Minist. Mines, République du Togo*, 221 p.
- ARROUAYS (D.), HARDY (R.), 1993.- Le programme inventaire, gestion et conservation des sols. Application dans la région landaise. *Purpan* (166), pp. 5-14.
- AUDEBERT (A.), 1993.- La culture cotonnière sur socle granito-gneissique au Togo. Analyse de la variabilité et déterminisme du comportement. *Thèse Univ. Montpellier II*, 216 p.
- AUDEBERT (A.), BLAVET (D.), 1992.- Sols, états de surface et rendements du cotonnier en station expérimentale (Togo central). *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, vol XXVII n° 2, pp. 153-166.
- AUDRY (A.), COMBEAU (A.), HUMBEL (F.X.), ROOSE 'E.), VIZIER (J.F.), 1973.- Essais sur les études de dynamique actuelle des sols. Définitions - Méthodologie - Techniques - Limitations actuelles. Quelques voies de recherche possibles. Orstom, Paris, 133 p. + annexes.
- AVENARD (J.M.), 1969.- Réflexions sur l'état de la recherche concernant les problèmes posés par les contacts forêts-savanes : essai de mise au point et de bibliographie. *Coll. Initiations-Documentations Techniques* n° 14., Orstom, Paris, 158 p.
- AVENARD (J.M.), 1971.- Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoires Orstom* n° 50, Orstom, Paris, 391 p.
- AVENARD (J.M.), BONVALLOT (J.), LATHAM (M.), RENARD-DUGERDIL (M.), RICHARD (J.), 1974.- Aspects du contact forêt-savane dans le centre et l'ouest de la Côte d'Ivoire. *Coll. Travaux et documents Orstom* n° 35, Orstom, Paris, 254 p.
- ATKINSON (T.C.), 1980.- Techniques for measuring subsurface flow on hillslopes. In : *Hillslope hydrology*, Kirkby ed., Wiley & Sons, New-york, pp. 173-117.
- BACHELIER (G.), 1969.- Coloration du fer ferreux dans les profils pédologiques. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol VII n° 2, pp 284-286.
- BAILLARGEON (G.), 1989.- Probabilités, Statistique et techniques de régression. Editions S.M.G., Trois-Rivières, 631 p.

- BAIZE (D.), GIRARD (M.C.), BOULAINÉ (J.), CHEVERRY (C.), RUELLAN (A.), 1992.- Pourquoi un référentiel pédologique ? In : Référentiel pédologique. Principaux sols d'Europe. Inra, Paris, pp. 9-22.
- BEAUDOU (A.G.), 1997.- Note sur la quantification et le langage typologique. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol XV n° 1, pp 35-41.
- BEAUDOU (A.G.), COLLINET (J.), 1977.- La diversité des volumes pédologiques cartographiables dans le domaine ferrallitique africain. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XV, n°1, pp. 19-34.
- BENZECRI (J.P), 1976.- L'analyse des données. I. La taxinomie. 2nd. ed., Dunod, Paris, 631 p.
- BEVEN (K.), KIRKBY (M.J.), 1979.- A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* n° 24 (1-3), pp. 43-69.
- BLAVET (D.), 1994.- Présentation sommaire de l'application Thorpedo (Traitement d'horizons par pédocomparateur). Application sous Paradox 3.5 pour Dos. Orstom, Montpellier, 19 p. multigr.
- BLAVET (D.), CRETENET (M.), JALLAS (E.), POSS (R.), 1990.- La recherche cotonnière au Togo. Mieux appréhender la variabilité naturelle. CIRAD-montpellier, Poster Sc. 5 panneaux.
- BLAVET (D.), FARDOUX (J.), 1993.- Méthode densimétrique simplifiée pour l'estimation sur mottes de terre de la porosité totale et de caractéristiques associées (masse volumique apparente, masse volumique pseudo réelle sèche). Protocole. Evaluation des biais et des incertitudes. Orstom, Montpellier, 40 p. multigr.
- BONN (F.), ROCHON (G.), 1992.- Précis de télédétection. Volume 1. Principes et méthodes. Univ Quebec. AUPELF, Sillery, Québec. 485 pp.
- BORNAND (M.), LEGROS (J.P.), ROUZET (G.), 1993.- La banque de données sur les sols régionaux du Languedoc-Roussillon. Présentation, conception et possibilités d'exploitation. *Purpan* (166), pp. 15-22.
- BOULARD (T.), BAILLE (A.), MERMIER (M.) & VILETTE (F.), 1991.- Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre. *Agronomie*, 11, Elsevier/INRA, pp. 259-274.
- BOULET (R.), 1970.- La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale. *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, vol VIII n° 3, pp. 245-271.
- BOULET (R.), FAUCK (R.), KALOGA (B.), LEPRUN (J.C.), RIQUIER (J.), VIEILLEFON (S.J.), 1971.- Pédologie. In : Atlas International de l'ouest africain. Protat Frères (imp.), Macon, 23 p.
- BOULET (R.), 1974.- Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibres dynamiques et bioclimatiques. *Thèse Univ. Strasbourg*, 330 p.

- BOULET (R.), 1975.- Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibres dynamiques et bioclimats. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIII, n° 1, pp. 3-6.
- BOULET (R.), 1978.- Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibre et déséquilibre pédobioclimatique. *Coll. Mémoires Orstom* n°85, Paris, 272 p.
- BOULET (R.), CHAUVEL (R.) & LUCAS (Y.), 1984.- Les systèmes de transformation en pédologie. In : Livre jubilaire du Cinquantenaire de l'AFES. AFES, Paris, pp. 167-179.
- BOULET (R.), CHAUVEL (A.), HUMBEL (F.X.), LUCAS (Y.), 1982.- Analyse structurale et cartographie en pédologie. 1. prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique. Les études de toposéquence et leurs principaux apports à la connaissance des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIX, n° 4, pp. 309-321.
- BOURGEON (G.), PEDRO (G.), 1992.- Rôle majeur du drainage climatique dans la différenciation altéritique et pédologique des sols des régions chaudes. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 314, sér. II, pp. 717-725.
- BRABANT (P.), 1991 a.- Le sol des forêts claires du Cameroun. Exemple d'étude d'un site représentatif en vue de la cartographie des sols et de l'évaluation des terres. Tome I. ORSTOM-MESIRES, Bondy, 530 p.
- BRABANT (P.), 1991 b.- Le sol des forêts claires du Cameroun. Exemple d'étude d'un site représentatif en vue de la cartographie des sols et de l'évaluation des terres. Tome II. Application à la cartographie des sols et à l'évaluation des terres. ORSTOM-MESIRES, Bondy, 278 p.
- BRAND (E.W.), PREMCHITT (J.), 1980.- Shape factors of cylindrical piezometers. *Géotechnique*, 30, n° 4, pp. 369-384.
- BRINKMAN (R.), 1970.- Ferrollysis, a hydromorphic soil forming process. *Geoderma* n° 3, pp. 199-206.
- BRUNEL (J.F.), HIEPKO (P.), SCHOLZ (H.), 1984.- Flore analytique du Togo. Phanérogames. G.T.Z., Eschborn, 751 p.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1989.- Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *Coll. Didactiques*, ORSTOM, Paris, 230 p.
- CHATELIN (Y.), 1976.- Une épistémologie des sciences du sol. *Thèse Univ. Dijon*, 151 p.
- CHAUVEL (A.), 1977.- Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. *Coll. Travaux et documents Orstom* n°62, ORSTOM, Paris, 532 p.
- CHAUVEL (A.), PEDRO (G.), 1978.- Genèse de sols beiges (ferrugineux tropicaux lessivé) par tranformation des sols rouges (ferrallitiques) de Casamance (Sénégal). Modalités de leur propagation. *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, vol 16 n° 3, pp. 231-249.
- CHEVALLIER (P.), 1988.- Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide : Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). *Thèse Univ. Montpellier*, 342 p.

- CHEVALLIER (P.), PLANCHON (O.) & LAPETITE (J.M.), 1990.- Le fonctionnement hydrologique du bassin versant. In : Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide. *Coll. Etudes et thèses Orstom*, Paris, pp 208-223.
- CHOPART (J.L.), 1989.- Méthodologie d'étude de l'enracinement à mettre en oeuvre dans le projet de recherche R3S PF2 (Amélioration de l'alimentation hydrique par les techniques culturales). Note technique n° 04/89/Syst., DCV IDESSA, 16 p.
- CHORLEY (R.J.), 1980.- The hillslope hydrological cycle. In : Hillslope hydrology, Kirkby ed., Wiley & Sons, New-york, pp. 1-42.
- CHRISTIANSEN (M.N.), 1986.- Influence of atmospheric parameters on growth and development. Chapter 4, Section 1. In : Cotton Physiologie, MAUNEY J.R. et STEWART Mc.D. ed., The cotton foudation, Memphis, pp. 39-46.
- COLLINET (J.), 1969.- Contribution à l'étude des "Stone-lines" dans la région du Moyen-Ogoué (Gabon). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol VII, n° 1, pp. 3-42
- COOK (P.G.), KILTY (S.), 1992.- A helicopter-borne electromagnetic survey to delineate groundwater. *Water Resources Research*, vol 28 n° 11, pp. 2953-2961,
- CORNEVIN (R.), 1988.- Le togo : des origines à nos jours. *Académie des Sc. d'outre mer*, Paris, 556 p.
- CRESSIE (N.), 1991.- Statistics for spatial data. Wiley & sons, New York, 900 p.
- DANCETTE (C.), 1976.- Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Orientation des travaux portant sur les besoins en eau des cultures. *Agron. Trop.*, n° 31 vol 4, pp. 321-338.
- DANCETTE (C.), 1983.- Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agron. Trop.*, 38(4), pp. 281-294.
- DE MARSILY (G.), 1986.- Geostatistic and stochastic approach in hydrogeology. In : Quantitative hydrogeology. Academic Press, INC, New, York, pp. 284-337.
- DEPRAETERE (C.), 1992.- Demiurge 2.0. Chaîne de production et de traitement de modèles numériques de terrain. *Coll. Logorstom*, Paris, 198 p.
- DIDAY (E.), 1971.- La méthode des nuées dynamiques. *Rev. Stat. Appl.*, 19(2), pp. 19-34.
- DUNNE (T.), 1980.- Field studies of hillslope flux processes. In : Hillslope hydrology. Kirby M.J. éd., John Wiley & Sons, pp. 227-293.
- E.P.A., 1988.- Geo-Eas (Geostatistical Environmental Assessment Software). User's guide. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, 215 p.
- ENGMAN (E.T.), GURNEY (R.J.), 1991.- Remote sensing in hydrology. Remote sensing applications, Chapman and Hall , 225 p.
- DUCHAUFOUR (P), 1977.- L'évolution de la fraction minérale. Altération et genèse des argiles. In : Pédologie. I. Pédogenèse et classification. Masson ed., Paris, pp. 3-27.

- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1988.- La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, 8(2), pp. 147-154.
- FAURE (P.), 1985.- Les sols de la Kara. Nord-Est Togo. Relations avec l'environnement. *Coll. Travaux et documents Orstom* n° 183, 283 p.
- FAURE (P.), 1987.- Les héritages ferrallitiques dans les sols jaunes du nord-Togo. Aspects micromorphologiques des éléments figurés. *Actes du VIIe congrès international de micromorphologie des sols*, 1985. AFES, Paris, pp. 111-118.
- FAURE (P.), VOLKOFF (B.), 1989.- Les couvertures pédologiques polygénétiques des régions soudano-guinéennes de l'Afrique de l'Ouest. In : SOLTROP 89. *Coll. Colloques et Séminaires Orstom*, Paris, pp. 117-142.
- FAVROT (J.C.), VIZIER (J.F.), 1992.- Solums à caractères hydromorphes. In : Référentiel pédologique, AFES, Paris, pp. 129-132.
- FREEZE (R.A.), 1980.- Mathematical models of hillslope hydrology. In : Hillslope hydrology, Kirkby ed., Wiley & Sons, New-york, pp. 177-225.
- FRITSCH (E.), 1993.- Organisation et fonctionnement de "systèmes sols" en zone de contact forêt-savane du milieu tropical ouest africain. (Booro Borotou, Côte d'Ivoire). *Coll. Etudes et thèses Orstom*, Paris, 176 p.
- FRITSCH (E.), VALENTIN (C.), MOREL (P.), LEBLOND (P.), 1990 a.- La couverture pédologique : interaction avec les roches, le modelé et les formes de dégradation superficielles. In : Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide. *Coll. Etudes et thèses Orstom*, Paris, pp 37-57.
- FRITSCH (E.), CHEVALLIER (P.) & JANEAU (J.L.), 1990 b.- Le fonctionnement hydrodynamique du bas de versant. In : Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide. *Coll. Etudes et thèses Orstom*, Paris, pp. 185-206.
- FRITSCH (E.), PLANCHON (O.) & BOA (C.), 1986.- Les transformations d'un paysage cuirassé au nord-ouest de la Côte d'Ivoire sur formations gneisso-migmatitiques. In : Séminaire régional sur les latérites. *Coll. Colloques et Séminaires.*, Orstom, Douala, pp. 59-76.
- FUCHS (M.), 1970.- Evapotranspiration. *Irrigation in Arid Zones*, Rehovot, Israel, pp. 155-162.
- GAVAUD (M.), 1967.- Esquisse de l'histoire des sols du Niger Centre Ouest Méridional. *Bull. ASEQUA*, n° 14-15, Dakar, pp. 24-27.
- GAVAUD (M.), 1970.- Les grandes divisions du quaternaire de régions ouest-africaines établies sur des bases pédologiques. ORSTOM, Yaoundé, 21 p.
- GAVAUD (M.), 1975.- Sols et pédogenèse au Niger méridional. ORSTOM, Paris, 1107 p.

- GAVAUD (M.), 1977.- Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional. *Coll. Travaux et documents Orstom* n°76, ORSTOM, Paris, 102 p.
- GIRARD (M.C.), 1983.- Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne. *Sols*, n° 12. I.N.A. P-G , Paris, 430 p.
- GIRARD (M.C.), AUROUSSEAU (P.), KING (D.), LEGROS (J.P.), 1989.- Apports de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. *Sc. du sol* 27(4), pp. 335-350.
- GIRARD (M.C.), DUFAURE (L.), 1988.- Le modèle SOURCE. In : Modèles hydrologiques, INRA, Calvet éditeur, 20 p.
- GRANDIN (G.), 1976.- Aplanissements cuirassés et enrichissements des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'ouest. *Coll. Mémoires Orstom*, (82), Paris, 276 p.
- GUILLET (F.), 1991.- Etude et modélisation hydropédologique d'un bassin versant de la zone sahélo-soudanienne au Burkina-Faso (utilisation du modèle "Source"). *Thèse Univ. Paris VI*, Paris, 266 p.
- HERVIEU (J.) 1975.- Evolution du milieu naturel en Afrique et à Madagascar : l'Interprétation paléoclimatique du quaternaire, essai de synthèse. 1ère partie: Faits d'observation régionaux. *Coll. Initiations-Documentations Techniques* n° 26, ORSTOM, Paris, 170 p.
- HILLEL (D.), 1974.- L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Vander éd., Louvain, 288 p.
- HUTCHINSON (J.), DALZIEL (J.M.), 1972.- Flora of West Tropical Africa. 2nd. ed., 3 vol. Millbank Ed., London, 1948 p.
- JEANROY (E.), RAJOT (J.L.), PILLON (P.), HERBILLON (A.J.), 1991.- Differential dissolution of hematite and goethite in dithionite and its implication on soil yellowing. *Geoderma*, 50, pp 81-94.
- JOLIVET (E.), 1983.- Introduction aux modèles mathématiques en biologie. INRA, *coll. actualités scientifiques et agronomiques* n° 11, Masson, Paris, 151 p.
- JORDAN (W.R.), 1986.- Water deficits and reproduction. Chapter 7, Section 1. In : Cotton Physiology, MAUNEY J.R. et STEWART Mc.D. ed., The cotton foudation, Memphis, pp 79-91.
- KALOGA (B.), 1969.- Etude de la pédogenèse sur les glacis soudaniens de Haute-Volta. *Bull. ASEQUA* n° 22, Dakar, pp. 20-23
- KALOGA (B.), 1986.-L'évolution du pédoclimat au cours du quaternaire dans les plaines du Centre-Sud du Burkina Faso (ex. Haute-Volta). In : Changements Globaux en Afrique Durant le Quaternaire. *Symposium INQUA-ASEQUA*, ORSTOM, Paris, pp 221-225.

- KATERJI (N.), PERRIER (A.), 1983.- Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne : rôle d'un coefficient cultural. *Agronomie*, 3(6) Elsevier/INRA, pp. 513-521.
- KING (D.), DAROUSSIN (J.), ARROUAYS (D.), 1989.- Analyse cartographique et système d'information géographique en pédologie. *Sc. du sol*, 27 (1), pp.89-92.
- L'HOMME (J.P.), MONTENY (B.) & HUMBERT (J.), 1982.- Evapotranspiration et caractéristiques aérodynamiques d'un gazon et d'une culture de riz en zone intertropicale humide. *Agronomie*, 2(2), pp. 181-186.
- LANGSHOLT (E.), 1994.- Water balance modelling in lateritic terrain. *Hydrological processes*, (8), pp 83-99.
- LEGROS (J.P.), ARGELES (J.), 1973.- Enquête sur la précision des descriptions de profils pédologiques. Doc. ronéo. SES n° 211, INRA, Montpellier, 16 p.
- LELONG (F.), 1966.- Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération tropicale. Conséquences pour la pédogenèse. *Sciences de la Terre*, (2), Fond. Scient. Géol. et App., Nancy, pp 201-244.
- LENOIR (F), 1977.- Le régime des nappes dans les formations d'altération. Un exemple en Côte d'Ivoire (Sakassou-Toumodi). Orstom, Abidjan, 48 p. multigr.
- LEPRUN (J.C.), 1979.- Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse - Transformations - Dégradation. *Mémoires de l'Institut de Géologie*, (58) Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 253 p.
- LEROUX (M.), 1980.- Le climat de l'Afrique tropicale. *Thèse Univ. Dijon*, vol. 1, 1427 p.
- LEVEQUE (A.), 1969.- Le problème des sols à nappes de gravats au Togo. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol VII, n ° 1, pp 43-69.
- LEVEQUE (A.), 1973.- Les sols du Togo, cartographie de reconnaissance au 1/200 000 : le socle granito-gneissique : région nord du 7ème parallèle. ORSTOM, Bondy 162 p.
- LEVEQUE (A.), 1976.- Pédogénèse sur le socle granito-gneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol XIV, n°1, pp. 63-72.
- LEVEQUE (A.), 1978.- Les concentrations du fer dans les sols développés sur le socle granito-gneissique au Togo. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol XVI, n°1, pp. 3-21
- LEVEQUE (A.), 1979.- Pedogénèse sur le socle granito-gneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. *Coll. Travaux et documents ORSTOM* n° 108, Paris, 224 p.
- LOAEC (C.), ANTOINE (P.), ENGALEC (M.), STEIN (M.), PARISOT (B.), COLOMBANI (J.), L'HOTE (Y.) & FAURE (P.), 1982.- Atlas des ressources et besoins en eau. *PNUD-LCHF*, 11 planches.
- LOZET (J.), MATHIEU (C.), 1986.- Dictionnaire de science du sol. Lavoisier, Paris, 269 p.

- MAIGNIEN (R.), 1958.- Contribution à l'étude du cuirassement des sols en Guinée française. *Mém. serv. Carte Géol. Als. Lor.*, 16, 235 p.
- MAIGNIEN (R.), 1980.- Manuel pour la description des sols sur le terrain. Orstom, Paris, 112 p.
- MATHE (E.), 1993.- Etude de toposéquence et cartographie pédologique détaillée à 1/3.000^{ème}. Exemple d'étude du site expérimental IRCT de Dalanda (Centre Togo). Orstom-INS, Lomé, - 100 p. multigr.
- MATHERON (G.), 1971.- The theory of regionalised variables and their applications. Les cahiers du Centre de morphologie mathématique, fasc. 5, Centre de géostatistique, Fontainebleau, 212 p.
- MAUNEY (J.R.), 1986.- Vegetative growth and development of fruiting sites. Chapter 2, Section 1. In : Cotton Physiology, MAUNEY J.R. et STEWART Mc.D. ed., The cotton foundation, Memphis, pp 11-28.
- MEROT (Ph.), GASCUEL-ODOUX (C.), CHEVASSU (G.), 1986.- Application de la magnéto-tellurique à l'étude de la profondeur du sol. *Agronomie*, vol 6 n° 1, Elsevier/INRA, pp.57-66.
- MICHEL (P.), 1970 a.- Chronologie du quaternaire des bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Essai de synthèse. 1ère partie. *Bull. ASEQUA* n° 25, pp. 53-64.
- MICHEL (P.), 1970 b.- Chronologie du quaternaire des bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Essai de synthèse. 2ème partie. *Bull. ASEQUA* n° 26, pp 25-38.
- MILLOT (G.), 1963.- Géologie des argiles. Altérations, sédimentologie, géochimie. Masson, Paris, 499 p.
- MOKMA (D.L.), SPRECHER (S.W.), 1994.- Water table depths and color patterns in soils developed from red parent materials in Michigan, USA. *Catena*, n° 22, pp. 287-298.
- MOREAU (R.), 1993.- Les principales couvertures pédologiques des régions centrales et ouest. Répartition zonale, caractères généraux et utilisation. *Actes Coll. gestion durable des sols et environnement en Afrique intertropicale*. Ouagadougou, 1993. Association ouest et centre africaine de science du sol, 35 p.
- MOUSTAFA (M.A.), 1959.- Red leaf disease in cotton. Egyptian Academy of Science, 3, pp 38-40.
- MULLON (C.), 1988.- Historique de la modélisation. SEMINFOR 2. La modélisation : aspects pratiques et méthodologiques. Montpellier, 26-28 Sept. 1988. *Coll. Colloques et séminaires*, ORSTOM, Bondy, pp. 372-383.
- NETTLETON (W.D.), BUSHUE (L.), DOOLITTLE (J.A.), ENDRES (T.J.), INDORANTE (S.J.), 1994.- Sodium-affected soil identification in South-central Illinois by electromagnetic induction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol 58, pp. 1190-1193.
- O.U.A, 1971.- Eléments mensuels du climat. In : Atlas international de l'ouest africain. *Comm. Sci. Techn. OUA*, planche 12.

