



Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération

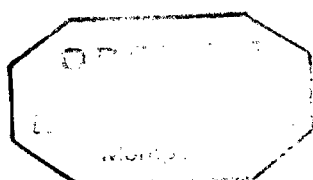
Centre
de
Montpellier

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

Didier BLAVET

Didier BLAVET

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

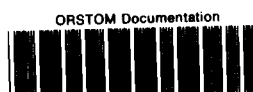


Montpellier
1997

068
PEDAPP
BLA

11 SEP. 1997

F



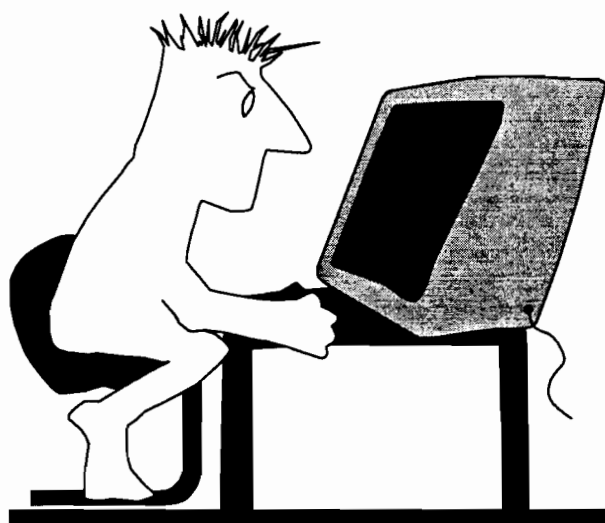
010053458

Les opinions exprimées dans ce document
n'engagent que la responsabilité de l'auteur

Ce travail a fait l'objet d'une soutenance de thèse à l'Université des sciences et techniques
du Languedoc-Montpellier II, le 19 décembre 1996.

© Orstom, 1997

A Cathy, Axelle 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. J'espère que les personnes que j'aurai involontairement oubliées ne m'en tiendront pas rigueur.

Au terme de ce travail, je tiens d'abord à remercier le professeur Claude DROGUE, de l'Université Montpellier II, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Le professeur Adrien HERBILLON, de l'Université de Nancy I, m'a fait l'honneur d'accepter la fonction de rapporteur de thèse, et de consacrer une part de son temps précieux à la lecture et au commentaire de ce document. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance.

Je suis très heureux que monsieur Roland POSS ait pu siéger au jury, malgré son expatriation à l'autre bout du monde. Étant à l'origine de ce travail sur le terrain, il a su, avec beaucoup de professionnalisme, en suivre étroitement l'évolution, quelque soit son éloignement géographique. Je tiens notamment à le remercier pour le soin apporté aux corrections du manuscrit, et pour avoir accepté la tâche de rapporteur de cette thèse.

Je tiens à rendre hommage au professeur Jean-Claude REMY, de l'ENSAM, qui a dirigé cette thèse. Les discussions que nous avons eues m'ont permis de mieux préciser le fil directeur de ce travail, et d'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 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".

J'adresse mes plus vifs remerciements à monsieur Jean-Claude LEPRUN, qui, malgré ses nombreuses missions à l'étranger, a trouvé le temps de lire attentivement le manuscrit, et de participer à ce jury. Je lui suis redevable de nombreuses suggestions et remarques constructives quant à la forme et au fond du manuscrit.

Pour remonter aux sources de ce travail, 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 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 le professeur Claude CHEVERRY, puis le professeur Gérard BOCQUIER, et encore 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. 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.

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.

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.

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.

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.

Dans la mesure où 99,9 % de ce mémoire a été réalisé sur ordinateur, je remercierai aussi (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.

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>	21
CHAPITRE 2. CHOIX D'UN VERSANT REPRÉSENTATIF DU PAYSAGE.....	23
2.1. <i>Choix et caractéristiques de la région</i>	24
2.2. <i>Choix du versant</i>	31
2.3. <i>Conclusion du chapitre 2</i>	32
CHAPITRE 3. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU VERSANT REPRÉSENTATIF.....	33
3.1. <i>La climatologie du versant</i>	33
3.2. <i>La géologie du versant</i>	39
3.3. <i>La topographie du versant</i>	40
3.4. <i>La morpho-pédologie du versant</i>	44
3.5. <i>L'occupation du sol du versant</i>	47
3.6. <i>Conclusion du chapitre 3</i>	49
CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE.....	51
DEUXIÈME PARTIE : L'HYDROPÉDOSÉQUENCE SUR LE VERSANT REPRÉSENTATIF	53
CHAPITRE 4. LA PÉDOSÉQUENCE.....	57
4.1. <i>Les méthodes d'étude</i>	57
4.2. <i>L'organisation pédologique du versant</i>	69
4.3. <i>Les séquences de caractères analytiques</i>	99
4.4. <i>Conclusion du chapitre 4</i>	105
CHAPITRE 5. L'HYDROSÉQUENCE.....	107
5.1. <i>Le dispositif</i>	107
5.2. <i>Résultats et interprétations</i>	110
5.3. <i>Conclusion du chapitre 5</i>	122
CHAPITRE 6. RELATIONS ENTRE PÉDOSEQUENCE ET HYDROSÉQUENCE.....	123
6.1. <i>Relations statistiques entre la fréquence annuelle d'engorgement et le type d'horizon pédologique</i>	124
6.2. <i>Relations statistiques entre la fréquence annuelle d'engorgement et les variables pédologiques quantitatives</i>	128
6.3. <i>Conclusion du chapitre 6</i>	132
CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE.....	135
TROISIÈME PARTIE : RELATIONS ENTRE L'HYDROPÉDOSÉQUENCE ET LE COMPORTEMENT D'UNE PLANTE CULTIVÉE	137
CHAPITRE 7. RELATIONS ENTRE L'HYDROPÉDOSÉQUENCE ET LE COMPORTEMENT DU COTONNIER.....	141
7.1. <i>Matériel et méthodes</i>	142
7.2. <i>Résultats et interprétations</i>	148
7.3. <i>Conclusion du chapitre 7</i>	168
CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE.....	171
CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	173
1. <i>L'inventaire des ressources naturelles en terre et en eau</i>	175
2. <i>L'évaluation de l'aptitude agricole des ressources</i>	177
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	179
ANNEXES.....	193
TABLE DES MATIÈRES LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	227

INTRODUCTION GENERALE

L'aménagement et la mise en valeur agricole constituent un objectif majeur pour le 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. Il faut donc, préalablement, avoir 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, des travaux d'inventaire et d'évaluation des ressources en terre et en eau ont été entrepris au cours de ces dernières décennies. Ces travaux s'inscrivent dans une démarche générale à différents niveaux (cf. **figure 1**), ainsi que le rappelle BRABANT (1991 b) :

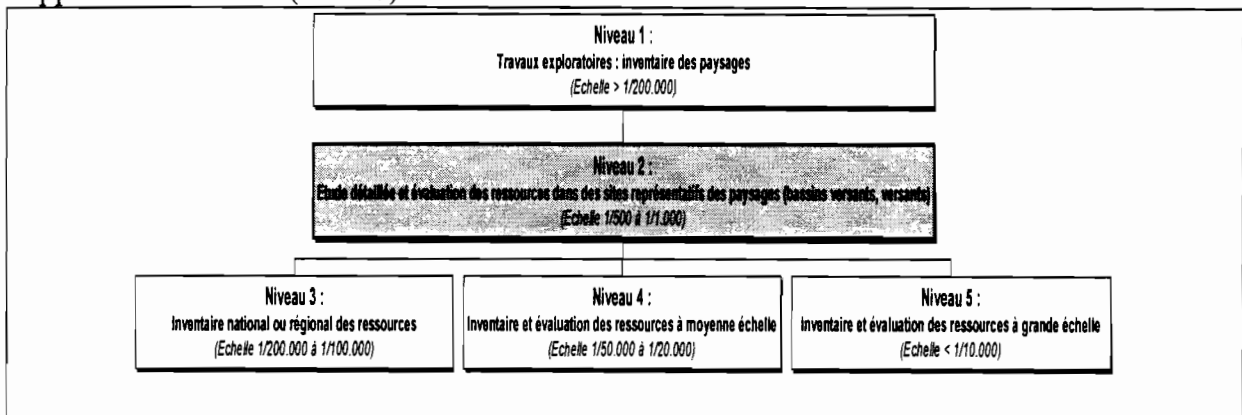


Figure 1. Approche générale de l'inventaire et de l'évaluation des ressources naturelles en terre et en eau en Afrique de l'ouest. D'après P. BRABANT, 1991 b.

- **au niveau 1** correspondent des études exploratoires à petite échelle ($> 1/200.000$). De telles études permettent d'identifier et de localiser les ressources par grandes unités naturelles : les paysages.

- **au niveau 2** correspondent des études à très grande échelle ($1/500$ à $1/1000$) de sites représentatifs de ces paysages. Ces sites correspondent généralement à un petit bassin versant, un interfluve ou un versant, car les paysages tropicaux s'organisent selon une répétition ordonnée de telles unités naturelles. Il s'agit, dans ces sites, d'étudier finement la variabilité spatio-temporelle des ressources en terre et en eau, ainsi que l'aptitude agricole de ces ressources. Les résultats obtenus sont destinés à être transposés aux niveaux suivants, et doivent permettre de préciser la manière de cartographier les ressources en terre et en eau à ces niveaux.

- **aux niveaux 3 à 5** correspondent des études destinées à fournir une aide à la décision pour les projets d'aménagement et de mise en valeur agricole. Ces études à moyenne échelle (échelle du $1/100.000$ au $1/10.000$) s'appuient sur les résultats obtenus au niveau 2.

Au stade actuel, on sait que certains paysages d'Afrique de l'ouest couvrent de vastes superficies qui pourraient être aménagées et mises en valeur. Cependant, les travaux d'inventaire et d'évaluation des ressources en terre et en eau s'y sont principalement limités au **niveau 1**, de sorte qu'il est à présent nécessaire d'y entreprendre des travaux d'inventaire et d'évaluation des ressources aux niveaux suivants.

C'est pourquoi ce mémoire se propose de mener une étude **de niveau 2** dans un de ces paysages d'Afrique de l'ouest. Ce paysage de référence peut se définir par 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. Du fait de ses caractéristiques, ce paysage présente une forte variabilité spatio-temporelle des ressources en terre et en eau. Toutefois, ces caractéristiques montrent que cette variabilité peut s'appréhender à l'échelle d'un versant représentatif.

A travers cette étude, et après avoir choisi un versant représentatif de ce paysage, nous aurons deux objectifs principaux :

- un objectif d'inventaire des ressources en terre et en eau, pour lequel nous tenterons d'analyser la variabilité spatio-temporelle des composantes pédologiques et hydrologiques du versant représentatif ;
- un objectif d'évaluation de l'aptitude agricole de ce versant, pour lequel nous nous efforcerons de voir comment la variabilité spatio-temporelle des ressources en terre et en eau peut influencer le comportement d'une plante cultivée.

Les éléments de l'étude seront présentés selon le plan suivant :

En **première partie**, nous décrirons 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.

PREMIERE PARTIE :

LE PAYSAGE DE REFERENCE ET LE VERSANT REPRESENTATIF

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 REFERENCE : DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

De vastes superficies de l'Afrique de l'ouest peuvent être caractérisées par 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. L'ensemble de ces caractéristiques définit ce que nous appellerons le paysage de référence.

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 (BOULET et al., 1971; TOUPET, 1971; LEPRUN, 1979; VALENTIN et al., 1990; MOREAU, 1993). 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 qu'il 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.

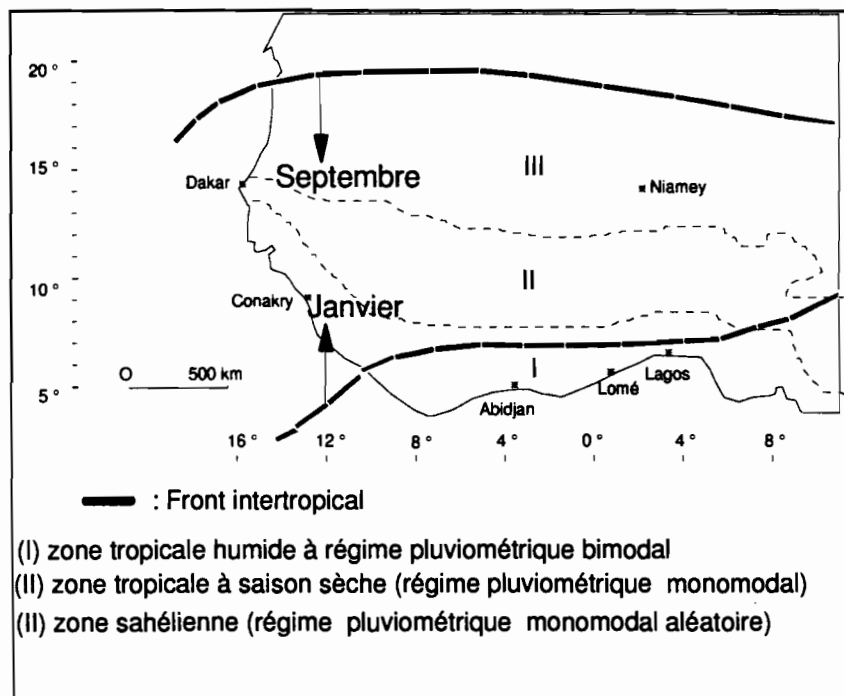


Figure I-1. Esquisse des climats d'Afrique de l'ouest. D'après TOUPET (1971) et CHAUVEL (1977).

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.

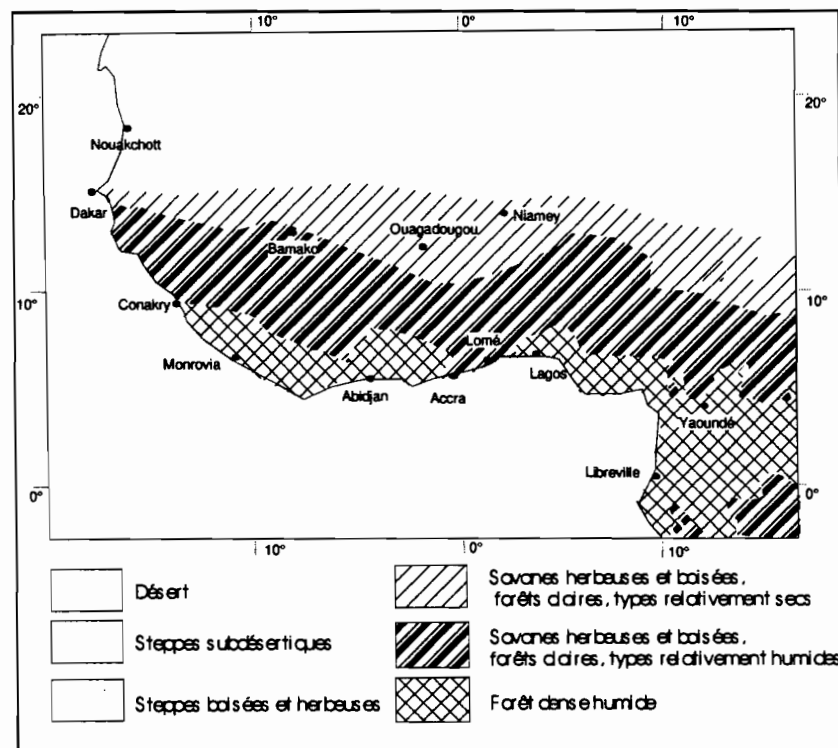


Figure I-2. La végétation au sud du Sahara. In VALENTIN et al., 1990.

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 de la figure I-1.

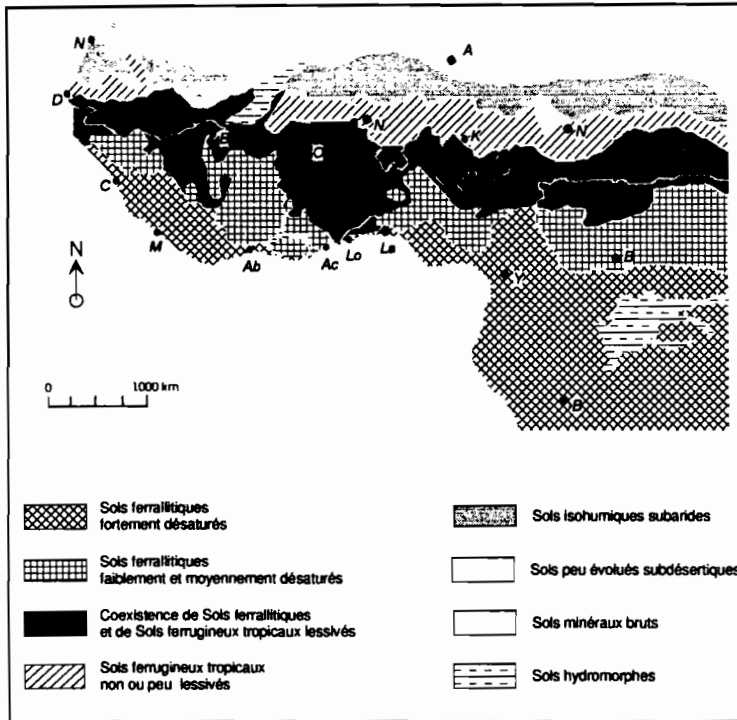


Figure I-3. Carte des sols d'Afrique de l'ouest. D'après MOREAU (1993).

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 les plus évidentes de ces sols (colorations vives d'oxy-hydroxydes de fer. Les propriétés 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 épipédon déferrifié et désargiliifié.

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).

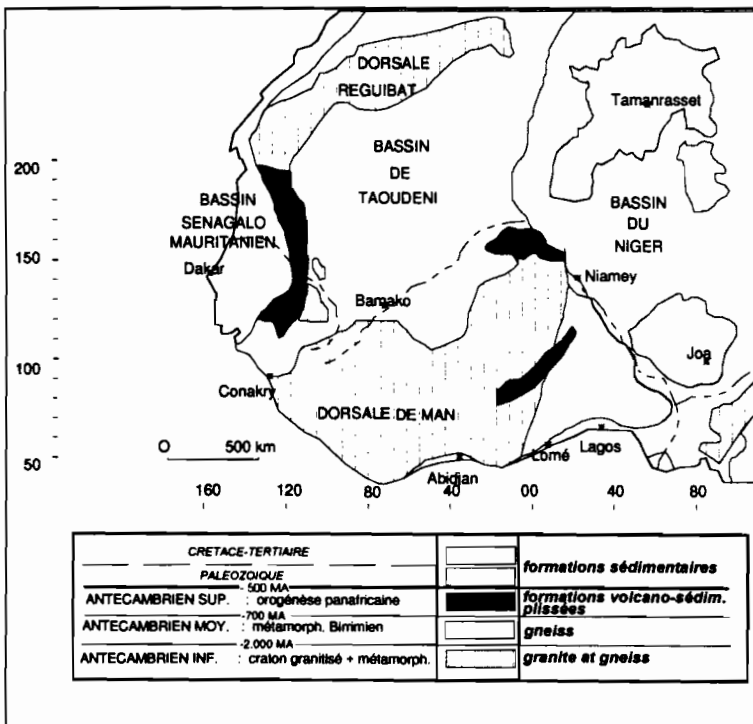


Figure I-4. Esquisse géologique de l'Afrique de l'ouest. D'après LEPRUN (1979)

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 granité 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.

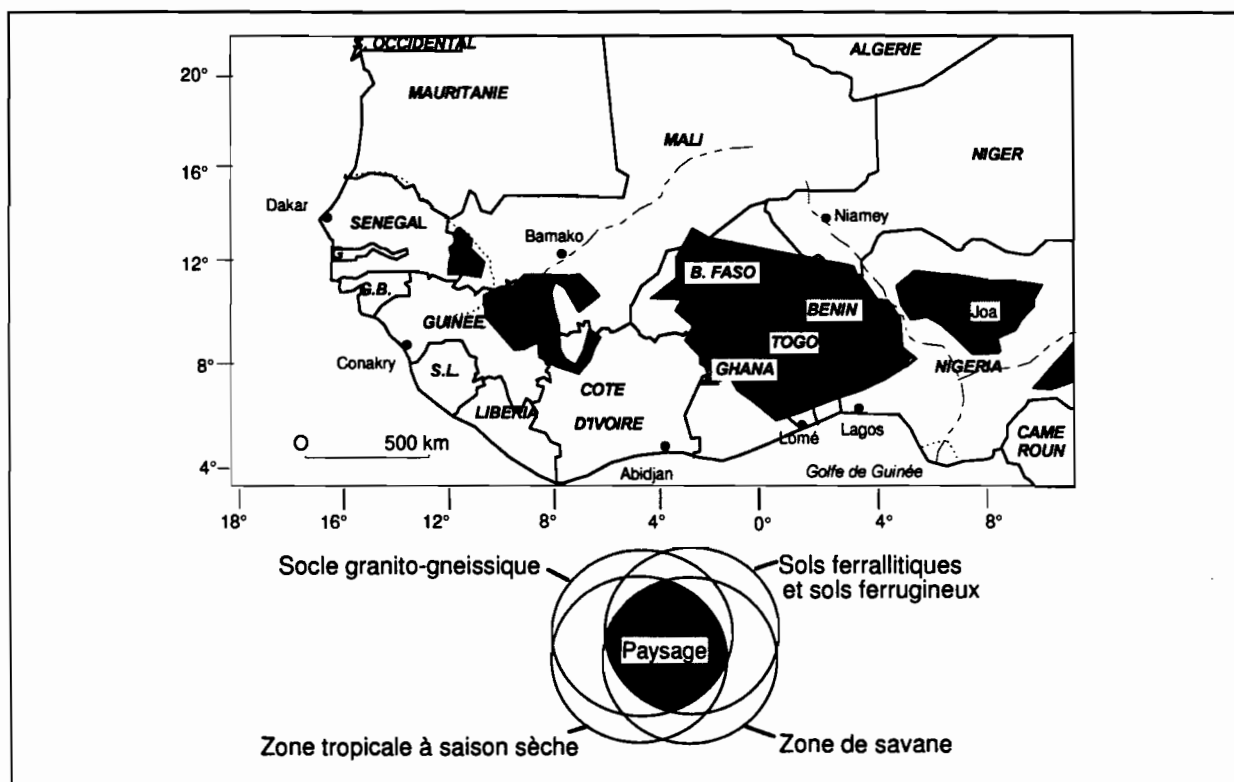


Figure I-5. Extension géographique du paysage de référence.

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).

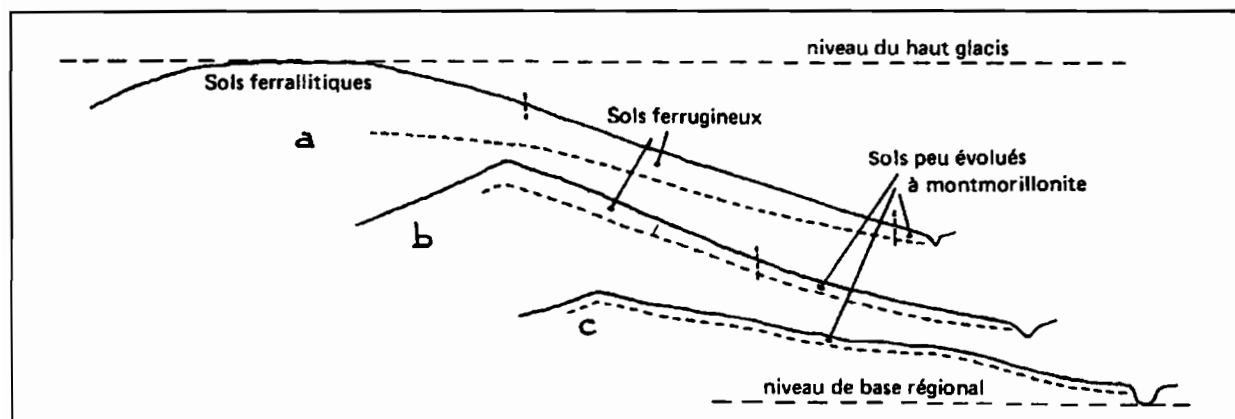


Figure I-6. Troncature par l'érosion du versant-type. D'après LEVEQUE (1976).

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) :

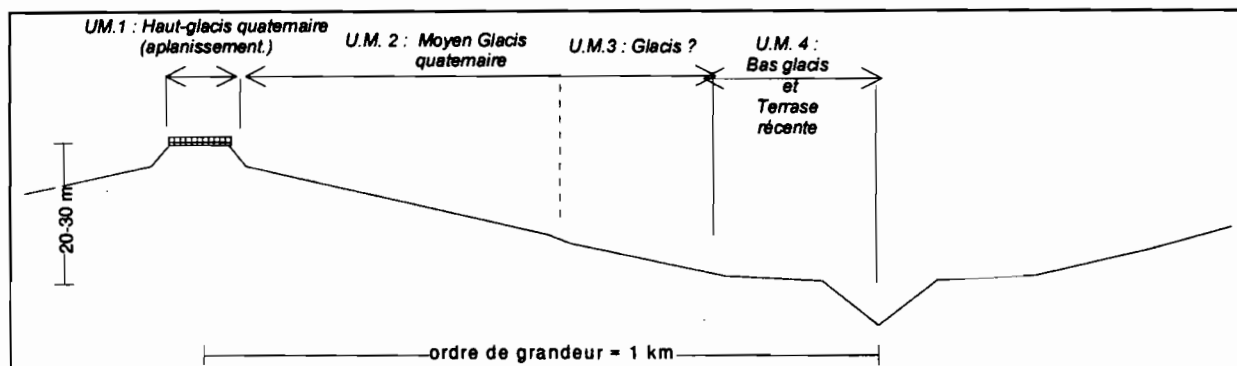


Figure I-7. Le modelé du versant-type

- **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; LEVEQUE, 1969 b, GAVAUD, 1970; MICHEL, 1970; BOULET, 1970 et 1974; GRANDIN, 1976; LEVEQUE, 1979; KALOGA, 1986), cette surface d'aplanissement daterait du tertiaire, mais elle serait recouverte d'un manteau d'altération et d'une cuirasse quaternaires qui correspondraient à un « haut-glacis quaternaire ». Parmi les arguments avancés en faveur de l'hypothèse de l'aplanissement, LEVEQUE (1979) note que les sommets aplanis se situent sensiblement à la même altitude pour une latitude donnée, et que celle-ci croit 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 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-plans à fragments de cuirasse relictuelle, puis à des sommets convexes (BEAUDOU et COLLINET, 1977).

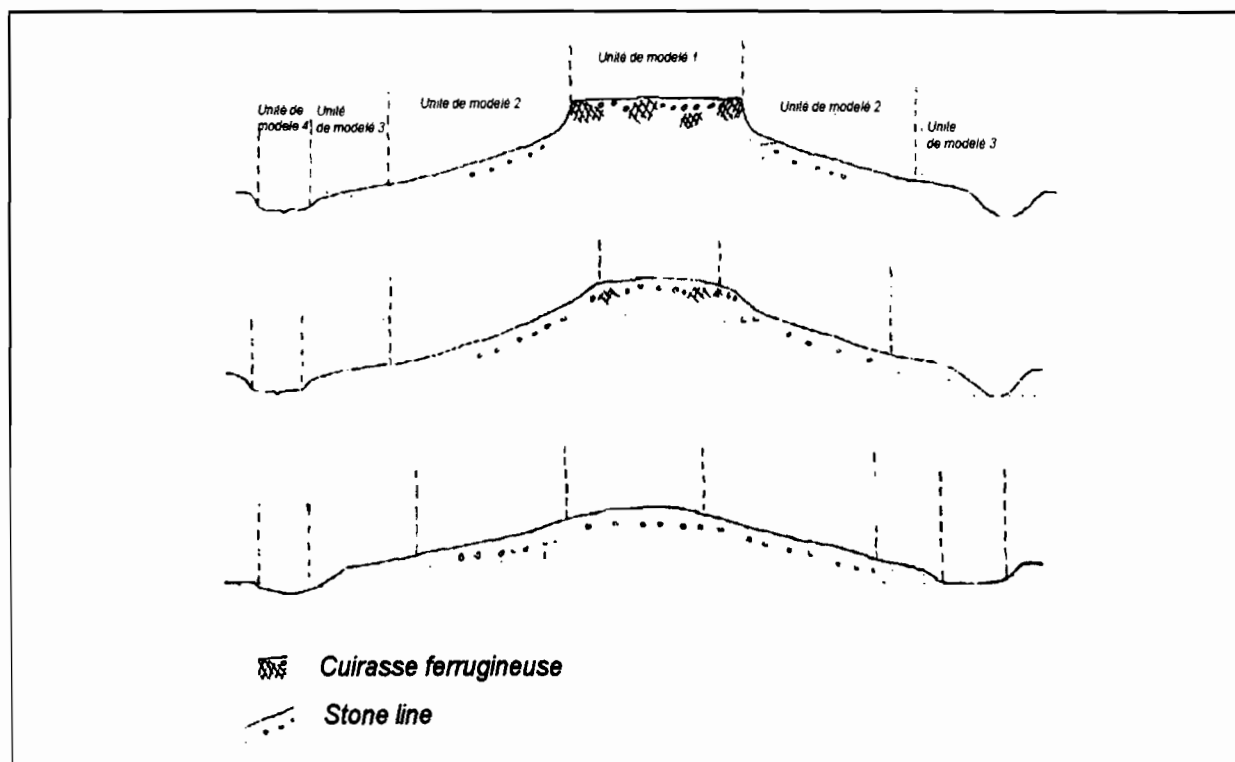


Figure I-8. Evolution du sommet du versant-type. D'après BEAUDOU et COLLINET (1977).

- **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. 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** : elle apparaît à la faveur d'une nouvelle rupture de pente et se localise à proximité de l'axe de drainage. Cette unité, appelée parfois "surface fonctionnelle" par les géomorphologues, correspond à un complexe colluvio-alluvial. Si l'on se réfère à la chronologie proposée par MICHEL (1970) et aux datations effectuées par SCHWARTZ (1991), les formations colluviales correspondraient au "bas glacis" quaternaire, tandis que les formations alluviales de cette unité de modelé seraient au plus âgées de 5.000 ans.

En résumé, le relief de ce versant-type se serait façonné au cours du quaternaire, à l'occasion d'une série de phases d'érosion successives et de dépôts en aval. 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 impossible.

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 le sommet de versant, généralement préservé 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. Elle correspondrait à un recul de la forêt dense semi-décidue depuis le dernier optimum pluvial (- 4.000 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;

- plus en aval, la forêt claire disparaît du fait d'une forte pression anthropique (POSS et al., 1990), par défrichement, 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* et à cypéracées;

- 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.*), et à nombreuses espèces de palmier (*Elaeis guineensis*; *Raphia sp.*).

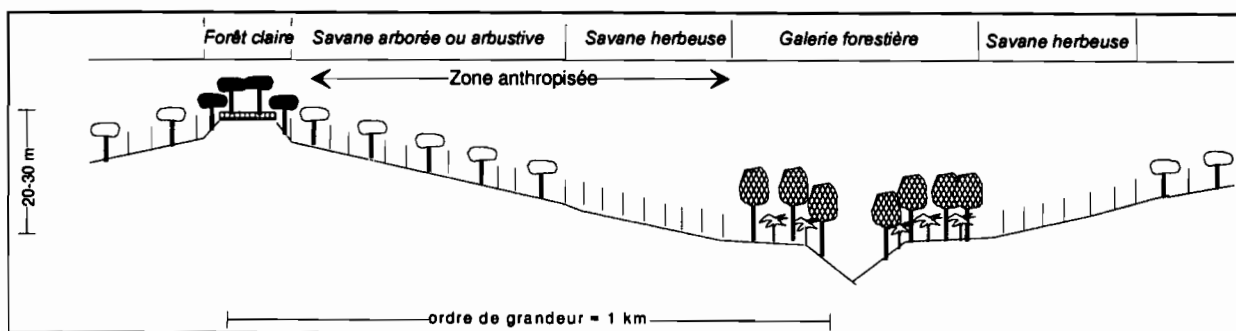


Figure I-9. Répartition de la végétation le long du versant-type.