- PEDRO (G.), 1987.- Géochimie, minéralogie et organisation des sols. Aspects coordonnés des problèmes pédogénétiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol XXIII, n° 3, pp. 169-186.
- PETARD (J.), 1993.- Les méthodes d'analyses. Tome 1. Analyses des sols. *Notes techniques* n° 5. Orstom, Nouméa, 196 p.
- PETERSCHMITT (J.M.), KATERJI (N.), 1989.- Comparaison de différentes méthodes de mesure de l'évapotranspiration d'une culture de blé non irriguée. *Agronomie*, 9, Elsevier-INRA, pp.197-205.
- PETITGAS (P.), PRAMPART (A.), 1993.- Eva (Estimation variance). Logiciel de géostatistique pour IBM-PC effectuant l'analyse structurale et les calculs de variance d'estimation des quantités totales pour des données géographiquement corrélées. ORSTOM, 32 p.
- PIAS (J.), 1968.- Contribution à l'étude des formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et des sols qui en dérivent. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol VI, n° 3-4, pp. 367-377.
- PIRAUX (M.), 1986.- Le togo aujourd'hui. *Jeune Afrique.*, Paris, 140 p.
- POSS (R.), 1978.- La dynamique de l'eau saturante dans les sols de la périphérie d'un inselberg, en milieu ferrallitique de transition (nord Côte d'Ivoire); Typologie des sols et test hydrodynamique. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol XVI n° 2, pp. 131-154.
- POSS (R.), 1991.- Transferts de l'eau et des éléments minéraux dans les terres de Barre du Togo. Conséquences agronomiques. *Thèse Univ. Paris VI*, 335 p.
- POSS (R.), ROUSSEL (B.), JALLAS (E.), 1990.- Relations entre les caractères du milieu et les espèces ligneuses au Nord-Togo. *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, vol 45, pp. 7-24.
- POSS (R.), VALENTIN (C.), 1983.- Structure et fonctionnement d'un système eau-sol-végétation : une toposéquence ferrallitique de savane (Katiola-Côte d'Ivoire). *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, vol XX n° 4, pp 341-360.
- RAWLS (W.J.), BRAKENSIEK (D.L.), SAXTON (K.E.), 1982.- Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*, vol 25, pp. 1316-1320.
- RIOU (C.), 1975.- La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. *Coll. Mémoires Orstom* n° 80, ORSTOM, Paris, 236 p.
- RIOU (C.), CHARTIER (R.), 1985.- Evapotranspiration en zone semi-aride de deux couverts végétaux (gazon, blé) obtenues par plusieurs méthodes. I. Evaluation de l'ETP (conditions non limitantes). *Agronomie*, 5(3), pp. 261-266.
- RIPLEY (B. D.), 1981. - Spatial statistics. Wiley & sons, New York, 252 p.
- RIQUIER (J.), 1969.- Contribution à l'étude des "Stone-lines" en régions tropicale et équatoriale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol VII, n° 1, pp 71-110.
- ROBAIN (H.), 1989.- Organisation et transformations dans une couverture ferrallitique de Guyane française. *Thèse Univ. Paris VI.*, 189 p.

- ROBBEZ-MASSON (J.M.), 1994.- Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. *Thèse Univ. Montpellier*, 161 p.
- SANDERS (L.), 1989.- L'analyse des données appliquées à la géographie. G.i.p. Reclus, Montpellier, 268 p.
- SAXTON (K.E), RAWLS (W.J.), ROMBERGER (J.S.), PAPENDICK (R.I.), 1986.- Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* vol 50, n° 4, pp. 1031-1036.
- SCANVIC (J.Y.), 1991.- Télédétection aérospatiale et informations géologiques. BRGM ,Orléans 284 p.
- SCHULZE (D.G.), NAGEL (J.L), VAN SCOYOC (G.E.), HENDERSON (T.L.), BAUMGARDNER (M.F.), 1993.- Significance of organic matter in determining soil colors. In : Soil Color, *Soil Sci. Soc. of Am. Special publication* n° 31, Madison, pp. 71-90.
- SCHWARTZ (D.), 1991.- Les savanes incluses du Mayombe congolais - Origine et évolution. Orstom, Pointe-Noire, pp. 11-13.
- SCHWERTMANN (U.), 1993.- Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. In : Soil Color. *Soil Sci. Soc. of America special publication* n° 31, Madison, pp 51-69.
- SEGALEN (P.), 1969.- Contribution à la connaissance de la couleur des sols à sesquioxydes de la zone intertropicale : sols jaunes et sols rouges. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol VII, n° 2, pp 225-236.
- SEGUIN (B.), 1975.- Etude comparée des méthodes d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du Sud de la France (Région d'Avignon). *Ann. Agron.* 26(6), pp. 671-691.
- SEGUIS (L.), 1988.- La pluviométrie au Togo : caractérisation agronomique. ORSTOM, Lomé, 23 p. multigr.
- SMITH (M.C.), VELLIDIS (G.), THOMAS (D.L), BREVE (M.A.), 1992.- Measurement of water table fluctuations in a sandy soil using ground penetrating radar. *Trans. ASAE*, vol 35 n° 4, pp. 1161-1166,
- SO.TO.CO, 1990, 1991, 1992.- Rapport annuel. Campagnes 1989-1990; 1990-1991; 1991-1992. Atakpamé (Togo), Ministère du développement rural.
- TANO (Y.), LEPAGE (M.), 1990.- Les termites : dynamique des nids épigés et interactions avec les composantes du milieu. In : Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane. *Coll. Etudes et thèses Orstom*, Paris, pp 105-116.
- TOMASSONE (R.), AUDRAIN (S.), LESQUOY-de-TURCKEIM (E.), MILLIER (C.), 1992.- La régression. Nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique. *Coll. Actualités scientifiques et agronomiques* n° 13, INRA, Masson, Paris, 188 p.

- TORRENT (J.), BARRON (V.), 1993.- Laboratory measurement of soil color : theory and practice. In : Soil Color, Soil Sci. Soc. of Am. Special publication n° 31, Madison, pp. 21-33.
- TORRENT (J.), SCHWERTMANN (U.), FECHTER (H.), ALFEREZ (F.), 1983.- Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Science*, vol 136 n° 6, pp. 354-358.
- TOUVE (A.), 1991.- La mesure de la couleur. Principes, technique et produits du marché. Afnor-Cetim, 193 p.
- VALENTIN (C.), CHEVALLIER (P.), FRITSCH (E.) & JANEAU (J.L.), 1990.- Le fonctionnement hydrodynamique aux échelles ponctuelles. In : Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane. *Coll. Etudes et thèses Orstom*, Paris, pp. 149-163.
- VIZIER (J.F.), 1969.- Choix et mise au point d'une méthode de dosage du fer ferreux applicable aux sols hydromorphes minéraux. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol VII n°3, pp. 435-445.
- VIZIER (J.F.), 1974 a.- Recherche de relations morphogénétiques existant dans un type de séquence de sols hydromorphes peu humifères au Tchad. 1ère partie : Etude des caractères morphologiques et analytiques des sols de la séquence de Gole. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol XII, n° 2, pp. 171-206.
- VIZIER (J.F.), 1974 b.- Recherche de relations morphogénétiques existant dans un type de séquence de sols hydromorphes peu humifères au Tchad. 2ème partie : Dynamique de l'eau et du fer dans les sols de la séquence. 3ème partie: conclusions sur l'évolution actuelle des sols et hypothèse sur la formation de la séquence. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol XII n° 3, pp. 211-266.
- VOGT (J.), 1968.- Etude de l'alluvionnement en haute-Volta. Rapp. B.R.G.M. 68 ABI 012 BOB., Arch. Direct. Géol. Mines Haute-Volta, 227 p.
- WAUTHY (B.), 1983.- Introduction à la climatologie du Golfe de Guinée. *Océanogr. Trop.*, 18(2), pp. 103-138.
- WOROU (S.), 1988.- Les nappes perchées semi-permanentes : bien les connaître pour mieux les utiliser. Com. 97 Réu. Cor. des sols. FAO Cotonou 14-23 Nov 1988. Rap. FAO N° 63, pp. 202-207.
- ZIMMER (D.), 1990.- Profils tensiométriques et fonctionnement hydraulique des sols drainés à plancher imperméable peu profond ; essai de typologie. *Science du Sol*, 28(3) AFES, Plaisir-France, pp. 179-191.

ANNEXES

ANNEXE A. RELEVÉS BOTANIQUES.

Les relevés suivants ont été effectués du 6 au 17 août 1991, par quadrats de 40 m² de part et d'autre de deux transects : le premier à la limite ouest de la surface étudiée et le second dans sa partie est. Les nomenclatures utilisées sont celles de HUTCHINSON et DALZIEL (1972) et de BRUNEL et al. (1984). Les espèces qui n'ont pas été identifiées sur le terrain ont été récoltées puis déterminées et conservées à l'Herbarium de l'Université du Bénin (Lomé).

A1. Espèces à large spectre de répartition

				POSITION SUR LE VERSANT			
				AMONT	MEDIAN	AVAL	GAL. FOREST.
lign. arboresc.	Combretaceae	<i>Terminalia</i>	<i>glaucescens</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
lign. arbustifs	Caesalpinaceae	<i>Piliostigma</i>	<i>thonningii</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Annonaceae	<i>Annona</i>	<i>senegalensis</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Araliaceae	<i>Cussonia</i>	<i>kirkii</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Chrysobalanaceae	<i>Maranthes</i>	<i>kerlingii</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Chrysobalanaceae	<i>Pantani</i>	<i>curatellifolia</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Combretaceae	<i>Combretum</i>	<i>collinum</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Combretaceae	<i>Terminalia</i>	<i>avicennioides</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Combretaceae	<i>Terminalia</i>	<i>macroptera</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Euphorbiaceae	<i>Hymenocardia</i>	<i>acida</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	
herbacées	Graminae (Poaceae)	<i>Panicum</i>	<i>phragmitoides</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Zingiberaceae	<i>Aframomum</i>	<i>alboviolaceum</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Commelinaceae	<i>Cyanotis</i>	<i>longifolia</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Compositae	<i>Aspilia</i>	<i>helianthoides</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Cyperaceae	<i>Cyperus</i>	<i>sp.</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Graminae (Poaceae)	<i>Andropogon</i>	<i>spp.</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Graminae (Poaceae)	<i>Bracharia</i>	<i>sp.</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
	Graminae (Poaceae)	<i>Hyparrhenia</i>	<i>spp.</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Amaranthaceae	<i>Pandiaka</i>	<i>Angustifolia</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	
Amaranthaceae	<i>Pandiaka</i>	<i>involutata</i>	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	

Tableau A.1. Espèces végétales largement réparties sur le versant.

A2. Espèces étagées

				POSITION SUR LE VERSANT			
	famille	genre	espèce	AMONT	MEDIAN	AVAL	GALERIE FOREST.
ligneux arborescents	Caesalpiniaceae	<i>Isoberrinia</i>	<i>doka</i>				
	Caesalpiniaceae	<i>Detarium</i>	<i>microcarpum</i>				
	Anacardiaceae	<i>Mangifera</i>	<i>indica</i>		plantation		
	Sapotaceae	<i>Vitellaria</i>	<i>paradoxa</i>				
	Palmae	<i>Borassus</i>	<i>aethiopum</i>				
	Palmae	<i>Elaeis</i>	<i>guineensis</i>				
	Palmae	<i>Raphia</i>	<i>vinifera</i>			plantation	
	Euphorbiaceae	<i>Sapium</i>	<i>ellipticum</i>				
ligneux arbusitifs.	Euphorbiaceae	<i>Margarita</i>	<i>discoidea</i>				
	Loganiaceae	<i>Strychnos</i>	<i>spinosa</i>				
	Moraceae	<i>Ficus</i>	<i>glumosa</i>				
	Phytolaccaceae	<i>Securidaca</i>	<i>longepedunculata</i>				
	Anacardiaceae	<i>Blighia</i>	<i>sapida</i>				
	Papilionaceae	<i>Eriosema</i>	<i>psoraloides</i>				
	Sapindaceae	<i>Allophylus</i>	<i>africanus</i>				
	Combretaceae	<i>Terminalia</i>	<i>laxiflora</i>				
	Mimosaceae	<i>Dichrostachys</i>	<i>cinerea</i>				
ligneux sarmenteux.	Ophiaceae	<i>Opilia</i>	<i>celtidifolia</i>				
	Rhamnaceae	<i>Zizyphus</i>	<i>mucronata</i>				
	Annonaceae	<i>Uvaria</i>	<i>chamae</i>				
	Cornaraceae	<i>Byrsocarpus</i>	<i>coccineus</i>				
lianes	Vitaceae	<i>Cissus</i>	<i>populnea</i>				
	Dioscoreaceae	<i>Dioscorea</i>	<i>spp.</i>				
	Vitaceae	<i>Cissus</i>	<i>sp.</i>				
herbacées	Commeleaceae	<i>Cyanotis</i>	<i>lanata</i>				
	Compositae	<i>Ageratum</i>	<i>conyzoides</i>				
	Compositae	<i>Aspilia</i>	<i>kotschy</i>				
	Compositae	<i>Tridax</i>	<i>procumbens</i>				
	Graminae (Poaceae)	<i>Imperata</i>	<i>cylindrica</i>				
	Graminae (Poaceae)	<i>Paspalum</i>	<i>scrobiculatum</i>				
	Icacinaeae	<i>Icacina</i>	<i>oliviformis</i>				
	Papilionaceae	<i>Tephrosia</i>	<i>bracteolata</i>				
	Papilionaceae	<i>Tephrosia</i>	<i>elegans</i>				
	Rubiaceae	<i>Spermacoce</i>	<i>spp.</i>				
	Compositae	<i>Aspilia</i>	<i>sp.</i>				
	Cyperaceae	<i>Fuirena</i>	<i>umbellata</i>				
	Euphorbiaceae	<i>Sapium</i>	<i>grahamii</i>				
	Graminae (Poaceae)	<i>Hyperthelia</i>	<i>dissoluta</i>				
	Graminae (Poaceae)	<i>Setaria</i>	<i>sp.</i>				
	Onagraceae	<i>Ludwigia</i>	<i>octovalvis</i>				
	Onagraceae	<i>Ludwigia</i>	<i>sp.</i>				
	Onagraceae	<i>Ludwigia</i>	<i>stenoraphe</i>				
Acanthaceae							
Cyperaceae	<i>Scleria</i>	<i>boivinii</i>					
Cyperaceae	<i>Scleria</i>	<i>bulbifera</i>					
Graminae (Poaceae)	<i>Paspalum</i>	<i>conjugatum</i>					

Tableau A.2. Espèces végétales localisées sur une partie du versant

ANNEXE B. S.G.D.B. RELATIONNEL

Les Systèmes informatique de Gestion de Bases de Données, (les "SGBD"), concernent potentiellement tous les domaines dans lesquels on est amené à stocker et traiter des données volumineuses. De plus, ces systèmes permettent de constituer et de traiter des ensembles de données qui ne sont pas nécessairement numériques. Ceci nous a conduit à utiliser un tel système pour constituer notre base de données pédologiques.

Le système que nous avons utilisé est un SGBD relationnel à représentation matricielle plane (Paradox v 3.5, BORLAND, 1991). Il est adaptable sur des plates formes portables à système d'exploitation Microsoft. Il autorise la saisie de 262 millions de caractères par table de données, de 4000 caractères/enregistrement et de 255 champs de 255 caractères (ce qui représente un minimum théorique de 65.500 enregistrements par table de données).

On peut se représenter une table de données de ce système comme une sorte de matrice à nombre de lignes variables, qui peut contenir des nombres et d'autres choses que des nombres (un code alphanumérique ou, dans les versions plus récentes de ce même système, des "objets" graphiques, photographiques, etc.).

$$\text{Table de données } B(n) = \begin{pmatrix} v_{11} & \dots & v_{1i} & \dots & v_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{j1} & \dots & v_{ji} & \dots & v_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{k1} & \dots & v_{ki} & \dots & v_{kn} \end{pmatrix}$$

i = indice de champ

j = indice d'enregistrement

v_{ij} = valeur numérique ou alphanumérique ou autre

Visualisée sur un tableau (cf. tableau A.3), une table de données présente en ligne des "enregistrements" qui regroupent les attributs quantitatifs ou qualitatifs d'une entité donnée (dans l'application que nous en avons faite, ces entités sont des volumes pédologiques élémentaires). Chaque colonne correspond à une variable (appelée champ dans la terminologie des bases de données).




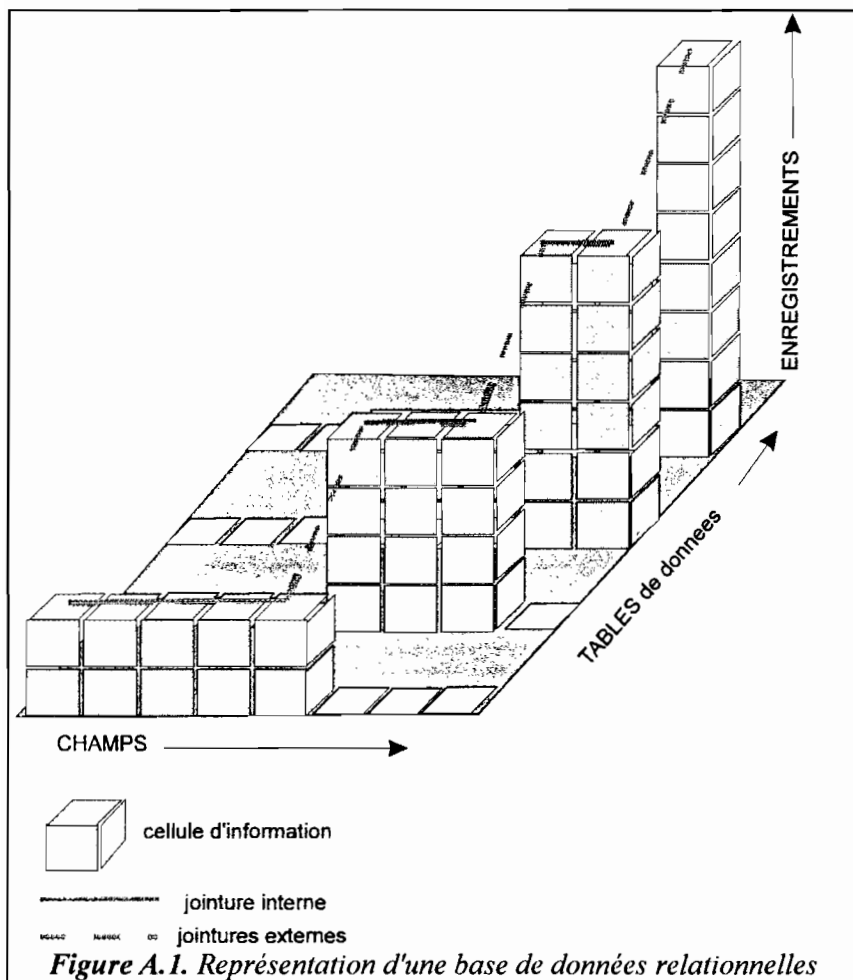
	<i>champ i-2</i> <small>nature</small>	<i>champ i-1</i> <small>ouleur</small>	<i>champ i</i> <small>forme</small>	<i>champ i+1</i> <small>diamètre</small>	<i>champ i+3</i> <small>schéma, photo de l'objet</small>
Enr k-1	nodule à cortex	ocre	mamelonné	10	
Enr j	gravillon ferr.	rouge	anguleux	7	
Enr j+1	oolithe	noir	sphérique	5	

Tableau A.3. Exemple de table de données (glossaire pédologique)

D'un certain point de vue, ce SGBD est donc d'abord un tableur qui permet de constituer des tableaux de grande dimension (le passage des informations entre ce système et un tableur se fait d'ailleurs aisément). Comme un tableur, ce système permet le tri en ligne des enregistrements, ou d'effectuer des traitements logiques et itératifs sur les éléments numériques stockés. Il offre aussi la possibilité d'importer ou d'exporter des données brutes ou issues d'un

traitement depuis ou vers d'autres applications. Toutefois, des contrôles plus stricts sont effectués sur les cellules du tableau.