1.2.3. La pédoséquence-type

Un certain nombre d'études pédologiques ont été effectuées sur ce type de versant (BOULET, 1974; LEPRUN, 1979; LEVEQUE, 1979; BOULET et al., 1982 et 1984; FRITSCH et al., 1986; FAURE et VOLKOFF, 1989; 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.

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).

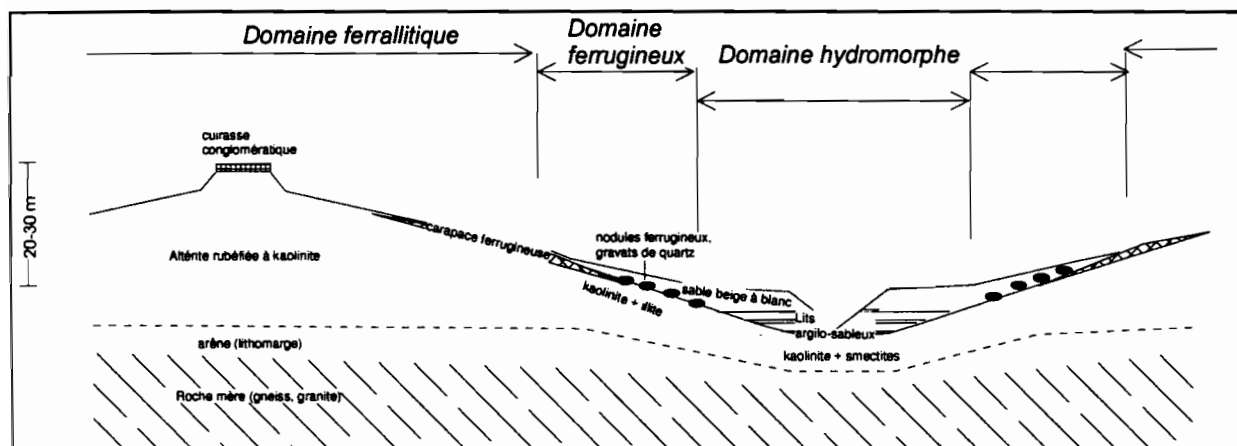


Figure I-10. Organisation pédologique du versant-type.

- **le domaine amont ferrallitique** s'étend sur les surfaces cuirassées du haut-glacis et sur le moyen glacis 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 (quartz, muscovite) peuvent être conservés sous forme plus ou moins intacte et constituent le squelette de ces altérations. Enfin, la libération des oxy-hydroxydes de fer (goéthite 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 produits d'altération (MILLOT, 1964; LEPRUN, 1979; PEDRO, 1987; BOURGEON et PEDRO, 1992). Différents essais de corrélation pédologique, géomorphologique et paléoclimatiques suggèrent que ces altérations 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 1974; GRANDIN, 1976; LEPRUN, 1979, KALOGA, 1986).

Ces altérations sont "coiffées" par des indurations plus ou moins continues (cuirasse ou carapace ferrugineuse), caractérisées par une accumulation de sesquioxydes de fer et de manganèse, et éventuellement d'alumine.

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.

La cuirasse, fortement indurée, se localise en sommet de versant (unité de modelé 1, haut-glacis quaternaire). La plupart des auteurs considèrent que le matériau parental de cette cuirasse est la roche sous-jacente. Mais, en raison de l'aspect conglomératique de cette cuirasse, certains auteurs supposent que ce matériau est surimposé au profil d'altération kaolinitique (GAVAUD, 1967; VOGT, 1968; BOULET, 1970; KALOGA, 1969 et 1986). D'autre part, l'accumulation des métaux au sein de cette cuirasse a été diversement expliquée :

- selon une première explication, il s'agirait d'une accumulation absolue de métaux (HUMBERT, 1948; MAIGNIEN, 1958 ; MILLOT, 1964). Ceux-ci, apportés par voie soluble, auraient précipité par oxydation dans la zone de battement d'une nappe, à présent disparue.
- selon une explication plus récente, basée sur des arguments micromorphologiques et minéralogiques, il s'agirait d'une accumulation relative de métaux, résultant d'une lixiviation de la silice et de l'aluminium après déstabilisation de la kaolinite contenue dans le matériau parental (MAC FARLANE, 1976; LEPRUN, 1979).

Située sur l'unité de modelé 2 (moyen glacis), la carapace ferrugineuse 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). Comme pour la cuirasse, l'accumulation des métaux dans cette carapace a été diversement expliquée (accumulation absolue ou relative de métaux). En revanche, les auteurs s'accordent sur l'autochtonie du matériau parental (LEVEQUE, 1979; LEPRUN, 1979).

- 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 (SEGALEN, 1967; COLLINET, 1969), ou bien être mise en place sous forme de pavage puis recouverte par colluvionnement ou remontées biologiques de matériau fin (LEVEQUE, 1969 a).

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 glacis 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 (BOULET, 1974; 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 (MILLOT, 1964; DUCHAUFOR, 1977).

1.2.4. l'hydroséquence-type

Il n'existe pas encore de modèle hydrologique déterministe adapté au versant-type, 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, d'après certaines études hydrologiques, on peut établir des schémas hydrologiques qualitatifs du versant-type. De manière générale, ce genre de schéma qualitatif porte sur la localisation des zones saturées et insaturées, et sur les différents flux d'eau dans ces zones (cf. figure I-11).

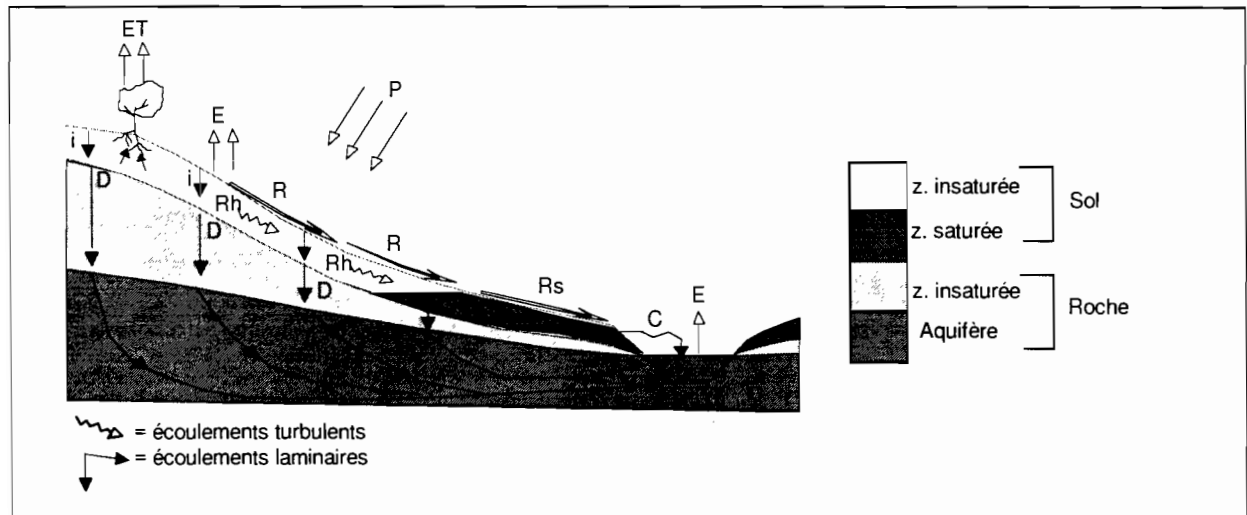


Figure I-11. Schéma qualitatif général de fonctionnement hydrodynamique d'un versant.
D'après CHORLEY (1980), DUNNE (1980) et ATKINSON (1980).

Dans ce genre de schéma, on différencie généralement les flux d'eau suivants : à l'interface sol-atmosphère, il y a évaporation (E) et évapotranspiration (Et). A la surface du sol, une partie de l'eau de précipitation (P) est reprise par le ruissellement de surface (R), 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, en ruissellement hypodermique (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).

Selon la bibliographie, trois schémas hydrologiques de ce genre sont possibles pour le versant-type (cf. figure I-12). 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 de surface (R) est 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'infiltré dans les horizons sableux désargilifiés, afin de produire du ruissellement hypodermique (Rh) qui rejoint la nappe à l'aval.

Toutefois, ces trois 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'existe qu'un seul aquifère, et la recharge de la nappe se fait par drainage (D) sur l'ensemble du versant. Le toit de cette nappe forme un dôme surélevé à l'amont, en concordance avec le mode de recharge. Les flux laminaires latéraux dans la nappe (FL) sont orientés systématiquement vers l'axe de drainage;

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

- enfin, selon un troisième schéma (WOROU, 1988; FRITSCH, 1993), il existe une nappe perchée à l'aval. Cette nappe perchée est séparée de l'aquifère de profondeur par des horizons argileux à phyllite 2/1 qui sont quasiment imperméables. Cet aquifère peut 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.

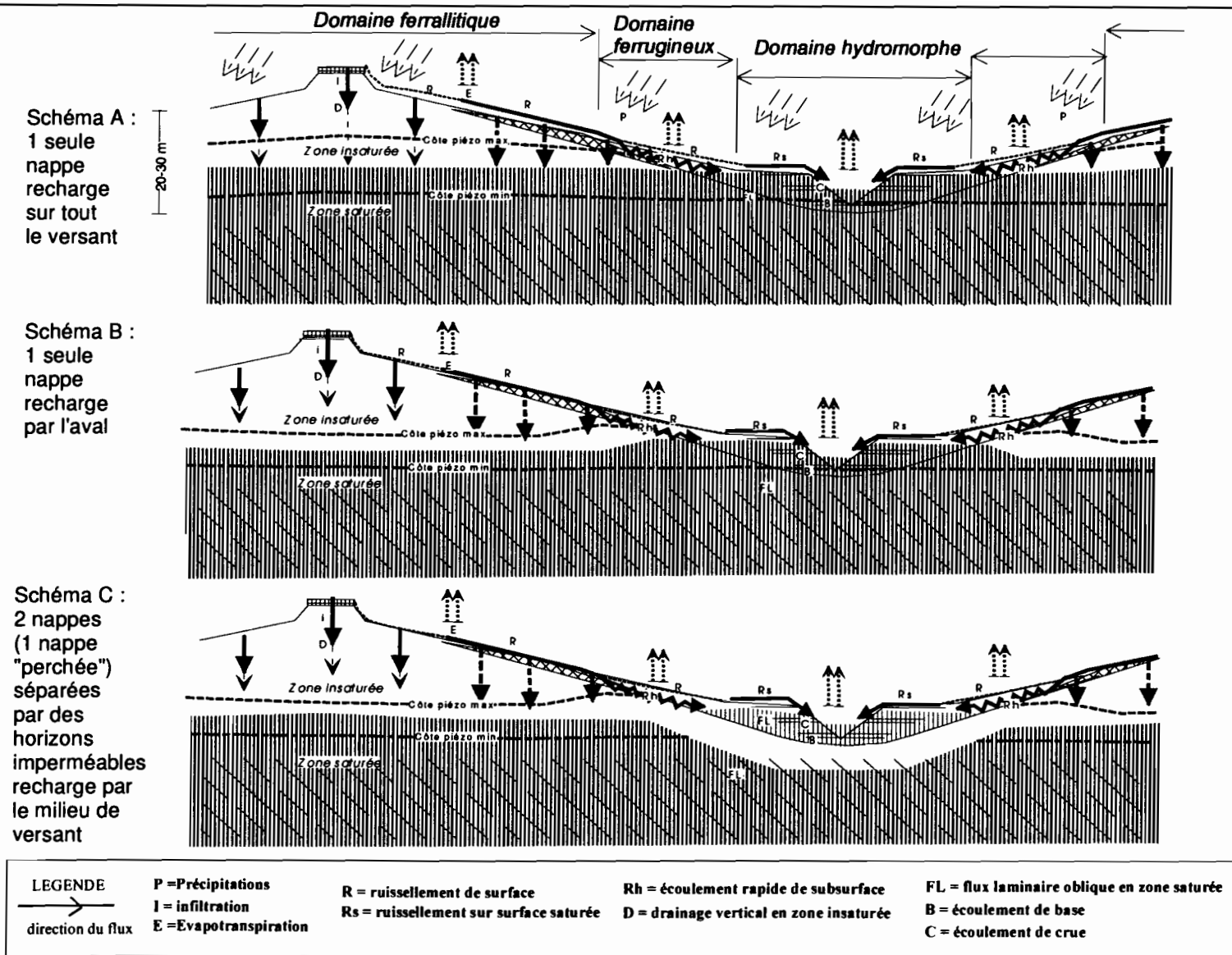


Figure I-12. Trois schémas possibles de fonctionnement hydrodynamique du versant-type.

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-13).

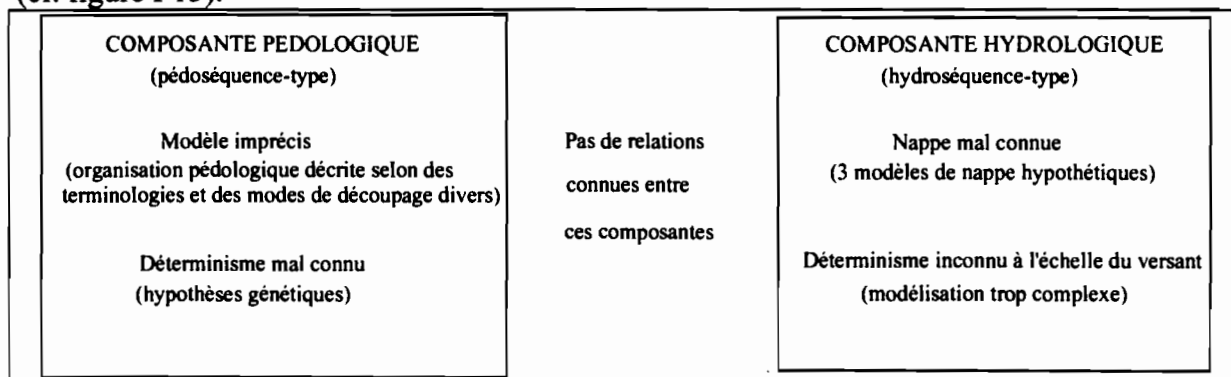


Figure I-13. Résumé de l'état des connaissances sur le paysage de référence.

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 permet 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 REPRESENTATIF 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).

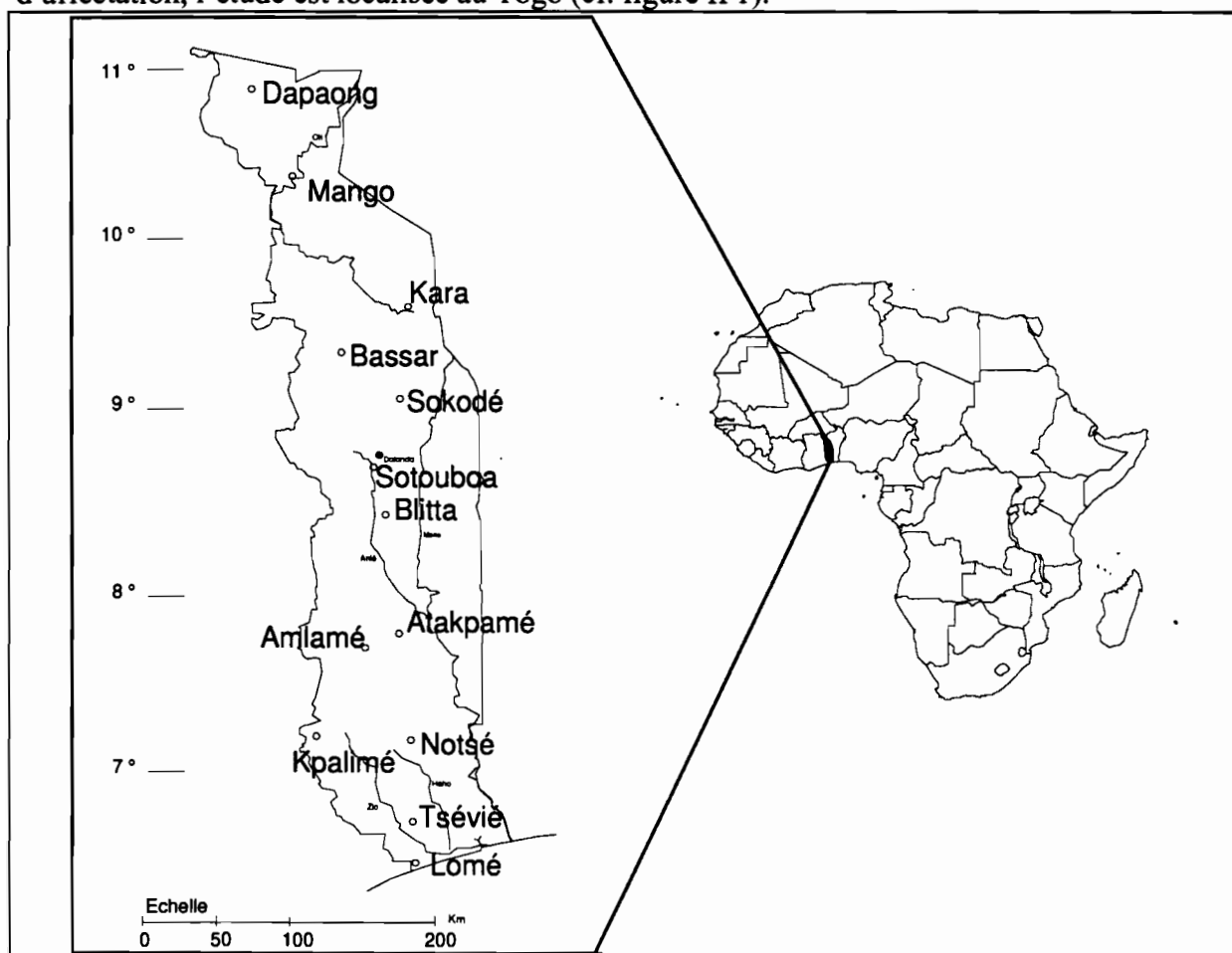


Figure II-1. Carte générale du Togo.

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.

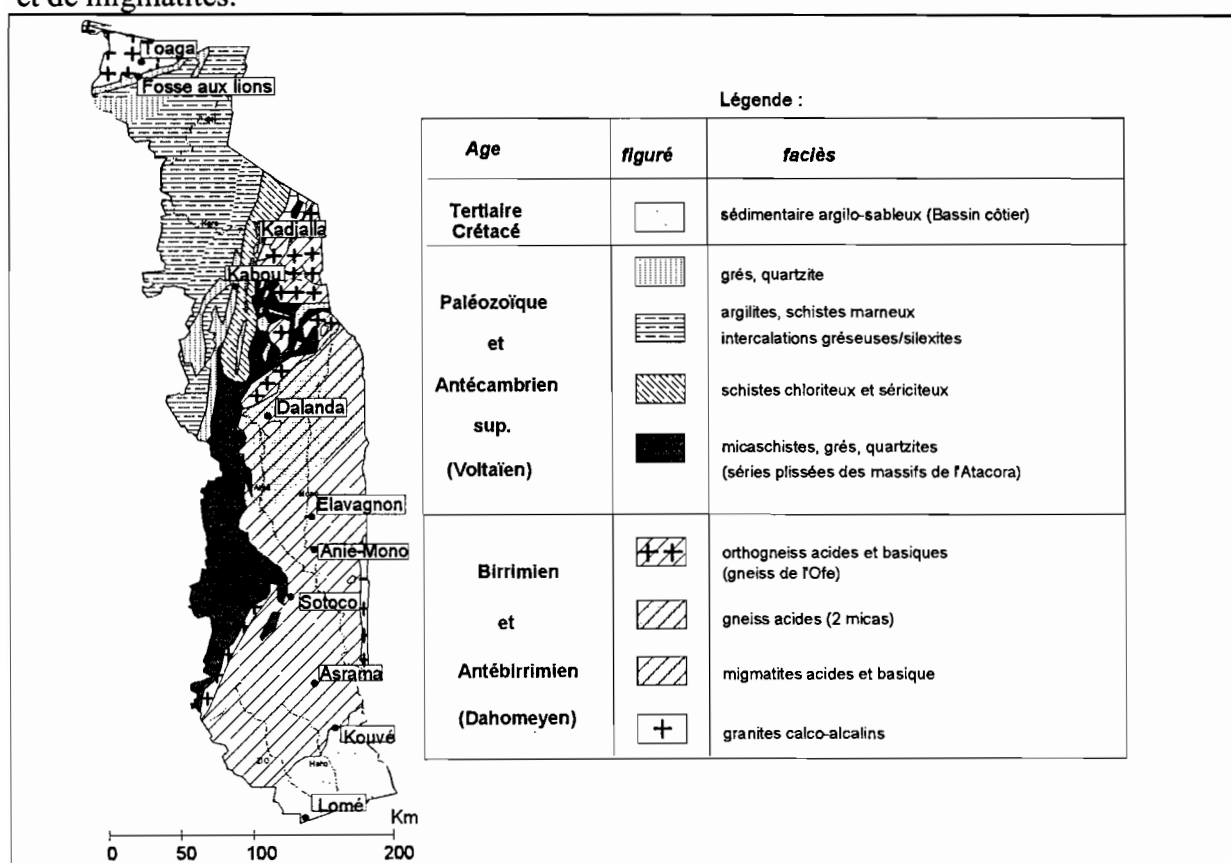


Figure II-2. Esquisse géologique du Togo. D'après LOAEC et al. (1982)

- 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 interceptent les lignes

de grains formés au Togo méridional (DENEAU, 1956, in LEROUX, 1980; LOAEC et al. 1982).

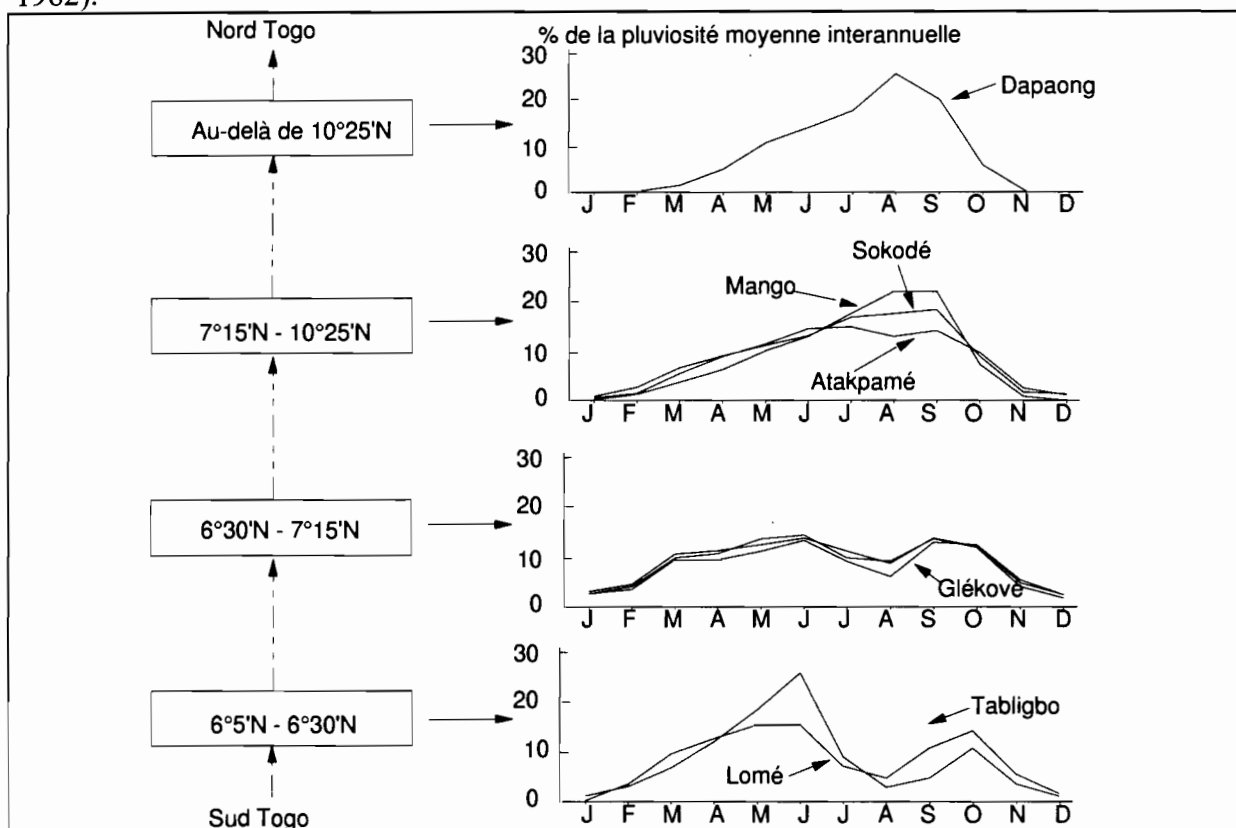


Figure II-3. Variations latitudinales du régime pluviométrique au Togo. d'après SEGUIS (1988).

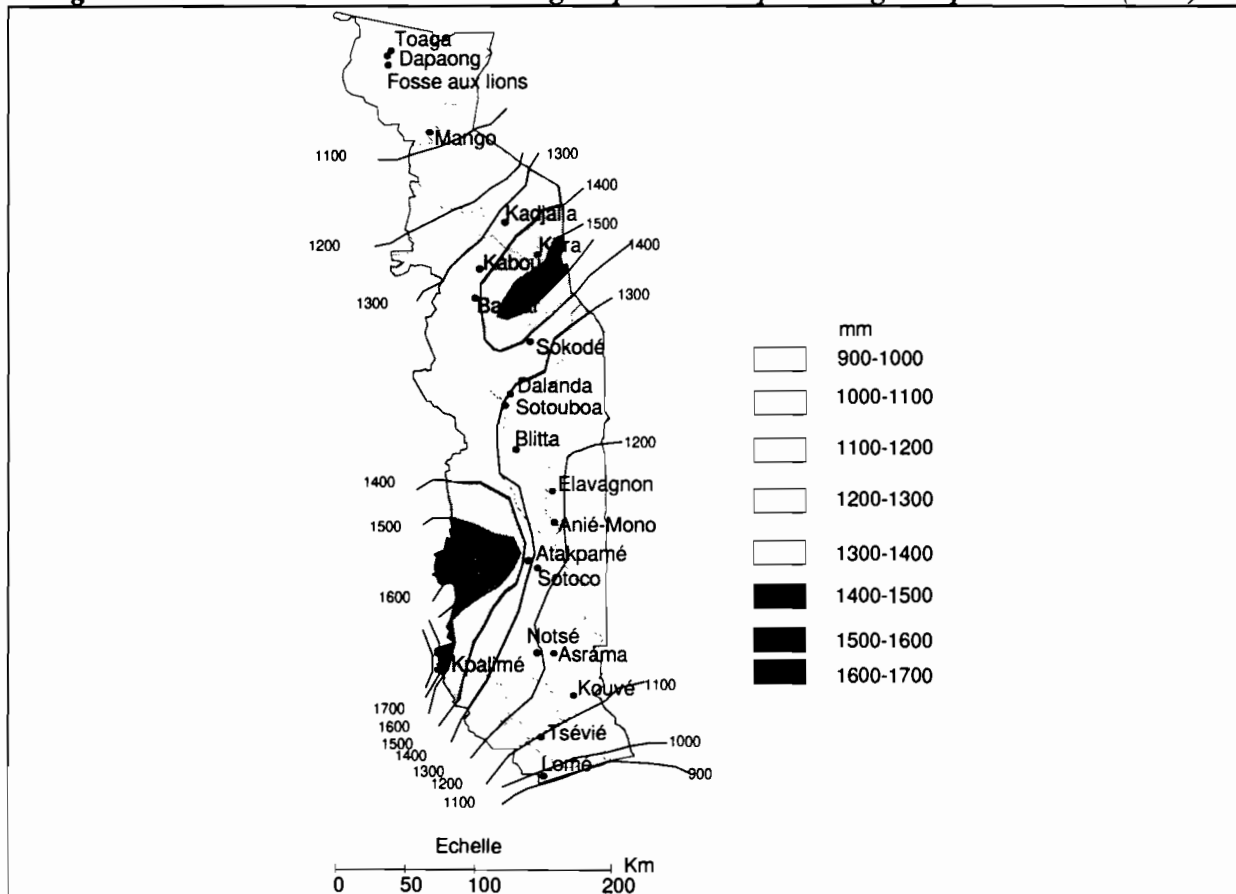


Figure II-4. Pluviosité moyenne annuelle au Togo. D'après LOAEC et al. (1982).

- 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 1/200.000 (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).

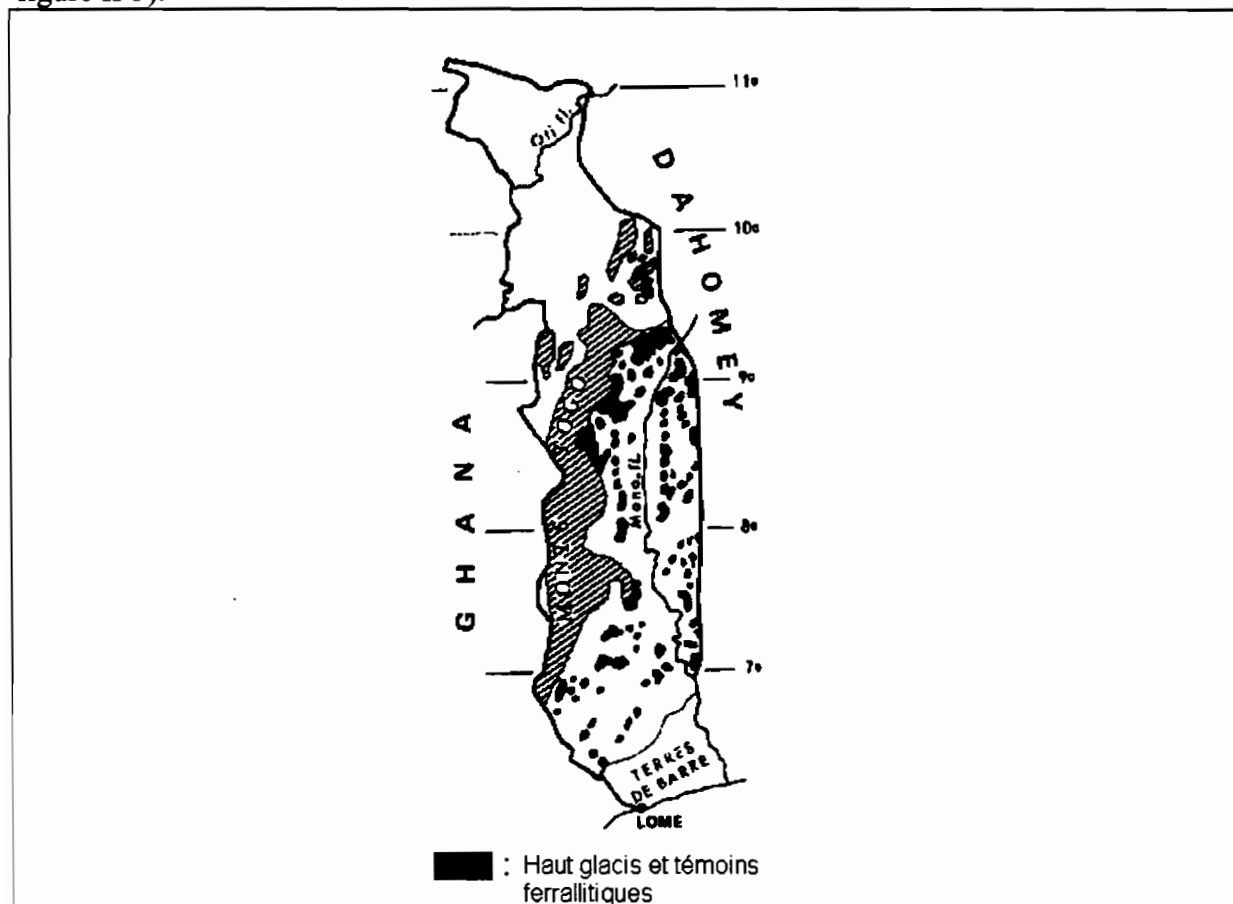


Figure II-5. Localisation des pédoséquences avec terme amont ferrallitique sur le socle granito-gneissique togolais. D'après LEVEQUE (1979).

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, a priori, des conditions particulièrement favorables, du fait de la présence de versants en tout point conformes à la pédoséquence-type (terme amont ferrallitique et cuirasse ferrugineuse sommitale). Nous nous sommes donc focalisé sur cette région, puis avons vérifié, par l'examen de données régionales, que celle-ci est bien représentative du paysage de référence. Ces données régionales sont les 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.

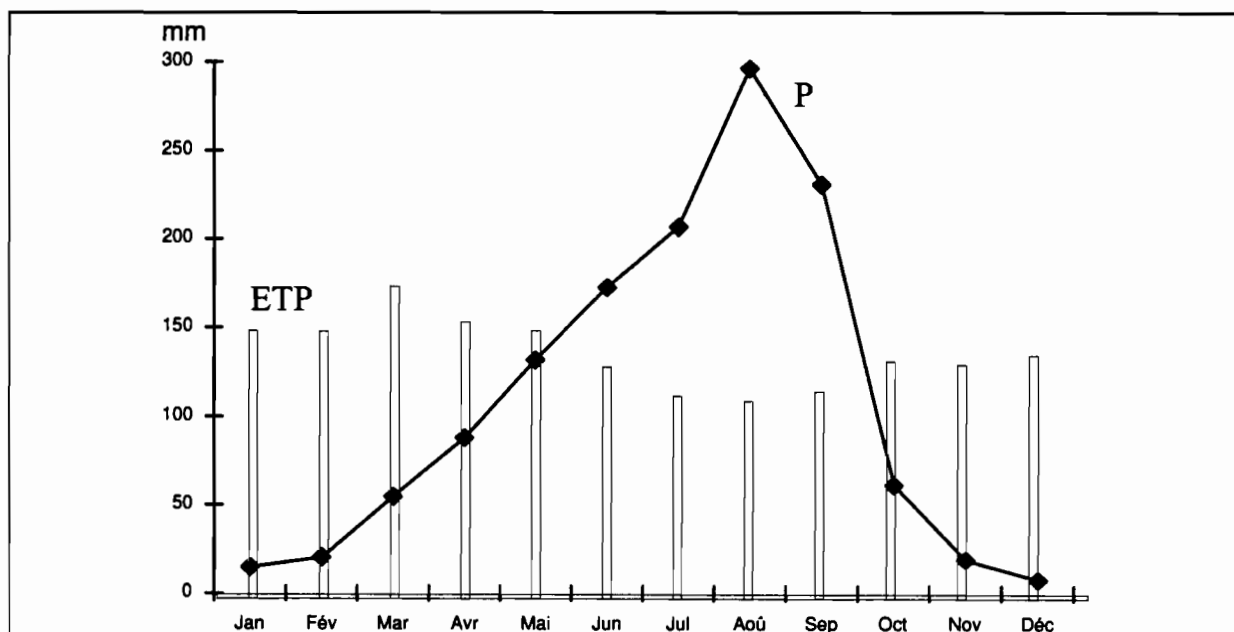


Figure II-6. Pluviométrie relevée à la station de Sotouboa (1984-1989). ETP Penman calculée à partir des relevés de la station de Sokodé (1982-1988; albedo = 0.20; coeff. de Black = 0.18 et 0.62).

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).

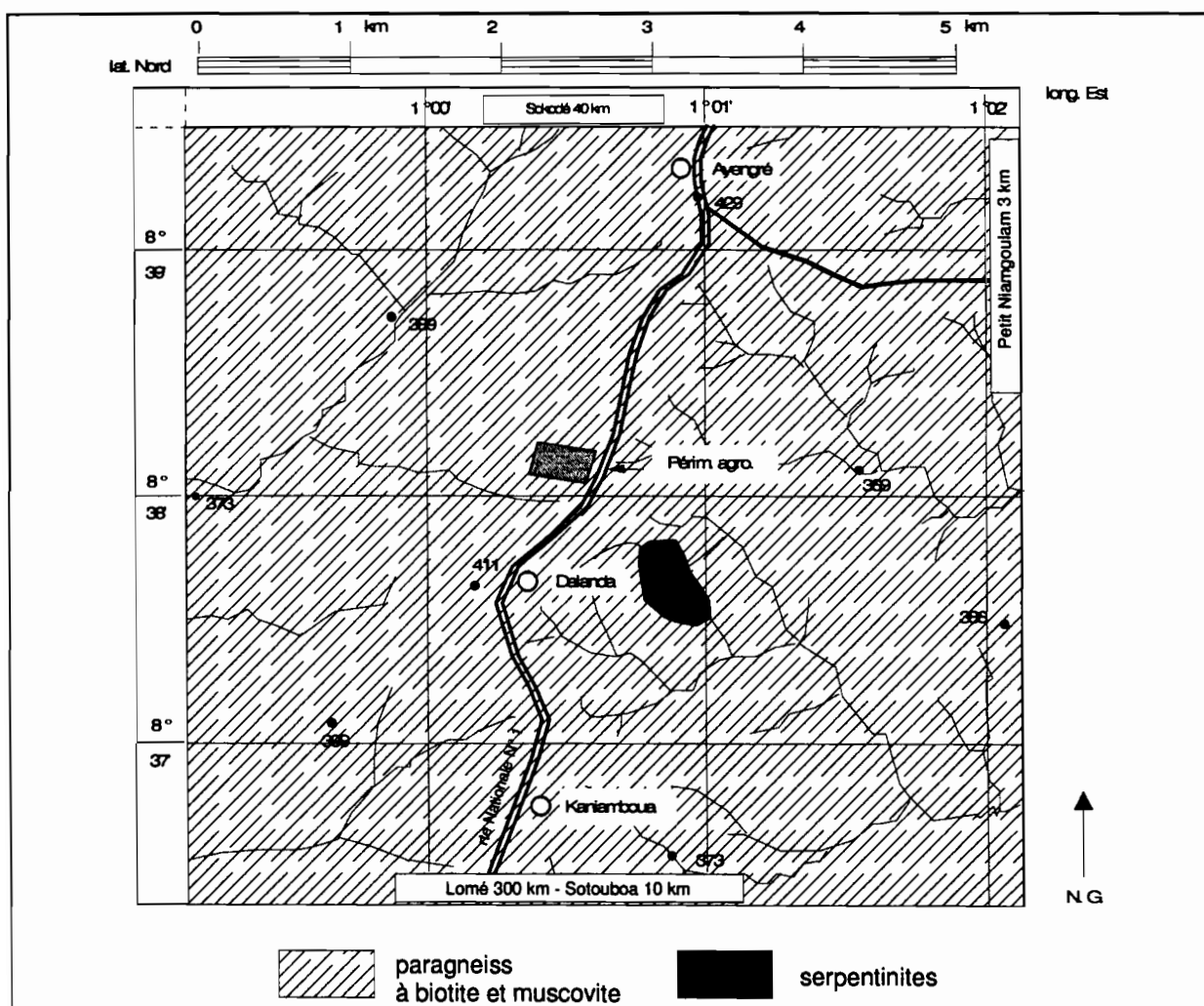


Figure II-7. Géologie de la région d'Ayengré. Extrait de la carte géologique au 1/200.000 ème. Feuille Sokodé.

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

La région d'Ayengré (cf. figure II-8) se situe sur la ligne générale de partage des eaux entre le fleuve Mono, à l'ouest et le fleuve Anié, à l'est. Il en résulte que le modelé est caractéristique des zones du socle granito-gneissique les plus éloignées du niveau de base régional : les sommets d'interfluve sont situés entre les cotes 420 et 440 m; les interfluves élémentaires se succèdent en moyenne tous les 2 kilomètres et dominent les cours d'eau qui les limitent d'environ 20 à 25 m.

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.

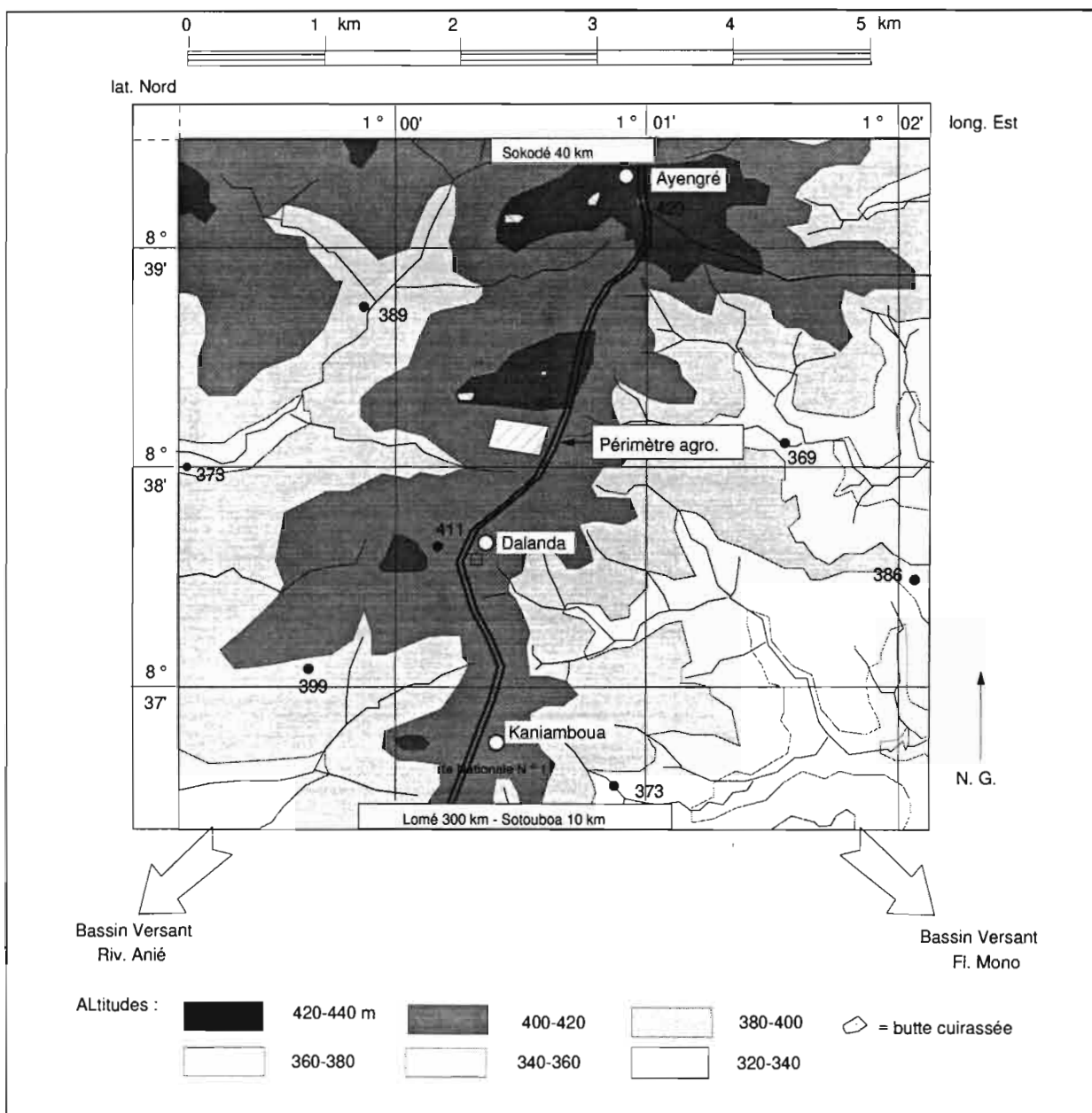


Figure II-8. Esquisse oro-hydrographique de la région d'Ayengré. D'après clichés IGN 1/30.000 ème (mission Tog. 31/300) et feuilles 1/50.000 ème Sokodé 3a et 4b (1969).

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, conformément à la carte générale du Togo présentée en figure II-5.

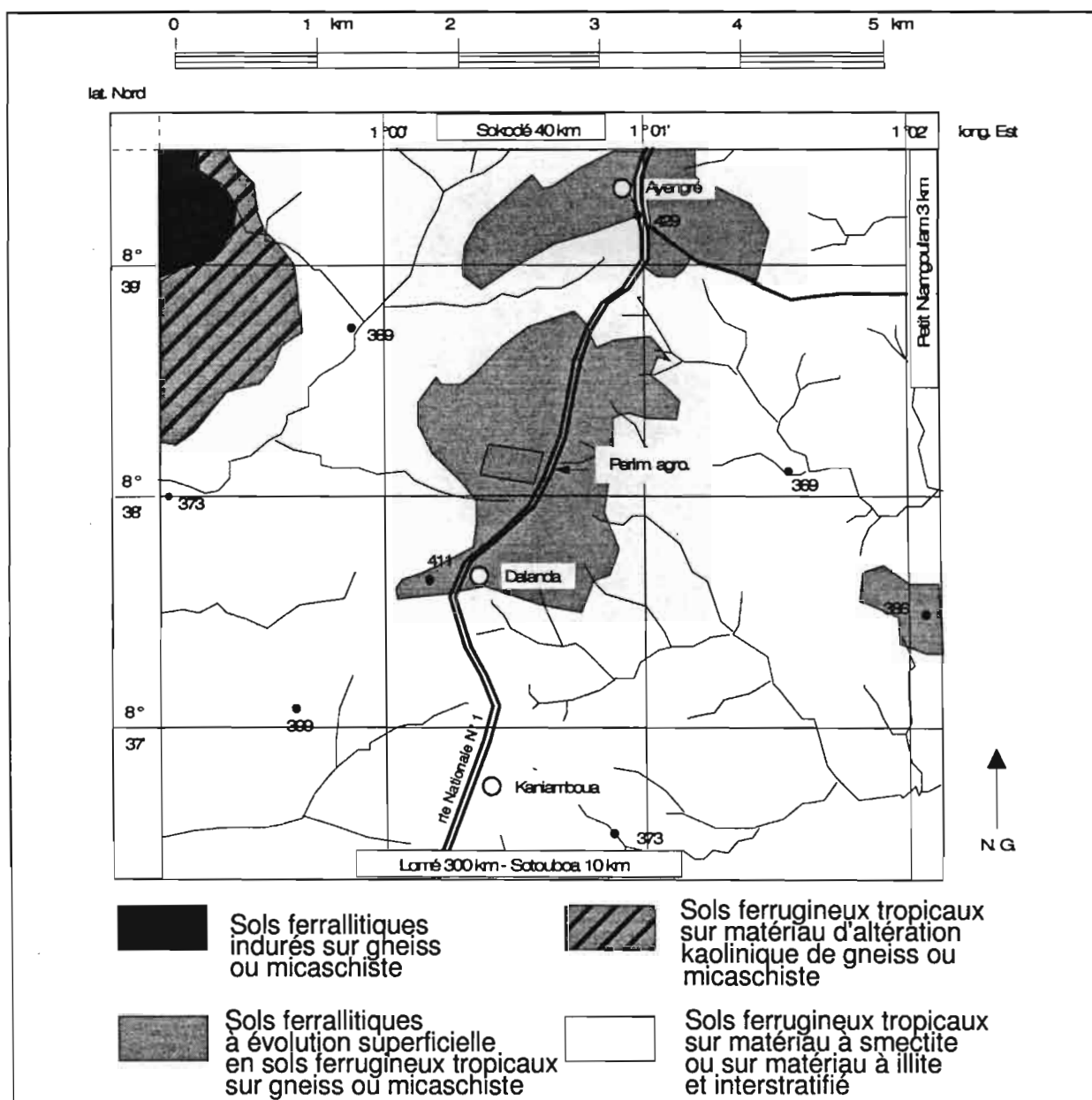


Figure II-9. Extrait de la carte pédologique au 1/200.000 ème. Région d'Ayengré. D'après LEVEQUE (1979).

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 topographique régionale Est-Ouest (cf. figure II-10 a), ces transects révèlent la présence de cuirasses et d'altérites ferrallitiques rubéfiées sur les sommets surélevés, et leur disparition sur les interfluves les plus surbaissés. Ce fait rejoint les observations de LEVEQUE (1969 b, 1976 et 1979) dans d'autres régions du socle granito-gneissique togolais. Il pourrait s'expliquer par l'érosion inégale d'une ancienne pénélaine à couverture ferrallitique généralisée (cf. figure II-10 b). Cette érosion aurait conduit au maintien de la couverture ferrallitique dans les parties les moins érodées de cette pénélaine, et à l'ablation totale de cette couverture dans les parties les plus érodées .

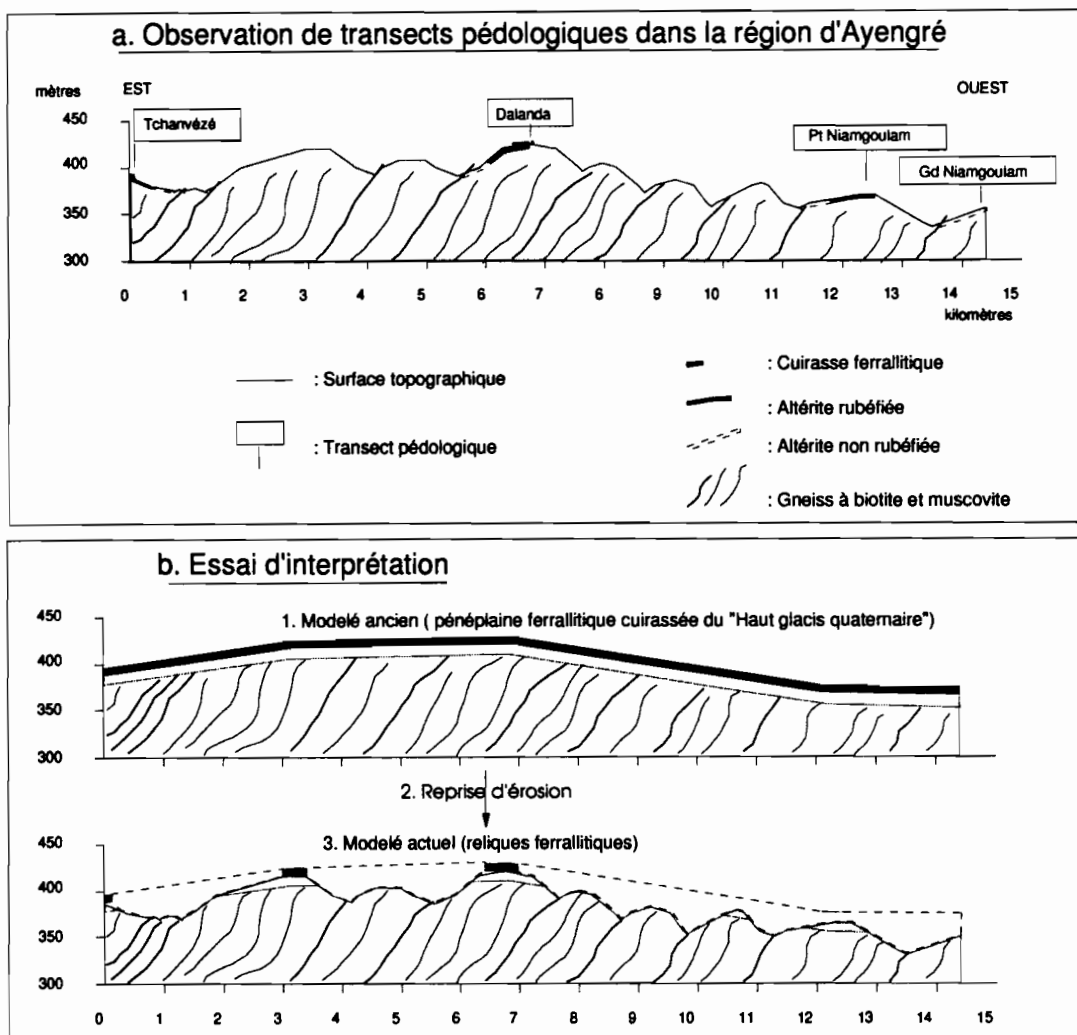


Figure II-10. Transects pédologiques dans la région d'Ayengré et interprétation.

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 :

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

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

CHAPITRE 3. CARACTERISTIQUES GENERALES DU VERSANT REPRESENTATIF

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, il est préférable de compléter les données des stations météorologiques les plus proches par des relevés sur le site. Aussi, celui-ci a-t-il été 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 à l'aide de ce dispositif, pour l'ensemble des chroniques disponibles.

3.1.1. Pluviosité

Un pluviomètre, de type "association", a été mis en place sur le site depuis 1974. Ce pluviomètre est situé en zone dégagée, au milieu du versant, et à 2 mètres de la surface du sol. Ses relevés, effectués quotidiennement depuis sa mise en place, fournissent des résultats très similaires à ceux d'un pluviomètre situé à un kilomètre au Nord du site (pluviomètre du Centre de Formation Technique Agricole d'Ayengré).

Pour l'ensemble de la période 1974-1992, on obtient une pluviosité moyenne annuelle sur le site de 1158 mm (avec une incertitude absolue de l'ordre de 40 millimètres, puisque l'incertitude absolue sur une mesure est de l'ordre de 0,1 millimètre). Comparativement à la station météorologique de Sotouboa située à 10 km au sud, la pluviosité moyenne annuelle sur le site est légèrement plus faible (moyenne de 1215 mm à Sotouboa pour la période 1974-1992), ce qui pourrait s'expliquer par le gradient latitudinal de pluviosité. Par ailleurs, le coefficient de variation interannuel de pluviosité est assez important (c.v. de 20 % pour l'ensemble de cette période 1974-1992), mais il n'apparaît pas exceptionnel pour la région (c.v. de 15 % à la station météorologique de Sotouboa pour cette même période).

Pour chacune des quatre années correspondant à notre étude, soit 1989 à 1992, les écarts relatifs à la pluviosité moyenne annuelle de la période 1974-1992 ont toujours été inférieurs au coefficient de variation interannuel de pluviosité (cf. tableau III-1). Ces quatre années apparaissent donc représentatives d'une année moyenne sur le plan des précipitations totales annuelles.

Année	P annuel mm	écart relatif à la moyenne 1974-1992 (1158 mm)
1989	1349	+16.6 %
1990	1077	-7 %
1991	1207	+4.3 %
1992	1206	+4.2 %

Tableau III-1. Comparaison entre la pluviosité annuelle moyenne de la période 1974-1992 et les pluviosités annuelles pour la période de cette étude.

Le tableau III-2 et la figure III-1, qui correspondent aux pluviosités mensuelles moyennes sur le site pour la période 1974-1992, permettent de vérifier le caractère monomodal du régime pluviométrique. Les précipitations sont centrées sur la période juillet-août-septembre, et chutent assez brutalement à la fin du mois d'octobre. Les extrêmes les plus élevés sont enregistrés en Juillet, car des perturbations orageuses peuvent se manifester sous forme de lignes de grains en début de la saison la plus pluvieuse (WAUTHY, 1983).

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

Tableau III-2. Pluviosités mensuelles moyennes sur le site. Période 1974-1992.

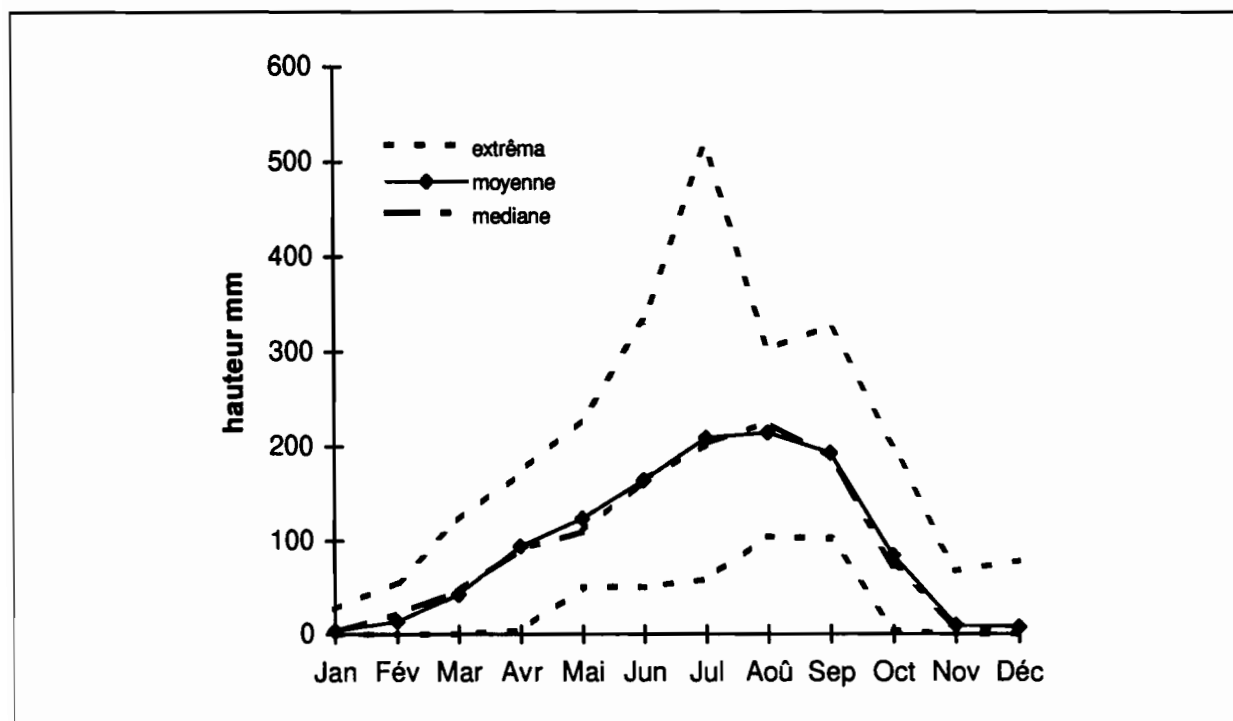


Figure III-1 : Pluviosités mensuelles moyennes sur le site. Période 1974-1992.

Au cours des années 1989 à 1992, la pluviosité moyenne mensuelle s'écarte peu de la médiane obtenue pour l'ensemble de la chronique 1974-1992 (cf. figure III-2). Seul le mois de septembre apparaît légèrement en dehors de l'intervalle interquartile, ce qui est imputable en grande partie à une seule averse de 105 millimètres, enregistrée en septembre 1989.

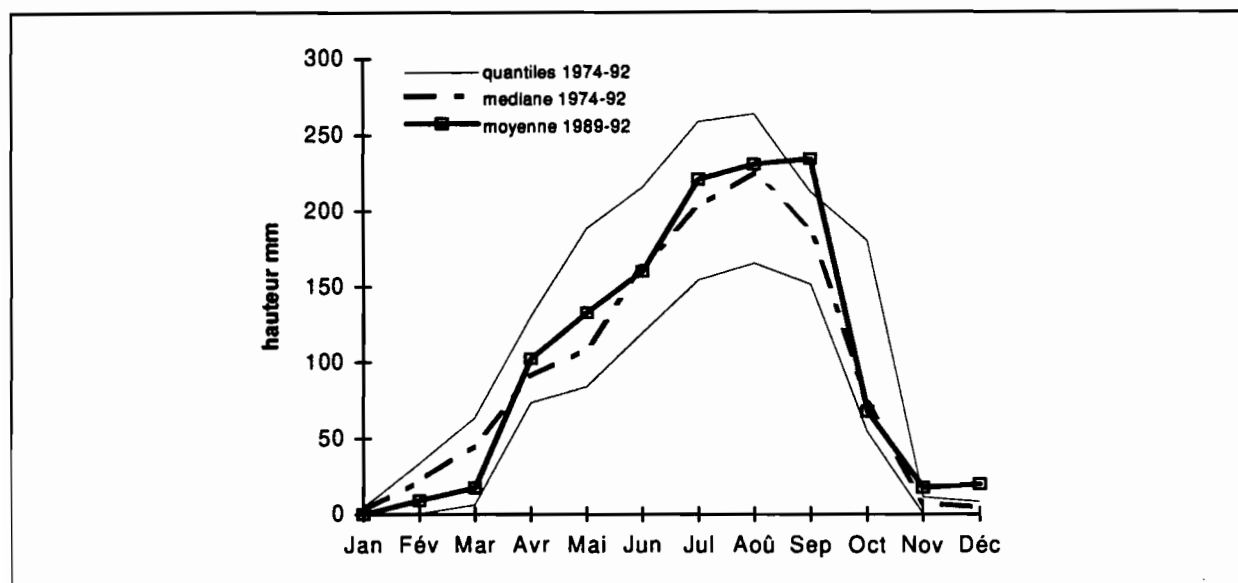


Figure III-2. Comparaison entre le régime pluviométrique au cours des 4 années de l'étude (1989-1992) et celui de la période 1974-1992.

Enfin, ainsi que le montre un histogramme de fréquence des hauteurs quotidiennes précipitées (cf. figure III-3), la moitié des pluies sont des averses inférieures à 10 millimètres sur l'ensemble de la période 1974-1992. Pour cette période, 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 pluie. Au cours des années 1989 à 1992 correspondant à cette étude, on retrouve cette distribution des averses.

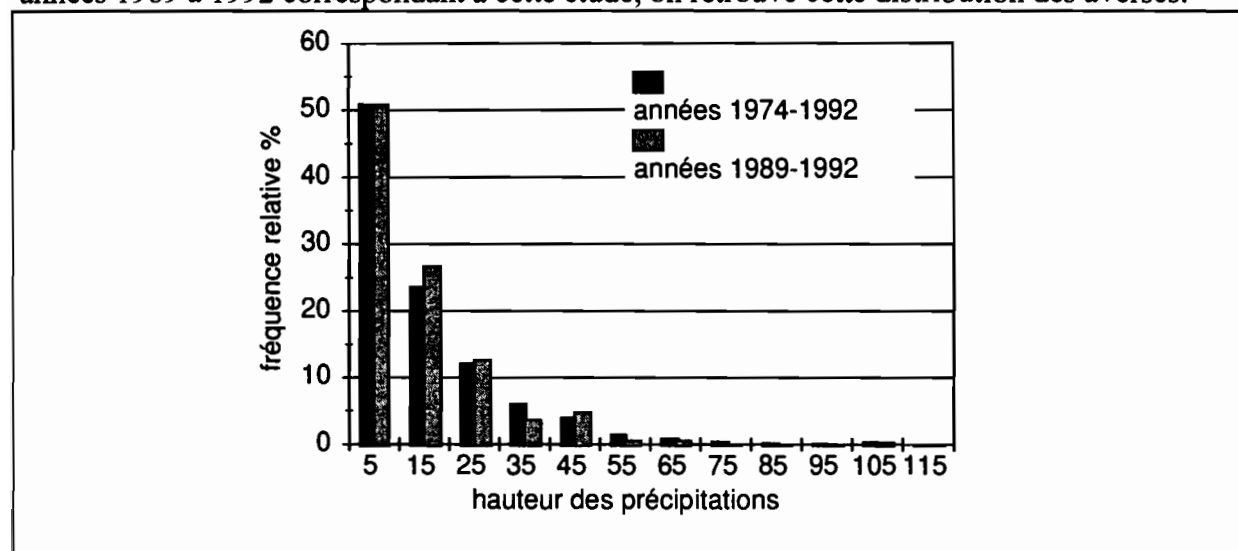


Figure III-3. Comparaison entre les fréquences des hauteurs quotidiennes précipitées pour la période de cette étude (1989-1992) et la période 1974-1992.