D'autres caractéristiques distinguent ce SGBD d'un tableur :

- a) le système est de type "relationnel", ce qui exprime le fait qu'il est possible de lier plusieurs tables de données par un ou plusieurs champs communs à ces tables. On peut ainsi constituer de nouvelles tables à partir de tables initialement disjointes. Les jointures entre les tables peuvent se faire en cascade, ainsi que l'illustre la figure A.1. La possibilité d'effectuer des jointures entre tables de données permet une économie de saisie et de stockage de l'information par élimination des redondances. En définitive, une *Base* de données est constituée d'un ensemble de *Tables* de données qui

possèdent, prises deux à deux, au moins un champ de nature commune. Un exemple de jointure entre tables peut être fourni avec deux tables et un seul champ de liaison commun : on part d'une table T1 constituée par exemple de nombreux enregistrements à peu de champs descripteurs. Cette table contient un champ de valeurs comparables à celles d'un champ sans doublons d'une table T2. Par exemple, cette deuxième table est constituée de peu d'enregistrements avec beaucoup de champs descripteurs. On obtient, par rattachement de T1 à T2, une table T3 contenant à la fois les informations de T1 et de T2, ainsi que le schématise la figure A.2.

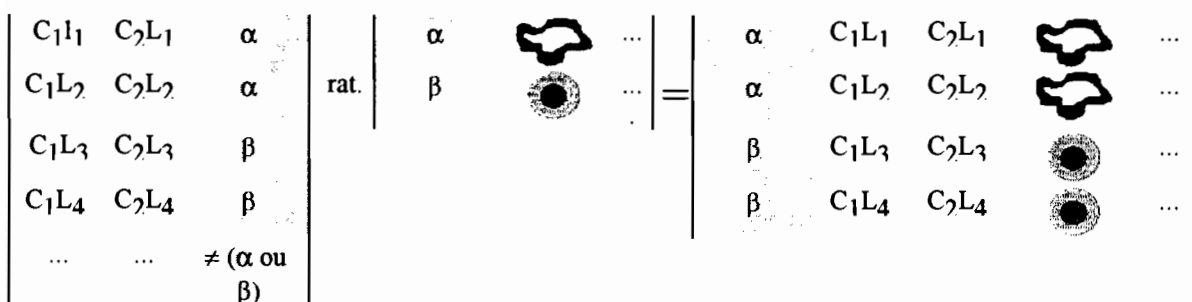


Figure A.2. Exemple de jointure entre tables de données

En pratique, nous avons appliqué ces possibilités de jointures à la liaison d'une table de description de volumes pédologiques de référence à une table de description de sondages.

Dans le même ordre d'idées, il a été également possible de créer des clés de saisie pour certains champs, c'est à dire de préétablir une liste des éléments possibles (glossaires d'aide à la saisie).

Par ailleurs, cet aspect relationnel permet des extractions conditionnelles sur une ou plusieurs variables et sur une ou plusieurs tables de données simultanément. Ceci nous a permis, par exemple, d'effectuer des extractions dites "thématiques" pour une cartographie des sols.

- b) ce SGBD est muni d'un langage de programmation (langage intégré, ou bien routines en Pascal, C++, etc. ..). Ce langage permet d'automatiser les tâches itératives ou les tâches les plus complexes et de créer des interfaces conversationnelles avec l'utilisateur.

ANNEXE C. EXEMPLE DE FICHE DE SAISIE INFORMATISEE DES DONNEES PEDOLOGIQUES

BASES DE DESCRIPTION DE VOLUMES PEDOLOGIQUES

↳ **REFERENTIEL** Pédocomparateur

RATTACHEMENTS

ANALYSES

REQUETES

QUITTER

Centre ORSTOM de Montpellier - U.R. MAP 3D - D. Blavat

Veillez choisir une option à l'aide des flèches de déplacement et Enter
Appuyez sur la touche F10 pour obtenir une note d'information générale

1. Description macromorphologique d'un volume élémentaire de référence

UOE	SYNOPTIQUE	VOLUME	REPERAGE & SOLUM	ETIQUETTE UOL, LIMITES	HUMIDITE + RACINES	STRUCT. POROS. MECAN.	COULEURS PHAS. MEUBLES	TEXT. NAT PHAS. MEUBLES	ELEMENTS GROSSIERS	ELEMENTS FIGURES	TRADUCTION ANALYSES	INTERPRETATIONS	NOM & COMMENTAIRE UOL
			* D *	E M 2 2 E S A	s ?	p d p t a c c n	t l l e 2 4 1 2 P A A A	L L e 2 n e 7 0 A B A	f A N g A P n A R	U M P T A A	L	c	h i B c
F2													
F9													
F10	Aide												

"Loupe" intitulé du champ et contenu :
▶ COULEUR SEC PHASE 1 ◀ (A12)

18YR6/4

<p>INTRODUCTION</p> <p>SEQUENCE : 3</p> <p>POSSE : 5</p> <p>UOLUME : 03</p> <p>29 à 45 c</p> <p>F2</p> <p>F9</p> <p>© ORSTOM 1993</p> <p>F10 = Aide</p>	<p style="text-align: right;">Page 1/8</p> <p>REPERAGE Transect : N° 3 Non : DALIII</p> <p>Profil : N° 5 Nb de volumes :</p> <p>X Y Z surface: X: Y: Z:</p> <p>CARACTERES CONCERNANT LE SOLUM Série de sol : Drainage : Engorgement :</p> <p>ETIQUETTE VOLUME Type observation : FOSSE</p> <p>Observateur : D. B. B. M.</p> <p>Date obs. terrain : 20.04.89</p> <p>Date obs. labo : 21.04.92</p> <p>Type saisie : saisie complète</p> <p>↳ UOLUME source : absent</p> <p>Photographies : pellicule - photo</p> <p>LIMITES sup : 29</p> <p>inf : 45</p> <p>type : ondulés</p> <p>net? : graduelle</p> <p>F10 = Aide Curseur: Fin/Home=EV ←→=champs ↑↓=pages Ctrl↑ Ctrl↓=enreg.</p>
--	---

1. Description macromorphologique d'un volume élémentaire de référence (suite)

DESCRIPTION 1/3		Page 2/8	
SEQUENCE: 3		HUMIDITE	Humidité terrain:sec
FOSSE : 5		RACINES	Abondance :?
VOLUME : 03		TEXTURE	Texture terrain :Las
29 à 45 c		ARCHITECT. DES AGREGATS	1. Structure dominante polyédrique subanguleuse 2. Porosité macroscopique forme pores 1 :tubulaire forme pores 2 :absent nomb. de pores:peu poreux fentes retrait:pas de fentes de retrait
F7		MECANIQUE	1.Pénétrabilité (humide) 2.Cisaillement (sec) compacté non fragile 3. Cimentation du matériau in situ carapacé (ferrug.)
F9		COULEURS	Organisation :tacheté net
© ORSTOM 1993 F10 = Aide Curseur: Fin/Home=BD ←→=champs ↑↓=pages Ctrl↑ Ctrl↓=enreg.			
DESCRIPTION 2/3		Page 3/8	
SEQUENCE: 3		PHASE1	Nature matériau organominéral % : Forme en fond matriciel TNOMB Localis? TextureLimon argilo-sableux Coul terrain Coul humide Coul sec 10YR6/4
FOSSE : 5		PHASE2	Nature matériau minéral % : Forme en volumes isolés PEU Localis? Texturenon différent de 1 Coul terrain Coul humide Coul sec 2.5YR4/8
VOLUME : 03		PHASE3	Nature Absent % : Forme Absent AUCUN LocalisAbsent TextureAbsent Coul terrain Coul humide Coul sec Absent
29 à 45 c		© ORSTOM 1993 F10 = Aide Curseur: Fin/Home=BD ←→=champs ↑↓=pages Ctrl↑ Ctrl↓=enreg.	
DESCRIPTION 3/3		Page 4/8	
SEQUENCE: 3		ELEMENTS GROSSIERS	
FOSSE : 5		1:fragments de carapace	x 1 :NOMBREcortex1Absent
VOLUME : 03		2:graviers de quartz "sain"	x 2 :PEU cortex2Absent
29 à 45 c		3:nodules/concr. rouges	x 3 :RARE cortex3Absent
F7		ELEMENTS FIGURES	
F9		1:Volumés diffus Fe/Mn	x 1 =MIN
		2:Paillettes muscovite	x 2 =TRARE
		3:Absent	x 3 =AUCUN
© ORSTOM 1993 F10 = Aide Curseur: Fin/Home=BD ←→=champs ↑↓=pages Ctrl↑ Ctrl↓=enreg.			

1. Description macromorphologique d'un volume élémentaire de référence (suite)

ANALYSES VOLUME		Page 5/8	
SEQUENCE: 3		GRANULOMETRIE	
FOSSE : 5		REPUS > 2000 µ :	42.1
VOLUME : 03		ARGILE B-2 µ :	31.15
29 à 45 c		LIMON TOTAL 2-50 µ :	6.24
		SABLE TOTAL 50-2000 µ :	162.82
		C.E.C pour 100 g d :	13.996*
		MAT. ORGANIQUE	
		Mat org % :	1.02
		Azote % :	.52
		C/N :	11.35
		pH	
		pH eau :	5.07
		KCl :	4.03
		pH 3.0 :	
		14.82 :	2.5 :
		16.23 :	
		FE203 %	
		Total :	3.9
		libra :	2.98
		lib/tot :	76.41*
		Bases	
		Ca :	1.27
		Mg :	.1
		K :	.21
		Na :	.06
		Total :	1.64
		CEC :	4.36
		S/T :	37.61
		ECH 101% :	8.67265*
		MINERA-LOGIE	
		Type d'argile :	
		Type de fer :	
		e ORSTOM 1993	
		F10 = Aide Curseur: Fin/Home=BD <=>=champs ↑↓=pages Ctrl↑ Ctrl↓=enreg.	
TRADUCTIONS		Page 6/8	
SEQUENCE: 3		Analyses Argile :	31.15
FOSSE : 5		granulo. : Limon total :	6.24
VOLUME : 03		Sable total :	62.82
29 à 45 c		↳ Texture USDA : Limon argilo-sableux	
		MATIERE ORGANIQUE	
		Analyses : MO % :	1.02
		C/N :	11.35
		↳ Type humus :	null
		GEOCHIMIE	
		Type argile :	
		Type Per :	
		↳ argilogén. :	
		↳ évol géoch. :	
		↳ Type géoch. :	
		COULEURS DES PHASES	
		Coul phas 1 brun jaunâtre clair :	×:INOMB
		Coul phas 2 rouge :	×:PEU
		Coul phas 3 :	×:AUCUN
		↳ Interprét. :	
		e ORSTOM 1993	
		F10 = Aide Curseur: Fin/Home=BD <=>=champs ↑↓=pages Ctrl↑ Ctrl↓=enreg.	
DIAGNOSTIQUE		Page 7/8	
SEQUENCE: 3		2 Type d'hydromorphie identifié	
FOSSE : 5		3 Origine du matériau	
VOLUME : 03		colluvial et/ou autochtone	
29 à 45 c		4. Processus généraux	
		Processus 1	
		Processus 2	
		Processus 3	
		Processus 4	
		SYNTHESE TYPOLOGIE	
		Appellation générique	
		horizon pétroplinthique	
		Nomenclature RPF 1988	
		Pos Type Suf1 Suf2	
		1 B/E cn -	
		Diagnostiques FAO et ORSTOM	
		HZ diag FAO	
		caractère FAO	
		HZ Diag ORSTOM	
		carac.1 ORSTOM	
		carac.2 ORSTOM	
		e ORSTOM 1993	
		F10 = Aide Curseur: Fin/Home=BD <=>=champs ↑↓=pages Ctrl↑ Ctrl↓=enreg.	

1. Description macromorphologique d'un volume élémentaire de référence (suite)

Page 8/8

COMMENTAIRE SEQUENCE: 3 FOSSE : 5 VOLUME : 03 29 à 45 c	COMMENT. LIBRE SUR LE VOLUME 255 carac. maximum
--	---

Paiblement carapacé en sec.

F2
 F9 Edition

© ORSTOM 1993
 F10 = Aide Curseur: Fin/Home=BD ←↔=champs ↑↓=pages Ctrl↑ Ctrl↓=enreg.

2. Données physico-chimiques sur un volume élémentaire de référence

PgUp

Limites (cm) :	29 45	pH	pH eau	RC1	pF	pF 3.0:	2.5:
			5.07	4.03		14.82	16.23

MAT. ORGANIQUE		PHOSPHORE		FER	
Mat org %:	1.02	P205 %	bilan%	P203 %	bilan%
Acide %:	.52	total	ass	total	libre
C/N:	11.35	.34	.05	14.70*	lib/tot
				3.9	2.98
					76.41*

GRANULOMETRIE		CATIONS		
ARGILE > 2000 µ:	42.1	BASES	ECH.	TOT.
ARGILE 0-2 µ:	31.15	meq/100 g		
LIMON TOTAL 2-50 µ:	6.24	Ca	1.27	3.57
SABLE TOTAL 50-2000 µ:	62.82	Mg	.1	4.08
Lf :	3.66	K	.21	2.05
Lg :	2.58	Na	.06	9.21
Lf :	21.1	Total	1.64	18.91
Lg :	41.72	CEC	4.36	ECH/TOT%:
		S/T:	37.61	8.67265*
C.E.C pour 100 g A:13.996*				

ESC Quitte Edite Aide PgDn

3. Description de volumes élémentaires par rattachement à des volumes de référence

Typ.OBS	CodeUOL	Limites sup/inf	REFERENCE
SONDAGE -150 -180 413.72	A19H01	0 / 10	-02H01
SONDAGE -150 -180 413.72	A19H02	10 / 40	-02H02
SONDAGE -150 -180 413.72	A19H03	40 / 160	03H04
SONDAGE -150 -180 413.72	A19H04	160 / 300	03H05
SONDAGE -150 -150 414.72	A20H01	0 / 10	-02H02
SONDAGE -150 -150 414.72	A20H02	10 / 80	-06H02
SONDAGE -150 -150 414.72	A20H03	80 / 270	-01H05
SONDAGE -150 -150 414.72	A20H04	270 / 300	-02H07
SONDAGE -150 -120 416.39	A21H01	0 / 10	-01H01
SONDAGE -150 -120 416.39	A21H02	10 / 50	-01H02

ESC QuitteSauve Ctrl UueReference Edite Aide

ANNEXE D. CODAGE NUMÉRIQUE DES VARIABLES DESCRIPTIVES DES VOLUMES PÉDOLOGIQUES

Les variables utilisées pour décrire la morphologie des volumes élémentaires de résolution (v.e.r.) sont alphanumériques. Or, certains traitements de l'information nécessitent des données purement numériques, en particulier les regroupements numériques de v.e.r., qui se basent sur la mesure des distances mathématiques entre ces volumes. Ceci nous a conduit à effectuer un codage qui consiste à traduire chaque v.e.r en un vecteur de composition numérique $V_i(v_1, \dots, v_n)$.

Pour effectuer ce codage, 3 groupes de variables alphanumériques ont été distingués, selon les transformations qu'il était possible d'appliquer (cf. tableau A.4) :

- 1°) des variables transformables en variables ordonnées et bornées par deux extrêmes connus (texture, porosité, nature et abondance des éléments grossiers et figurés, couleur et abondance des phases meubles). Les transformations appliquées à ces variables ont nécessité un calage sur des mesures de laboratoire. Le codage final obtenu est une quantification entre 0 et 100.

- 2°) des variables transformables en variables ordonnées mais non bornées par des valeurs extrêmes (cimentation du matériau, pénétrabilité, fragilité, netteté des limites inférieures des v.e.r.). Une disjonction des modalités en terme de présence/absence a permis d'obtenir un codage final booléen (0 ou 100).

- 3°) enfin, des variables non transformables en variables ordonnées (fissuration, structure, forme des limites). Comme pour le groupe précédent de variables, une disjonction des modalités a permis d'obtenir un codage final booléen (0 ou 100).

Le codage numérique a donc permis d'obtenir un tableau de valeurs numériques comprises entre 0 et 100. Par rapport à un codage disjonctif complet en terme de présence ou absence de chaque modalité (0 ou 100), l'avantage de ce type de codage est qu'il réduit au minimum le nombre de variables numériques finales.

Par ailleurs, il reste homogène. En effet, selon le point de vue duquel on se place, un tel codage fournit :

- un tableau de mesures dans lequel certaines mesures ne prennent que les valeurs extrêmes (respectivement 0 et 100);

- un tableau logique de "présence-absence" de type booléen assoupli, dans lequel intervient le concept de "degré de présence", analogue au concept utilisé en logique floue de "degré d'appartenance à un ensemble" (ZADEH, 1965, in BOUCHON-MEUNIER, 1992).

Quel que soit le point de vue adopté, un tel codage peut notamment servir de base pour le calcul de distances mathématiques entre les v.e.r., puis à la classification de ceux-ci selon différentes méthodes numériques.

Variables alphanumériques	Mode de codage initial	Possibilité de transformation	Opérations de codage	Codage final
Texture	Variables combinées	variables ordonnées et bornées.	Disjonction des variables Quantification après calage sur mesures de laboratoire	0 à 100
Porosité	Variable simple		Quantification après calage sur mesures de laboratoire	
Nature et abondance des éléments grossiers et figurés	Associations d'une variable simple et d'une échelle de quantification		Disjonction des modalités Quantification après calage de l'échelle	
Couleur et abondance des phases meubles	Associations de variables combinées et d'une échelle de quantification		Disjonction des variables Disjonction des modalités Quantification après calage de l'échelle	
Cimentation du matériau, pénétrabilité; fragilité; netteté des limites	Variables simples	variables ordonnées et non bornées.	Disjonction des modalités	Présence/absence (0 ou 100)
Fissuration; structure; forme des limites		non ordonnables.		

Tableau A.4. Codage des variables alphanumériques.

Les paragraphes suivants fournissent le détail des opérations de codage effectuées. En pratique, ces opérations ont été automatisées à l'aide d'un module informatique écrit pour notre base de données pédologiques.

D.1. Codage numérique de la texture.

Les codes alphanumériques utilisés sur le terrain sont les suivants :

A Al La As L Las Ls Sa Sl S

Ces codes représentent une combinaison de deux variables indépendantes et ordonnables (par exemple les teneurs en argile et en sable). Nous avons donc pu procéder à une disjonction de ces codes initiaux en deux variables indépendantes.

variable texture terrain → variable Argile + variable Sable

Ces variables indépendantes étant bornées par des extrêmes théoriques connus (0 pour absence et 100 pour unicité), une codification ordonnée entre 0 et 100 a été obtenue après calage sur des données de laboratoire. Ce calage a été effectué en se basant sur 86 v.e.r. pour lesquels nous disposons à la fois de la description de terrain et de l'analyse granulométrique. Chaque classe de texture a été associée aux valeurs moyennes des teneurs en argile et en sable correspondantes (valeurs quasiment confondues dans ce cas aux valeurs médianes).

La figure A.3 traduit la correspondance entre l'ordre de grandeur fourni par l'estimation de terrain ainsi calée, et les analyses granulométriques de laboratoire. Elle montre que les textures considérées comme "équilibrées" par l'observateur (code Las) présentent en réalité une assez forte variabilité (écart type pour les teneurs en argile et en sable, respectivement, de 5 et

6.5 pour-cent du matériau), et qu'un volume pédologique placé dans une classe granulométrique pourrait aussi être classé dans la classe granulométrique voisine. Toutefois, l'échelle de terrain fournit un ordre cohérent par rapport à l'analyse de laboratoire.

Le codage numérique final est présenté au tableau A.5.

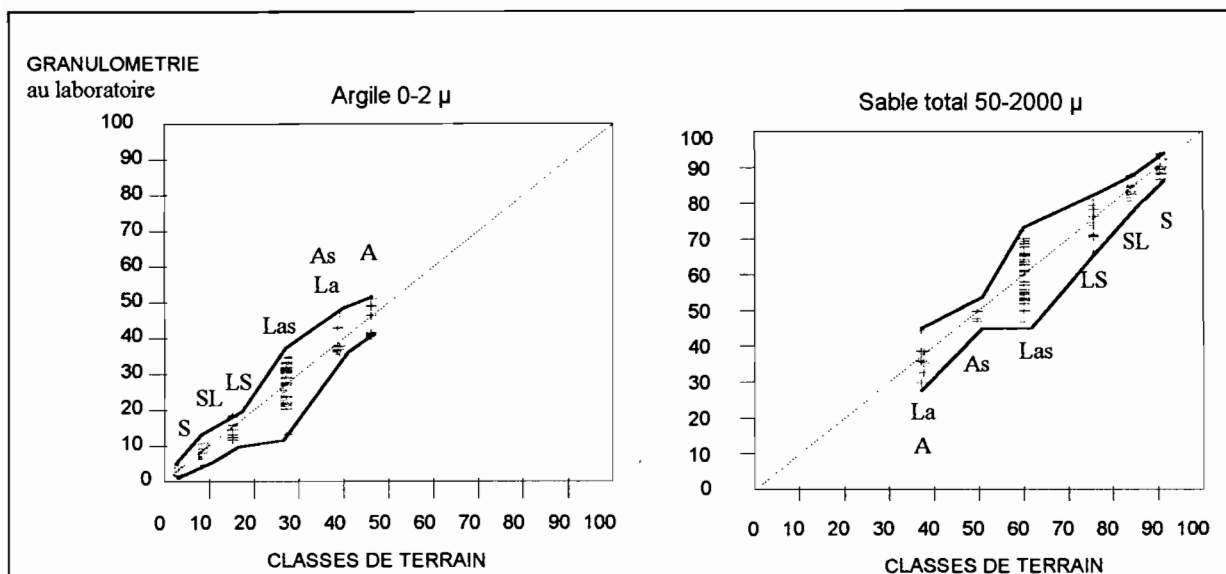


Figure A.3. Correspondance entre analyse granulométrique de laboratoire et codage de terrain.