En définitive, les 4 années au cours desquelles se sont effectuées cette étude apparaissent bien 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 qui ne sont représentatives qu'au dessus d'un couvert végétal donné. Elles sont donc surtout réservées à des stations bioclimatologiques.

En dehors de ces stations, on estime plutôt la **demande climatique**, qui est indépendante du type de couvert végétal, mais qui intervient de manière importante dans l'évapotranspiration réelle. Ainsi, dans les stations météorologiques, deux estimateurs de cette demande climatique sont classiquement utilisés : l'évapotranspiration "potentielle" (ETP) et l'évapotranspiration "d'équilibre" ou "standard" (Eto). Hors station météorologique, la mesure de l'évaporation à partir d'une surface d'eau libre constitue une alternative intéressante pour caractériser la demande climatique, en raison de la relative simplicité de l'instrumentation mise en oeuvre (bac d'évaporation), de la bonne représentativité spatiale des mesures, et du caractère intégrateur des variations horaires (FUCHS, 1970; RIOU, 1975; DANCETTE, 1983). Cette "évaporation bac", qui dépend des conditions atmosphériques (température, humidité de l'air, radiation, vitesse et turbulence du vent), est généralement corrélable à l'Evapotranspiration potentielle et à l'Evapotranspiration standard (SEGUIN, 1975; DANCETTE, 1976; RIOU et al., 1985; POSS, 1991). Elle tient compte des termes radiatifs et convectifs pris en compte dans les calculs de l'ETP.

En conséquence, et afin d'estimer cette demande climatique sur le site, un bac d'évaporation d'eau libre a été mis en place au début de cet étude (1989). Cet instrument a été construit selon les normes retenues par l'équipe d'hydrologie de l'ORSTOM (G. DELFIEU, comm pers.) Il s'agit d'un bac de type "Colorado modifié ORSTOM", qui 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 côte de référence, indiquée par un pointeau fixe. La remise à niveau est effectuée au moment où sont effectués les relevés pluviométriques, par simple ajout 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 suivante:

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

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

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

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

Un calcul d'incertitudes permet de montrer que la mesure des hauteurs de pluie constitue la source principale d'incertitude sur E_{bac} . Cette évaporation est donc mesurée avec une incertitude de l'ordre de 0.1 millimètres par jour et de 40 millimètres par an.

Pour la période 1989 à 1992, on obtient une valeur moyenne de l'évaporation bac annuelle de 1734 mm. Cette valeur est de l'ordre de grandeur de l'ETP moyenne annuelle calculée à la station météorologique de Sokodé (1662 mm pour la période 1982-1988). Elle est nettement supérieure à la pluviosité moyenne annuelle (1158 mm), ce qui indique un déficit hydrique potentiel.

Cette évaporation suit des fluctuations calées sur les cycles saisonniers, ainsi que le montre la figure III-4. Ainsi, l'évaporation quotidienne peut être inférieure à 2 millimètres au coeur de la saison pluvieuse (juillet, août, septembre) et augmenter jusqu'à 9 millimètres en saison sèche. L'évaporation moyenne mensuelle est maximale en Mars, et minimale en juillet (cf. tableau III-3).

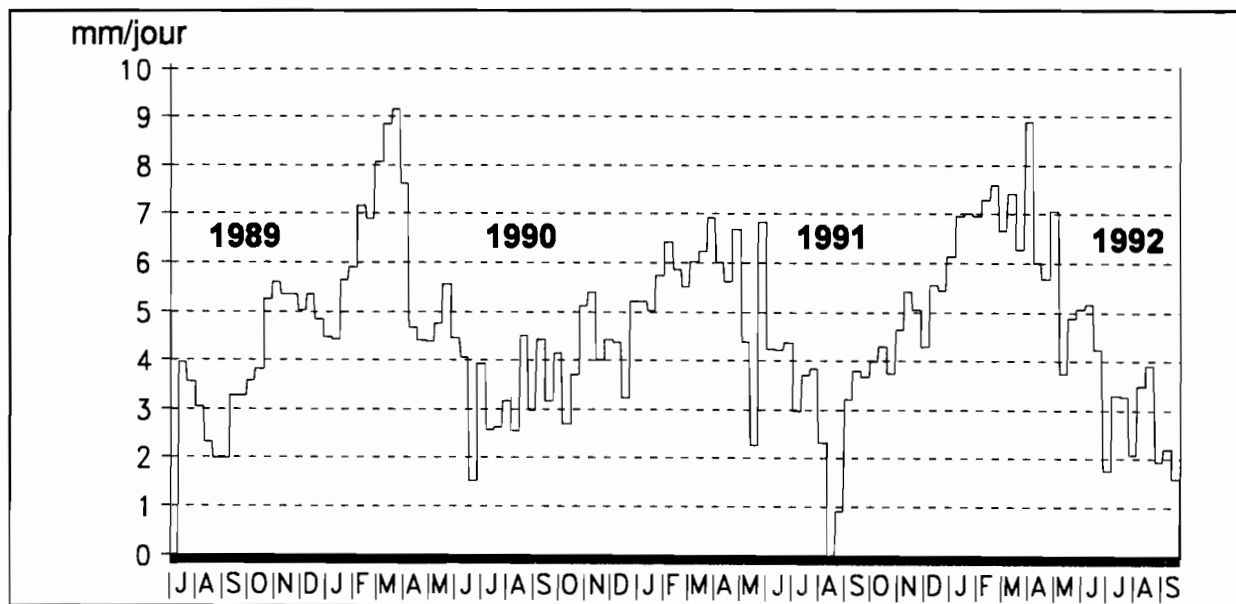


Figure III-4. Evaporation bac sur le site. Moyenne quotidienne par pentade. Période du 1.07.1989 au 31.09.1992.

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-3. Evaporation bac sur le site. Moyenne mensuelle pour la période 1989-1992.

Ainsi que le montre la figure III-5, cette évaporation bac est bien corrélée à l'évapotranspiration potentielle (ETP Sokodé = $0,42 \cdot E_{\text{bac}} + 77,6$ avec $R^2 = 0,84$ pour 12 couples de valeurs.).

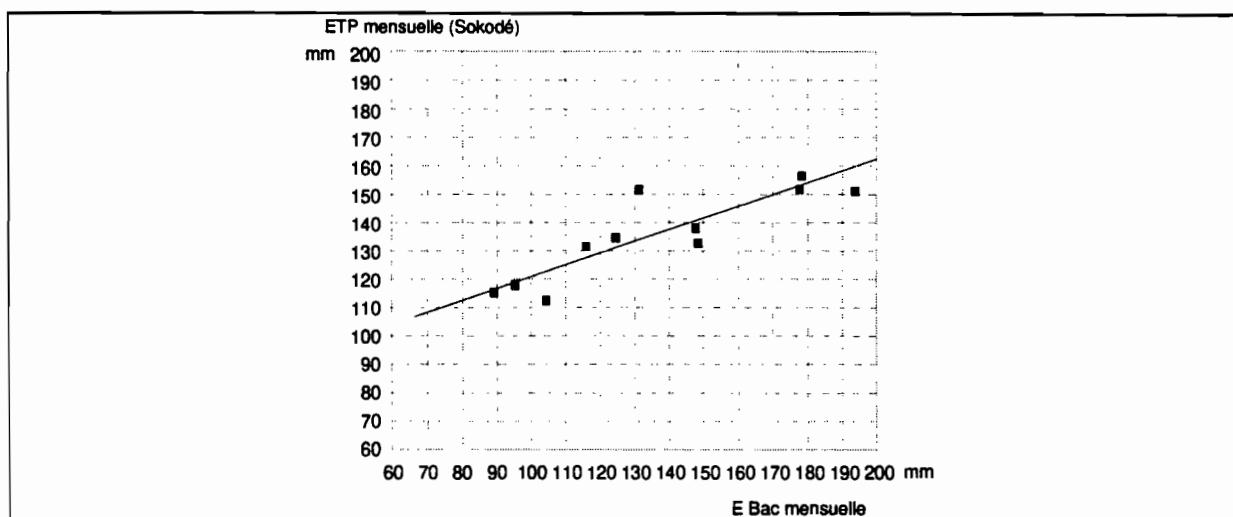


Figure III-5. Relation entre l'évaporation bac mesurée sur le site et l'ETP calculée à Sokodé.

3.1.3. Température

La température a été relevée sous abri au cours de la période 1990-1992. On obtient une température moyenne annuelle 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-6). Ces températures apparaissent en bon accord avec celles de la station météorologique la plus proche (cf. tableau III-4).

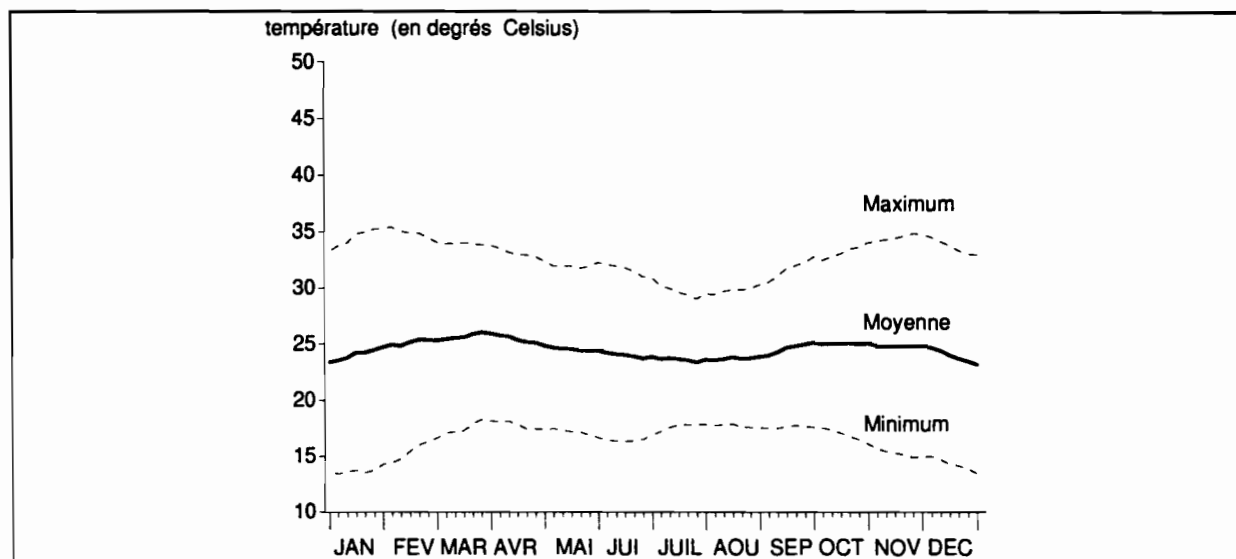


Figure III-6. Température moyenne pentadaire sur le site. Valeurs obtenues par moyenne glissante. Période 1990-1992

Mois	T° moyen 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-4. 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

Compte tenu de l'épaisseur de l'altération sur le versant, il est difficile d'observer la roche saine. Toutefois, dans la partie Nord-est du sommet d'interfluve, un affleurement rocheux a résisté à cette altération. 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, partiellement altérée et localement ferruginisée, se débite facilement au marteau, en feuilletts 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, 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 de gneiss à deux micas qui s'observe sur des versants fortement érodés situés à quelques kilomètres à l'est du site.

Enfin, 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.

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, qui reste difficile à préciser dans le détail. Ceci n'est d'ailleurs pas surprenant pour de telles formations métamorphiques. L'affleurement de sommet d'interfluve à quartz et muscovite pourrait témoigner d'une plus grande résistance à l'altération du faciès leucocrate acide.

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-7). 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-8). 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 régulière, nous avons obtenu un modèle numérique de terrain (MNT) de type "raster", dont l'analyse a pu être effectuée à l'aide du logiciel Demiurge (DEPRAETERE, 1992).

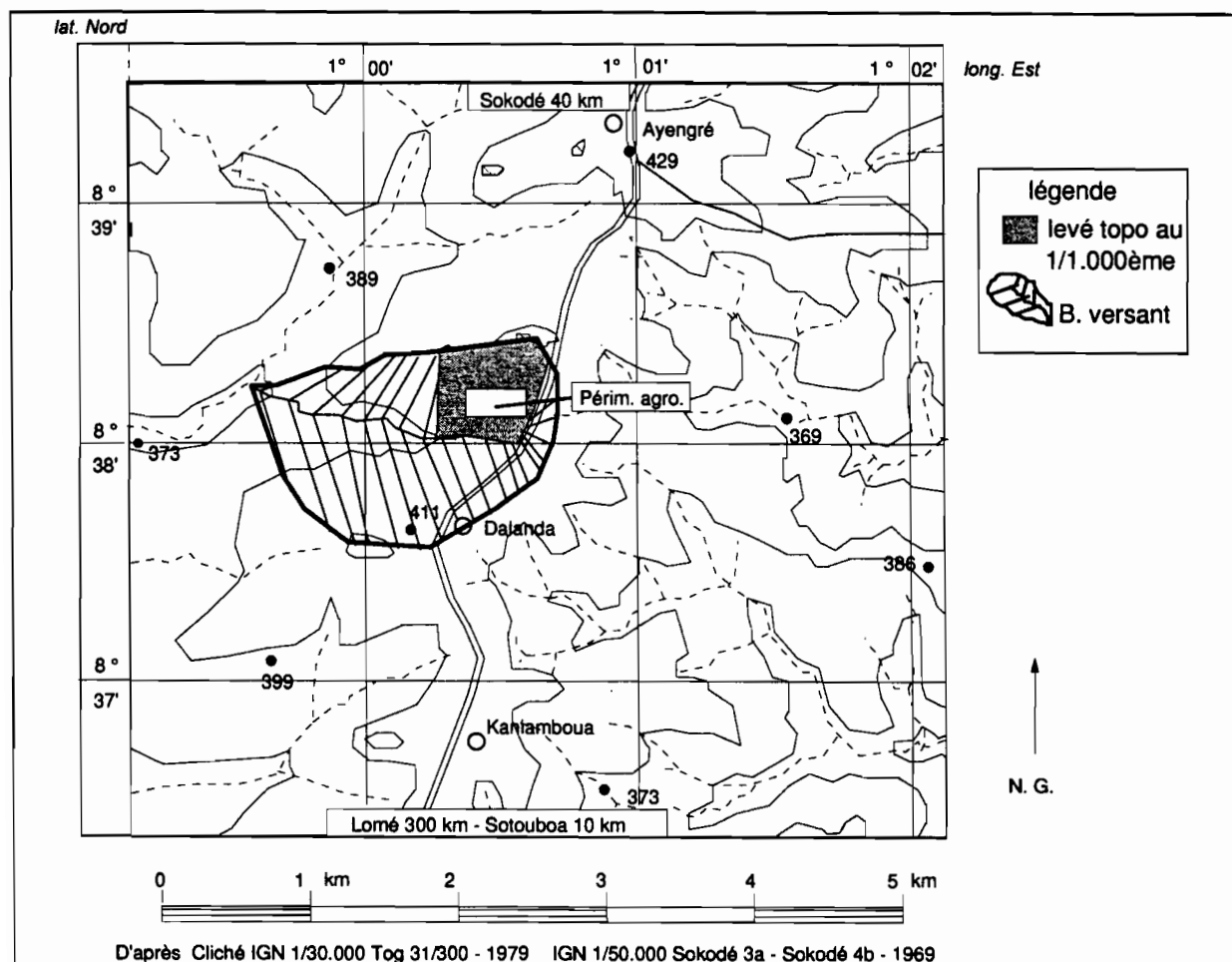


Figure III-7. Délimitation du secteur topographié sur le bassin versant élémentaire.

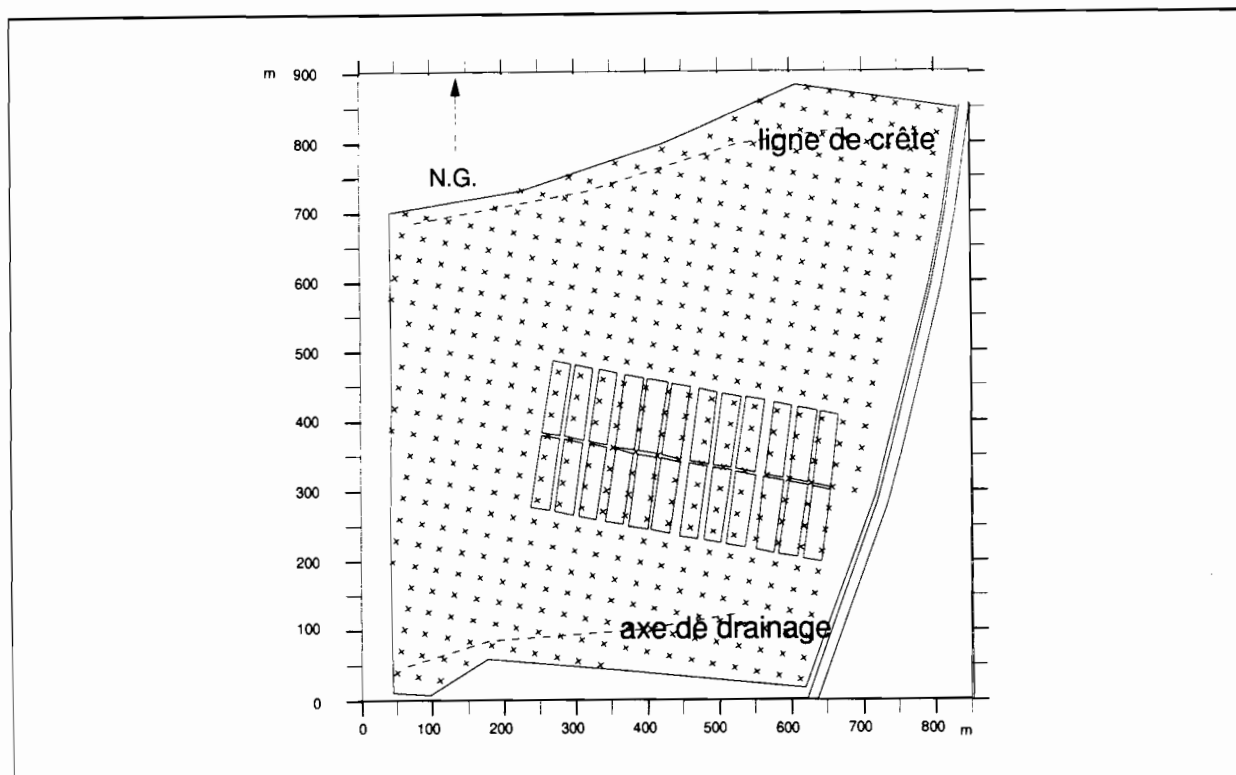


Figure III-8. Maille du levé altimétrique.

3.3.1. Altimétrie

La dénivelée entre le sommet d'interfluve et le thalweg est de l'ordre de 20 à 25 mètres, pour des altitudes absolues comprises entre 398 et 423 mètres (cf. figure III-9). Au nord-ouest du site, une surface surélevée apparaît à la cote absolue de 420 mètres. Cette surface, séparée du reste de la surface topographique par un escarpement abrupt, correspond à la butte témoin cuirassée identifiée lors du choix du versant.

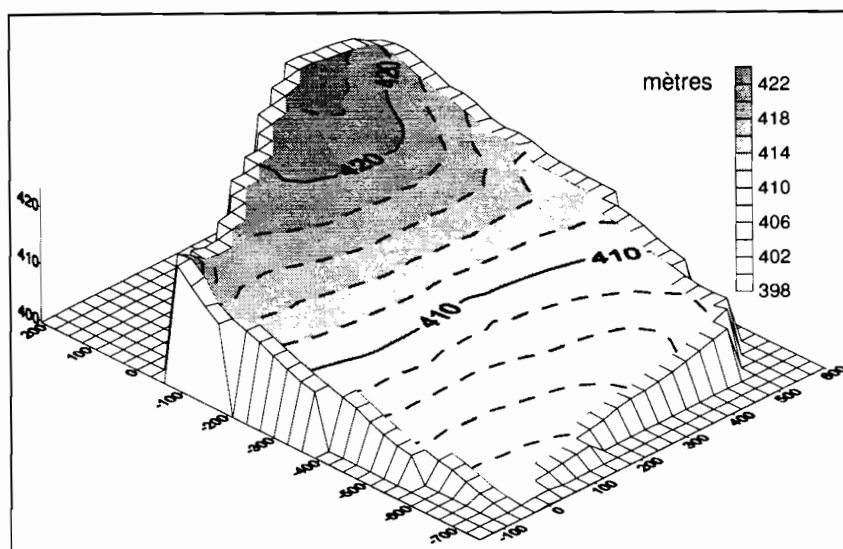


Figure III-9 : Bloc-diagramme altimétrique dérivé du modèle numérique de terrain.

Hormis cette butte témoin, le reste du versant présente des courbes de niveau à incurvation faible et régulière. Le bas-fond prend d'abord l'aspect d'une cuvette évasée dans sa partie amont (au sud-est du secteur topographié), puis il 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 cote 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 de terrain

3 formes élémentaires de terrain (crête, versant et thalweg) ont été reconnues par le logiciel Demiurge, en fonction de l'altitude relative de chaque maille du MNT par rapport à ses huit voisines. En localisant avec précision la ligne de crête, cette analyse révèle notamment que la partie nord-est du secteur topographié n'appartient pas au même bassin versant que le reste du secteur (cf. figure III-10).

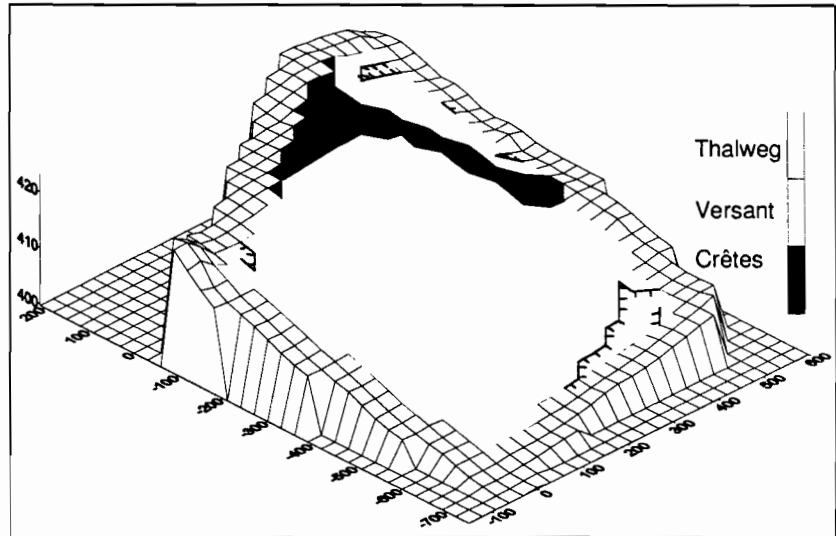


Figure III-10 : Bloc-diagramme des formes de terrain dérivées du modèle numérique de terrain.

3.3.3. Pente et unités de modelé

La pente a été calculée pour chaque maille du MNT, en déterminant des plans élémentaires de régression à l'aide du logiciel Demiurge. Le bloc-diagramme des pentes obtenu (cf. figure III-11) 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. On constate que la pente s'accroît légèrement en milieu de versant, puis diminue à nouveau vers l'aval. Ces variations de pente entraînent une rupture de pente qui sépare des formes convexes dans la partie supérieure du versant (pentes s'accroissant vers l'aval) et des formes concaves dans sa partie inférieure (pentes diminuant vers l'aval).

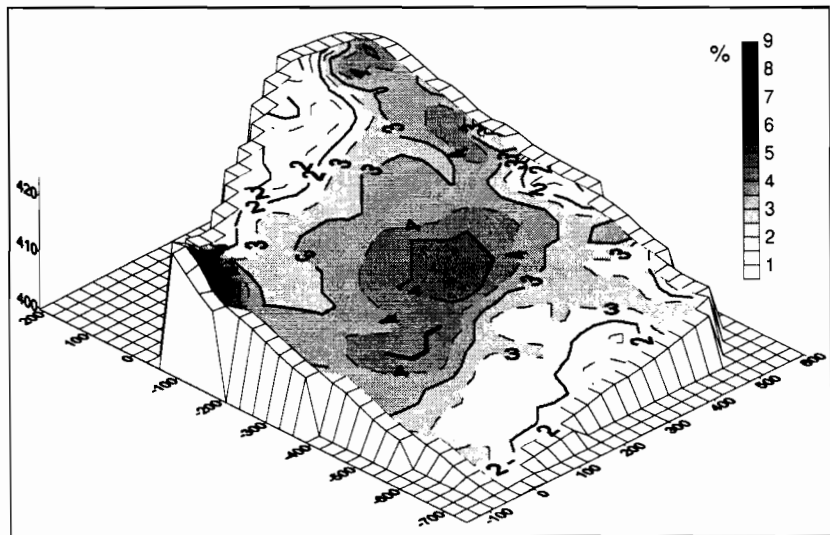


Figure III-11 : Bloc-diagramme des pentes dérivées du modèle numérique de terrain.

On visualise bien cette rupture de pente sur un profil en long généralisé qui a été obtenu, à partir du MNT, en reliant les altitudes à la distance à l'exutoire (cf. figure III-12).

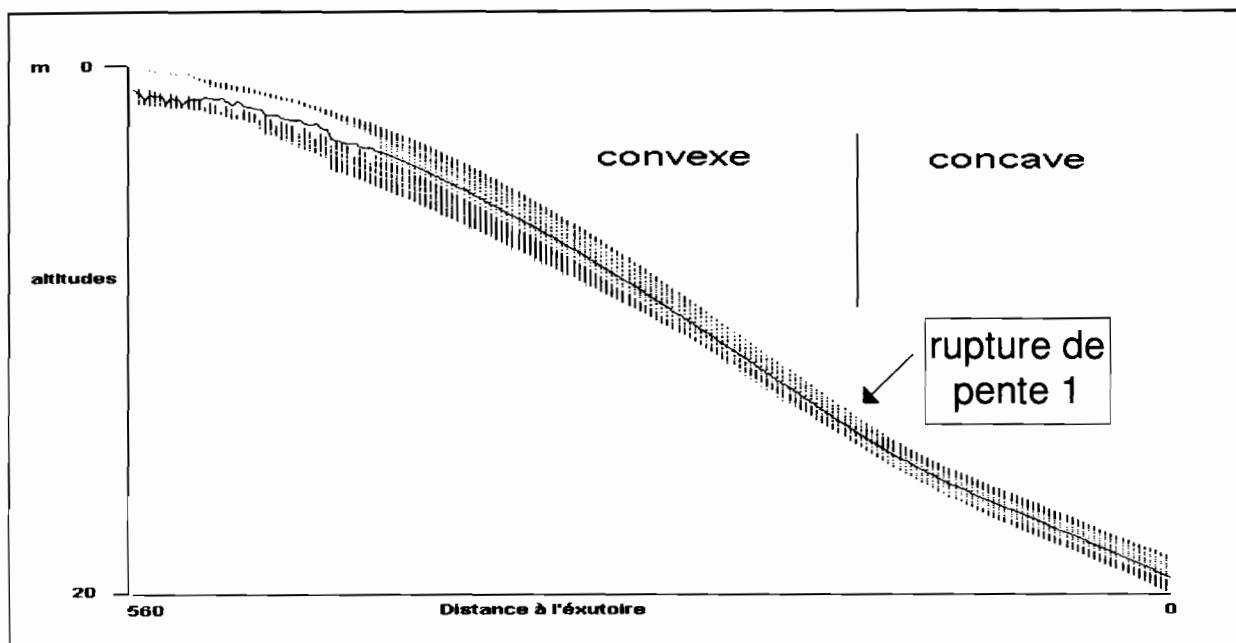


Figure III-12. Profil en long généralisé de la partie centrale du site.

Par suite, un relevé altimétrique plus détaillé a été effectué sur deux transects. Ce relevé a permis de constater l'existence d'une deuxième rupture de pente atténuée à l'aval du versant (cf. figure III-13). Il en résulte que l'on retrouve bien, sur ce versant, les deux ruptures de pente et les 4 unités de modelé du versant-type (cf. chapitre 1).

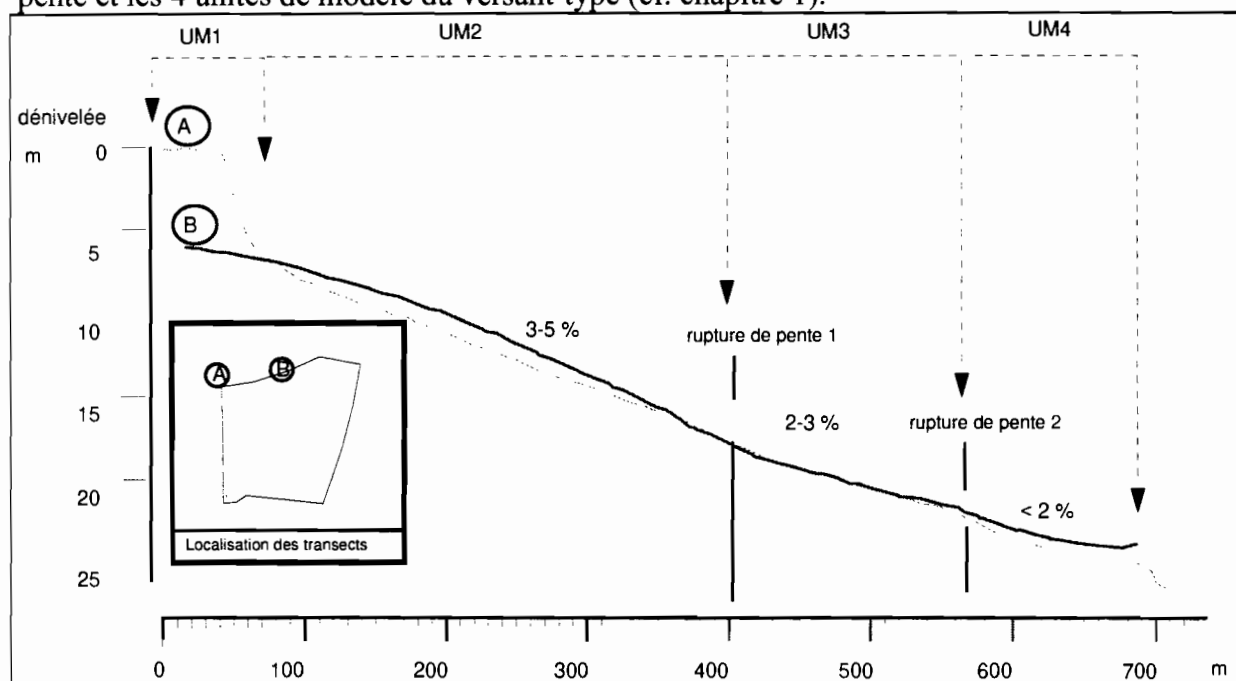


Figure III-13. Profil en long détaillé sur deux transects
(distance moyenne entre 2 relevés altimétriques = 5 mètres)

3.3.4. Convexité

La convexité verticale a été calculée sur l'ensemble du MNT à l'aide du logiciel Demiurge. Le bloc-diagramme obtenu (cf. figure III-14) montre d'abord un passage de formes convexo-planes à des formes concaves en milieu de versant, ce qui permet de retrouver la première rupture de pente identifiée sur les profils en long. Il révèle également l'existence d'une étroite bande convexo-plane qui est située au sein de la zone concave aval. Cette bande, qui ceinture l'axe de drainage sur l'ensemble du bas de versant, correspond à la deuxième rupture de pente identifiée sur les profils en long.