Code initial terrain texture	Codage numérique argile	Codage numérique sable	Méthode
A	46.0	37.0	moyenne labo
Al	39.0	37.5	interpolation
La	39.0	37.5	moyenne labo
As	38.5	49.5	moyenne labo
L	32.5	37.5	interpolation
Las	27.0	60.0	moyenne labo
Ls	15.0	75.5	moyenne labo
Sa	13.5	80.0	interpolation
Sl	8.5	84.0	moyenne labo
S	3.0	90.5	moyenne labo

Tableau A.5. Codage numérique de la texture

D.2. Codage numérique de la porosité.

La porosité estimée sur le terrain a été affectée des modalités "très peu poreux" à "très poreux". Il s'agit d'une variable ordonnable et bornée par des extrêmes théoriques connus (absence de pores et absence de sol). Comme pour la texture, une codification ordonnée entre 0 et 100 est donc théoriquement possible après calage sur des données de laboratoire.

L'expérience a cependant montré l'impossibilité d'un tel calage (cf. tableau A.6). En effet, l'ordre des estimations de terrain s'avère en totale discordance par rapport à celui de mesures de laboratoire effectuées sur mottes de terre (BLAVET et FARDOUX, 1993) pour un ensemble de 86 v.e.r., et par la méthode du cylindre pour un ensemble de 57 v.e.r.. Cette discordance d'ordre est vraisemblablement liée au fait que l'estimation de terrain est basée sur la seule porosité visible à l'oeil nu. Le codage de la porosité estimée sur le terrain a donc été abandonné.

Estimation de terrain de la porosité	Méthode au pétrole (moyenne 86 échantillons)	Méthode au cylindre (moyenne 57 échantillons)
peu poreux	39.57	32.29
poreux	41.81	37.29
très poreux	38.18	34.92

Tableau A.6. Discordance d'ordre entre l'estimation de la porosité sur le terrain et les mesures de laboratoire.

D.3. Codage numérique de la nature et de l'abondance des éléments grossiers.

Ce groupe de variable associe les descripteurs de la nature des éléments grossiers et des éléments figurés à une échelle de quantification de terrain. Il a été possible de les transformer en variables numériques, bien que les opérations de codage aient été ici un peu plus complexes que pour la texture et la porosité.

Les fiches de description informatisées que nous avons utilisées (cf. annexe C) prévoient 3 types possibles d'éléments grossiers et 3 types d'éléments figurés pour chaque v.e.r. Dans un premier temps, une transformation de variables a été effectuée en disjoignant en terme de présence absence les modalités et en regroupant les variables initiales 3 à 3, de la façon suivante :

$$\begin{array}{rcccl}
 & & & & \text{mod } 1 & \dots & \text{mod } i & \dots & \text{mod } j & \dots & \text{mod } k & \dots & \text{mod } n \\
 & & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & & & & & + & & & & \\
 \text{EG1 ou EF1} & \text{EG2 ou EF2} & \text{EG3 ou EF3} & \rightarrow & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \text{mod } i & \text{mod } j & \text{mod } k & & & & + & & & & & & \\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 & & & & \hline
 & & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0
 \end{array}$$

Puis, nous avons quantifié chaque variable finale en fonction d'un codage numérique de l'échelle de terrain.

Pour coder numériquement cette échelle, nous avons comparé notre estimation de terrain aux taux de refus à l'analyse granulométrique sur 86 v.e.r.. A partir du jeu de données de terrain, nous avons calculé, pour chaque v.e.r., les effectifs des classes de pourcentage des différents types d'éléments grossiers. Nous avons obtenu ainsi une matrice d'effectifs présentant, en colonne, les 10 classes de quantification (AUCUN, RARE; ..., UNIQUE) et chaque v.e.r. en ligne.

Par suite, nous avons déterminé les 10 coefficients (C1 à C10) qui permettent d'obtenir, par combinaison linéaire des éléments de cette matrice, la matrice à une colonne (α, \dots, β) des pourcentages totaux d'éléments grossiers obtenus par l'analyse de laboratoire. Ces 10 coefficients correspondent aux valeurs moyennes optimales de chaque classe de l'échelle de terrain :

	AUCUN	TRARE	RARE	PEU	MIN	ASSEZ	NOMBRE	TNOMB	MAJOR	UNIQUE	Σ éléments grossiers
v.e.r.1	C1×0+	C2×0+	C3×1+	C4×0+	C5×0+	C6×1+	C7×1+	C8×0+	C9×0+	C10×0=	α
...
v.e.r.n	C1×0+	C2×0+	C3×0+	C4×0+	C5×2+	C6×0+	C7×1+	C8×0+	C9×0+	C1×10=	β

En pratique, nous avons déterminé ces 10 coefficients de deux manière, à l'aide d'un tableur du commerce : par régression linéaire multiple et par résolution matricielle d'un système de 10 équations à 10 inconnues obtenu en regroupant les 86 échantillons en 10 ensembles. Ces deux déterminations ont donné des résultats sensiblement similaires, et proches des valeurs prévues par l'échelle de terrain. Les correspondances établies sont présentées au tableau A.7.

Echelle de terrain	Classe de pourcentage	Codage numérique
AUCUN	0 %	0
TRARE	0-1 %	1
RARE	1-5 %	6
PEU	5-15 %	15
MIN	15-30 %	25
ASSEZ	30-50 %	35
NOMBRE	50-75 %	50
TNOMB	75-95 %	70
MAJOR	95-100 %	90
UNIQUE	100 %	100

Tableau A.7. Codage numérique de l'échelle de quantification des éléments grossiers.

Si l'on compare (cf. figure A.4) les valeurs obtenues à partir du codage numérique final et les taux moyens d'éléments grossiers obtenus par l'analyse pour chacune de ces valeurs (soit 3 à 4 valeurs de refus pour un code numérique de terrain donné), on peut dire que l'estimation de terrain est significativement corrélée (à 99 chances sur 100) à l'analyse de laboratoire ($r = 0.74$ pour 29 couples de valeur; r_c critique inférieur à 0.487 à ce seuil de probabilité). De plus, on pourra noter que si l'échelle de terrain est forcément moins précise que l'analyse granulométrique des refus, elle reste plus sélective. En effet, en spécifiant la nature des éléments grossiers, l'observateur écarte systématiquement les agrégats de terre s'indurant assez fortement après dessèchement, lesquels peuvent en revanche échapper au broyage. (A posteriori, nous estimons qu'une réhumectation des agrégats avant le broyage de certains matériaux destinés à l'analyse aurait permis d'obtenir une meilleure correspondance entre l'estimation de terrain et la mesure au laboratoire).

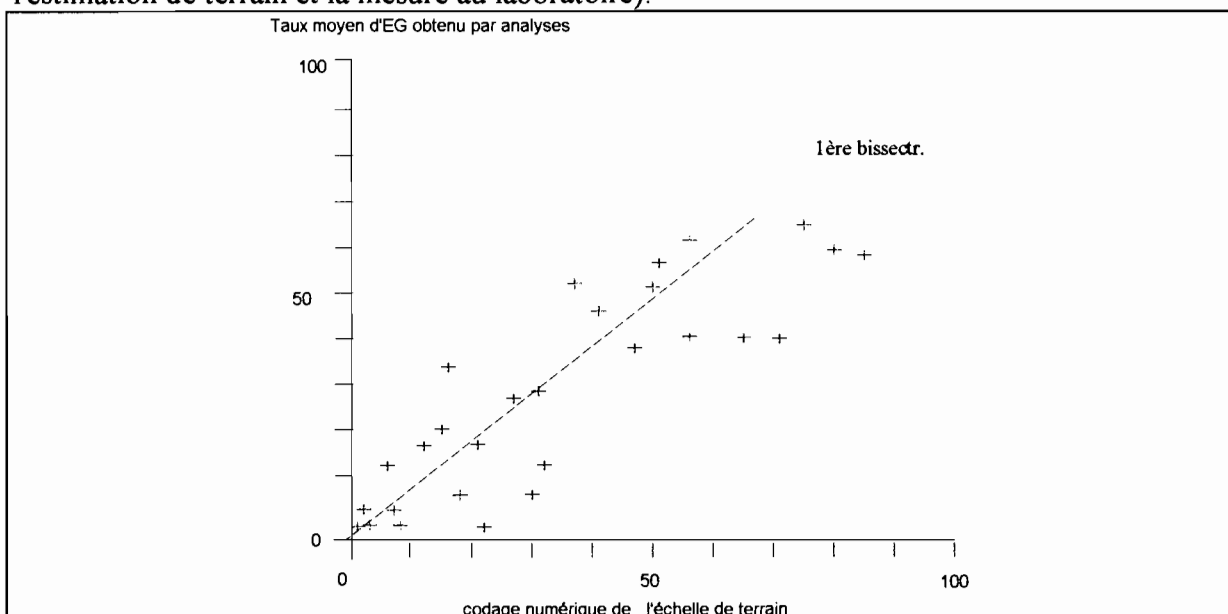


Figure A.4. Relation entre le codage de la quantité d'éléments grossiers par l'échelle de terrain et les analyses de laboratoire.

D.4. Codage numérique de la nature et de l'abondance des éléments figurés.

Contrairement aux éléments grossiers, les éléments figurés reconnus sur le terrain (volumes ferro-manganésifères, revêtements argileux, ..) n'ont pas fait l'objet de quantification au laboratoire. Toutefois, nous avons admis que l'observateur évalue sensiblement les quantités de ces éléments de la même manière que pour les éléments grossiers. Un codage analogue à celui des éléments grossiers a été finalement appliqué.

D.5. Codage numérique de la couleur et de l'abondance des phases meubles.

Ce groupe de variables est peu différent, dans sa structure, du groupe de variables concernant les éléments grossiers et les éléments figurés : les fiches de description informatisées prévoient 3 types possibles de phases meubles, caractérisées notamment par une couleur Munsell. Chacune de ces phases est par ailleurs quantifiée par une échelle de terrain. Nous avons donc pu effectuer, comme pour les éléments grossiers, une transformation de variables par disjonction en terme de présence des modalités et par regroupement des variables initiales 3 à 3. Puis, nous avons quantifié chaque variable finale en fonction du codage numérique de l'échelle de terrain.

Toutefois, afin de ne pas multiplier le nombre de variables de couleurs (plus de 60 couleurs différentes ont été relevées pour les différents volumes pédologiques), les codes de couleurs Munsell ont d'abord été dissociés selon leurs trois composantes (teinte, clarté, chroma)

Pour coder numériquement l'échelle de quantification de terrain, nous avons d'abord choisi de retenir les valeurs centrales des classes de pourcentage prévues par cette échelle. Mais en sommant les quantités des différentes phases meubles obtenues pour chacun des v.e.r. de référence, nous avons constaté (cf. figure A.5 a) que ce choix provoquait, en moyenne, une sous-estimation de 10 % du total théorique (100 %) des pourcentages de phases. Ce premier codage a donc été suivi d'une correction sur le poids respectif de chaque classe. Pour cela, nous avons employé la méthode suivante : nous avons assimilé les 10 inconnues que représentent les quantificateurs de l'échelle de terrain aux coefficients d'un polynôme du premier degré dans lequel les termes constants sont déterminés par la somme des effectifs pour l'ensemble des v.e.r. La somme a été forcée à $n \times 100$, avec n = nombre de v.e.r..

$$(AUCUN) \cdot \sum_1^n \text{effectifs } AUCUN+.. + (ASSEZ) \cdot \sum_1^n \text{effectifs } ASSEZ+.. + (UNIQUE) \cdot \sum_1^n \text{effectifs } UNIQUE = \sum_1^n 100$$

Nous avons imposé comme contraintes supplémentaires l'appartenance de ces coefficients aux intervalles définis par les bornes des classes de l'échelle d'appréciation (avec égalité des classes extrêmes à 0 ou 100). Une optimisation a alors été effectuée, à l'aide d'un tableur du commerce (recherche des solutions par méthode de NEWTON).

Cette optimisation (cf. figure A.5 b) a permis de recentrer les sommes de phases meubles pour chaque v.e.r. autour de la valeur théorique. On constate que ceci a également symétrisé la dispersion des sommes réelles par rapport à la somme théorique. Le coefficient de variation de ces sommes (17 %), légèrement inférieur au cv obtenu initialement (18 %), traduit en fait les fluctuations d'appréciation de l'observateur.

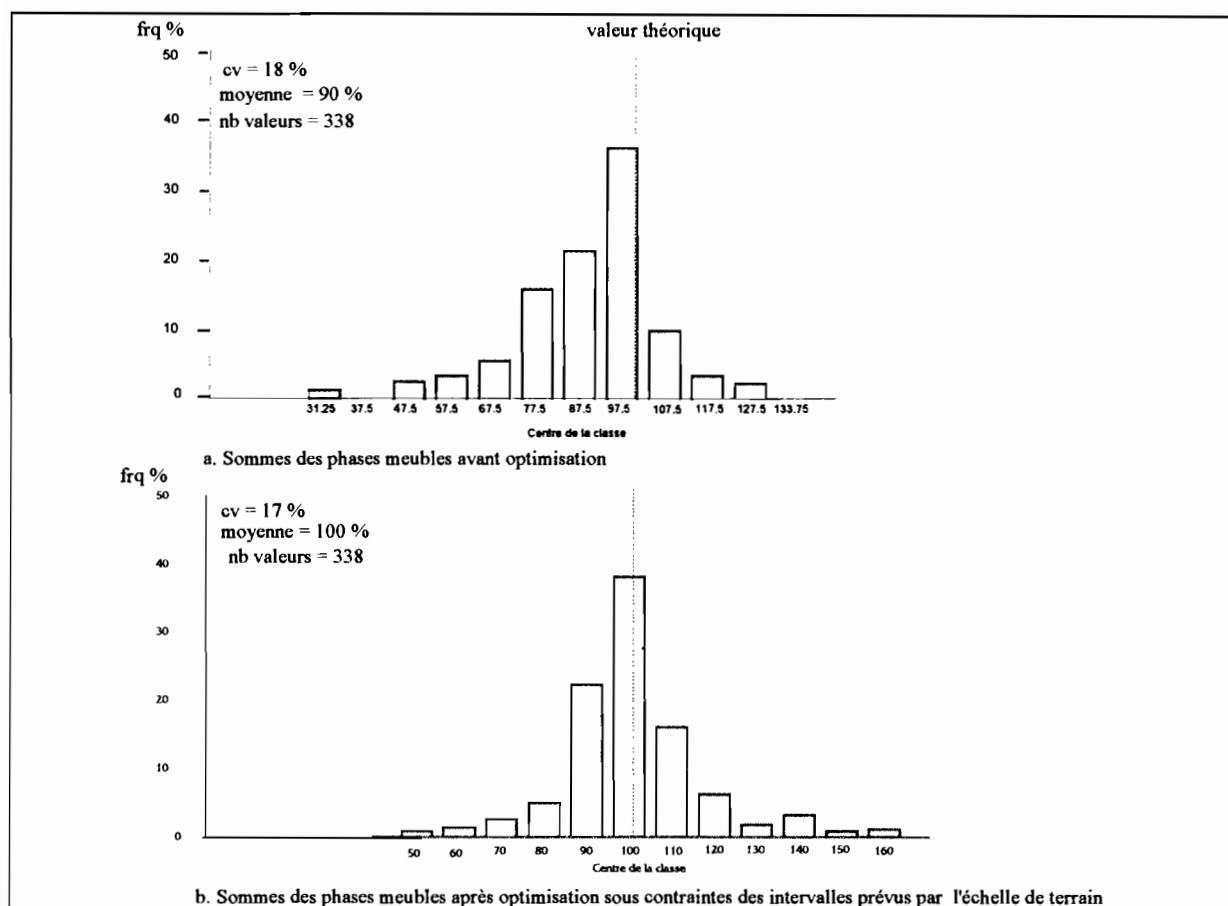


Figure A.5. Optimisation du codage numérique de l'échelle de quantification des phases meubles.

Le codage numérique final de l'échelle de terrain d'abondance des phases meubles est présenté au tableau A.8.

Echelle de terrain phases meubles	Classe de pourcentage	Centre de classe (codage avant optimisation)	Codage numérique final
AUCUN	0 %	0	0
TRARE	0-1 %	0.05	1
RARE	1-5 %	3	5
PEU	5-15 %	10	15
MIN	15-30 %	22.5	30
ASSEZ	30-50 %	40	45
NOMBRE	50-75 %	62.5	75
TNOMB	75-95 %	85	84.3
MAJOR	95-100 %	97.5	97.5
UNIQUE	100 %	100	100

Tableau A.8. Codage numérique de l'échelle de quantification des phases meubles

Enfin, les quantifications codées numériquement ont été pondérées v.e.r. par v.e.r. de façon à obtenir la valeur somme théorique de 100 %, en admettant implicitement que les erreurs d'appréciation sont uniformément réparties sur chacune des phases, c'est à dire que les proportions relatives de ces phases sont correctement appréciées par l'observateur.

D.6. Codage numérique de la cimentation, de la pénétrabilité et de la fragilité du matériau.

Ces variables ont été codées sur le terrain à l'aide d'une échelle de quantification relative. On pourrait à priori traduire cet ordre selon une codification numérique. Toutefois, les extrêmes restent inconnus et un calage sur des mesures de laboratoire n'est pas possible dans notre cas. Nous avons donc disjoint totalement les modalités de ces variables en terme de présence/absence des modalités (0 ou 100).

D.7. Codage numérique de la structure et de la fissuration.

Ces variables ne sont pas ordonnables. Elles ont nécessité une disjonction complète des modalités en terme de présence/absence (0 ou 100).

D.8. Codage numérique de la forme et de la netteté des limites inférieures des v.e.r.

Ces variables nécessitent en théorie une disjonction complète des modalités en terme de présence/absence. En pratique elles sont incomplètes, car, n'ayant pu atteindre la roche mère, on ne possède pas cette information pour le v.e.r. de profondeur. Nous avons donc préféré ne pas tenir compte de ces variables (pour une classification numérique, l'ensemble des autres variables est apparu suffisamment discriminant).

ANNEXE E. ESPACE COLORIMÉTRIQUE MUNSELL ET QUANTIFICATION DES TEINTES.

L'espace colorimétrique Munsell (cf. figure A.6) est un espace cylindrique (ESCADAFAL et al., 1988; TORRENT et BARRON, 1993). Dans cet espace, les teintes se projettent sur un cercle (cf. figure A.7) : elles se répartissent en 10 secteurs de $2\pi/10$ radians (36 degrés) qui sont désignés par un indice principal de teinte (de R à PR). La position d'une teinte sur un de ces secteurs du cercle est précisée à l'aide d'une échelle numérique secondaire (0 en début de secteur à 10 en fin de secteur).

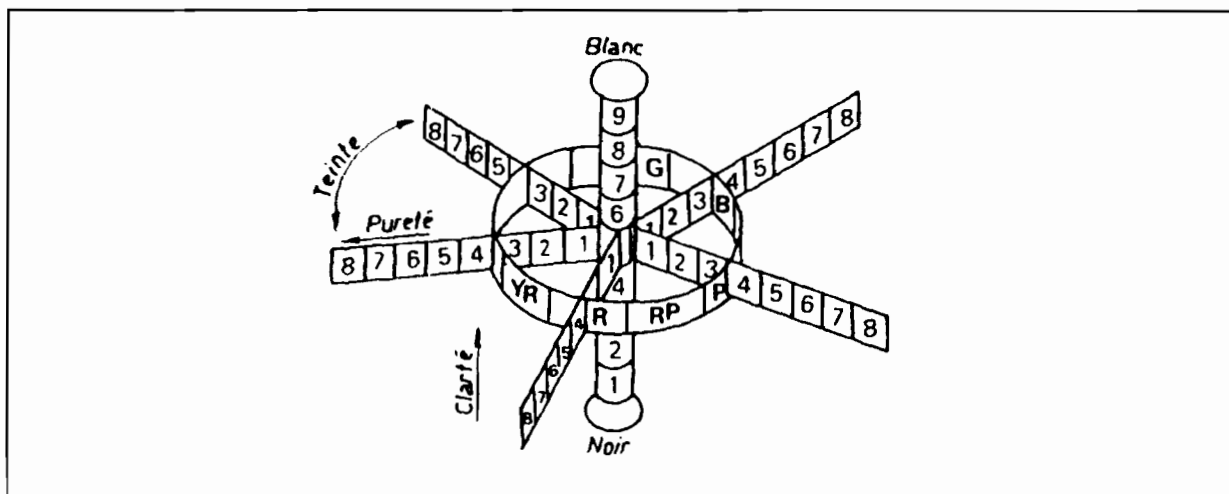


Figure A.6. L'espace des couleurs Munsell et ses coordonnées cylindriques. D'après ESCADAFAL et al., 1988.