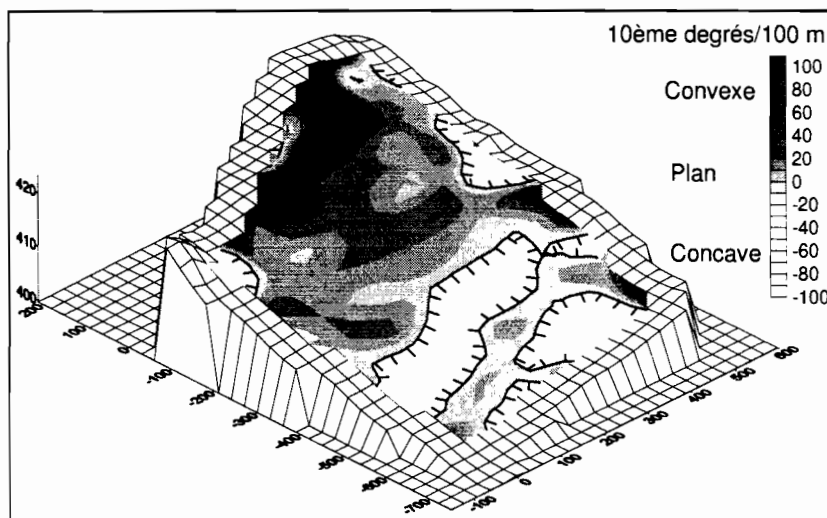


Figure III-14 : Bloc-diagramme des convexités dérivées du modèle numérique de terrain.

3.4 La morpho-pédologie du versant

Une reconnaissance morpho-pédologique a été effectuée à partir de la description de fosses pédologiques, et de la stéréo-photo-interprétation d'un couple de photographies aériennes (photos de la mission IGN Tog. 31/300 agrandies au 1/5.000^{ème}).

Pour cette reconnaissance, 35 fosses pédologiques ont été ouvertes, de 3 à 7 mètres de profondeur. Ces fosses ont été implantées le long de quatre transects (cf. figure III-15) qui suivent l'axe de plus forte pente et l'axe de drainage, de façon à recouper la majorité des différenciations pédologiques observables sur le versant.

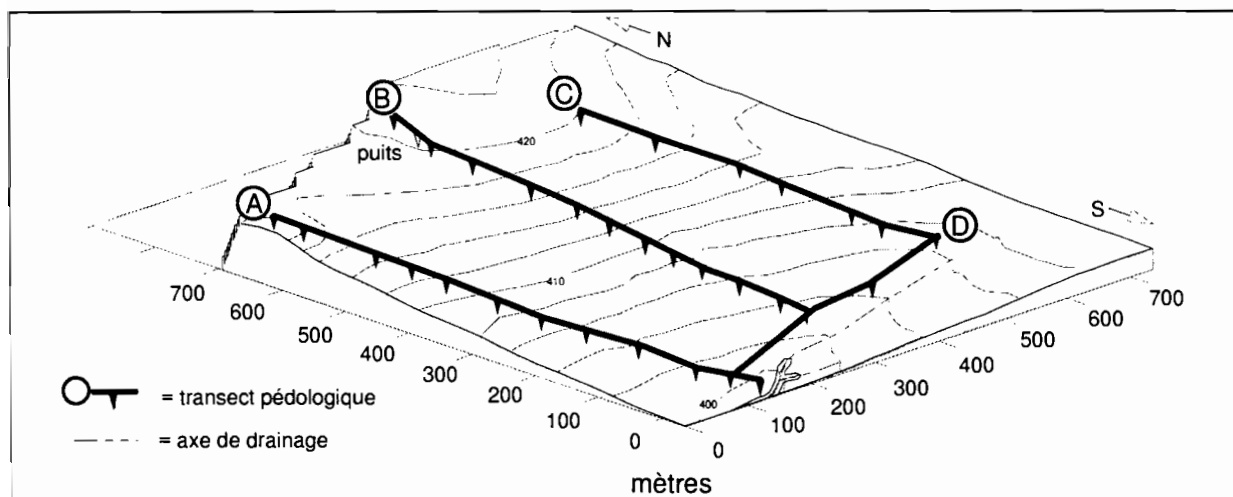


Figure III-15. Implantation en transects des fosses pédologiques

Cette reconnaissance a permis de retrouver une organisation morpho-pédologique conforme au versant-type. En effet, trois grands domaines ont été identifiés, qui sont associés à des unités de modelé (cf. figure III-16) : un premier **domaine ferrallitique**, qui s'étend depuis l'amont jusqu'à mi-versant, est associé à deux unités de modelé (U.M. 1 et 2). Un **domaine ferrugineux** apparaît plus en aval, 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 **domaine hydromorphe** qui ceinture l'axe de drainage.

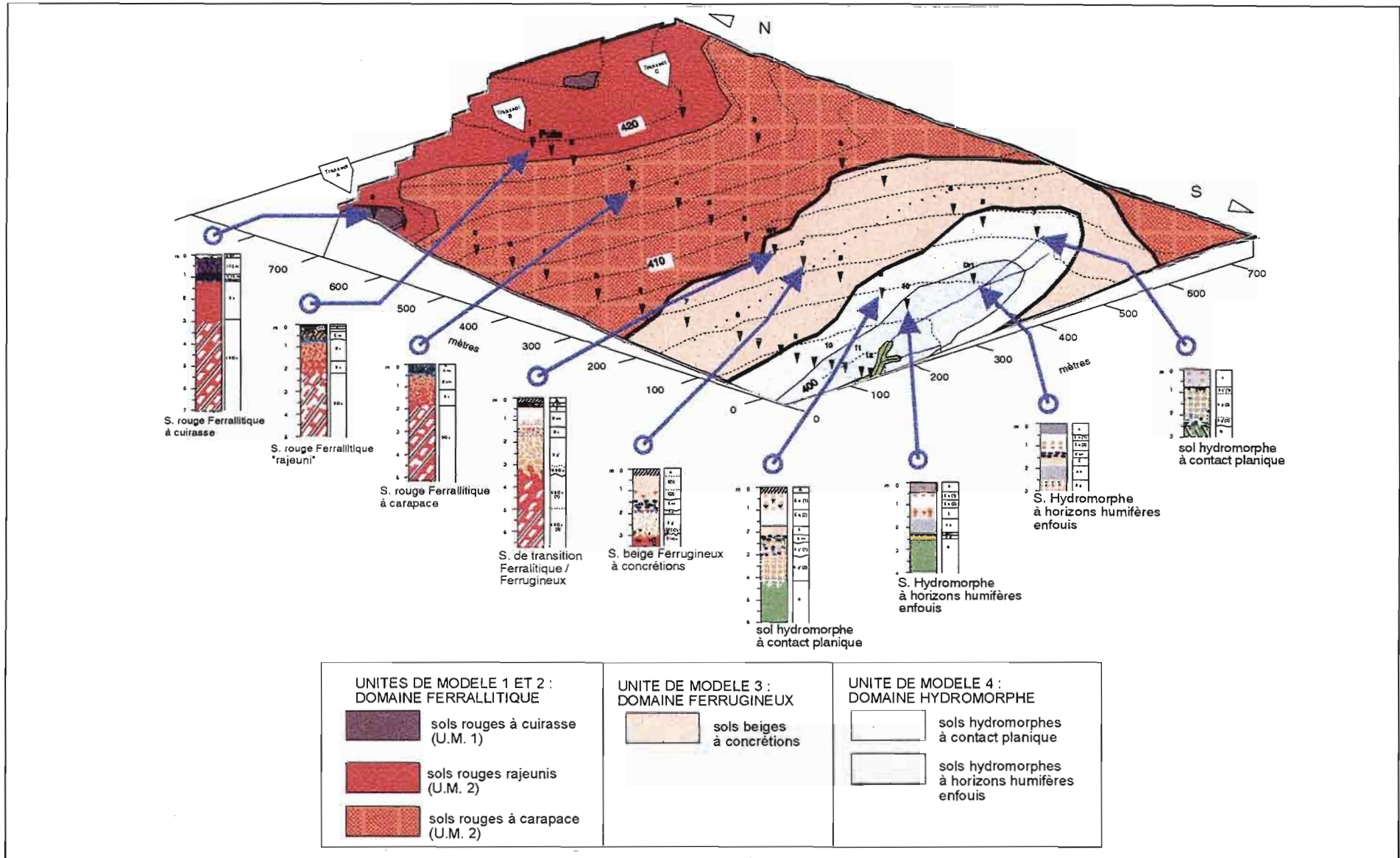


Figure III-16. Bloc-diagramme de reconnaissance morphopédologique sur le versant.

3.5. L'occupation du sol du versant

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

3.5.1. L'occupation ancienne

Lors de l'ouverture d'une fosse pédologique dans la partie aval du site, un outil sphérique de quartz saccharoïde d'environ 10 centimètres de diamètre, à surface usée mais non entièrement poli, a été découvert à près de 2 mètres de profondeur, juxtaposé à des fragments de poterie. Un tel outil aurait pu servir de meule pour broyer du grain. Par ailleurs, des outils analogues se trouvent en surface du sol et au pied de la butte cuirassée du sommet de versant. Selon DAVIES (1954), cité par CORNEVIN (1988), de tels outils de pierre correspondent à une industrie vieille de plus de 10.000 ans (industrie sangoéenne). Dans cette hypothèse, les premières activités humaines sur le versant seraient très anciennes. Cependant, certains de ces outils pourraient être beaucoup plus récents, puisque des outils analogues seraient encore utilisés actuellement en pays Dogon (LEPRUN, comm. pers.).

Par ailleurs, on observe sur le versant les vestiges de plusieurs hauts fourneaux ayant servi à l'extraction du fer. Il s'agit de 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, qui est susceptible de fournir le minerai de fer. Si l'on se réfère à des datations au carbone 14 effectuées sur des laitiers dans la circonscription voisine de Bassar (POSNANSKY et de BARROS 1979, in CORNEVIN, 1988), ces hauts fourneaux" dateraient tout au plus d'entre 1400 et 1600 de notre ère. En raison de la nécessité d'alimenter ces hauts fourneaux en bois, l'exploitation du couvert forestier du versant aurait pu être initiée à cette époque. Cependant, ces "hauts fourneaux" pourraient être plus récents, car 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).

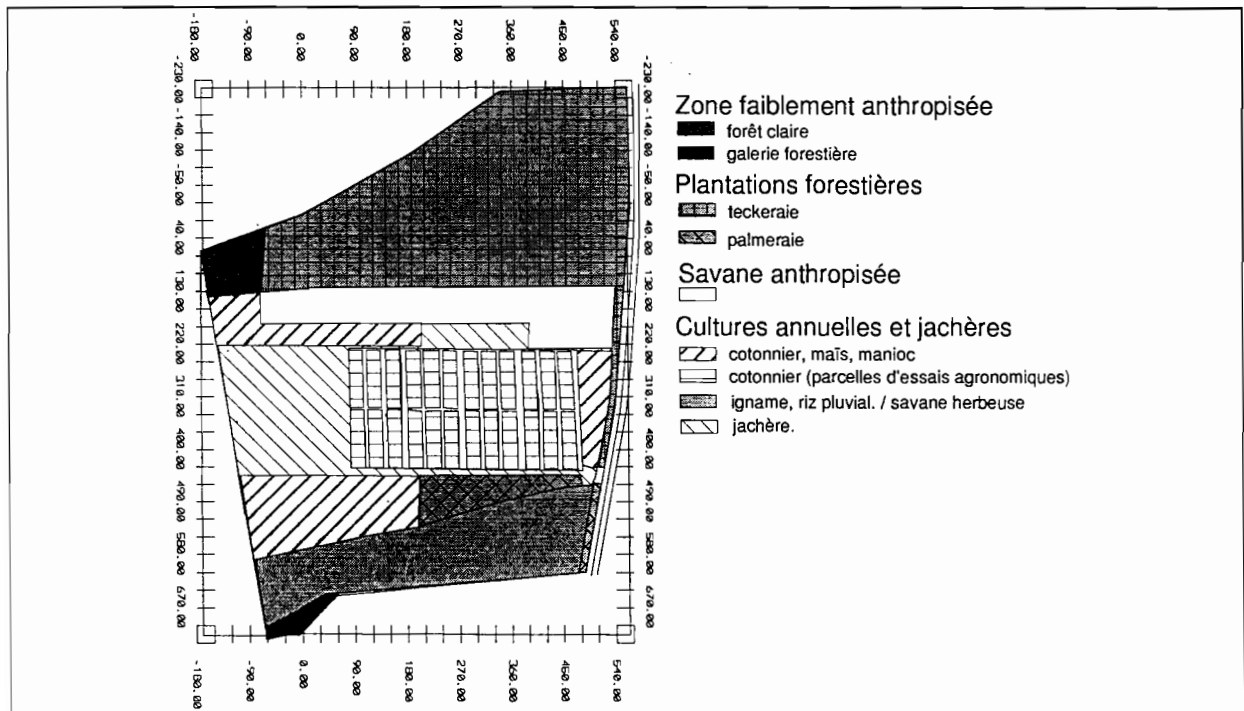
3.5.2. L'occupation actuelle

Comme pour l'ensemble de la région, le versant est cultivé depuis environ 50 ans (AFANOU, 1991). En effet, son histoire agricole débute avec la création des deux villages environnants (Dalanda et Ayengré), au cours de la période 1940-1950.

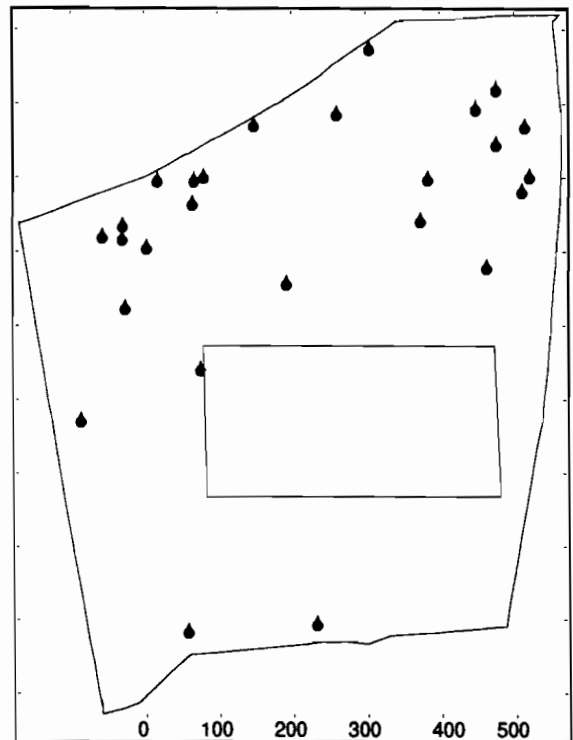
L'occupation actuelle du sol est résumée en figure III-17 (pour un relevé botanique plus détaillé hors des surfaces cultivées, on pourra se reporter à l'annexe A). Hors des surfaces cultivées, on constate que la végétation se répartit le long du versant selon le schéma-type présenté en figure I-9. Ainsi :

- 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.



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-18). 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-19).



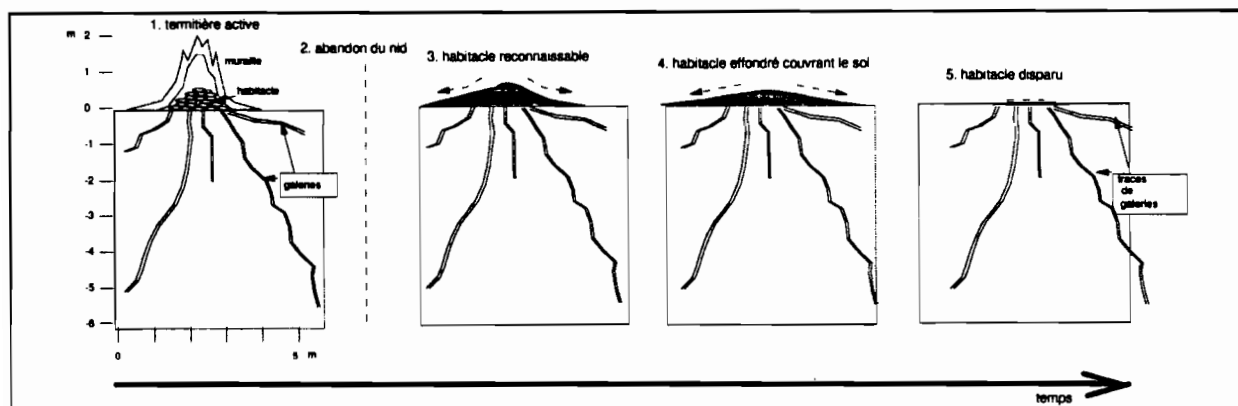


Figure III-19. Séquence d'évolution d'un nid de macrotermes créant une macroporosité tubulaire dans le sol.

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. Sa variabilité (présence ou absence de filons de quartz, variations de la proportion relative de biotite et de muscovite) est caractéristique des roches de ce socle.

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

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Après avoir précisé les caractéristiques générales d'un 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.

DEUXIEME PARTIE :

L'HYDROPESEQUENCE
SUR LE VERSANT REPRESENTATIF

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 PEDOSEQUENCE

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

Nous précisons 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 représentations 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.). On considère que la portion de couverture pédologique occupée par une fosse, ou extraite par un sondage, est constituée d'une succession verticale de volumes pédologiques homogènes appelés "volumes élémentaires de résolution". L'épaisseur de ces volumes se mesure en centimètres ou décimètres. Ils se différencient par l'existence de contrastes par rapport aux volumes sus-jacents ou sous-jacents, et sont définis par un contenu (constituants, organisation, caractéristiques analytiques). La description de chacun de ces volumes constitue une unité élémentaire d'information.

- l'horizon pédologique. A l'échelle d'une couverture pédologique, l'ensemble des v.e.r. similaires définissent un volume, l'horizon pédologique, qui 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.

A l'aide de ces deux concepts, nous avons constitué un outil pour stocker 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, une base de données pédologiques a été conçue pour caractériser les volumes élémentaires de résolution (BLAVET, 1994). Cette base a été créée sous un système de gestion de bases de données relationnel, dont une analyse sommaire est fournie en annexe B. Un exemple de fiche de saisie est présenté en annexe C.

Cette base de données utilise 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).

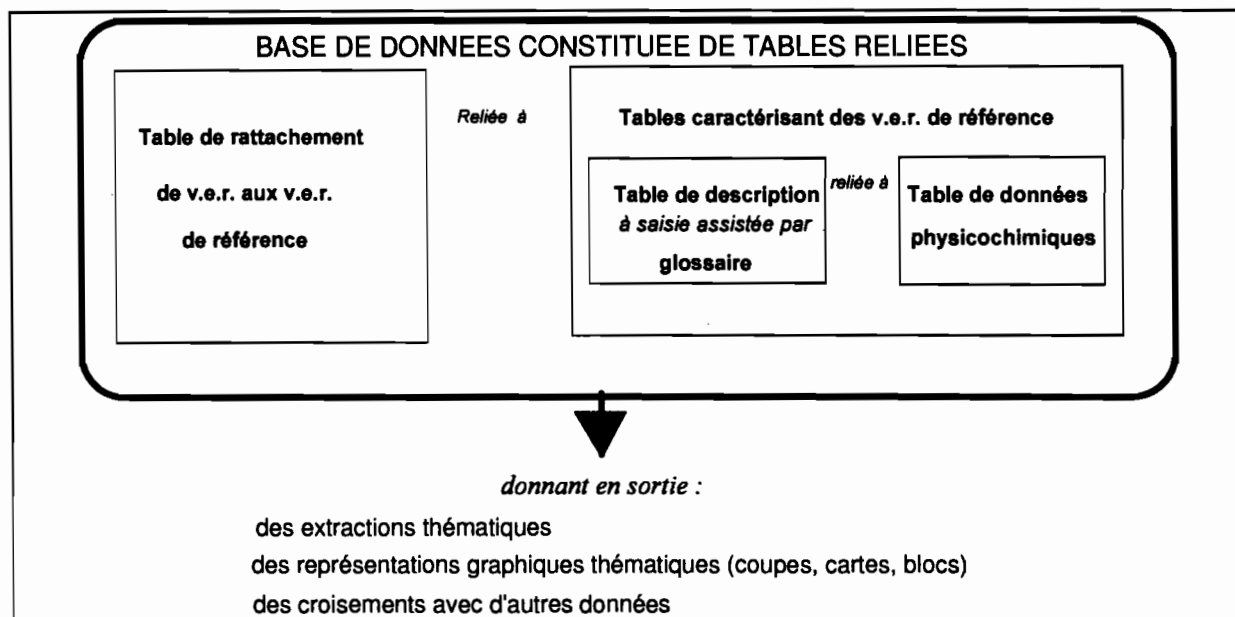


Figure IV-1. Structure générale et fonction de la base de données pédologiques.

Les trois tables de données principales sont les suivantes :

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

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 données physico-chimiques.

Cette table de données numériques est destinée à stocker les résultats d'analyses physico-chimiques des v.e.r. de référence. On y accède directement à partir des fiches de description de ces v.e.r.

4.1.1.C. La table de rattachement de v.e.r. aux v.e.r. de référence.

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

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 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 identifié et décrit des **v.e.r. de référence**. Puis, nous avons **rattaché des v.e.r. issus de sondages à ces v.e.r. de référence**. Par ailleurs, tous ces v.e.r. ont été localisés en coordonnées tridimensionnelles.

1°) les v.e.r. de référence

314 v.e.r. de référence ont été identifiés sur le terrain, à partir des 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).

La description de ces v.e.r. a été effectuée in situ à l'aide des variables descriptives présentées au tableau IV-1. Toutefois, comme certaines informations n'ont pas pu être traduites à l'aide de ces variables (variations verticales continues de certains paramètres; limites complexes de certains v.e.r...), nous avons systématiquement complété la description des fosses pédologiques par des croquis et des prises de vue photographiques.

Par suite, un échantillon de chaque v.e.r. de référence a été conservé dans un pédocomparateur de terrain.

Au laboratoire, les couleurs de ces v.e.r. ont été à nouveau déterminées sur des échantillons secs illuminés par un éclairage artificiel constant.

Enfin, la description et les coordonnées tridimensionnelles de ces v.e.r. de référence ont été saisies dans la base de données pédologiques présentée au § 4.1.1., à l'aide de la fiche de saisie informatisée présentée en annexe C.

2°) les v.e.r. issus de sondage

Des sondages de raccordement resserrés ont d'abord été réalisés le long de deux transects orientés selon l'axe de plus forte pente (cf. figure IV-2). Puis l'ensemble du versant à 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.

Ces échantillons de sondage ont été disposés dans des casiers individuels, en fonction de leurs coordonnées tridimensionnelles (coordonnées planimétriques du sondage et cotes de profondeur de l'échantillon). Ceci nous a permis de constituer une "pédothèque".

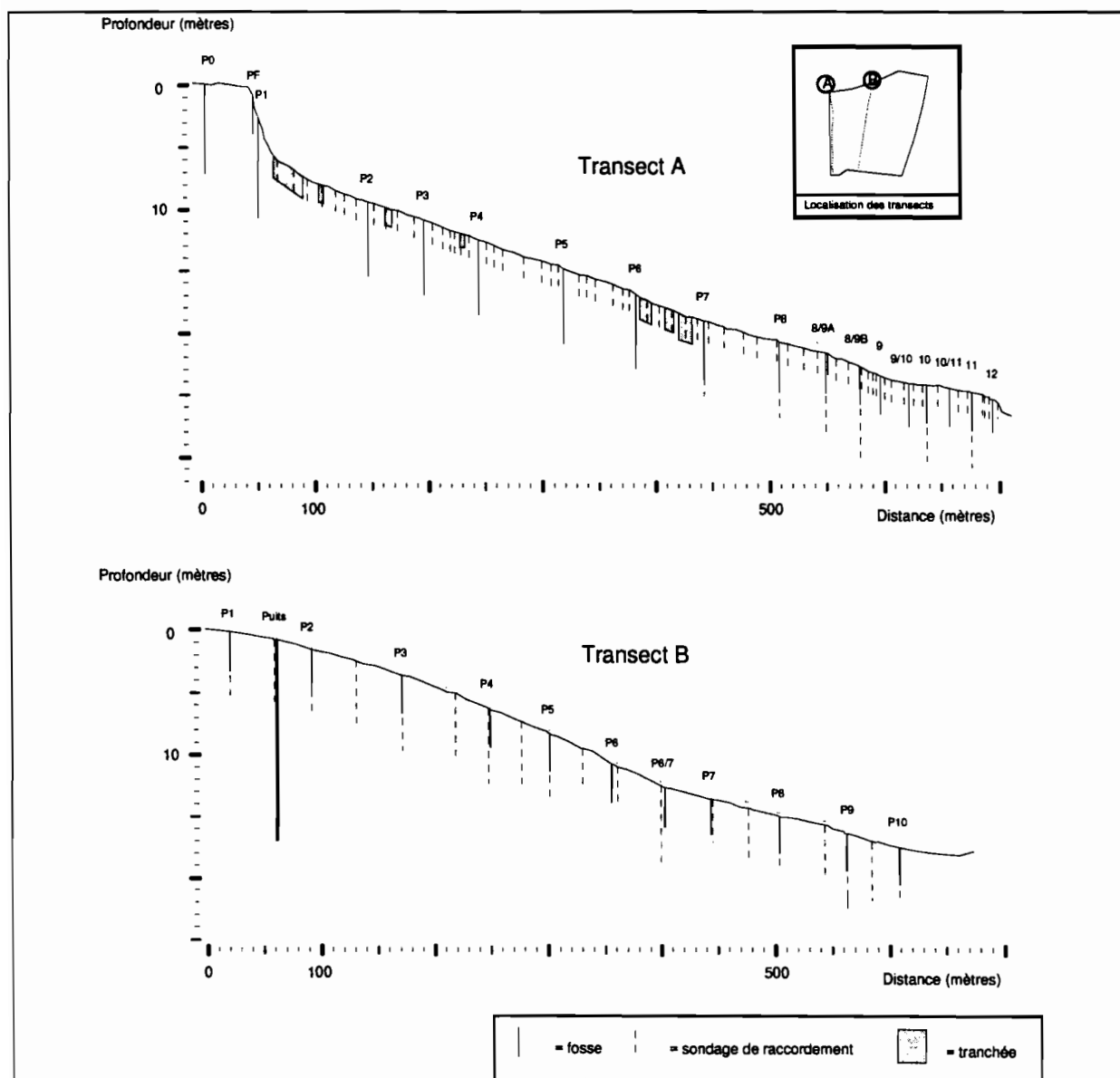


Figure IV-2. Localisation des fosses, des sondages de raccordement et des tranchées sur deux transects.

Au laboratoire, les échantillons de sondages stockés dans cette pédotothèque ont été rattachés aux v.e.r de référence, ce qui ne correspond pas au rattachement à un nombre limité d'"horizons-concepts" (BAIZE et al., 1992), mais au rattachement à un nombre relativement important de volumes réels. Celui-ci, qui permet de conserver un maximum d'information sans nécessiter la description très lourde de plusieurs milliers d'échantillons, a été effectué de la manière suivante:

a) les échantillons de sondage ont d'abord été regroupés en 2822 v.e.r. par un balisage au sein de la pédotothèque.

b) pour chacun de ces v.e.r., nous avons recherché le v.e.r. de référence le plus similaire dans le pédocomparateur de terrain. La similarité a été estimée à partir de la couleur, de la forme et de l'abondance des taches, de la texture du matériau, de la nature et du pourcentage des éléments grossiers et des éléments figurés. Une telle estimation, effectuée par l'observateur, est analogue à celle qui est mise en oeuvre lorsque l'on estime une variable telle que la couleur d'un échantillon par comparaison de l'échantillon avec le code Munsell (on notera qu'une estimation mathématique des similitudes entre v.e.r. issus de sondages et v.e.r.

de référence aurait nécessité une description de tous les v.e.r. issus de sondage, ce qui aurait annulé l'intérêt du rattachement).

Au cours de cette opération de rattachement, seuls 24 v.e.r. issus de sondage n'ont pu être rattachés à aucun des v.e.r. de référence. Ces 24 v.e.r. ont été considérés comme de nouveaux v.e.r. de référence, et ont été entièrement décrits en tant que tel dans la base de données pédologiques (ce qui a porté à 338 au total le nombre de v.e.r. de référence).

Par suite, les coordonnées tridimensionnelles de 2798 v.e.r. issus de sondage, ainsi que le nom de leur v.e.r. de référence, ont été enregistrés dans la table de rattachement de la base de données pédologiques.

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 au microscope et 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	Méthode Walkey & Black Attaque Kjeldahl -AFNOR X31111
	<u>Complexe d'échange</u> C.E.C Ca, K, Mg, Na ech P2O5 assimilable	Saturation par CaCl ₂ 1M - Méthode Riehm & Metson Extraction par NH ₄ CO ₂ H 1 M à pH 7 - AFNOR NFX31108 Méthode Olsen mod. Dabin
	<u>Bases "totales"</u> Ca, K, Mg, Na	Attaque nitrique à ébullition 5 h
	Fer libre Fer "total" Phosphore "total"	Méthode DEB. Attaque triacide. Attaque nitrique à ébullition 5 h
	<u>pH eau, KCl</u>	sol/solution 1/2.5
	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 des dépôts discontinus de matériaux allochtones).

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" est celle qui est classiquement employée par les pédologues. Cependant, elle peut sembler subjective, et 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/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.

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

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 $d(v_1, v_2) = 1 - \frac{\text{card}(v_1 \cap v_2)}{\text{card}(v_1 \cup v_2)}$.

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.

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.

Afin d'obtenir des appellations synthétiques, 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

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

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.

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 lisibilité, nous dénommerons 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.

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.**

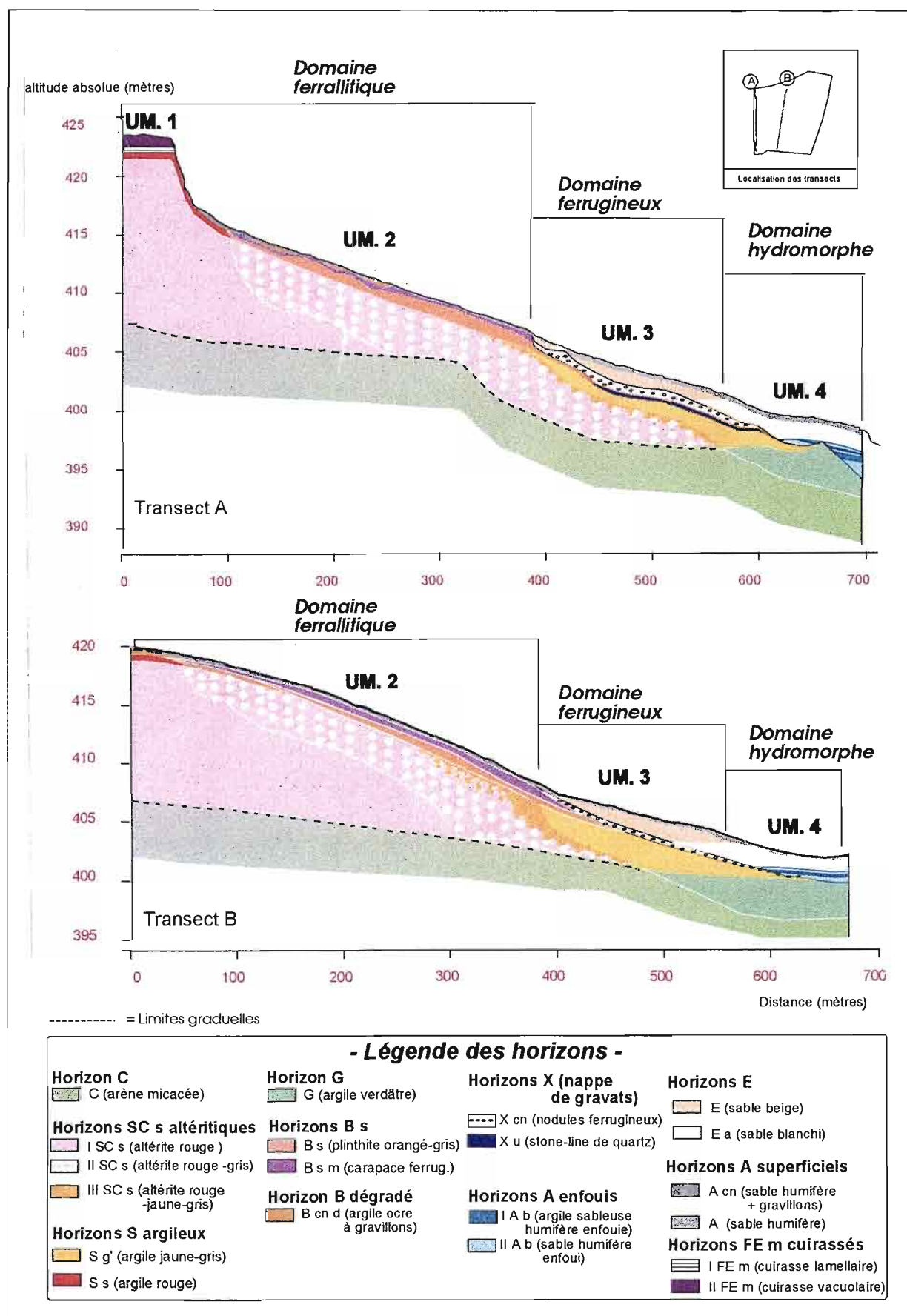


Figure IV-3. Organisation en coupes des horizons pédologiques.
(Nb : les déformations d'échelle sont restreintes à l'échelle latérale).

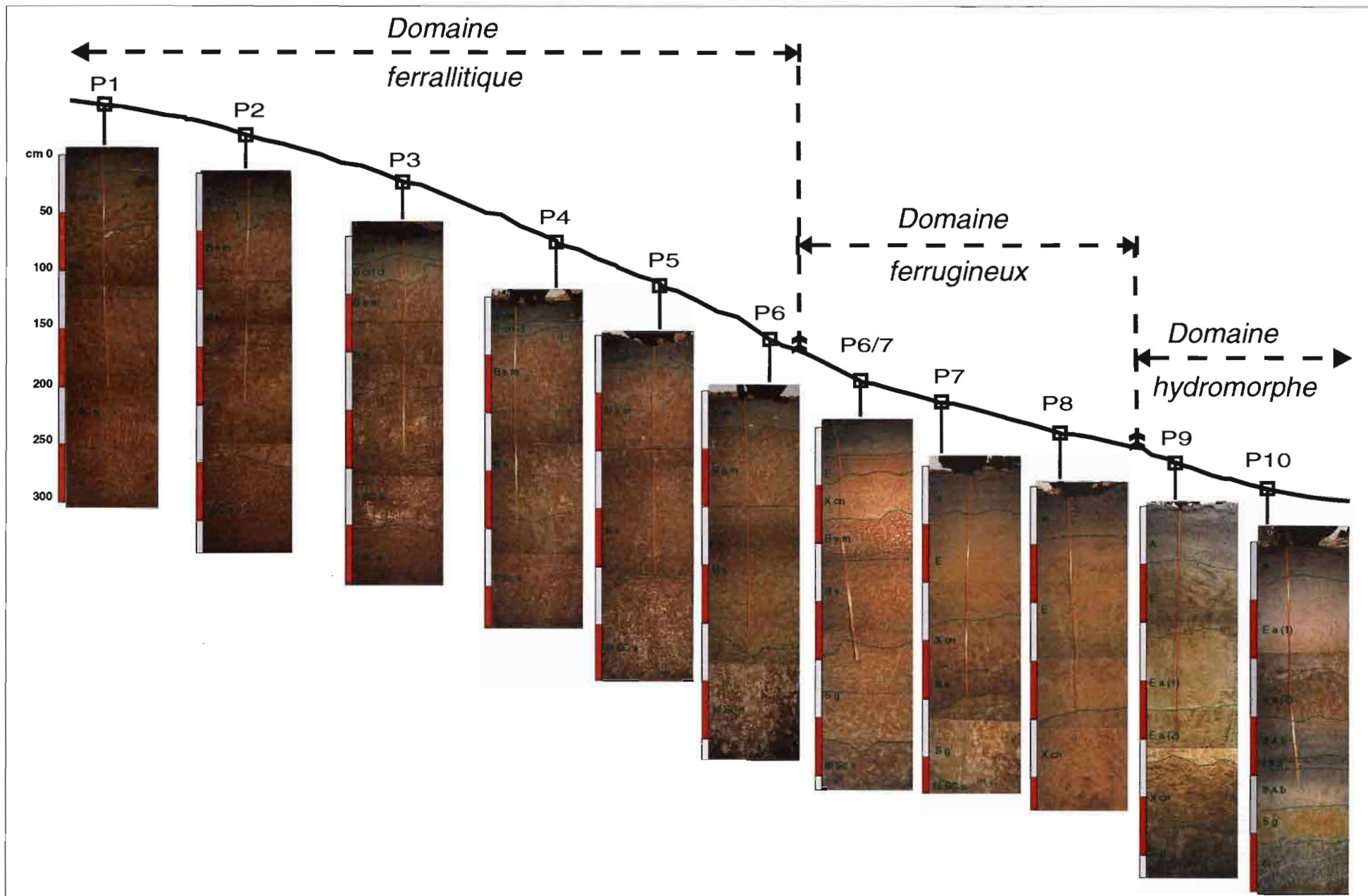


Planche 1. Profils du transect B.

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'horizons fortement indurés par les oxy-hydroxydes de fer (horizons cuirassés FE m), qui sont séparés des horizons sous-jacents par un banc de quartz fortement émoussés. Le profil type est le suivant :

Horizons :		Epaisseurs :
A cn	} sable humifère à gravillons	10 à 15 cm
II FE m	} cuirasse vacuolaire	90 à 100 cm
I FE m	} cuirasse lamellaire	40 à 50 cm
X u	} banc de quartz émoussés	15 à 25 cm
S s	} argile rouge	45 à 50 cm
I SC s	} altérite rouge	1400 à 1490 cm
C	} arène micacée	/

- *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 et le banc de quartz disparaissent. En revanche, un horizon argileux ocre à gravillons (horizon B cn d) apparaît sous l'horizon humifère. Le profil est le suivant :

Horizons :		Epaisseurs :
A cn	} sable humifère à gravillons	20 à 45 cm
B cn d	} argile ocre à gravillons	0 à 35 cm
S s	} argile rouge	50 à 60 cm
I SC s	} altérite rouge	900 à 1200 cm
C	} arène micacée	/

- *dans la partie aval du domaine ferrallitique*, deux horizons indurés par les oxy-hydroxydes 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. L'apparition de ces deux horizons concorde avec celle de plages grises qui se développent dans la partie supérieure de l'altérite rouge (apparition de l'horizon II SC s). Le profil est constitué comme suit :

Horizons :		Epaisseurs :
A cn	} sable humifère à gravillons	20 à 45 cm
B cn d	} argile ocre à gravillons	0 à 35 cm
B s m	} carapace ferrugineuse	15 à 65 cm
Bs	} plinthite	25 à 110 cm
II SC s	} altérite rouge-gris	100 à 450 cm
I SC s	} altérite rouge	0 à 1200 cm
C	} arène micacée	/

- 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 :

Horizons :		Epaisseurs :
A cn	} sable humifère à gravillons	15 à 55 cm
B s m	} carapace ferrugineuse	35 à 90 cm
Bs	} plinthite	40 à 100 cm
III SC s	} altérite rouge-jaune-gris	15 à 240 cm
II SC s	} altérite rouge-gris	175 à 430 cm
I SC s	} altérite rouge	0 à 350 cm
C	} arène micacée	/

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 : un 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 type devient le suivant :

Horizons :		Epaisseurs :
A	} sable humifère	20 à 50 cm
E beige	} sable beige	0 à 150 cm
X cn	} nodules ferrugineux	0 à 95 cm
X u	} stone-line de quartz	0 à 40 cm
S g'	} argile jaune-gris	25 à 250 cm
III SC s	} altérite rouge-jaune-gris	10 à 250 cm
II SC s	} altérite rouge-gris	0 à 480 cm
C	} arène micacée	/

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

On obtient le profil suivant :

Horizons :		Epaisseurs :
A	} sable humifère	30 à 55 cm
E beige	} sable beige	15 à 145 cm
E a	} sable blanchi	0 à 130 cm
X cn	} nodules ferrugineux	35 à 65 cm
X u	} stone-line de quartz	0 à 35 cm
S g'	} argile jaune-gris	100 à 205 cm
G	} argile verdâtre	0 à 275 cm
C	} arène micacée	/

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 enfouis 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 :

Horizons :		Epaisseurs :
A	} sable humifère	40 à 65 cm
Ea	} sable blanchi	100 à 160 cm
II A b	} sable humifère enfoui	5 à 45 cm
I Ab	} argile sableuse humifère enfouie	15 à 45 cm
II AB	} sable humifère enfoui	15 à 145 cm
G	} argile verdâtre	160 à 390 cm
C	} arène micacée	/

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, grâce à ces tomographies, on peut préciser la géométrie de certains horizons. C'est ainsi que l'on note, dans le domaine ferrallitique, que les horizons indurés par les oxyhydroxydes 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.

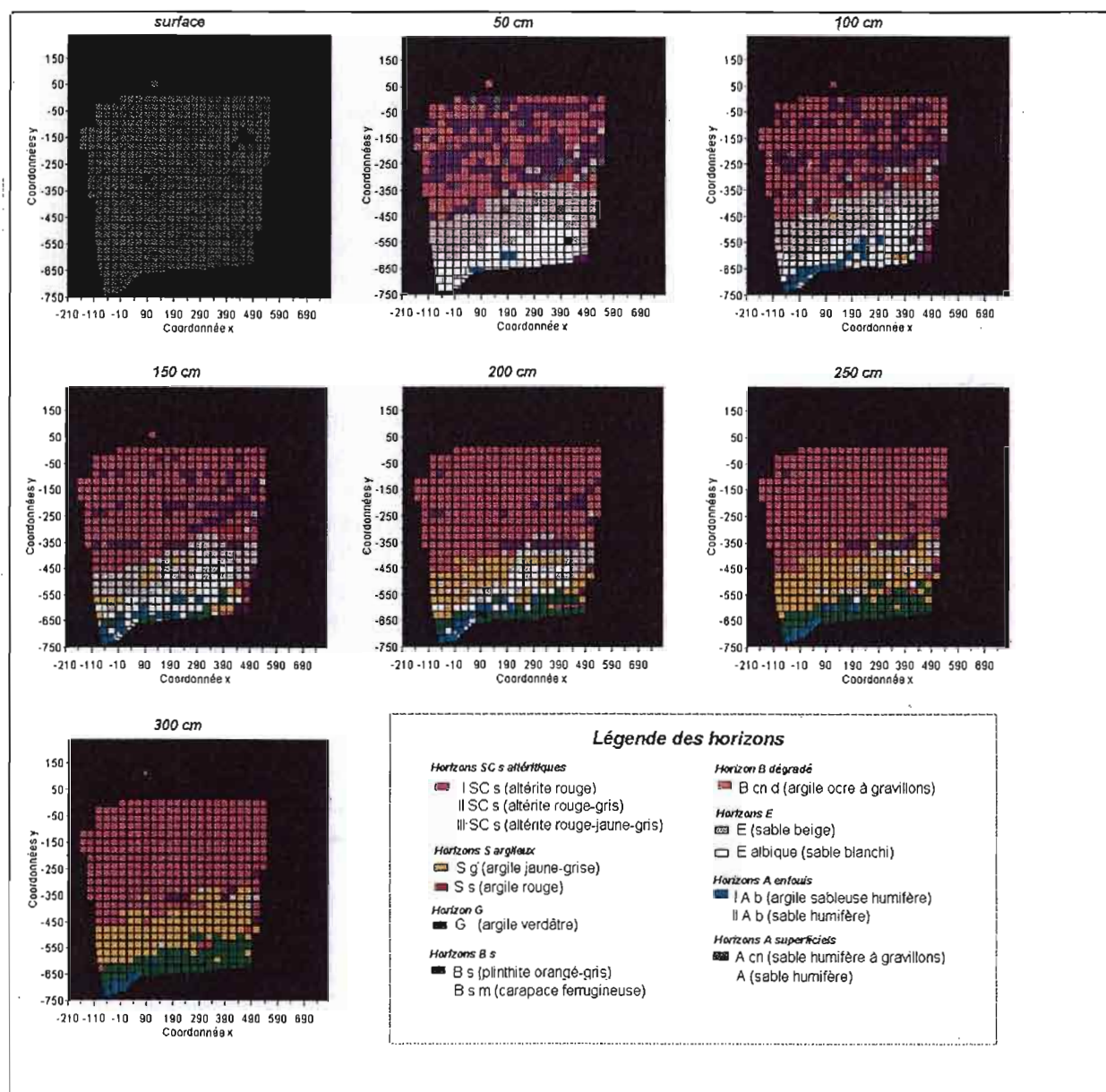


Figure IV-4. Tomographies des horizons pédologiques.

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.


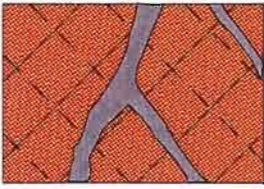
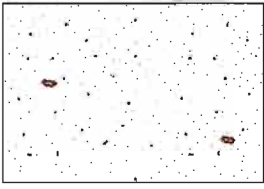
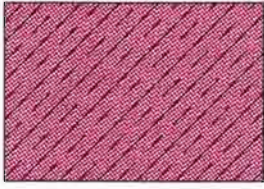
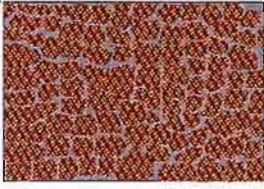

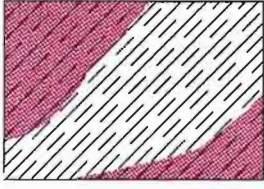



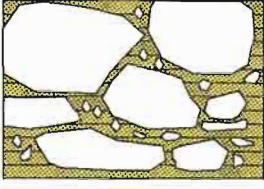


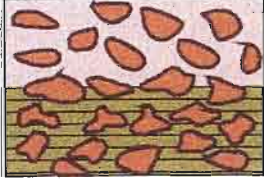


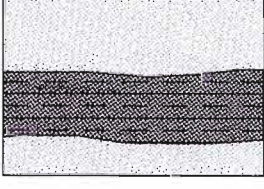

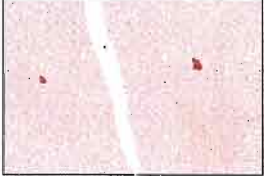
<p>1 <i>Arène micacée</i> C</p> 	<p>8 <i>Plinthite</i> B s</p> 	<p>16 <i>Sable blanchi</i> E a</p> 
<p>2 <i>Altérite rouge</i> I SC s</p> 	<p>9 <i>Carapace ferrugineuse</i> B s m</p> 	<p>17 <i>Sable humifère à gravillons</i> A cn</p> 
<p>3 <i>Altérite rouge-gris</i> II SC s</p> 	<p>10 <i>argile ocre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

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 macroporosité 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)**

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.2</p>
--

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)**

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.3</p>
--

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 pluricentimétriques à pluridécimétriques grises 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)

Aspect macro
 10x15 cm :
 cf. planche 2.4

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')

Aspect macro
 10x15 cm :
 cf. planche 2.5

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)

Aspect macro
10x15 cm :
cf. planche 2.6

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 plinthisque) 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)

Aspect macro
10x15 cm :
cf. planche 2.7

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-horizontale. 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 plinthe 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-manganesifères (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 :
plinthe
(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 plinthe 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 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.**

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.13-14</p>
--

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)

<p>Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.15</p>

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)

Aspect macro 10x15 cm : cf. planche 2.20
--

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.

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 du 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 (SEGALÉN, 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'oxy-hydroxydes 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 serait 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 (MILLOT, 1964).

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 plinthe 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 en 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 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 (SEGALEN, 1967; 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 a).

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 suggère qu'ils ont pu subir un déplacement. Dans ce cas, l'horizon 11 correspondrait plutôt à un pavage d'éléments grossiers sur une ancienne surface topographique. Dans cette hypothèse, l'horizon 12 X cn, qui se situe au dessus de l'horizon 11, ne pourrait être le produit de la désagrégation in situ de la carapace et 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). Dans ces conditions, 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 sesquioxiques) 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

Deux arguments suggèrent que ces horizons cuirassés n'appartiennent pas au profil d'altération :

- d'une part, 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);
- d'autre part, l'aspect lamellaire de l'horizon situé à la base de cet ensemble (horizon 19), qui le distingue nettement d'un horizon à structuration pédologique.

Le matériau parental de ces horizons cuirassés serait donc surimposé au profil d'altération, ce qui rejoint certaines interprétations antérieures (GAVAUD, 1967; BOULET, 1970; VOGT, 1968; KALOGA, 1986). Ce matériau serait alors issu d'apports.

processus génétiques et causes potentielles

Le matériau originel de cet ensemble d'horizons cuirassés a été manifestement le siège d'une importante accumulation de fer. Toutefois, puisque ces horizons ne semblent pas dériver de l'altération de la roche, il est difficile d'avoir une idée exacte de la nature de leur matériau originel, et par conséquent des transformations que celui-ci a pu subir. On ne peut donc ici trancher entre l'hypothèse d'une accumulation absolue de fer (HUMBERT, 1948; MAIGNIEN, 1958; MILLOT, 1964) et celle d'une accumulation relative (MAC FARLANE, 1976; LEPRUN, 1979).

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.a

4.2.2.B. Résumé des 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) :

- **un premier ensemble d'horizons qui seraient 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. On peut noter que le toit de cet ensemble présente une forte rupture de pente au passage entre l'unité de modelé 2 (domaine ferrallitique) et l'unité de modelé 3 (domaine ferrugineux). Une telle rupture suggère l'existence de deux phases érosives successives dans cette partie du versant, conformément aux hypothèses de LEVEQUE (1979) et KALOGA (1986). De ce fait, l'unité de modelé 3 correspondrait à une génération de glaciers intermédiaire entre le moyen glaciers quaternaire (unité de modelé 2) et le bas glaciers quaternaire (unité de modelé 4).

- **un second ensemble d'horizons dont le matériau parental serait issu d'apports.** Cet ensemble contient tout d'abord les horizons FE m, qui se surimposent au profil d'altération dans la partie amont du domaine ferrallitique (unité de modelé 1, haut-glacis quaternaire). Par ailleurs, cet ensemble inclut les horizons supérieurs des domaines ferrugineux et hydromorphes (horizons A, E, X, et Ab). Ces horizons, qui sont probablement d'origine colluvio-alluviale ou alluviale, attesteraient d'un comblement partiel du bas de versant.

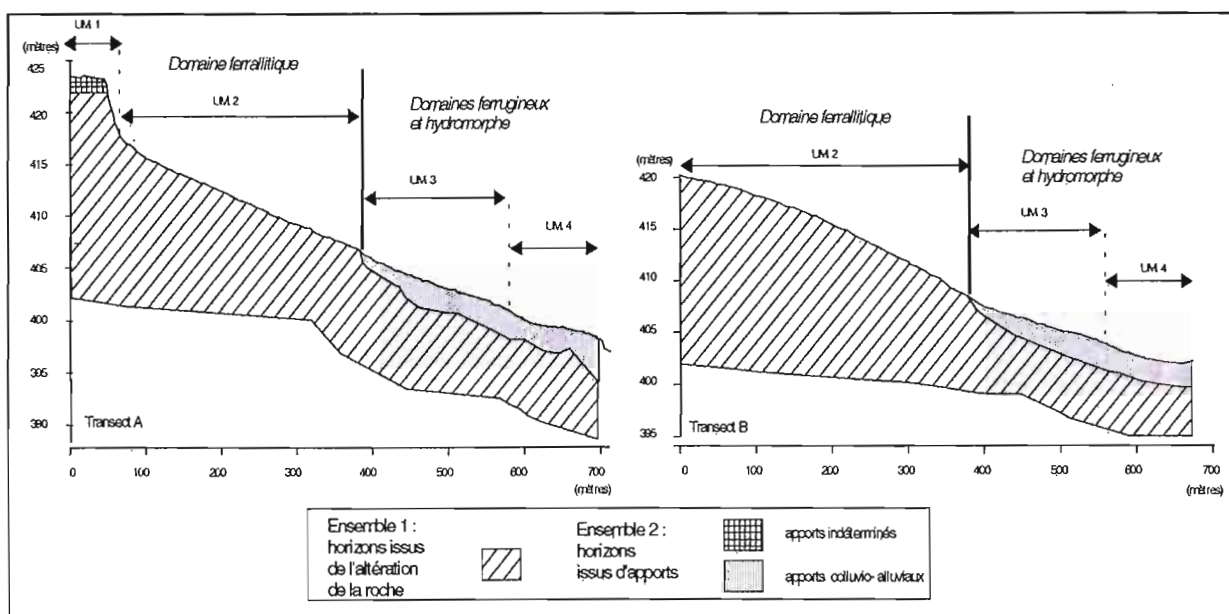


Figure IV-5. Les ensembles d'horizons selon l'origine de leur matériau parental (interprétation).

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

Au sein des deux ensembles d'horizons définis ci-dessus, la différenciation des horizons a été attribuée à un certain nombre de processus de transformation qui sont résumés en figures IV-6 et IV-7.

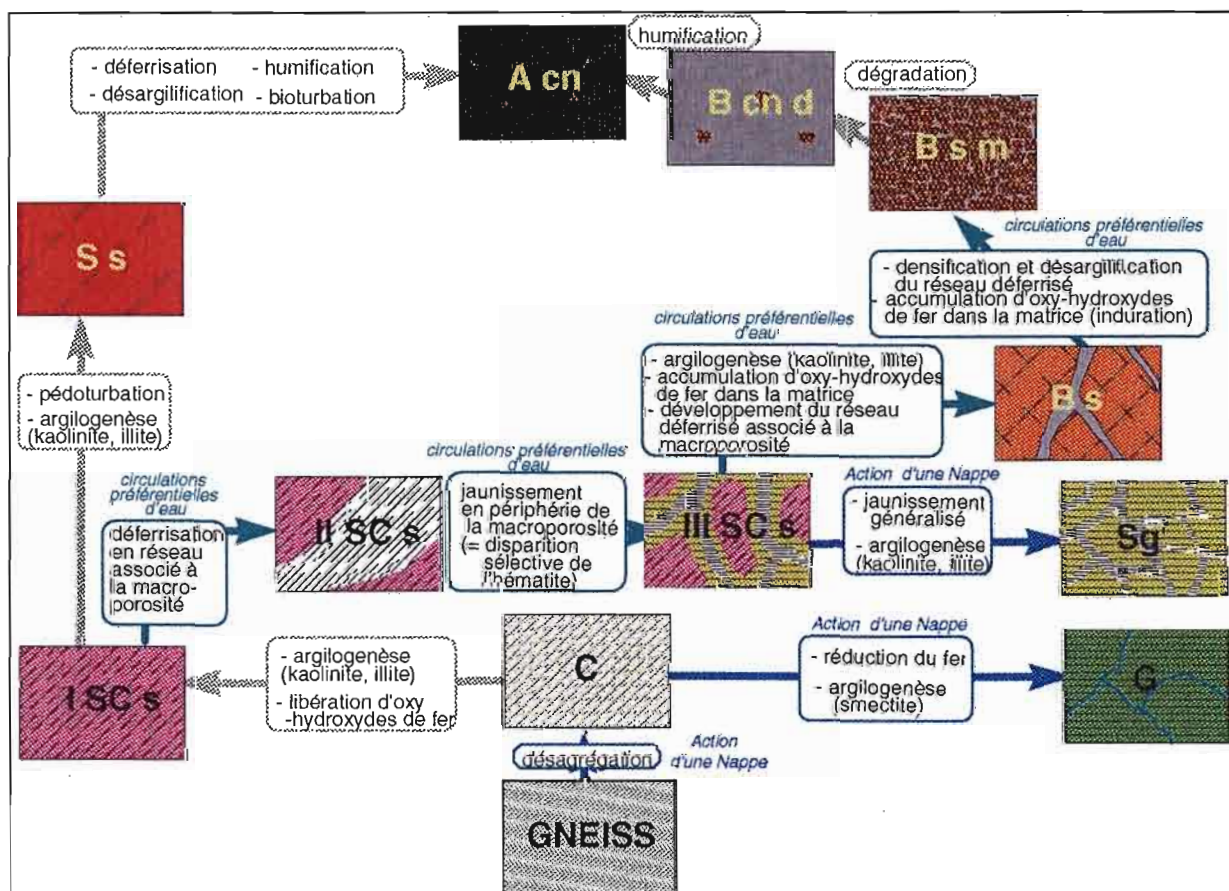


Figure IV-6 : Processus génétiques et filiations entre les horizons issus de l'altération de la roche (interprétation)

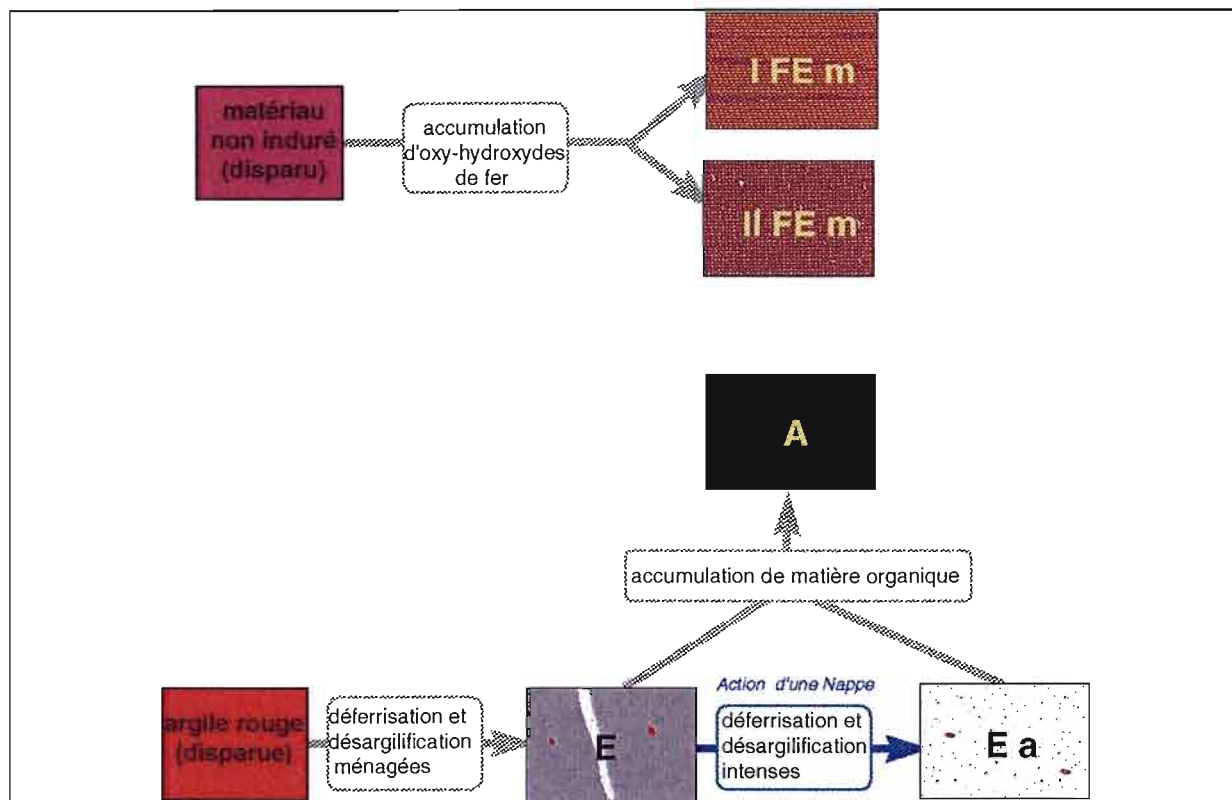


Figure IV-7 : Processus génétiques et filiation entre les horizons issus d'apport (interprétation).

Parmi ces processus, certains feraient intervenir l'action d'une nappe (désagrégation de la roche ; réduction du fer ; jaunissement généralisé du matériau, déferrisation et désargilification intenses). D'autres seraient liés à des circulations préférentielles d'eau (déferrisation en réseau ; jaunissement en périphérie de la macroporosité). Les horizons formés à partir de ces processus constituent donc des indices³ pédologiques qui permettent de formuler certaines hypothèses hydrologiques. En localisant ces horizons sur le versant, on obtient les hypothèses suivantes, illustrées en figure IV-8 :

³ Notons toutefois que la plupart de ces indices ne permettent pas de préjuger de l'actualité ou de l'inactualité de l'action de l'eau.

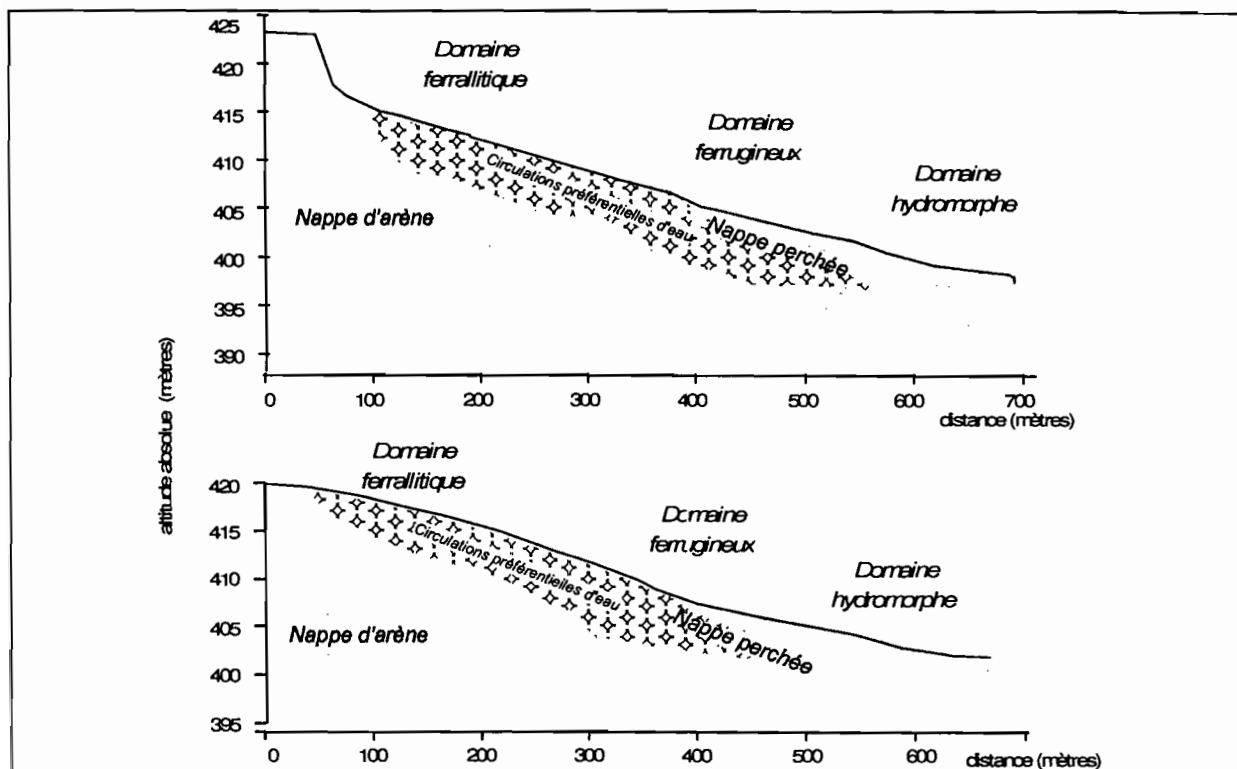


Figure IV-8 : Hypothèses hydrologiques à l'échelle du versant issues de l'interprétation des horizons.