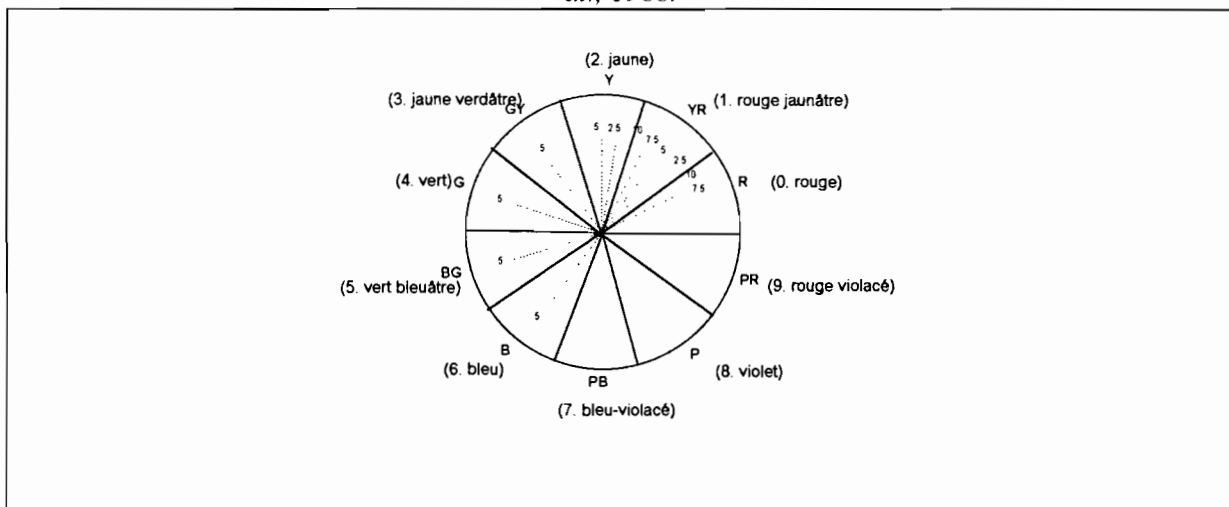


Figure A.7. Répartition des teintes Munsell sur le cercle colorimétrique.

On peut donc affecter à chaque teinte munsell une valeur d'angle H :

$$H \text{ (en degrés)} = 36 \cdot \left(n + \frac{I_{\text{teinte}}}{10} \right)$$

où n = entier fonction de l'indice principal de teinte.

I_{teinte} = échelle numérique secondaire de teinte (0 à 10)

En posant , par convention, $H = 0$ pour la teinte 10 PR, n se définit comme suit :

Indice principal de teinte	n
R	0
YR	1
Y	2
GY	3
G	4
BG	5
B	6
PB	7
P	8
PR	9

On obtient alors, pour les teintes munsell courantes, la correspondance suivante :

Teinte Munsell	H angulaire (en degrés)
7.5 R	27
10 R	36
2.5 YR	45
5 YR	54
7.5 YR	63
10 YR	72
2.5 Y	81
5 Y	90
5 GY	126
5 G	162
5 B	234

ANNEXE F. PHYSICO-CHEMIE DES PRINCIPAUX HORIZONS (*)

Nb : Les valeurs fournies dans les tableaux suivants correspondent à des moyennes sur plusieurs échantillons). Sauf précisions, elles correspondent à l'analyse de la fraction 0-2000 μ .

HORIZON	A cn	A	E	E a	B cn d	B s m	B s	S s	I SC s	II SC s	III SC s	S g	G	X cn	X u	I A b	II A b
nb. ech.	13	8	6	7	2	6	6	1	3	12	3	5	4	4	2	1	2

HORIZON	M.O		
	M.O %	Azote %	C/N
A cn	1.1	0.5	13.3
A	0.8	0.3	15.2
E	0.4	0.2	11.5
E a	0.2	0.1	9.2
B cn d	0.6	0.4	9.6
B s m	0.6	0.4	9.1
B s	0.4	0.3	7.1
S s	0.4	0.3	7.6
I SC s	0.2	0.2	4.6
II SC s	0.1	0.2	4.0
III SC s	0.2	0.2	5.9
S g	0.1	0.2	3.0
G	0.1	0.1	5.2
X cn	0.2	0.2	6.2
X u	0.1	0.2	4.0
I A b	0.5	0.2	20.9
II A b	0.2	0.1	12.1

HORIZON	GRANULO.		
	0-2 μ	200-2000 μ	> 2000 μ
A cn	15.3	77.3	26.7
A	5.0	87.8	5.7
E	11.9	80.4	8.7
E a	5.6	86.9	4.1
B cn d	30.0	58.3	38.5
B s m	26.1	63.5	47.7
B s	34.4	53.1	32.6
S s	33.3	50.0	40.2
I SC s	29.4	54.6	14.0
II SC s	28.4	57.1	18.7
III SC s	31.7	52.0	6.4
S g	35.4	43.8	17.8
G	41.4	42.0	20.5
X cn	23.9	63.7	59.5
X u	28.3	61.6	55.6
I A b	14.5	70.7	3.1
II A b	8.9	83.3	3.0

HORIZON	Masse vol. Porosité	
	mottes	mottes
A cn	1.9	46.4
A	1.7	43.5
E	1.7	40.8
E a	1.8	35.2
B cn d	1.8	42.6
B s m	1.9	37.5
B s	1.9	39.8
S s	1.8	39.1
I SC s	1.7	44.9
II SC s	1.8	43.1
III SC s	1.7	40.1
S g	1.8	40.3
G	2.0	34.5
X cn	2.2	27.6
X u	2.1	23.8
I A b	1.9	32.6
II A b	1.8	35.9

HORIZON	pF	
	2,5	3,0
A cn	9.9	8.2
A	4.7	3.7
E	8.0	6.8
E a	4.5	3.5
B cn d	18.3	16.6
B s m	19.4	17.1
B s	24.2	21.4
S s	29.1	24.8
I SC s	31.2	23.4
II SC s	28.6	24.4
III SC s	28.4	24.3
S g	35.8	31.2
G	26.0	21.9
X cn	16.1	14.0
X u	18.2	15.9
I A b	11.5	8.7
II A b	6.8	5.2

HORIZON	pH	
	eau	KCl
A cn	5.7	4.7
A	6.0	4.8
E	5.9	4.6
E a	6.4	4.9
B cn d	5.2	4.3
B s m	5.5	4.4
B s	5.4	4.4
S s	5.7	4.9
I SC s	5.6	4.4
II SC s	5.6	4.2
III SC s	5.6	4.2
S g	5.9	4.9
G	6.4	4.7
X cn	5.7	4.8
X u	5.9	4.7
I A b	6.6	4.8
II A b	6.8	5.1

(*) Les méthodes d'analyse sont précisées au chapitre 4.1.

HORIZON	BASES (meq/100 g)							
	Ca		Mg		K		Na	
	total	ech	total	ech	total	ech	total	ech
A cn	6.6	1.7	4.3	0.4	2.4	0.2	8.6	0.1
A	5.4	0.8	1.4	0.1	1.5	0.2	12.3	0.0
E	6.3	0.8	38.7	0.1	2.3	0.1	11.7	0.0
E a	9.6	1.7	9.0	0.9	1.5	0.2	13.0	0.1
B cn d	11.3	1.7	8.3	0.2	3.3	0.2	8.3	0.1
B s m	5.4	1.5	2.2	0.2	3.7	0.2	8.4	0.1
B s	5.1	1.7	4.0	0.5	4.2	0.2	7.7	0.1
S s	6.9	3.0	3.3	0.8	3.8	0.2	7.5	0.1
I SC s	6.7	2.7	1.8	0.5	3.1	0.2	8.5	0.1
II SC s	5.3	1.8	3.9	0.3	3.5	0.2	8.0	0.1
III SC s	5.5	2.1	3.6	1.2	4.0	0.2	9.6	0.1
S g	4.7	2.1	2.4	1.1	4.5	0.2	11.3	0.1
G	14.4	7.1	9.0	2.9	5.7	0.4	6.6	0.2
X cn	4.7	1.1	5.4	0.3	3.5	0.2	10.6	0.0
X u	4.0	1.9	10.1	0.7	3.1	0.2	9.0	0.1
I A b	4.5	3.3	3.5	2.6	3.4	0.2	7.2	0.1
II A b	5.4	4.6	1.0	2.0	1.7	0.3	11.9	0.1

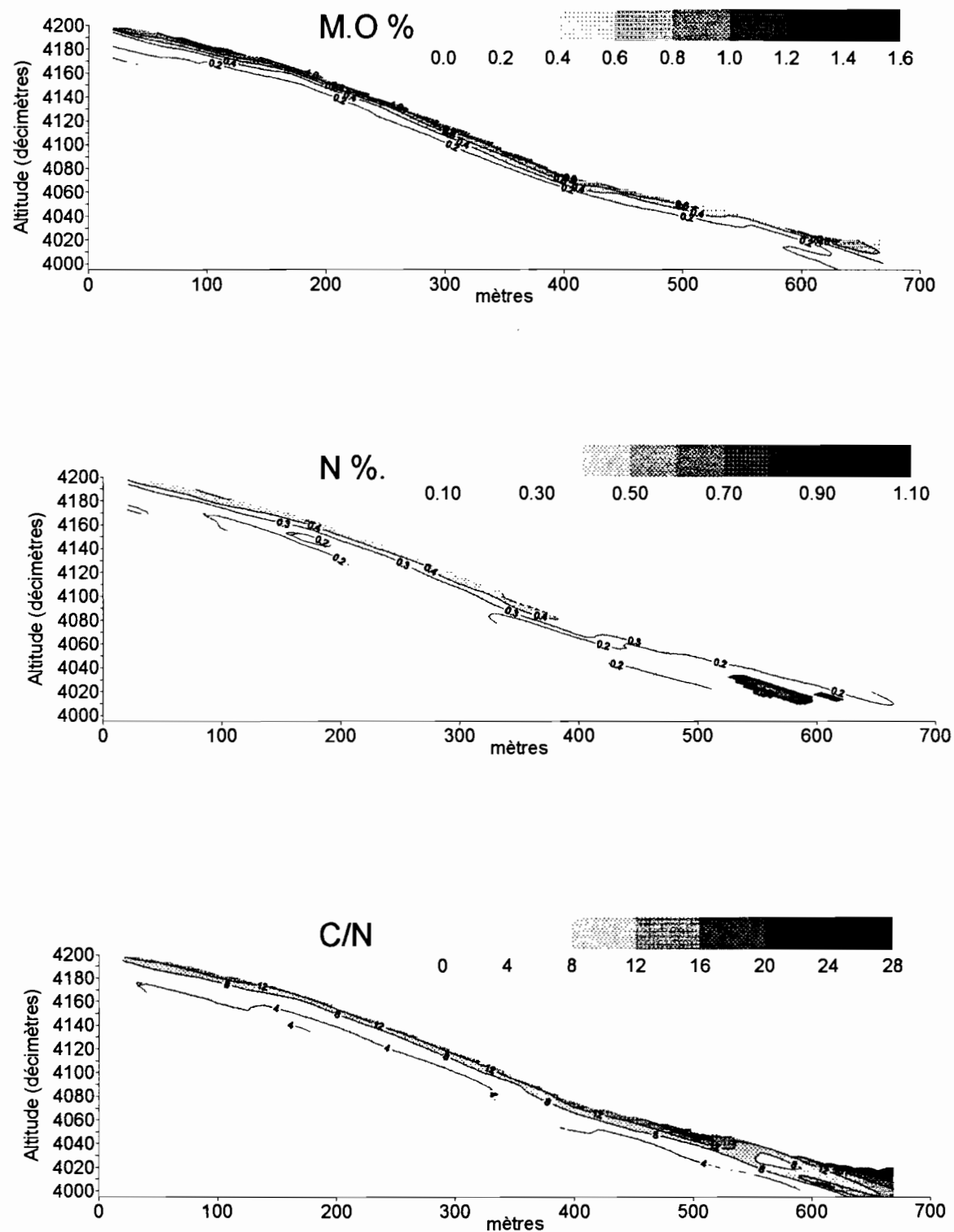
HORIZON	Fe203	
	total	libre
A cn	2.9	2.5
A	1.3	1.2
E	1.9	1.7
E a	1.2	1.1
B cn d	6.8	5.6
B s m	9.5	8.0
B s	11.6	9.4
S s	9.9	8.5
I SC s	8.9	7.8
II SC s	10.8	9.4
III SC s	10.6	9.6
S g	12.4	10.7
G	7.5	5.8
X cn	8.2	7.2
X u	7.9	7.1
I A b	1.3	1.0
II A b	1.4	1.2

HORIZON	P205 %.	
	total	assimil.
A cn	0.4	0.0
A	0.3	0.1
E	0.2	0.0
E a	0.1	0.0
B cn d	0.5	0.0
B s m	0.5	0.0
B s	0.5	0.0
S s	0.5	0.0
I SC s	0.4	0.0
II SC s	0.5	0.0
III SC s	0.4	0.0
S g	0.5	0.0
G	0.4	0.1
X cn	0.4	0.0
X u	0.4	0.0
I A b	0.2	0.1
II A b	0.1	0.0

ANNEXE G. SÉQUENCES ANALYTIQUES DU TRANSECT B ¹

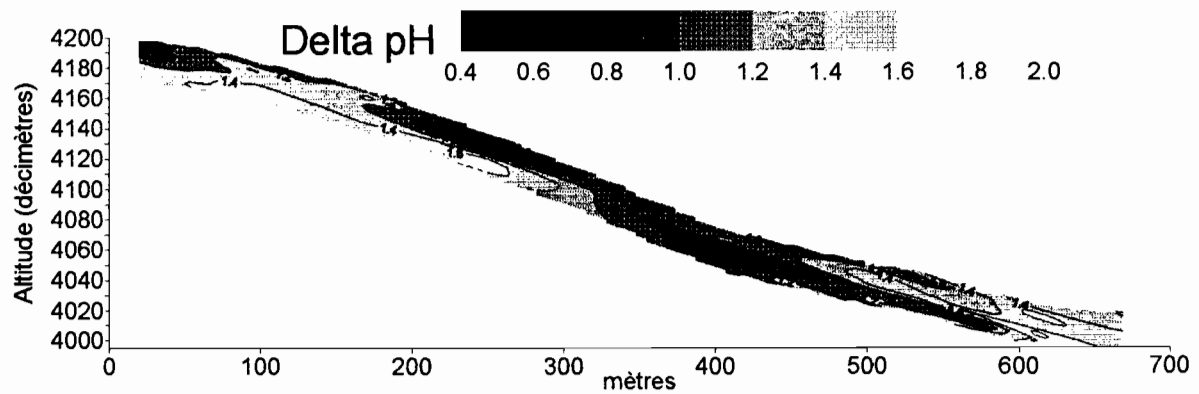
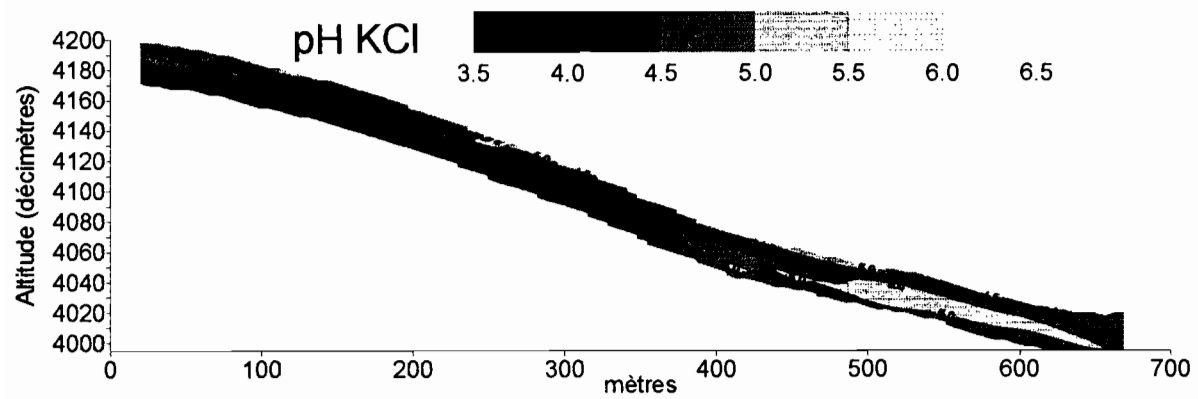
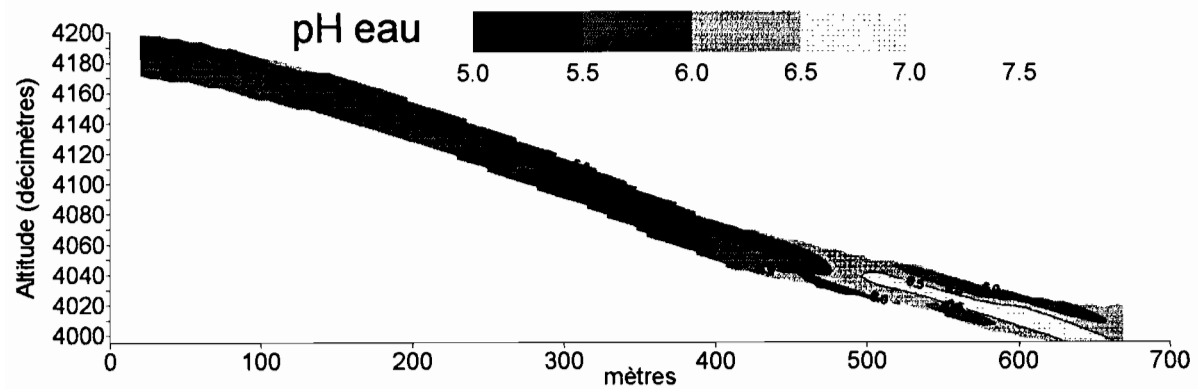
Nb : toutes les séquences ci-après concernent la fraction 0-2 mm du sol.

G.1. Matière organique

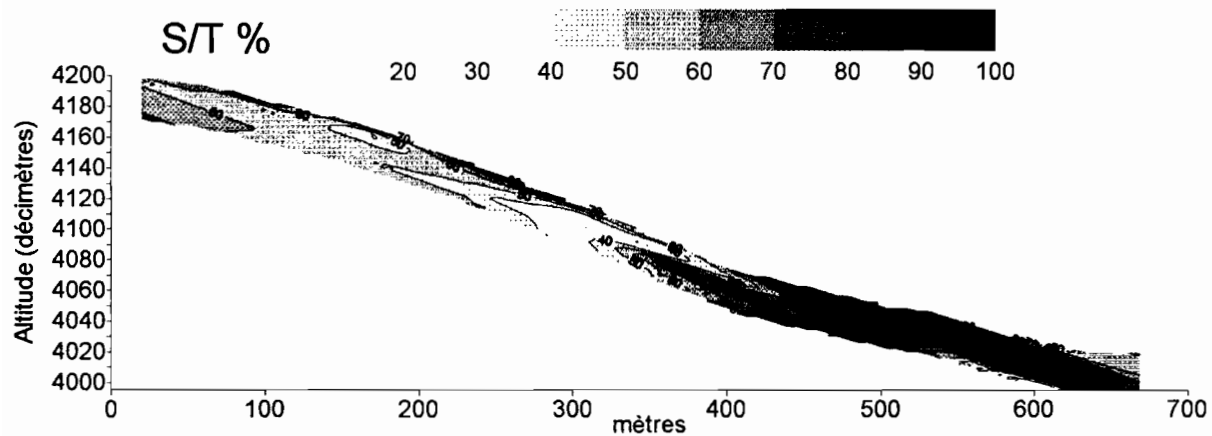
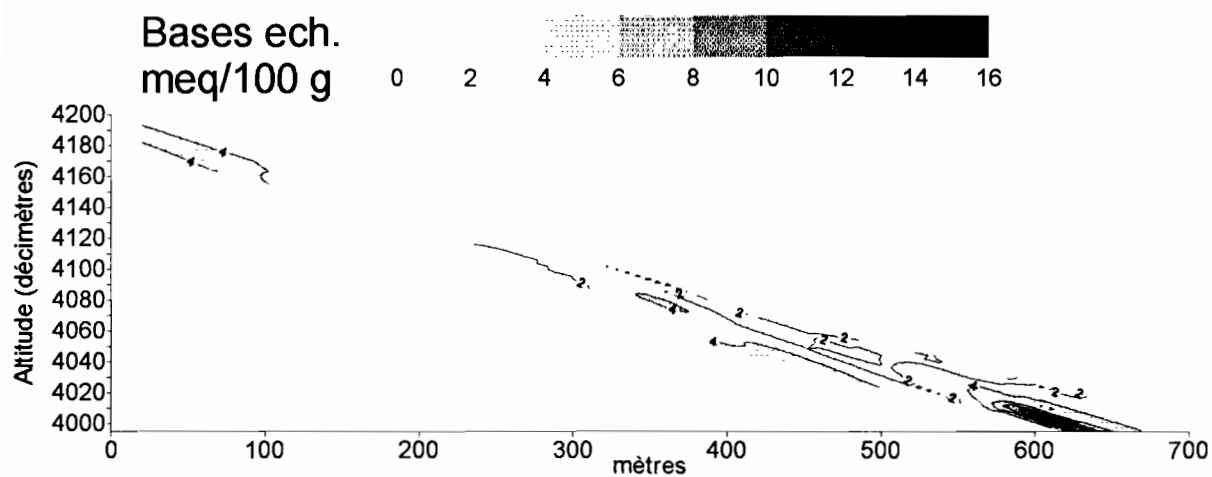
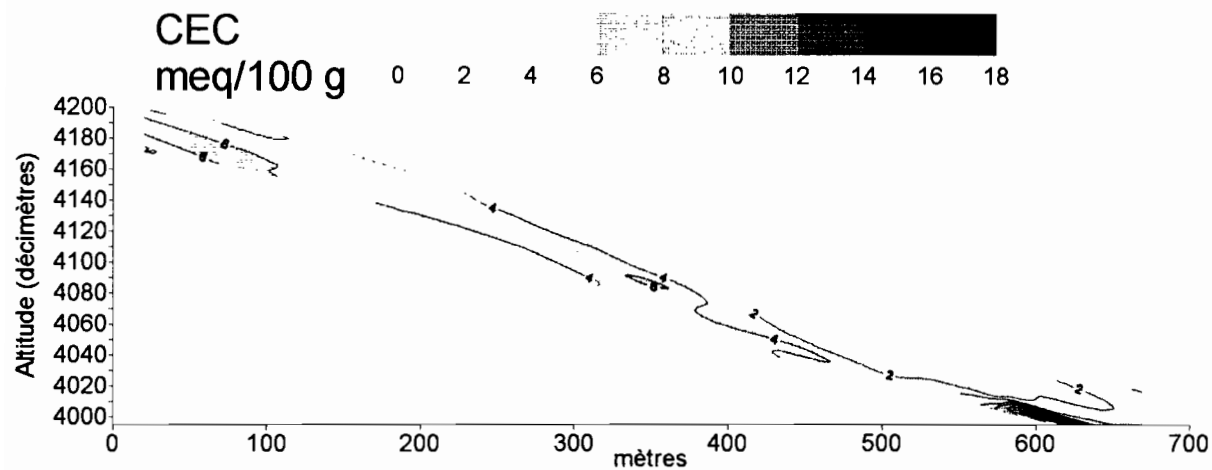


¹ Les méthodes d'analyse et de réalisation de ces séquences sont précisées au chapitre 4.1.