- d'une part, une nappe de profondeur serait (ou aurait été) présente dans l'arène, et dans tous les domaines pédologiques ;
- d'autre part, les différents domaines pédologiques se distingueraient comme suit :
 - dans le domaine ferrallitique il n'y aurait pas (et pas eu) d'autre nappe que la nappe d'arène. En revanche, depuis la subsurface jusqu'à plusieurs mètres en profondeur, il y aurait (ou il y aurait eu) des circulations préférentielles d'eau indiquées par la déferrisation ou le jaunissement des matériaux de certains horizons en périphérie de la macroporosité (horizons II SCs, III SCs et horizons B).
 - dans le domaine ferrugineux, les horizons S g' sont marqués par des caractères d'hydromorphie (généralisation du jaunissement par disparition sélective de l'hématite), qui indiqueraient l'action, actuelle ou passée, d'une nappe en subsurface. Cette nappe, perchée, serait (ou aurait été) séparée de la nappe d'arène.
 - dans le domaine hydromorphe, l'importance de la désargilification et de la déferrisation de l'horizon E albique indiquerait l'action soustractive d'une nappe à faible profondeur. Dans ce domaine, cette nappe pourrait être en connexion avec la nappe d'arène, si l'on considère l'hydromorphie de l'horizon G qui s'intercale entre l'horizon E albique et l'arène.

Hormis une connexion possible des nappes de surface et de profondeur à l'aval, ces hypothèses conduisent à un schéma hydrologique à deux nappes superposées qui est proche du schéma de type C présenté au § 1.2.4.

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 :

- **la Clarté moyenne** = $\sum \alpha_i \times V_i$

- **la Pureté moyenne** = $\sum \alpha_i \times C_i$

- **la Teinte moyenne** = $\sum \alpha_i \times H_i$

- **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

A 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-9. 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.

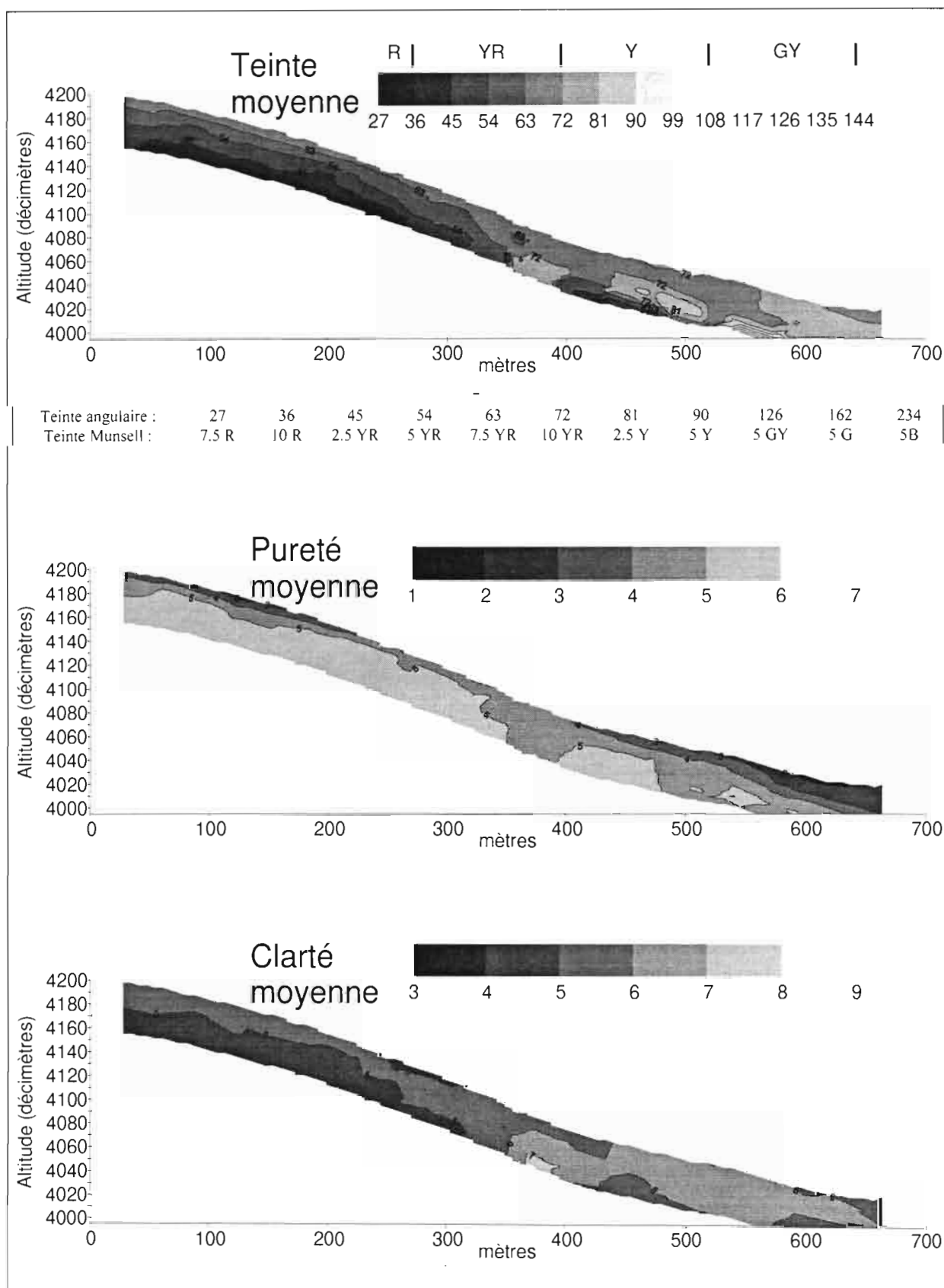


Figure IV-9. Teinte, clarté et pureté moyennes. transect B.

4.3.1.B. La séquence du red ratio moyen

La séquence du Red Ratio moyen est présentée en figure IV-10. 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

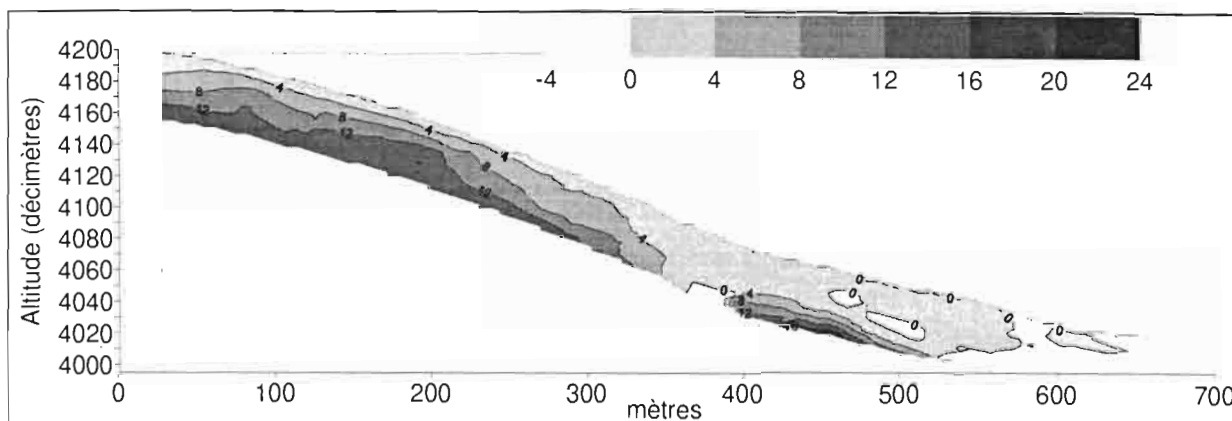


Figure IV-10. Red Ratio moyen. Transect B.

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-11. 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.

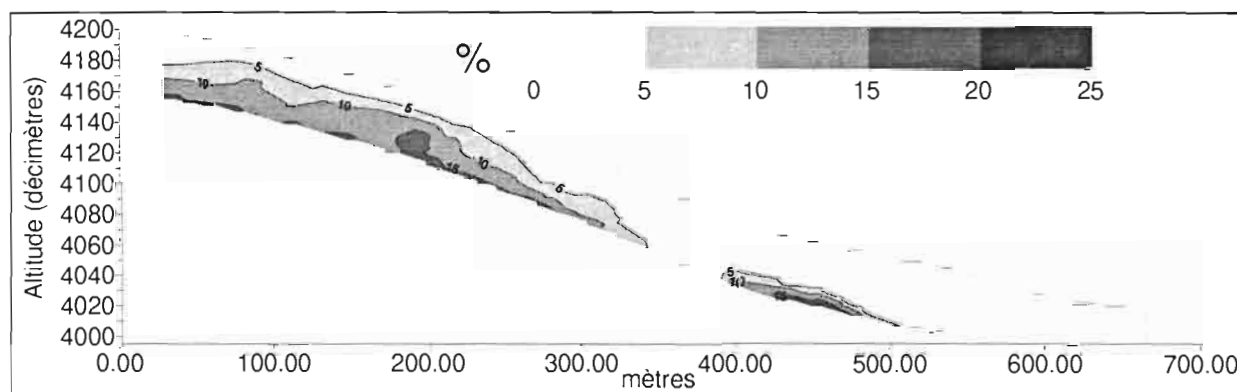


Figure IV-11. Estimation des teneurs en hématite d'après le Red Ratio. Transect B.

4.3.2. Les séquences granulométriques

Les séquences de taux d'éléments grossiers, de sable et d'argile sont présentées en figure IV-12. 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.

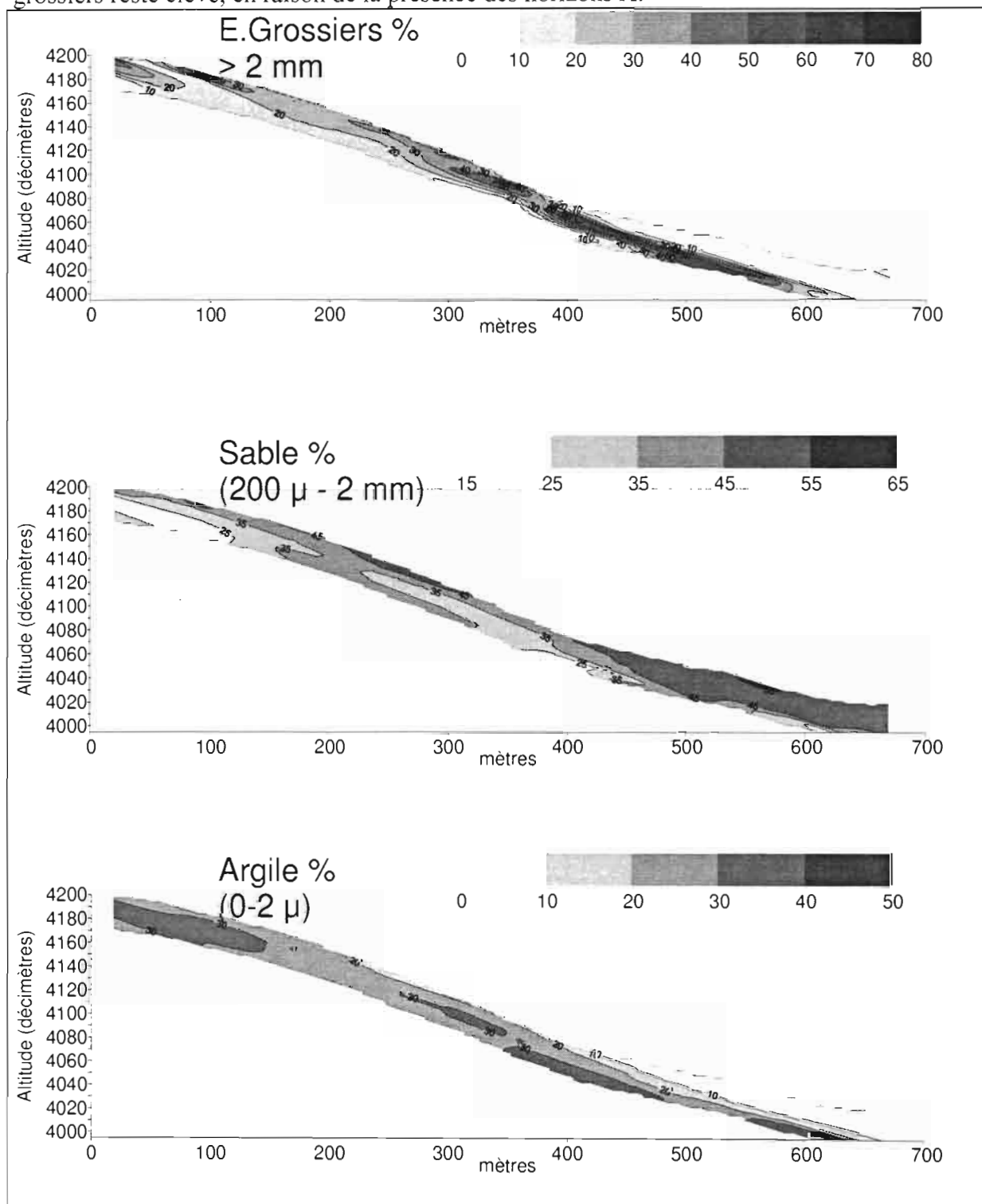


Figure IV-12. Granulométrie. Transect B.

4.3.3. La séquence de porosité

Comme pour les variables précédentes, la porosité⁴ présente une variation importante à mi-versant, au passage entre le domaine ferrallitique et le domaine ferrugineux (cf. figure IV-13). 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 Sg' 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.

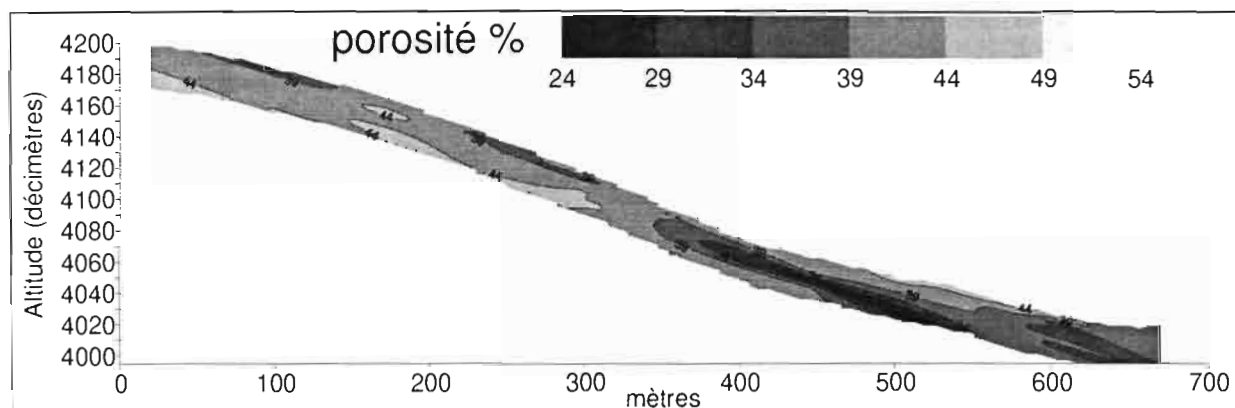


Figure IV-13. Porosité. Transect B

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 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] :

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

⁴ 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.

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-14.

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.

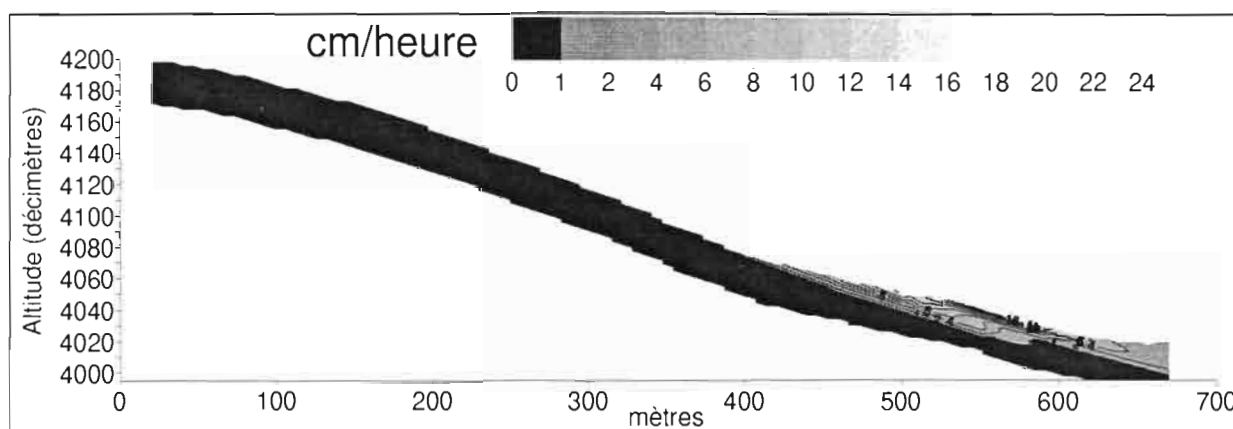


Figure IV-14. Estimation de la perméabilité par la formule de SAXTON (1986).

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 qui ont fourni des résultats complémentaires :

La première approche, s'est basée sur le découpage conceptuel de la couverture pédologique en 20 horizons. Ce découpage a été effectué en regroupant des volumes élémentaires de résolution (v.e.r.) selon une méthode classique qui reste améliorable, mais qui s'est avérée comparable à une mesure de distances mathématiques à des références préétablies.

L'analyse des caractéristiques et de la distribution dans l'espace de ces 20 horizons a confirmé l'existence de trois domaines pédologiques (domaines ferrallitique, ferrugineux et hydromorphe), et a permis d'en préciser les caractéristiques.

Cette analyse a permis, par ailleurs, d'aboutir à une interprétation génétique dans laquelle la différenciation de la pédoséquence serait liée à plusieurs facteurs :

- 1°) *trois phases d'érosion successives à partir d'un haut glacis quaternaire à surface cuirassée.* La phase d'érosion la plus ancienne, prévue par le modèle général présenté au chapitre 1, se traduit par une forte rupture de pente au sein du domaine ferrallitique, et aurait donné naissance au moyen glacis quaternaire à partir du haut-glacis quaternaire. La deuxième phase d'érosion, qui n'est pas explicitement reconnue par le modèle général, serait à l'origine

d'un glaciaire d'érosion s'étendant sur tout le domaine ferrugineux. Cette phase se traduit par une rupture de pente atténuée à la surface du sol, mais aussi par une forte rupture de pente du toit des horizons issus de l'altération de la roche. Enfin, la phase d'érosion la plus récente est également prévue par le modèle général. Elle se traduit par une rupture de pente à la surface du sol, et aurait conduit à la formation du bas glaciaire quaternaire dans le domaine hydromorphe.

-2°) *le comblement partiel de la partie inférieure du versant.* Dans les domaines ferrugineux et hydromorphe, la mise en place des horizons supérieurs (horizons A, E, X) serait due au comblement partiel des glaciaires d'érosion par un recouvrement colluvio-alluvial.

-3°) *la différenciation d'horizons due à des transformations au sein des matériaux pédologiques* (déferrisation, désargilification, disparition sélective de l'hématite). Parmi ces transformations, certaines se seraient produites sous l'action d'une nappe (formation de l'arène, des horizons Sg', Ea et G) ou de circulations préférentielles d'eau (formation des horizons II SCs, III SCs et B).

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 montré 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, ...).

Ces deux approches ont fourni des indices qui permettent de formuler certaines hypothèses concernant les nappes phréatiques :

- d'une part, une nappe de profondeur serait (ou aurait été) présente dans l'arène, et dans tous les domaines pédologiques ;

- d'autre part, les différents domaines pédologiques se distingueraient comme suit :

- dans le domaine ferrallitique, les traits pédologiques associés à la macroporosité de certains horizons suggèrent l'existence de circulations préférentielles d'eau depuis la subsurface jusqu'à plusieurs mètres en profondeur. Mais il n'y aurait pas (et pas eu) d'autre nappe que la nappe d'arène.

- dans le domaine ferrugineux, plusieurs indices (forte contraste entre les couches supérieures du sol perméables et les couches sous-jacentes peu perméables, hydromorphie de l'horizon S g', ..) suggèrent l'existence (actuelle ou passée) d'une nappe phréatique perchée;

- enfin, dans le domaine hydromorphe, différents indices (désargilification et déferrisation des horizons E albique; réduction des horizons G...) suggèrent l'existence d'une nappe phréatique dès la subsurface.

En définitive, ces hypothèses conduisent à un schéma hydrologique à deux nappes superposées, qui est proche du schéma de type C présenté au § 1.2.4.

Il reste à vérifier ces hypothèses par une approche plus directe des conditions hydriques sur le versant. Ceci nous conduit au chapitre suivant, consacré à l'étude de l'hydroséquence.

CHAPITRE 5. L'HYDROSEQUENCE

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

Il s'agit ici de préciser un schéma hydrologique qui reste mal connu, d'après la bibliographie présentée au chapitre 1. Il s'agit également de vérifier, par une approche directe, certaines hypothèses¹ formulées au chapitre précédent à partir des indices pédologiques.

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 de 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.

¹ Il s'agit évidemment des hypothèses sur les conditions hydrologiques actuelles, puisqu'on ne peut vérifier directement les conditions hydrologiques passées.

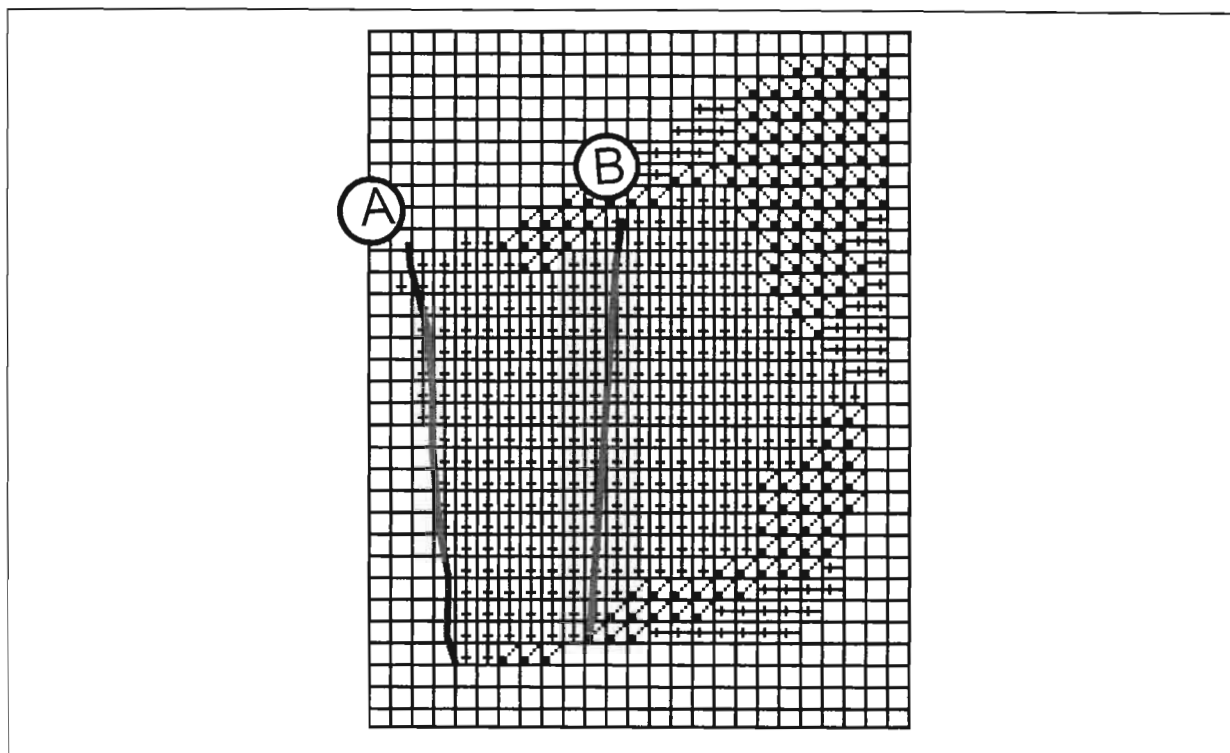


Figure V-1. Orientation des écoulements de surface et localisation des transects.

L'indice I_b de BEVEN (BEVEN et al. 1979) est un estimateur topographique de la saturation potentielle en eau des sols. Cet indice 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 ($\tan(\beta)$) : $I_b = \text{Log}(\alpha_i / \tan(\beta))$. En pratique, la surface drainée par une maille donnée peut être calculée 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 (DEPRAETERE, 1992). Quant à la pente locale d'une maille, elle peut être déterminée par le plan de régression qui relie les quatre points altimétriques formant cette maille.

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, présenté en figure V-2, montre que cet indice augmente généralement des lignes de crêtes vers les axes de drainage. On remarque toutefois que celui-ci reste relativement élevé dans la partie amont du transect A, ce qui confirme que cette partie peut être alimentée par des écoulements latéraux de surface. En revanche, cet indice augmente régulièrement sur le transect B.

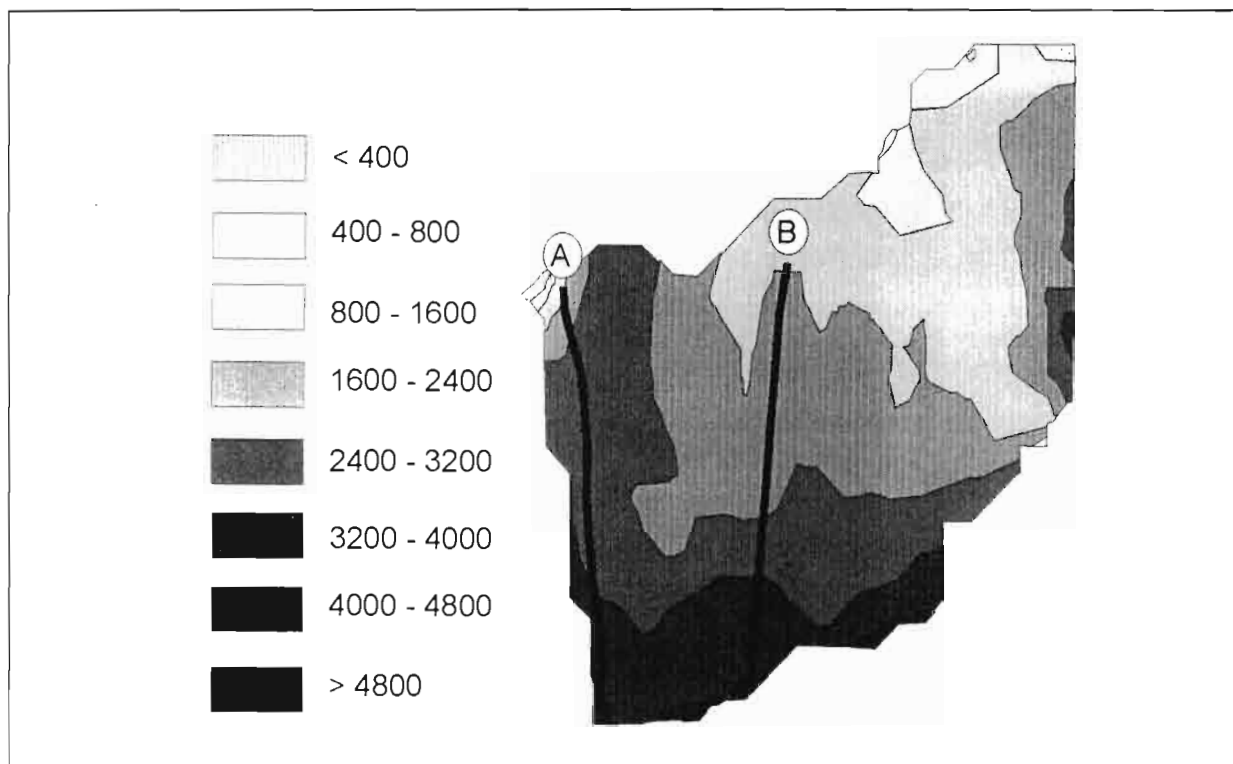


Figure V-2. Indice topographique de Beven et localisation des transects.

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.

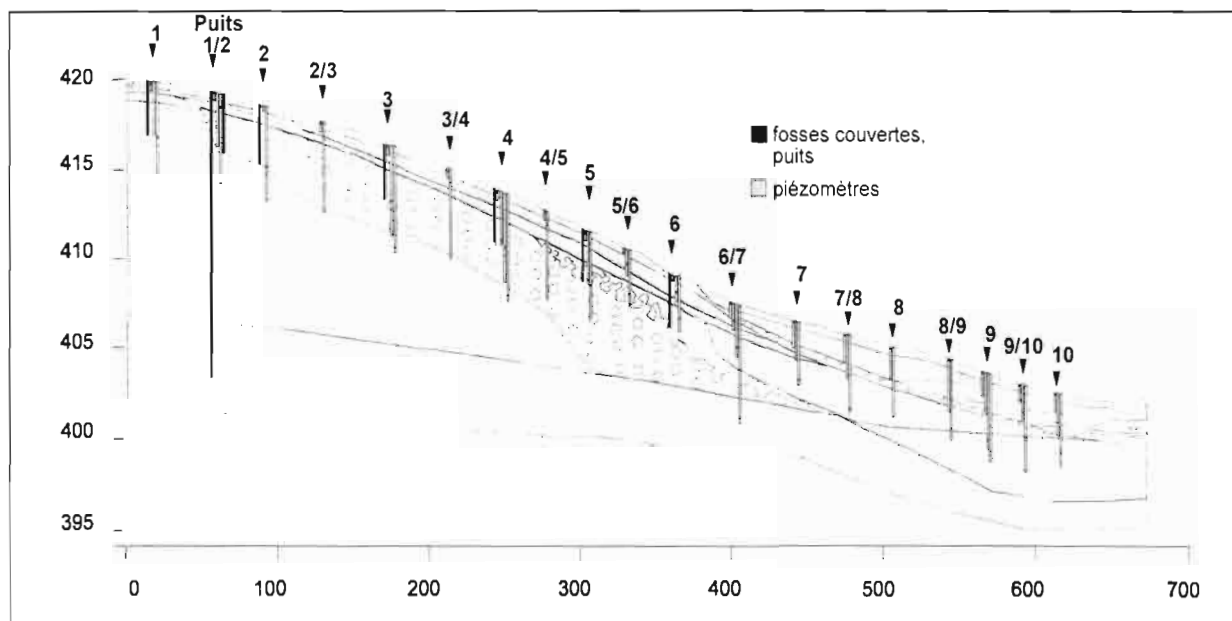


Figure V-3. Dispositif implanté sur le transect B.

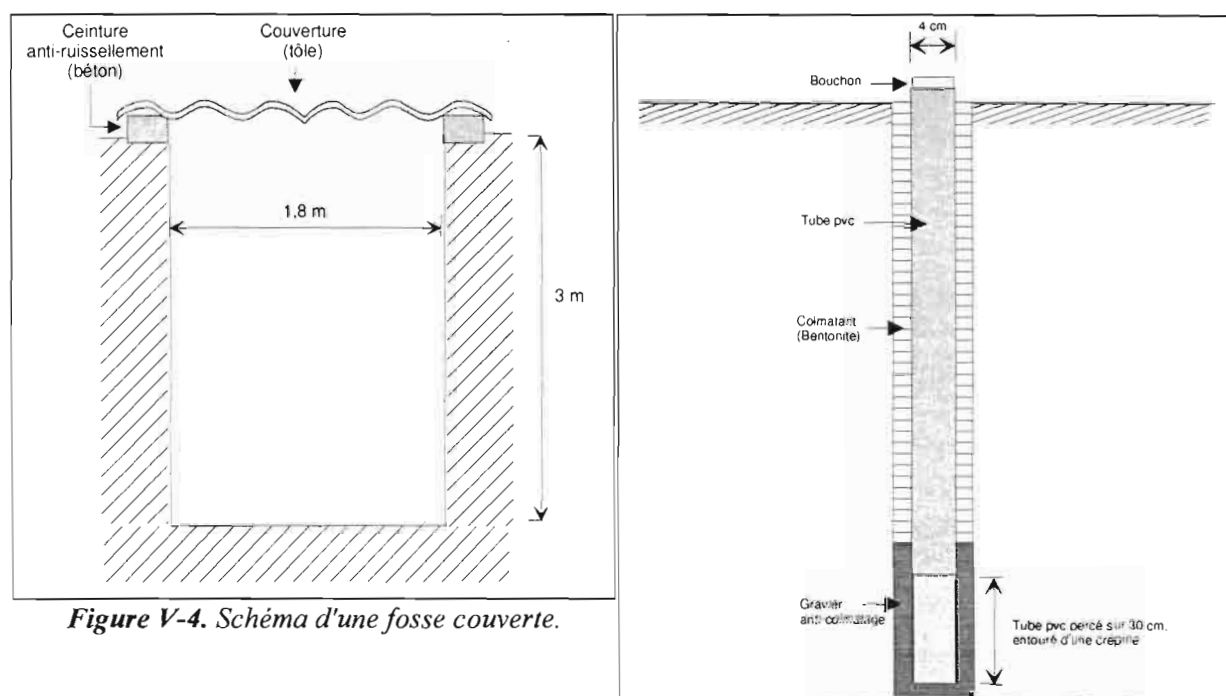


Figure V-4. Schéma d'une fosse couverte.