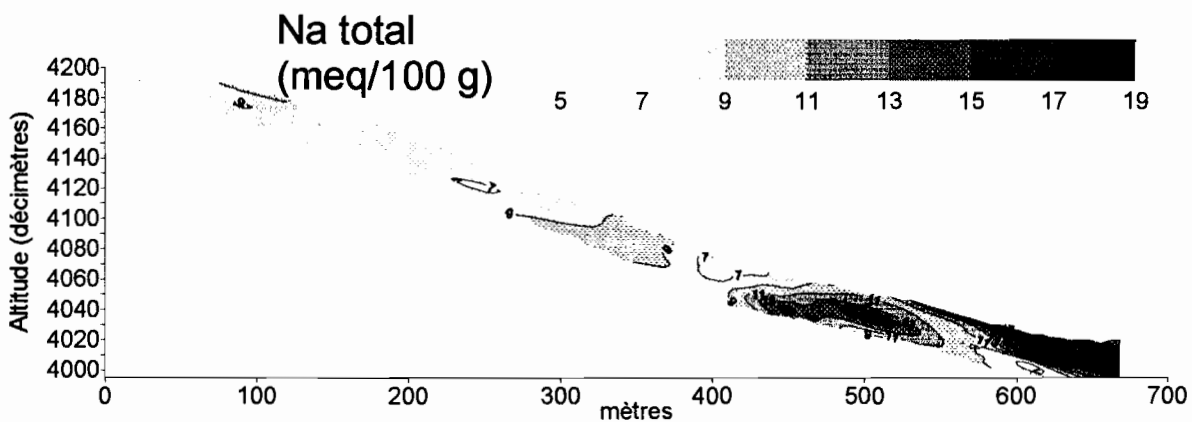
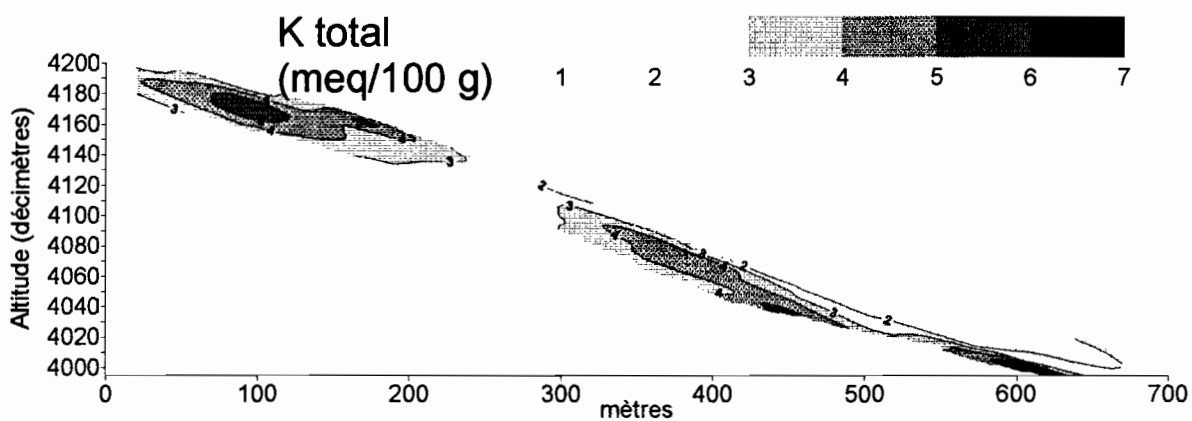
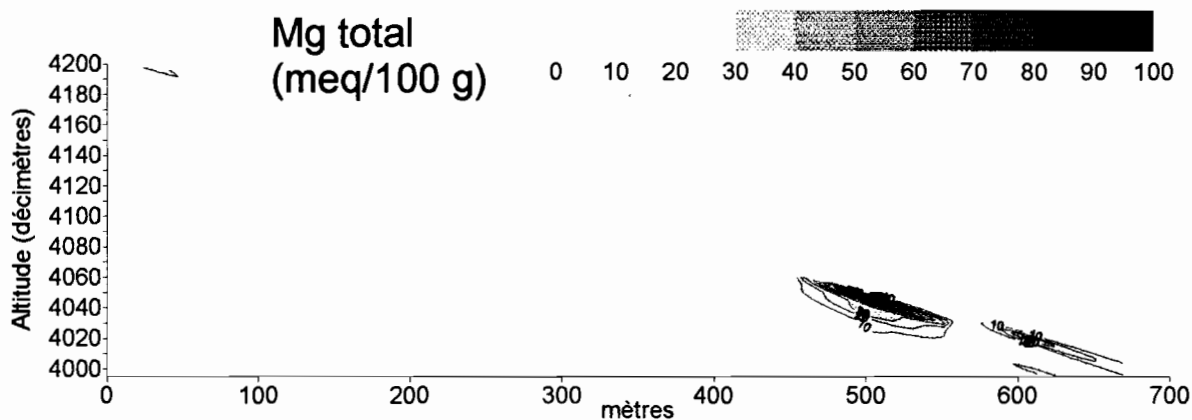
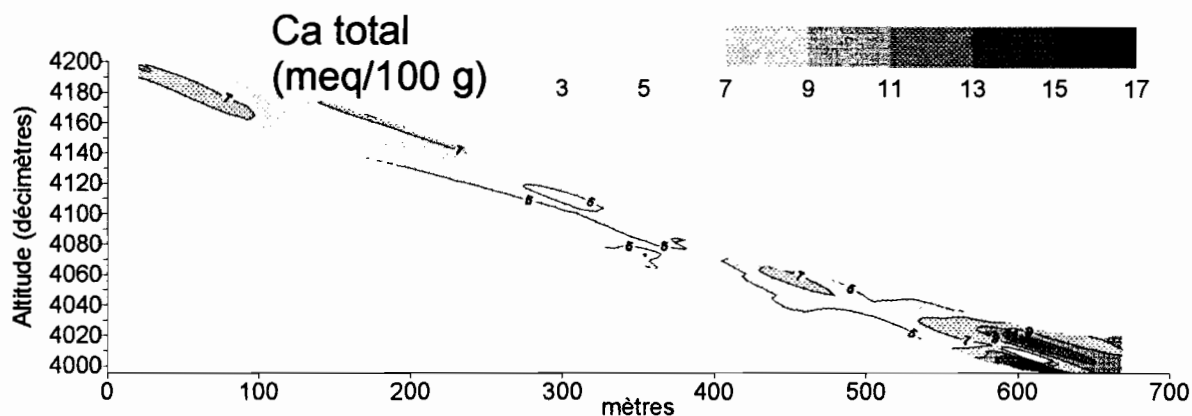
G.2. pH



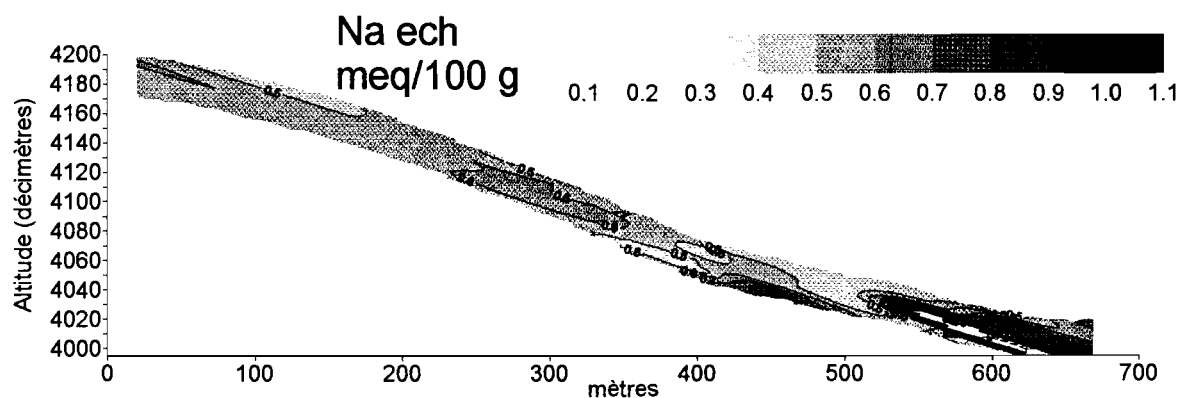
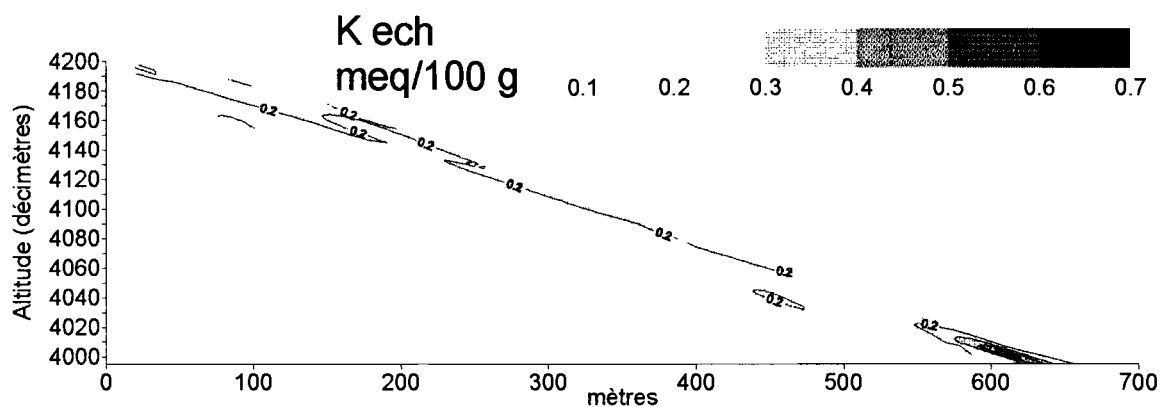
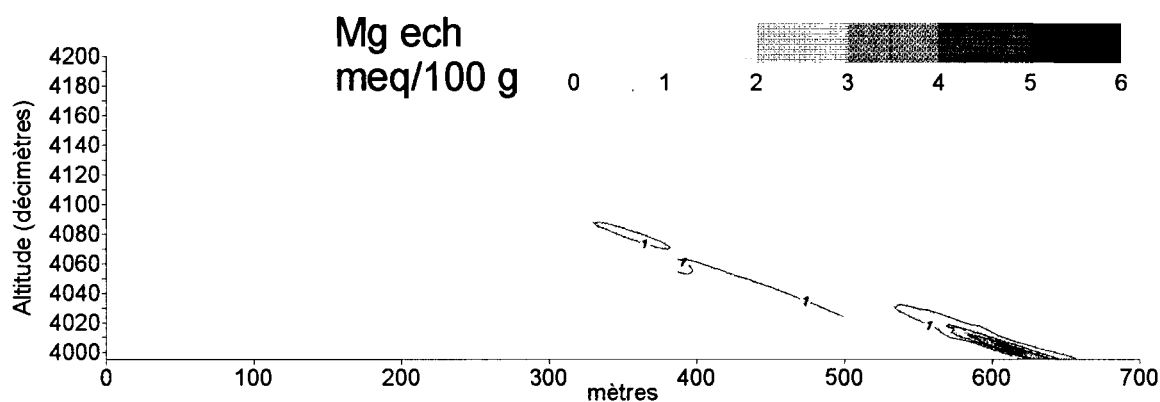
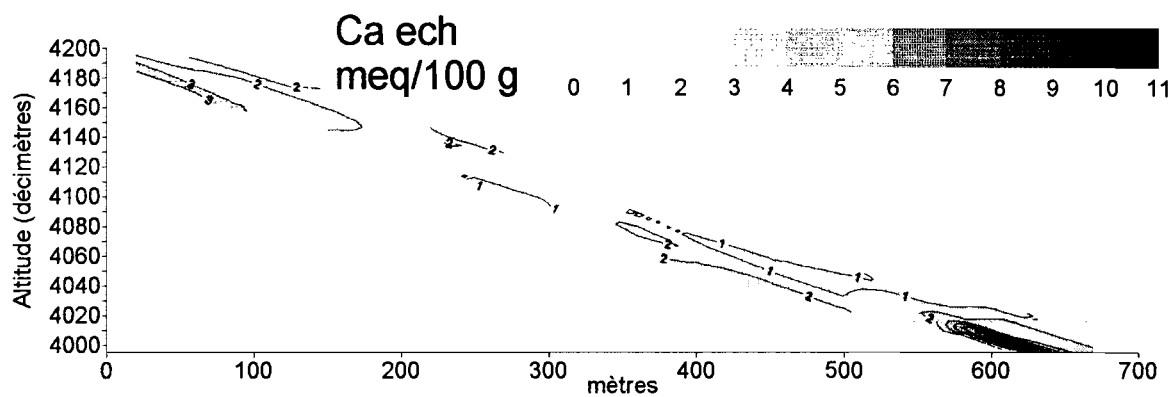
G.3. Complexe adsorbant



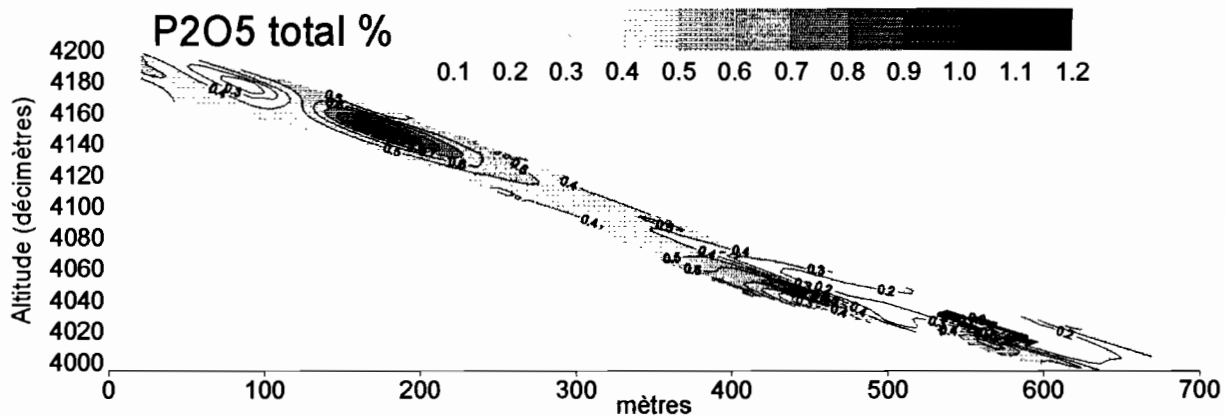
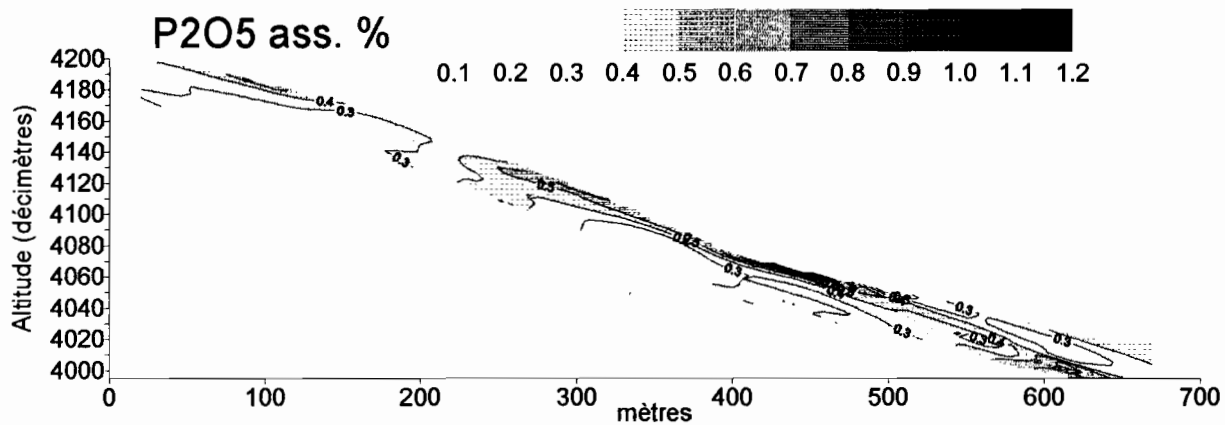
G.4. Bases totales



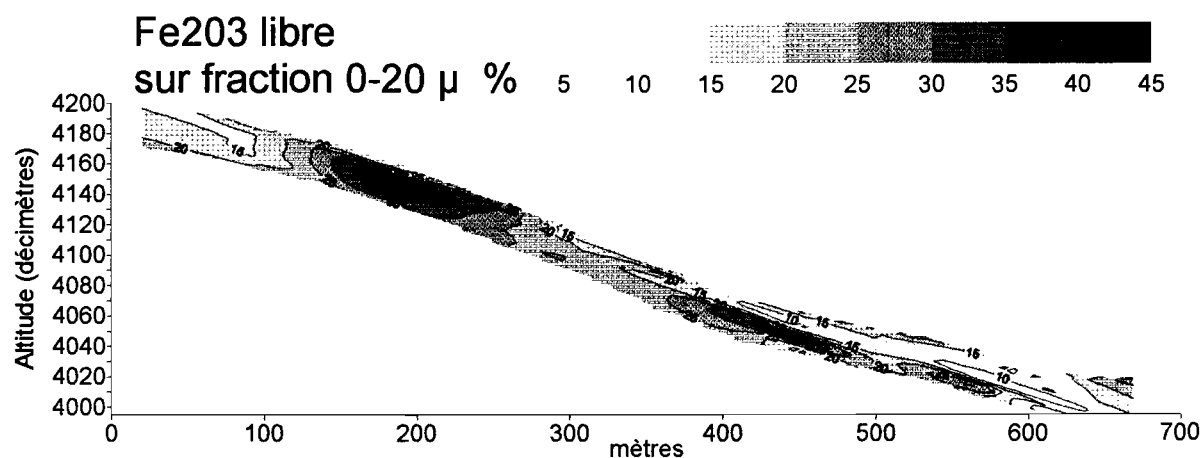
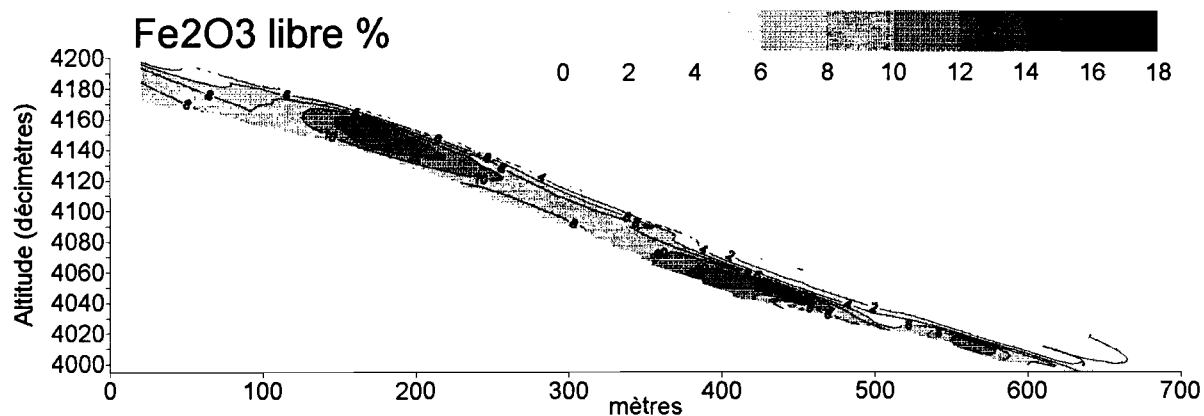
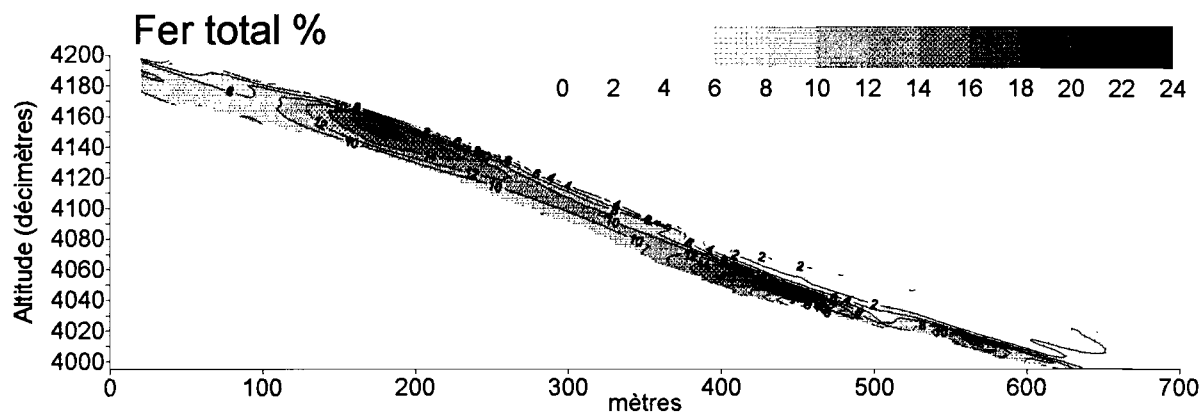
G.5. Bases échangeables



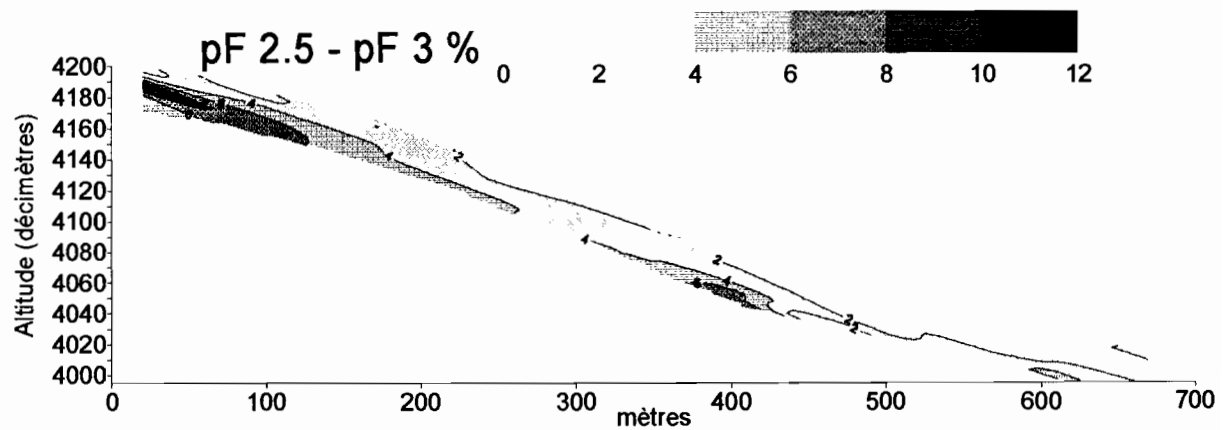
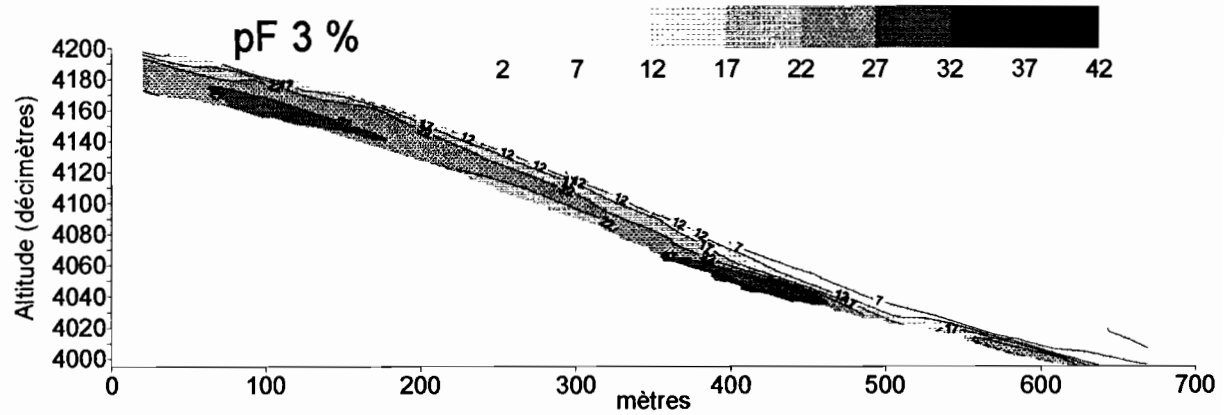
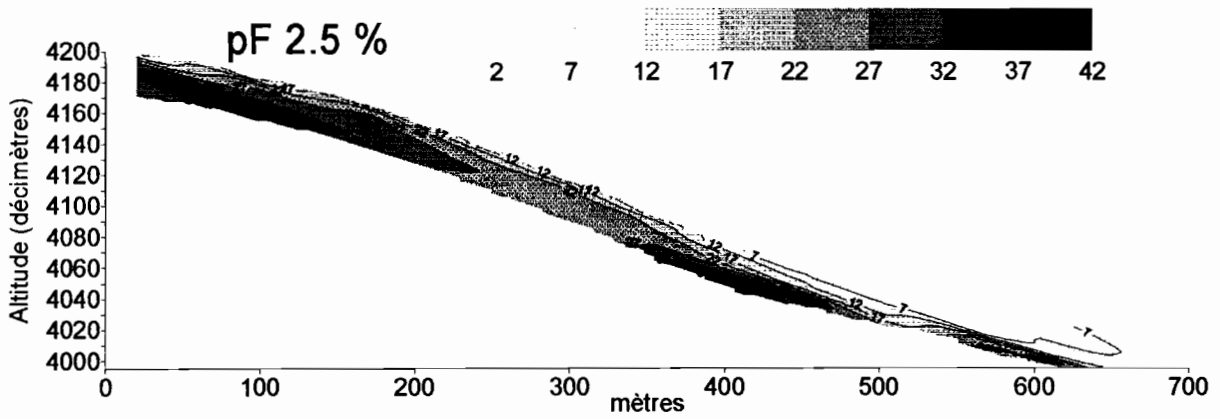
G.6. Phosphore



G7. Fer



G.8. pF



ANNEXE H. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SITES AGRONOMIQUES

H.1. Site ferrallitique

HORIZON Profondeur	A cn 0 32	B cn d 32 54	B s m 54 106
GRANULOMETRIE			
Argile %	9.16	14.25	32.61
Limons fins %	3.32	3.10	3.22
Limons grossiers %	3.42	2.70	2.57
Sables fins %	36.51	21.55	13.42
Sables grossiers %	47.66	58.45	48.14
MATIERE ORGANIQUE			
M.O. %	1.33	0.87	0.82
Carbone %	0.77	0.51	0.48
Azote total %	0.70	0.52	0.57
C/N	11.08	9.81	8.38
PHOSPHORE Olsen	16.72	5.59	4.61
COMPLEXE ADSORBANT			
Ca ech. meq/100 g	1.82	1.03	1.43
Mg ech. meq/100 g	0.42	0.41	0.55
K ech. meq/100 g	0.09	0.05	0.07
Na ech. meq/100 g	0.05	0.04	0.05
Mn ech. meq/100 g	0.08	0.05	0.09
Al ech meq/100 g	0.07	0.10	0.21
H+ ech. meq/100 g	0.01	0.02	0.05
Somme cations meq/100 g	2.45	1.58	2.20
CEC meq/100 g	2.60	1.71	2.53
Taux saturation %	94.5	92.4	86.6
pH			
pH eau	5.93	5.75	5.29
pH KCl	4.80	4.57	4.29
pH Cobalt	5.23	5.04	4.64
ELEMENTS TOTAUX			
Ca total meq/100 g	4.92	2.65	2.64
Mg total meq/100 g	7.30	7.95	11.78
K total meq/100 g	5.07	6.56	11.63
Na total meq/100 g	3.06	1.93	1.34
Fer total %	1.86	4.22	7.61
Al total %	2.11	4.33	9.92
ANALYSES SPECIALES			
Al extractible ppm	73.65	95.54	85.59
AL solution µeq/100 g	38.42	< 1	< 1
Fer libre %	1.53	3.45	6.09
DENSITE APPARENTE	1.72	1.62	1.55
POROSITE	0.35	0.39	0.41

H.2. Site ferrugineux amont

HORIZON	A	E	X cn
Profondeur	0 32	32 89	89 199
GRANULOMETRIE			
Argile %	6.93	12.20	28.52
Limons fins %	4.94	4.90	7.28
Limons grossiers %	4.10	4.24	7.24
Sables fins %	41.68	36.42	24.82
Sables grossiers %	42.42	42.19	32.15
MATIERE ORGANIQUE			
M.O. %	1.56	0.56	0.41
Carbone %	0.90	0.32	0.24
Azote total %	0.73	0.38	0.37
C/N	12.38	8.41	6.40
PHOSPHORE			
Olsen	24.72	4.66	1.86
COMPLEXE ADSORBANT			
Ca ech. meq/100 g	2.36	0.95	1.45
Mg ech. meq/100 g	0.53	0.30	0.61
K ech. meq/100 g	0.10	0.07	0.07
Na ech. meq/100 g	0.04	0.04	0.05
Mn ech. meq/100 g	0.13	0.08	0.04
Al ech meq/100 g	0.05	0.08	0.17
H+ ech. meq/100 g	0.01	0.02	0.04
Somme cations meq/100 g	3.16	1.44	2.22
CEC meq/100 g	3.27	1.58	2.67
Taux saturation %	96.7	90.9	82.9
pH			
pH eau	6.18	5.79	5.26
pH KCl	5.21	4.75	4.27
pH Cobalt	5.47	5.24	4.78
ELEMENTS TOTAUX			
Ca total meq/100 g	6.15	1.91	2.00
Mg total meq/100 g	4.48	4.19	8.09
K total meq/100 g	4.08	4.75	8.74
Na total meq/100 g	1.54	1.32	0.84
Fer total %	0.82	1.23	4.98
Al total %	1.49	2.34	7.08
ANALYSES SPECIALES			
Al extractible ppm	19.53	29.63	57.58
Al solution µeq/100 g	24.81	8.73	< 1
Fer libre %	0.55	0.86	4.21
DENSITE APPARENTE	1.41	1.49	1.64
POROSITE	0.47	0.44	0.38

H.3. Site ferrugineux aval

HORIZON Profondeur	A 0 37	E 37 117	Ea 117 143	X cn 143 207
GRANULOMETRIE				
Argile %	4.22	12.36	7.66	8.60
Limons fins %	2.67	3.99	4.92	5.55
Limons grossiers %	2.60	3.40	5.34	6.90
Sables fins %	41.29	36.87	32.59	33.05
Sables grossiers %	49.23	43.39	49.48	45.95
MATIERE ORGANIQUE				
M.O. %	0.63	0.30	0.13	0.10
Carbone %	0.37	0.17	0.07	0.06
Azote total %	0.38	0.26	0.13	0.15
C/N	9.68	6.64	5.56	4.14
PHOSPHORE				
Olsen	17.00	6.26	3.49	2.88
COMPLEXE ADSORBANT				
Ca ech. meq/100 g	0.26	0.53	0.34	0.41
Mg ech. meq/100 g	0.07	0.26	0.19	0.24
K ech. meq/100 g	0.04	0.03	0.02	0.04
Na ech. meq/100 g	0.05	0.05	0.03	0.03
Mn ech. meq/100 g	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ech meq/100 g	0.17	0.12	0.07	0.07
H+ ech. meq/100 g	0.04	0.03	0.02	0.01
Somme cations meq/100 g	0.43	0.88	0.60	0.72
CEC meq/100 g	0.61	1.09	0.65	0.72
Taux saturation %	70.7	80.7	92.1	100.0
pH				
pH eau	5.21	5.30	5.41	5.45
pH KCl	3.95	4.21	4.66	4.62
pH Cobalt	4.68	4.76	5.24	5.16
ELEMENTS TOTAUX				
Ca total meq/100 g	1.41	1.32	1.23	1.06
Mg total meq/100 g	2.33	3.87	2.45	2.94
K total meq/100 g	2.81	4.43	3.37	3.68
Na total meq/100 g	1.37	1.24	0.90	0.64
Fer total %	0.38	1.01	0.90	0.91
Al total %	0.96	2.84	1.67	1.79
ANALYSES SPECIALES				
Al extractible ppm	36.24	31.60	15.34	15.72
Al solution µeq/100 g	115.13	6.88	< 1	< 1
Al ³⁺ à pH 5 µmole/l	3.7	≡ 0	≡ 0	≡ 0
Al ³⁺ à pH 4 µmole/l	12.9	≡ 0	≡ 0	≡ 0
Fer libre %	0.20	0.66	0.65	0.68
DENSITE APPARENTE	1.49	1.39	1.66	1.79
POROSITE	0.44	0.47	0.38	0.32

TABLE DES MATIÈRES
LISTE DES ILLUSTRATIONS

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE : LE PAYSAGE DE RÉFÉRENCE	
ET LE VERSANT REPRÉSENTATIF.....	5
CHAPITRE 1. LE PAYSAGE DE RÉFÉRENCE : DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES	9
<i>1.1. L'extension géographique du paysage</i>	<i>9</i>
<i>1.2. Les composantes du paysage : état des connaissances.....</i>	<i>12</i>
1.2.1. Le modelé-type	13
1.2.2. La végétation-type	16
1.2.3. La pédoséquence-type	17
1.2.4. l'hydroséquence-type	22
<i>1.3. Conclusion du chapitre 1</i>	<i>26</i>
CHAPITRE 2. CHOIX D'UN VERSANT REPRÉSENTATIF DU PAYSAGE.....	27
<i>2.1. Choix et caractéristiques de la région</i>	<i>28</i>
2.1.1. Climatologie de la région d'Ayengré	31
2.1.2. Géologie de la région d'Ayengré.....	32
2.1.3. Modelé de la région d'Ayengré.....	33
2.1.4. Pédologie de la région d'Ayengré	34
<i>2.2. Choix du versant</i>	<i>35</i>
<i>2.3. Conclusion du chapitre 2</i>	<i>36</i>
CHAPITRE 3. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU VERSANT REPRÉSENTATIF.....	37
<i>3.1. La climatologie du versant.....</i>	<i>37</i>
3.1.1. Pluviosité.....	37
3.1.2. Demande climatique.....	42
3.1.3. Température	46
<i>3.2. La géologie du versant.....</i>	<i>47</i>

3.3. <i>La topographie du versant</i>	49
3.3.1. Altimétrie	50
3.3.2. Formes du terrain.....	51
3.3.3. Pente et unités de modelé.....	51
3.3.4. Convexité.....	52
3.4 <i>La morpho-pédologie du versant</i>	54
3.5. <i>L'occupation du sol du versant</i>	57
3.5.1. L'occupation ancienne.....	57
3.5.2. L'occupation actuelle.....	58
3.6. <i>Conclusion du chapitre 3</i>	60
CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE	63

DEUXIÈME PARTIE : L'HYDROPÉDOSÉQUENCE

SUR LE VERSANT REPRÉSENTATIF

CHAPITRE 4. LA PÉDOSÉQUENCE	69
4.1. <i>Les méthodes d'étude</i>	69
4.1.1. Constitution d'un outil de stockage de l'information	70
4.1.1.A. La table de description de v.e.r. de référence.....	72
4.1.1.B. La table de description de v.e.r. par rattachement aux v.e.r. de référence.....	73
4.1.1.C. La table de données physico-chimiques.....	74
4.1.2. Acquisition de l'information pédologique.....	74
4.1.2.A. Etude des volumes élémentaires de résolution.....	74
4.1.2.A.1. Description morphologique et localisation des v.e.r.....	74
4.1.2.A.2. Analyse chimique, minéralogique, et micro morphologique des v.e.r de référence.....	78
4.1.2.B. Etude de transitions latérales au sein de la couverture pédologique	79
4.1.3. Traitement de l'information pédologique.....	80
4.1.3.A. Détermination de l'organisation pédologique du versant	80
4.1.3.A.1. L'identification des horizons.....	80
4.1.3.A.2. La localisation des horizons en coupes et plans	83

4.1.3.A.3. Le rattachement des horizons à des références	83
4.1.3.B. Constitution de séquences de caractères analytiques	84
4.2. L'organisation pédologique du versant	86
4.2.1. Organisation spatiale et caractéristiques des horizons pédologiques	86
4.2.1.A. Distribution des horizons dans l'espace	86
4.2.1.A.1. Distribution des horizons en coupes	89
4.2.1.A.2. Distribution des horizons en plans	93
4.2.1.B. Caractéristiques d'enveloppe et de contenu des horizons	95
Horizon 1 : arène micacée (horizon C)	97
Ensemble d'horizons 2,3 et 4 : horizons altéritiques à matrice rouge (horizons SC)	97
Horizon 5 : horizon argileux jaune-gris (horizon S g')	100
Horizon 6 : horizon argileux rouge (horizon S s)	100
Horizon 7 : horizon argileux verdâtre (horizon G)	101
Ensemble d'horizons 8 et 9 : horizons indurés (horizons B s plinthique et B s m)	102
Horizon 10 : horizon argileux ocre à gravillons (horizon B cn d)	104
Ensemble d'horizons 11 et 12 : horizons cailloutiques à nodules ferrugineux ou gravats de quartz (horizons X)	104
Ensemble d'horizons 13 et 14 : horizons humifères enfouis (horizons Ab)	106
Ensemble d'horizons 15 et 16 : horizons sableux peu ou non humifères (horizons E)	107
Ensemble d'horizons 17 et 18 : horizons humifères (horizons A)	109
Ensemble d'horizons 19 et 20 : horizons ferriques cuirassés (horizons FE m)	110
4.2.2. Interprétations génétiques	112
4.2.2.A. Interprétations individuelles des horizons	112
Horizon 1 : arène micacée (horizon C)	112
Ensemble d'horizons 2,3 et 4 : horizons altéritiques à matrice rouge (horizons SC s)	113
Horizon 5 : horizon argileux jaune-gris (horizon S g')	116
Horizon 6 : horizon argileux rouge (horizon S s)	117
Horizon 7 : horizon argileux verdâtre (horizon G)	118
Ensemble d'horizons 8 et 9 : horizons indurés (horizons B s plinthique et B s m)	119
Horizon 10 : horizon argileux ocre à gravillons (horizon B cn d)	120
Ensemble d'horizons 11 et 12 : horizons cailloutiques à nodules ferrugineux ou gravats de quartz (horizons X)	121
Ensemble d'horizons 13 et 14 : horizons humifères enfouis (horizons Ab)	122
Ensemble d'horizons 15 et 16 : horizons sableux non humifères (horizons E)	123
Horizon 17 : horizon sableux humifère à gravillons (horizon A cn)	125
Horizon 18 : horizon sableux humifère (horizon A)	126
Ensemble d'horizons 19 et 20 : horizons ferriques cuirassés (horizons FE m)	127
4.2.2.B. Interprétations à l'échelle du versant	128
4.2.2.B.1. Origine du matériau parental des horizons	128
4.2.2.B.2. Transformations conduisant à la différenciation des horizons	129
4.3. Les séquences de caractères analytiques	132
4.3.1. Les séquences de couleur	132

4.3.1.A. Séquences de teinte, pureté et clarté moyennes.....	134
4.3.1.B. La séquence du red ratio moyen.....	136
4.3.2. Les séquences granulométriques.....	137
4.3.3. La séquence de porosité.....	139
4.3.4. La séquence de perméabilité.....	139
4.4 Conclusion du chapitre 4.....	141
CHAPITRE 5. L'HYDROSÉQUENCE.....	145
5.1 Le dispositif.....	145
5.1.1. Choix du transect.....	145
5.1.2. Instrumentation.....	148
5.2 Résultats et interprétations.....	150
5.2.1. Allure générale du toit piézométrique.....	150
5.2.2. Examen de stations piézométriques représentatives des domaines pédologiques.....	152
5.2.2.A. Stations du domaine ferrallitique.....	152
5.2.2.A.1. Station 1.....	152
5.2.2.A.2. Station 1/2.....	153
5.2.2.B. Stations du domaine ferrugineux.....	154
5.2.2.B.1. Station 6/7.....	154
5.2.2.B.2. Station 7/8.....	155
5.2.2.C. Stations du domaine hydromorphe.....	156
5.2.2.C.1. Station 9.....	156
5.2.2.C.2. Station 10.....	158
5.2.3. Séquences de fréquences d'engorgement.....	159
5.2.3.A. Séquence de fréquences annuelles d'engorgement.....	160
5.2.3.B. Séquences de fréquences mensuelles d'engorgement et dynamique saisonnière des nappes.....	163
5.3 Conclusion du chapitre 5.....	166
CHAPITRE 6. RELATIONS ENTRE PÉDOSEQUENCE ET HYDROSÉQUENCE.....	169
6.1. Relations statistiques entre la fréquence annuelle d'engorgement et le type d'horizon pédologique..	170
6.2. Relations statistiques entre la fréquence annuelle d'engorgement et les variables pédologiques quantitatives.....	176

6.2.1. Relations entre la fréquence d'engorgement et les variables physico-chimiques	176
6.2.2. Relations entre la fréquence d'engorgement et la couleur des matériaux	179
6.2.2.A. Relations entre la fréquence d'engorgement et la pureté (chroma)	179
6.2.2.B. Relations entre la fréquence d'engorgement et la clarté (value).....	180
6.2.2.C. Relations entre la fréquence d'engorgement et la teinte	180
6.2.2.D. Relations entre la fréquence d'engorgement et le Red ratio.....	182
6.3. Conclusion du chapitre 6	183
CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE	185

**TROISIÈME PARTIE : RELATIONS ENTRE L'HYDROPÉDOSÉQUENCE ET LE
COMPORTEMENT D'UNE PLANTE CULTIVÉE..... 187**

CHAPITRE 7. RELATIONS ENTRE L'HYDROPÉDOSÉQUENCE ET LE COMPORTEMENT DU COTONNIER.....	191
7.1. Matériel et méthodes.....	192
7.1.1. Les conditions de la culture.....	193
7.1.1.A. les surfaces mises en culture et leurs caractéristiques	193
7.1.1.B. le matériel végétal et les techniques culturales	194
7.1.2. Les méthodes	196
7.1.2.A. méthodes utilisées à l'échelle des groupes de parcelles	196
7.1.2.B. méthodes utilisées à l'échelle intraparcellaire	198
7.2. Résultats et interprétations.....	202
7.2.1. Résultats et interprétations à l'échelle des groupes de parcelles.....	202
7.2.1.A. Les variations inter annuelles du rendement des micro parcelles.....	203
7.2.1.B. Les variations spatiales de la récolte.....	205
7.2.1.B.1. Détermination des variables agronomiques régionalisées.....	209
7.2.1.B.2. Orientation préférentielle de la variabilité spatiale des variables agronomiques régionalisées.....	211
7.2.1.C. Les variations spatiales de la récolte en fonction des domaines pédologiques	213
7.2.2. Résultats et interprétations à l'échelle intraparcellaire	215
7.2.2.A. Les caractéristiques hydro-pédologiques des sites.....	216

	300
7.2.2.A.1. Caractéristiques pédologiques	216
7.2.2.A.2. Caractéristiques hydrologiques.....	219
7.2.2.B. La croissance du cotonnier selon le site.....	221
7.2.2.B.1. Evolution du système aérien	221
7.2.2.B.2. Evolution du système racinaire	225
7.2.2.C. Les contraintes hydropédologiques selon le site.....	226
7.2.2.C.1. Les contraintes dans le site ferrallitique.....	227
7.2.2.C.2. Les contraintes dans le site ferrugineux amont.....	228
7.2.2.C.3. Les contraintes dans le site ferrugineux aval.....	229
7.3. Conclusion du chapitre 7	231
CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE.....	233
CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	235
1. L'inventaire des ressources naturelles en terre et en eau.....	237
2. L'évaluation de l'aptitude agricole des ressources	242
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	245
ANNEXES.....	259
ANNEXE A. RELEVÉS BOTANIQUES.	261
A1. Espèces à large spectre de répartition	261
A2. Espèces étagées.....	262
ANNEXE B. S.G.D.B. RELATIONNEL.....	263
ANNEXE C. EXEMPLE DE FICHE DE SAISIE INFORMATISÉE DES DONNÉES PÉDOLOGIQUES.....	266
ANNEXE D. CODAGE NUMÉRIQUE DES VARIABLES DESCRIPTIVES DES VOLUMES PÉDOLOGIQUES	270
D.1. Codage numérique de la texture.....	271
D.2. Codage numérique de la porosité.	272

<i>D.3. Codage numérique de la nature et de l'abondance des éléments grossiers.....</i>	273
<i>D.4. Codage numérique de la nature et de l'abondance des éléments figurés.....</i>	275
<i>D.5. Codage numérique de la couleur et de l'abondance des phases meubles.....</i>	275
<i>D.6. Codage numérique de la cimentation, de la pénétrabilité et de la fragilité du matériau.....</i>	277
<i>D.7. Codage numérique de la structure et de la fissuration.....</i>	277
<i>D.8. Codage numérique de la forme et de la netteté des limites inférieures des v.e.r.....</i>	277
ANNEXE E. ESPACE COLORIMÉTRIQUE MUNSELL ET QUANTIFICATION DES TEINTES.....	278
ANNEXE F. PHYSICO-CHIMIE DES PRINCIPAUX HORIZONS.....	280
ANNEXE G. SÉQUENCES ANALYTIQUES DU TRANSECT B.....	282
<i>G.1. Matière organique.....</i>	282
<i>G.2. pH.....</i>	283
<i>G.3. Complexe adsorbant.....</i>	284
<i>G.4. Bases totales.....</i>	285
<i>G.5. Bases échangeables.....</i>	286
<i>G.6. Phosphore.....</i>	287
<i>G.7. Fer.....</i>	288
<i>G.8. pF.....</i>	289
ANNEXE H. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SITES AGRONOMIQUES.....	290
<i>H.1. Site ferrallitique.....</i>	290
<i>H.2. Site ferrugineux amont.....</i>	291
<i>H.3. Site ferrugineux aval.....</i>	292
TABLE DES MATIÈRES LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	293
TABLE DES MATIÈRES.....	295
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	302
<i>Liste des figures.....</i>	302
<i>liste des tableaux.....</i>	304
<i>Liste des planches.....</i>	305

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 1. Position de cette étude au second niveau d'une approche générale d'inventaire et d'évaluation des ressources naturelles en terre et en eau. D'après BRABANT (1991) -----	4
Figure I-1. Esquisse des climats d'Afrique de l'ouest. D'après l'atlas international de l'ouest africain (O.U.A, 1971) et CHAUVEL (1977). -----	10
Figure I-2. La végétation au sud du Sahara. D'après VALENTIN et al.. 1990. -----	10
Figure I-3. Carte des sols d'Afrique de l'ouest. D'après MOREAU (1993). -----	11
Figure I-4. Esquisse géologique de l'Afrique de l'ouest. D'après LEPRUN (1979) -----	11
Figure I-5. Extension géographique du paysage de référence. -----	12
Figure I-6. Troncature par l'érosion du versant-type. D'après LEVEQUE (1976). -----	13
Figure I-7. Le modelé du versant-type -----	13
Figure I-8. Evolution du sommet du versant-type. D'après BEAUDOU et COLLINET (1977). -----	14
Figure I-9. Répartition de la végétation le long du versant-type. -----	17
Figure I-10. Organisation pédologique du versant-type. -----	18
Figure I-11. Hypothèse de la mise en place de la cuirasse par accumulation absolue de fer soluble en bas de versant. D'après MAIGNIEN (1958). -----	20
Figure I-12. Schéma général des chemins de l'eau sur un versant. D'après CHORLEY, DUNNE et ATKINSON (1980). -----	22
Figure I-13. Trois schémas possibles de fonctionnement hydrodynamique du versant-type. -----	24
Figure I-14. Résumé de l'état des connaissances sur le paysage de référence. -----	26
Figure II-1. Carte générale du Togo. -----	27
Figure II-2. Esquisse géologique du Togo. D'après LOAEC et al.(1982) -----	28
Figure II-3. Variations latitudinales du régime pluviométrique au Togo. d'après SEGUI (1988). -----	29
Figure II-4. Pluviosité moyenne annuelle au Togo. D'après LOAEC et al. (1982). -----	29
Figure II-5. Localisation des pédoséquences avec terme amont ferrallitique sur le socle granito-gneissique togolais. D'après LEVEQUE (1979). -----	30
Figure II-6. Pluviométrie relevée à la station de Sotouboa (1984-1989). ETP Penman calculée à partir des relevés de la station de Sokodé (1982-1988) -----	32
Figure II-7. Géologie de la région d'Ayengré. Extrait de la carte géologique au 1/200.000 ème. Feuille Sokodé. -----	32
Figure II-8. Esquisse oro-hydrographique de la région d'Ayengré. D'après clichés IGN 1/30.000 ème (mission Tog. 31/300) et feuilles 1/50.000 ème Sokodé 3a et 4b (1969). -----	33
Figure II-9. Extrait de la carte pédologique au 1/200.000 ème. Région d'Ayengré. D'après LEVEQUE (1979). -----	34
Figure II-10. Transect morpho-pédologique dans la région d'Ayengré et essai de reconstitution du modelé ancien. -----	35
Figure III-1. Comparaison des moyennes mensuelles sur le site et à 1 km du site. Période 1981-1985.	39
Figure III-2. Variations de la pluviosité totale annuelle sur le site au cours de la période 1974-1992.	40
Figure III-3. Comparaison entre le régime pluviométrique au cours des 4 années de l'étude (1989-1992) et celui de la période 1974-1992.	41
Figure III-4. Comparaison entre les fréquences des hauteurs quotidiennes précipitées pour la période de cette étude (1989-1992) et la période 1974-1992.	42
Figure III-5. Evaporation bac sur le site. Moyenne quotidienne par pentade. Période du 1.07.1989 au 31.09.1992.	45
Figure III-6. Comparaison entre l'évaporation bac sur le site et l'ETP calculé à Sokodé.	46
Figure III-7. Relation entre l'évaporation bac mesurée sur le site et l'Etp calculée à Sokodé.	46
Figure III-8. Température moyenne pentadaire sur le site. Valeurs obtenues par moyenne glissante. Période 1990-1992.	47
Figure III-9. Délimitation du secteur topographié sur le bassin versant élémentaire.	50
Figure III-10. Maille du levé altimétrique.	50
Figure III-11. Caractéristiques topographiques du versant.	53
Figure III-12. Profil en long généralisé de la partie centrale du site.	53

Figure III-13. Profil en long détaillé sur deux transects	54
Figure III-14. Implantation en transects des fosses pédologiques.....	54
Figure III-15. Bloc-diagramme de reconnaissance morphopédologique sur le versant.....	56
Figure III-16. Occupation du sol au 15/10/1990.....	59
Figure III-17. Relevé des termitières actives de macrotermes	60
Figure III-18. Séquence d'évolution d'un nid de macrotermes créant une macroporosité tubulaire dans le sol.	60
Figure IV-1. Structure générale et fonction des fiches de saisie informatisées. -----	71
Figure IV-2. Localisation des fosses, des sondages de raccordement et des tranchées sur les transects A et B. -----	76
Figure IV-3. Organisation en coupes des horizons pédologiques. -----	87
Figure IV-4. Tomographies des horizons pédologiques. -----	95
Figure IV-5. Les ensembles d'horizons selon l'origine de leur matériau parental (interprétation). -----	129
Figure IV-6. Processus génétiques et filiation entre les horizons (interprétation). -----	130
Figure IV-7. Teinte, clarté et pureté moyennes. transect B. -----	135
Figure IV-8. Red Ratio moyen. Transect B. -----	136
Figure IV-9. Estimation des teneurs en hématite d'après le Red Ratio. Transect B. -----	137
Figure IV-10. Granulométrie. Transect B. -----	138
Figure IV-11. Porosité. Transect B-----	139
Figure IV-12. Estimation de la perméabilité par la formule de SAXTON -----	141
Figure V-1. Orientation des écoulements de surface et localisation des transects. -----	146
Figure V-2. Indice topographique de Beven et localisation des transects. -----	147
Figure V-3. Dispositif implanté sur le transect B. -----	149
Figure V-4. Schéma d'une fosse couverte. -----	149
Figure V-5. Schéma d'un tube piézométrique. -----	149
Figure V-6. Relevés piézométriques le long du transect et pluviométrie. Période 1989-1992 -----	151
Figure V-7. Variations du toit piézométrique par rapport à la position sur le transect et le temps. (Période 1989-1992) -----	151
Figure V-8. Relevés piézométriques de deux stations du domaine amont ferrallitique -----	154
Figure V-9. Relevés piézométriques de deux stations du domaine médian ferrugineux -----	156
Figure V-10. Relevés piézométriques de deux stations du domaine aval hydromorphe -----	159
Figure V-11. Séquence des fréquences annuelles d'engorgement (calcul sur la période du 30/09/1991 au 30/09/1992) -----	161
Figure V-12. Profils moyens de fréquences annuelles d'engorgement selon les domaines pédologiques. (Calculés sur la période du 30/09/1989 au 30/09/1992). -----	163
Figure V-13. Séquences des fréquences mensuelles d'engorgement (calcul sur la période du 30/09/1989 au 30/09/1992) -----	165
Figure VI-1. Superposition graphique de la pédoséquence et de la séquence de fréquences annuelles d'engorgement calculée sur la période du 30/09/1991 au 30/09/1992. -----	171
Figure VI-2. Correspondance entre groupes d'horizons pédologiques et fréquences moyennes annuelles d'engorgement. -----	175
Figure VI-3. Diagrammes de dispersion des bases échangeables en fonction de la fréquence annuelle d'engorgement. -----	178
Figure VI-4. Relations entre teintes (phase principale, teinte "moyenne") et fréquence moyenne annuelle d'engorgement. -----	181
Figure VI-5. Relations entre Red ratios (phase principale, Red ratio "moyen") et fréquence moyenne annuelle d'engorgement. -----	182
Figure VII-1. Localisation du périmètre de la station d'essai de culture cotonnière par rapport aux domaines pédologiques -----	192
Figure VII-2. Délimitation des domaines pédologiques sur les deux groupes de parcelles-----	193
Figure VII-3. Subdivision d'une parcelle en 120 micro parcelles -----	197
Figure VII-4. Localisation des sites étudiés et détail du dispositif. -----	201
Figure VII-5. Variabilité inter annuelle du rendement des micro parcelles. -----	204
Figure VII-6. Relations entre les rendements 1989, 1990 et 1991 des micro parcelles (kg/ha). Groupe de parcelles 1. -----	204
Figure VII-7. Cartes des variables agronomiques de la récolte de 1989 pour le groupe de parcelles 1. Codage en classes isoamples d'individus (quartiles). -----	207
Figure VII-8. Variogramme omnidirectionnel du rendement (1989). Groupe de parcelles 1. -----	209
Figure VII-9. Variogramme omnidirectionnel de la hauteur des plants (1989). Groupe de parcelles 1. -----	210
Figure VII-10. Variogramme omnidirectionnel du diamètre du pivot (1989). Groupe de parcelles 1. -----	210

Figure VII-11. Variogramme omnidirectionnel de la profondeur du pivot (1989). Groupe de parcelles 1. ---	210
Figure VII-12. Variogrammes de la récolte selon l'axe de la toposéquence (Nord-Sud) et l'axe transversal (Est-Ouest). Groupe de parcelles 1.-----	212
Figure VII-13. Variations de la hauteur des plants et du rendement le long de la toposéquence, selon les domaines pédologiques. Groupe de parcelles 1.-----	214
Figure VII-14. Profils pédologiques des 3 sites. -----	217
Figure VII-15. Profils de résistance mécanique à la pénétration des 3 sites.-----	218
Figure VII-16. Evolution du toit de la nappe selon le site. Campagne 1991.-----	220
Figure VII-17. Profils de fréquence annuelle d'engorgement selon le site. Année 1991. -----	221
Figure VII-18. Evolution de la hauteur de la tige principale selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993). -----	222
Figure VII-19. Evolution de l'indice foliaire (L.A.I) selon le site. campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993). -----	223
Figure VII-20. Production de matière sèche selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993) ---	224
Figure VII-21. Evolution du front racinaire actif selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993). -----	226
Figure VII-22. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydro-pédologiques sur le site ferrallitique.-----	228
Figure VII-23. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydro-pédologiques sur le site ferrugineux amont. -----	229
Figure VII-24. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydro-pédologiques sur le site ferrugineux aval. -----	230
Figure A.1. Représentation d'une base de données relationnelles-----	264
Figure A.2. Exemple de jointure entre tables de données-----	264
Figure A.3. Correspondance entre analyse granulométrique de laboratoire et codage de terrain. -----	272
Figure A.4. Relation entre le codage de la quantité d'éléments grossiers par l'échelle de terrain et les analyses de laboratoire. -----	274
Figure A.5. Optimisation du codage numérique de l'échelle de quantification des phases meubles.-----	276
Figure A.6. L'espace des couleurs Munsell et ses coordonnées cylindriques. D'après ESCADAFAL et al., 1988.-----	278
Figure A.7. Répartition des teintes Munsell sur le cercle colorimétrique. -----	278

liste des tableaux

Tableau III-1. Pluviosités moyennes mensuelles sur le site. Période 1974-1992. -----	38
Tableau III-2. Comparaison entre la moyenne de pluviosité annuelle de la période 1974-1992 et les pluviosités annuelles pour la période de cette étude.-----	40
Tableau III-3. Variabilité de la pluviosité mensuelle sur le site. Période 1974-1992. -----	40
Tableau III-4. Evaporation bac sur le site. Moyenne mensuelle pour la période 1989-1992.-----	45
Tableau III-5. Comparaison des températures relevées sur le site (période 1990-1992) et de celles relevées à la station météorologique la plus proche (Sotouboa, période 1984-1989). -----	47
Tableau IV-1. Principales variables descriptives d'un v.e.r. de référence.-----	72
Tableau IV-2. Une échelle de terrain de quantification absolue.-----	73
Tableau IV-3. Analyses de laboratoire sur les v.e.r. de référence. -----	79
Tableau IV-4. Comparaison entre classement manuel des v.e.r. et classements numériques à l'aide d'un indice de similarité. -----	83
Tableau VI-1. Fréquences annuelles d'engorgement pour chaque horizon pédologique. -----	172
Tableau VI-2. Comparaison statistique des moyennes de fréquence annuelle d'engorgement par horizon.---	173
Tableau VI-3. Regroupement des horizons en ensembles après le test de comparaison des moyennes de fréquence annuelle d'engorgement. -----	173
Tableau VI-4. Groupes d'horizons pédologiques au sein des ensembles définis par le test de comparaison de moyennes-----	174
Tableau VI-5. Fréquences annuelles d'engorgement par groupe d'horizons-----	175
Tableau VI-6. Liste des variables physico-chimiques testées-----	177
Tableau VII-1. Antécédents culturels des 8 parcelles agronomiques utilisées pour l'étude.-----	194
Tableau VII-2. Traitement agronomique sur les 8 parcelles étudiées. -----	195
Tableau VII-3. Variations spatiales de la récolte de 1989. Groupe de parcelles 1. -----	205

<i>Tableau A.1. Espèces végétales largement réparties sur le versant</i> -----	261
<i>Tableau A.2. : Espèces végétales localisées sur une partie du versant</i> -----	262
<i>Tableau A.3. Exemple de table de données (glossaire pédologique)</i> -----	263
<i>Tableau A.4. Codage des variables alphanumériques.</i> -----	271
<i>Tableau A.5. Codage numérique de la texture</i> -----	272
<i>Tableau A.6. Discordance d'ordre entre l'estimation de la porosité sur le terrain et les mesures de laboratoire.</i> -----	273
<i>Tableau A.7. Codage numérique de l'échelle de quantification des éléments grossiers.</i> -----	274
<i>Tableau A.8. Codage numérique de l'échelle de quantification des phases meubles</i> -----	276

Liste des planches

<i>Planche 1. Profils du transect B (planche photographique).</i> -----	88
<i>Planche 2. Aspect macro-morphologique des horizons</i> -----	96



"Once a job is fouled up, anything done to improve it makes it worse" (4 ème loi de Finagle)

RESUME

Cette étude porte sur la caractérisation hydro-pédologique et une première évaluation de l'aptitude agricole d'un versant représentatif d'un paysage couvrant plus de 500.000 km² en Afrique de l'ouest. Ce paysage est défini par un climat tropical à saison sèche, une végétation de savane, un substratum granito-gneissique, et une organisation pédologique à sols ferrallitiques et sols ferrugineux. Le versant est situé au Togo entre 1°00'-1°01' de longitude Est et 8°38'-8°39' de latitude Nord.

⊙L'étude de la pédoséquence a permis de reconnaître trois domaines pédologiques ferrallitique, ferrugineux et hydromorphe, délimités par des ruptures de pente, et associés à différents niveaux de glaciaires quaternaires. Les caractéristiques et la distribution de 20 horizons pédologiques ont permis d'expliquer la différenciation pédologique du versant selon deux facteurs : érosion en glaciaires suivie du comblement partiel du bas de versant; transformations au sein des horizons liées à l'action de l'eau.

L'étude de l'hydroséquence, effectuée durant 3 années, a révélé l'existence d'une nappe perchée semi-permanente localisée dans les domaines ferrugineux et hydromorphes. Elle a également montré l'existence d'une nappe d'arène dans tous les domaines pédologiques.

La pédoséquence et l'hydroséquence ont été mises en relation : des relations statistiques ont été établies entre la fréquence annuelle d'engorgement d'une part, et le type d'horizon et la couleur des matériaux, d'autre part.

Une transposition des résultats à des échelles plus petites apparaît envisageable, à l'aide de modèles numériques de terrain.

⊙Une première évaluation de l'aptitude agricole de ce versant a été effectuée avec une culture de cotonnier en condition de traitement homogène. Ceci a montré l'existence d'une séquence étagée de contraintes hydro-pédologiques : résistance à la pénétration dans le domaine ferrallitique; faible fertilité et excès d'eau lié à la nappe dans le domaine ferrugineux.

Un prolongement serait d'étudier la réponse d'autres plantes cultivées sur l'ensemble du versant.

Mots-Clés : Togo; Socle granito-gneissique; Sol ferrallitique; Sol ferrugineux; Sol hydromorphe; Toposéquence; Nappe phréatique; Cotonnier.