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 ²

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 qui localise ce toit par rapport à la position sur le transect et le temps (cf. figure V-7). On observe aussi, sur ce bloc-diagramme, 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 : en effet, 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.

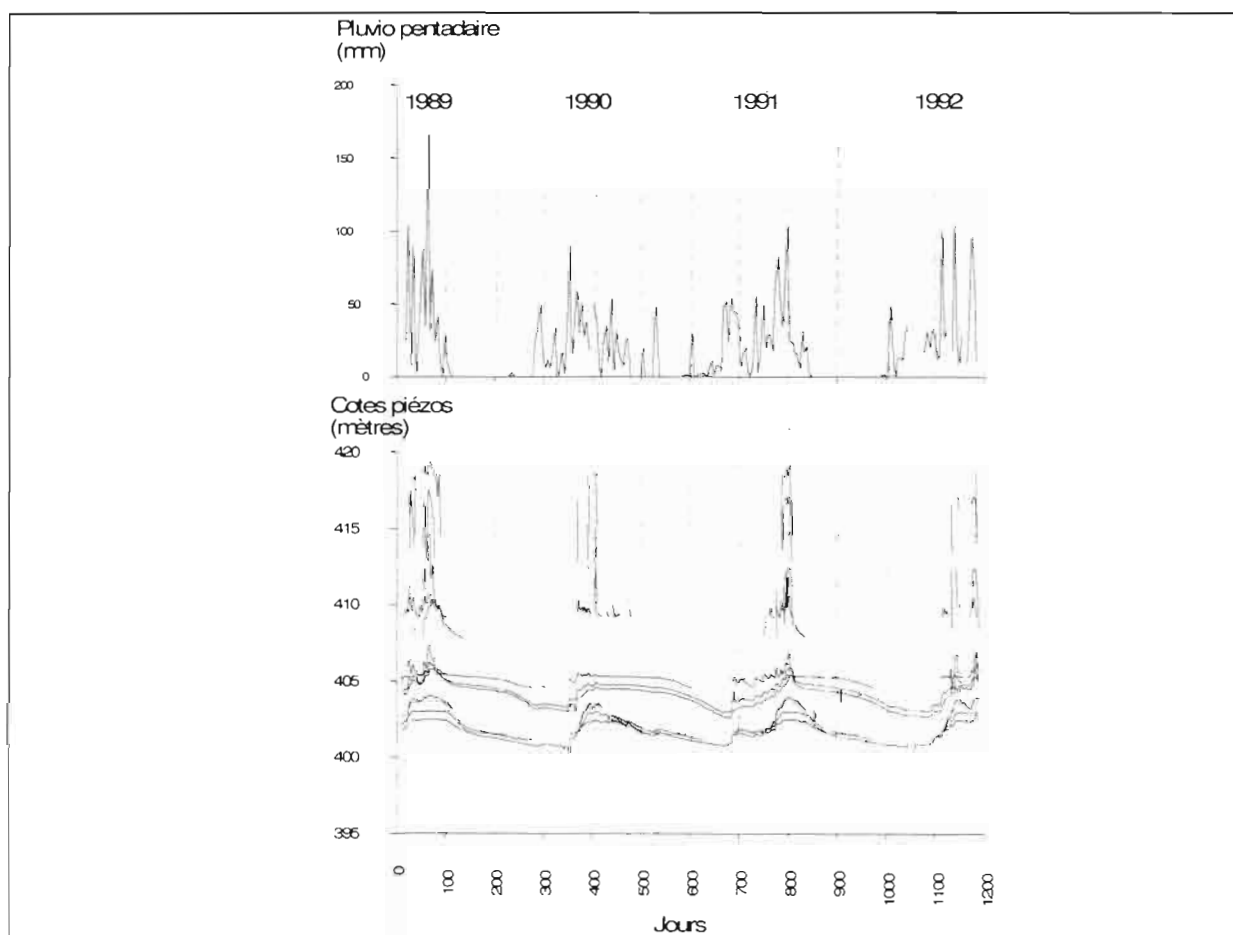


Figure V-6. Relevés piézométriques le long du transect et pluviosité. Période 1989-1992

² Dans cet examen, nous ne tenons pas compte des piézomètres implantés en profondeur sur certaines stations.

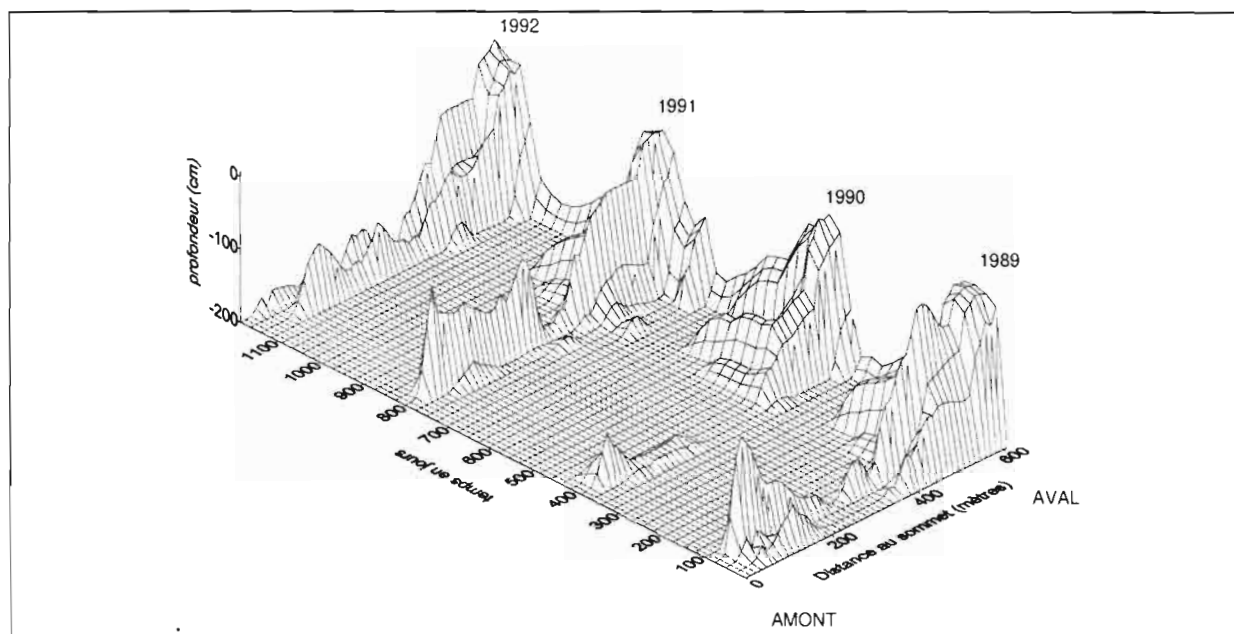


Figure V-7. Variations du toit piézométrique par rapport à la position sur le transect et le temps. Période 1989-1992

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, et 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). 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.

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.

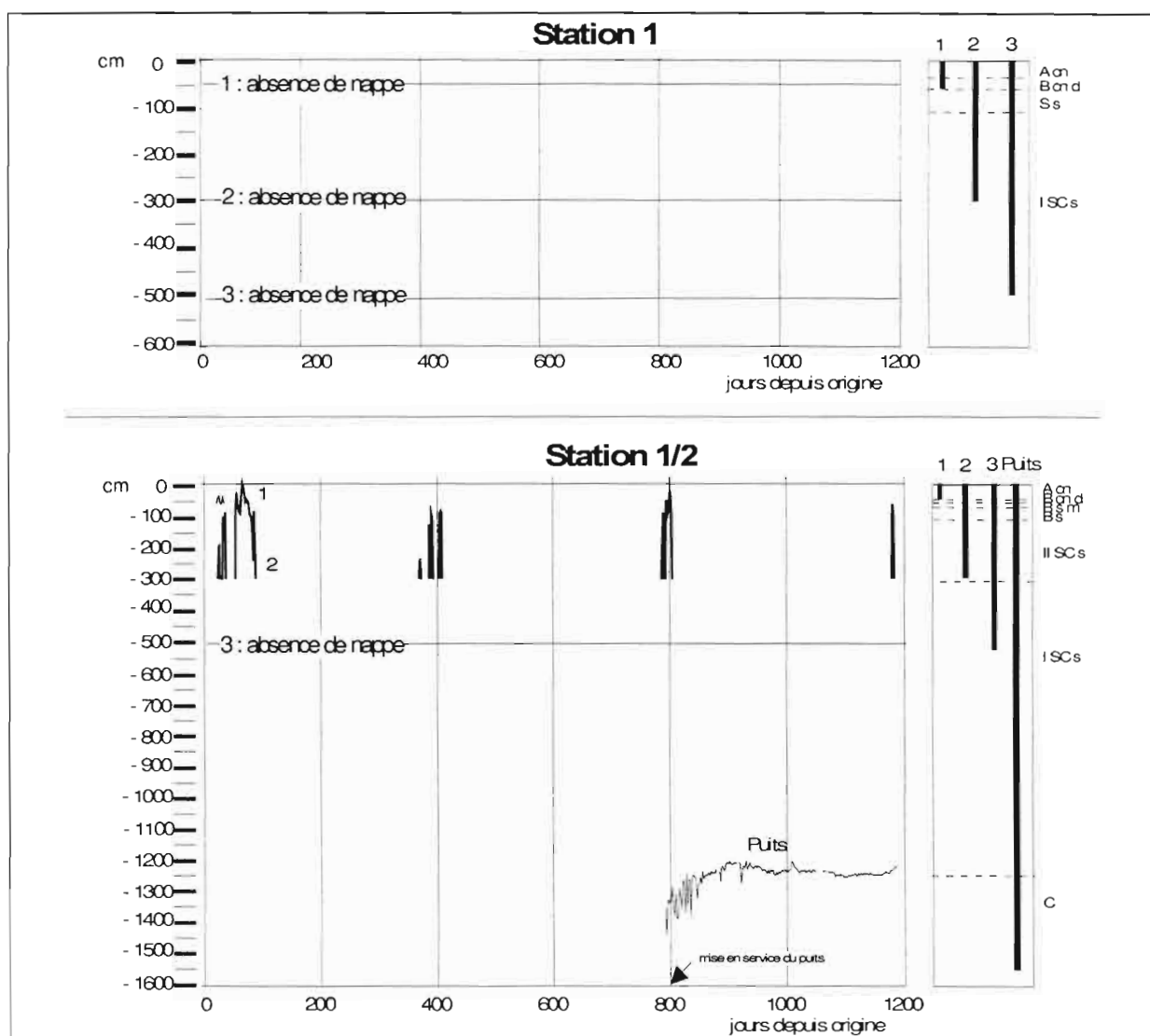


Figure V-8. Relevés piézométriques de deux stations du domaine amont ferrallitique

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.

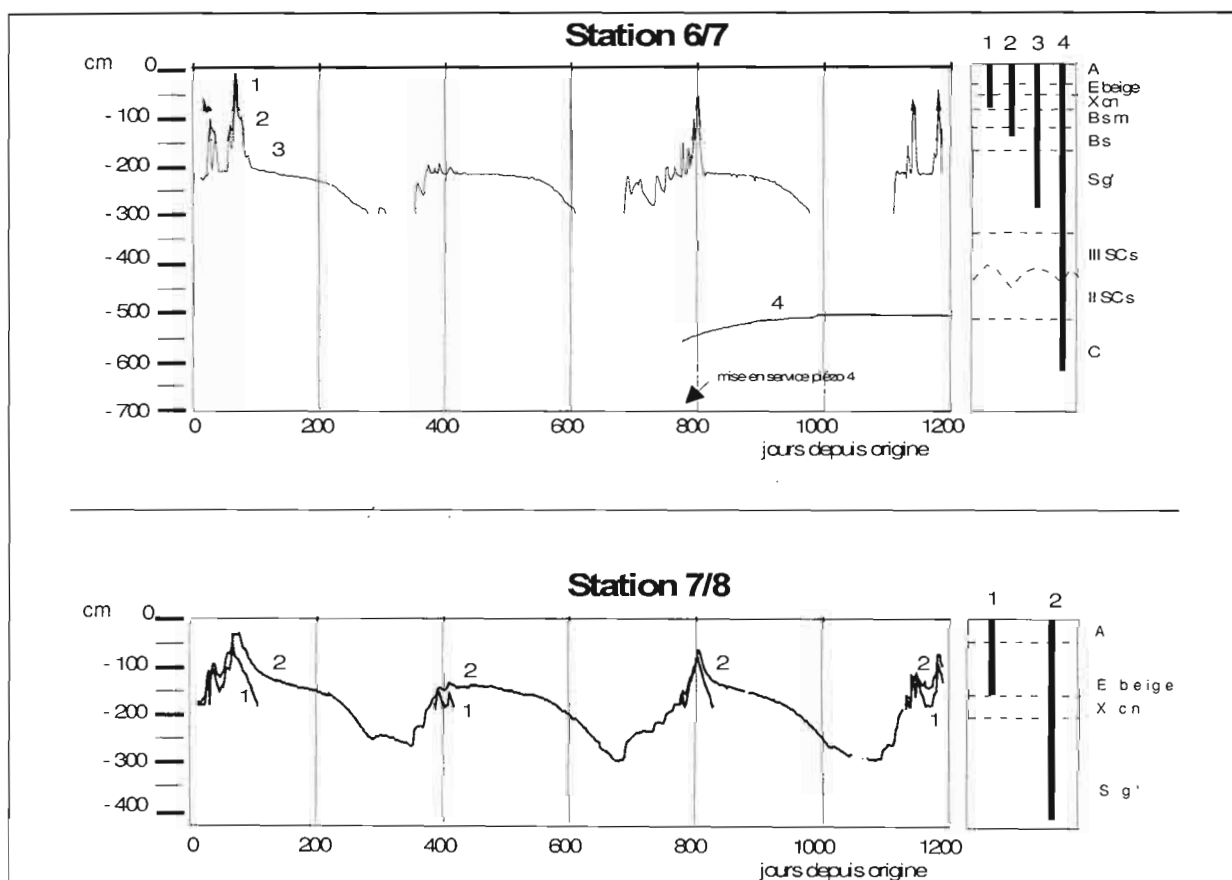


Figure V-9. Relevés piézométriques de deux stations du domaine médian ferrugineux

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 :

- une première nappe est traversée par les piézomètres implantés dans les horizons supérieurs sableux (cf. réponses des piézomètres 1 et 2), 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.

- une seconde nappe est rencontrée par les deux piézomètres de profondeur implantés dans l'horizon argileux verdâtre G (cf. réponses des piézomètres 3 et 4). Il ne s'agit pas d'un artefact, car la cote du piézomètre 4 rejoint assez rapidement la cote du piézomètre 3 après sa mise en service. On note tout d'abord que les fluctuations de cette nappe sont décalées dans le temps par rapport à la nappe de surface. De plus, on constate qu'en phase de recharge, le toit libre de cette nappe se situe au dessus du toit de la nappe de surface, ce qui indique qu'elle est en surpression par rapport à la nappe de surface. Ce type de surpression a déjà été observé précédemment dans des horizons argileux de profondeur à faible conductivité hydraulique : selon CHEVALLIER et al. (1990), il pourrait s'agir d'un phénomène d'artésianisme; pour ZIMMER (1990), il résulterait de la compression du matériau pédologique, dont la cohésion serait insuffisante à l'état humide pour supporter le poids des matériaux sus-jacents. Notons enfin que compte tenu de sa position, la nappe de profondeur semble correspondre à la partie supérieure de la nappe d'arène.

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, en effet, 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 dans l'horizon argileux verdâtre G (cf. piézomètre 3), qui peut être en surpression par rapport à la nappe perchée.

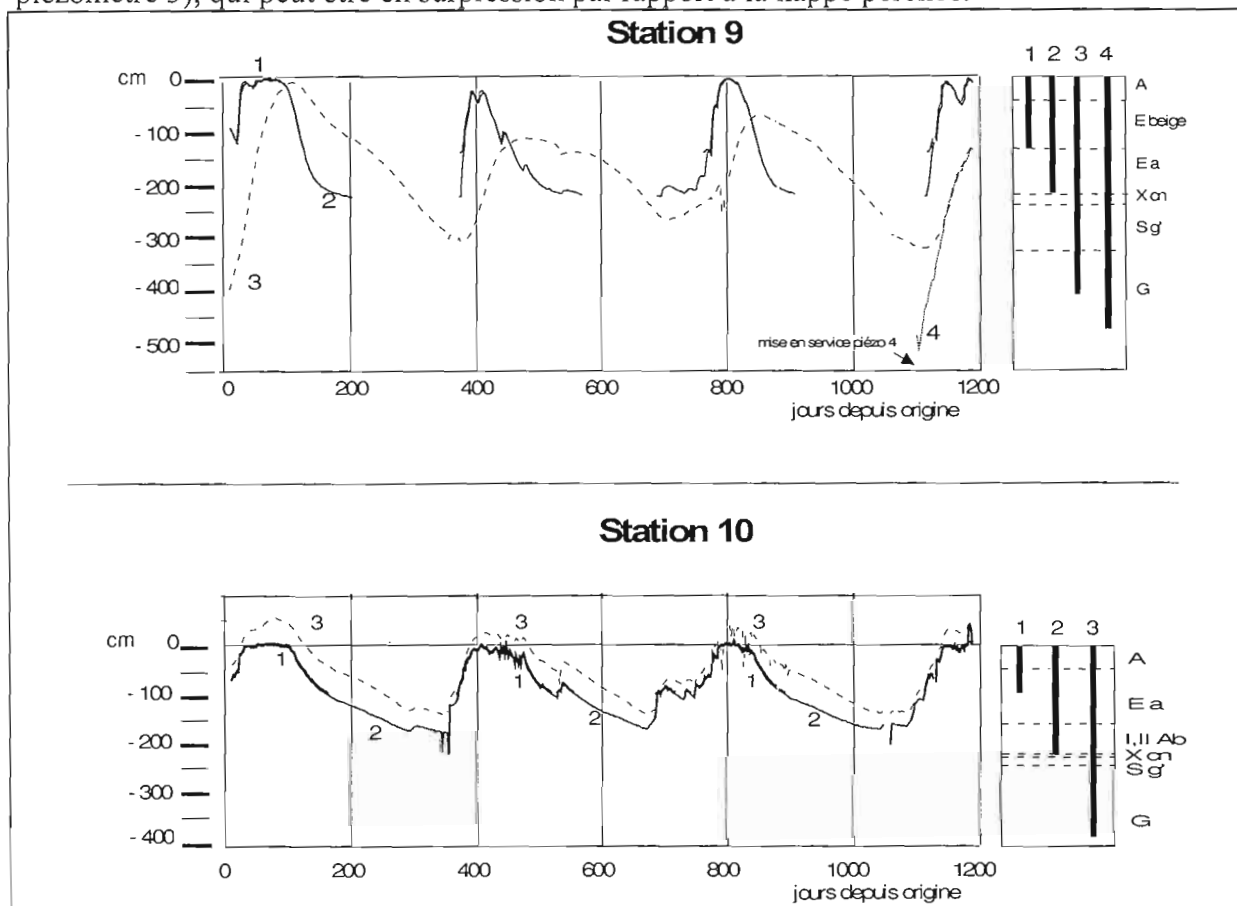


Figure V-10. Relevés piézométriques de deux stations du domaine aval hydromorphe

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.

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.

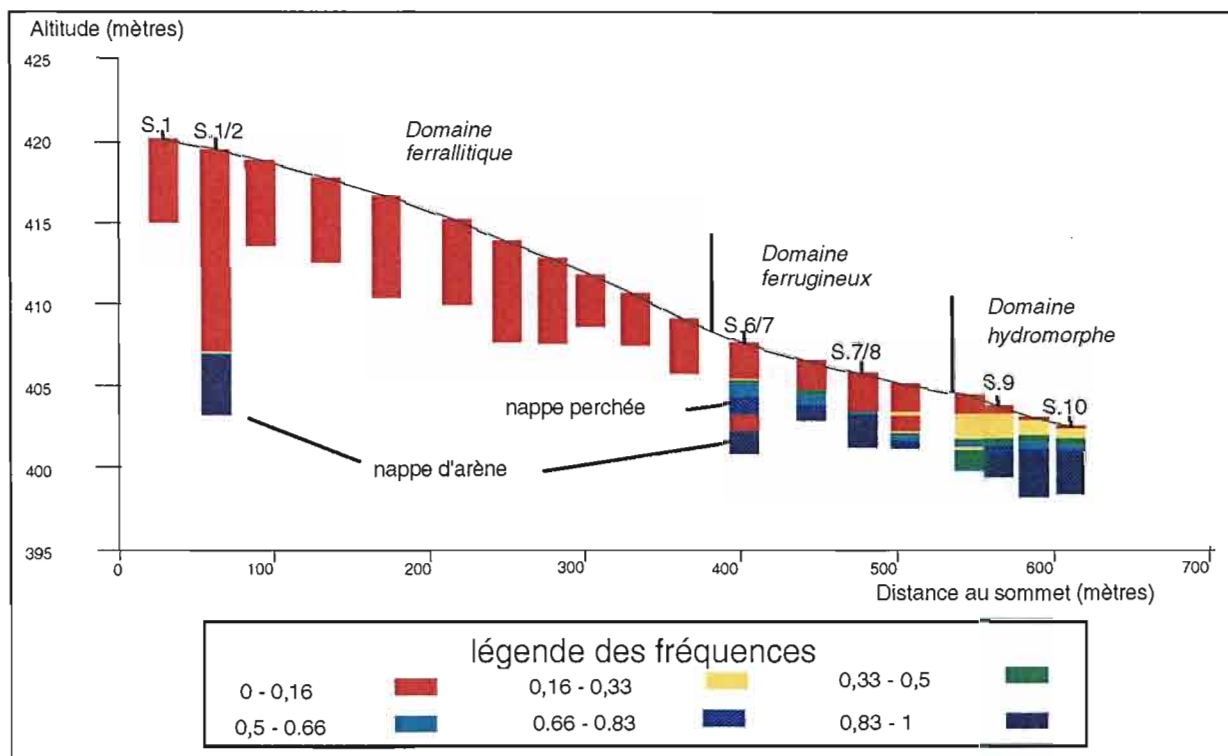


Figure V-11. Séquence des fréquences annuelles d'engorgement (calcul sur la période du 30/09/1991 au 30/09/1992).

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), ce qui pourrait correspondre à la nappe d'arène. Par ailleurs, une nappe temporaire (fréquence annuelle d'engorgement supérieure à 0,16) se manifeste ici jusqu'en surface.

En définitive, si l'on exclut la nappe d'arène qui semble présente sur l'ensemble du versant, 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.

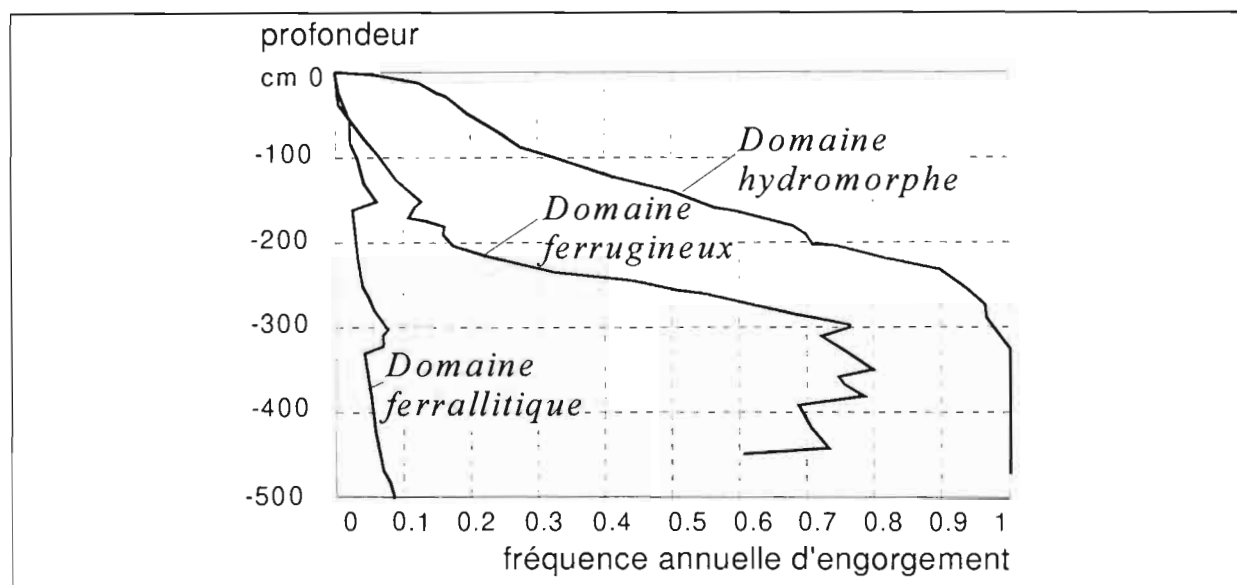


Figure V-12. Profils moyens de fréquences annuelles d'engorgement selon les domaines pédologiques. (Calculés sur la période du 30/09/1989 au 30/09/1992).

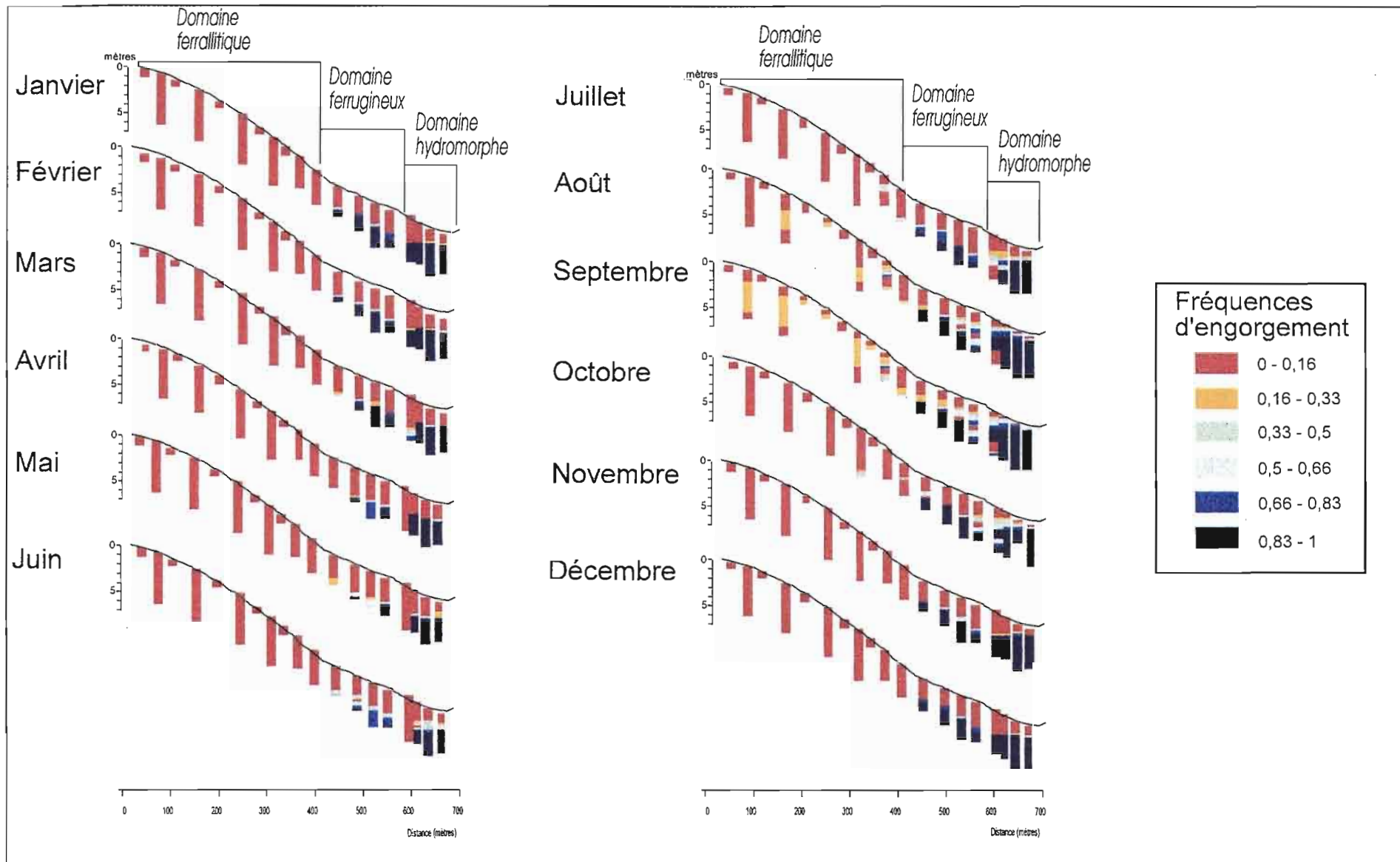
5.2.3.B. Séquences de fréquences mensuelles d'engorgement et dynamique saisonnière des nappes

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 phréatiques superposées, dont les fluctuations cycliques dépendent des cycles pluviométriques saisonniers. Une de ces nappes n'est localisée qu'à l'aval du versant. Ainsi, et en résumé :

- dans le domaine ferrallitique, on trouve, en profondeur, une nappe d'arène permanente à faible battement. 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 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 dans les horizons E, X et S g' (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 l'horizon argileux verdâtre G, une nappe permanente qui peut être en surpression, et qui correspondrait à la nappe d'arène. Dans les horizons supérieurs A et E, on retrouve la nappe perchée semi-permanente observée dans le domaine ferrugineux.

Cette analyse montre, tout d'abord, que cette hydroséquence correspond à un schéma hydrologique qui a pu être observé sur d'autres versants (WOROU, 1988; FRITSCH, 1993). Il s'agit plus précisément du schéma hydrologique de type C présenté au chapitre 1 (cf. § 1.2.4.).

De plus, cette analyse confirme les hypothèses hydrologiques formulées à la fin du chapitre précédent, à partir d'indices pédologiques. Ces indices pédologiques traduisent donc effectivement les conditions hydriques actuelles, ce qui signifie qu'il existe des relations entre pédoséquence et hydroséquence, et que la pédoséquence est "hydrologiquement fonctionnelle".

Il reste toutefois à quantifier les relations entre pédoséquence et hydroséquence, ce qui nous amène au chapitre suivant.

CHAPITRE 6. RELATIONS ENTRE PEDOSEQUENCE ET HYDROSEQUENCE

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 une assez forte variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques du sol, ainsi que 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 données pédologiques et hydrologiques qui peuvent être mises en relation numérique. Il

- 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**.

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.

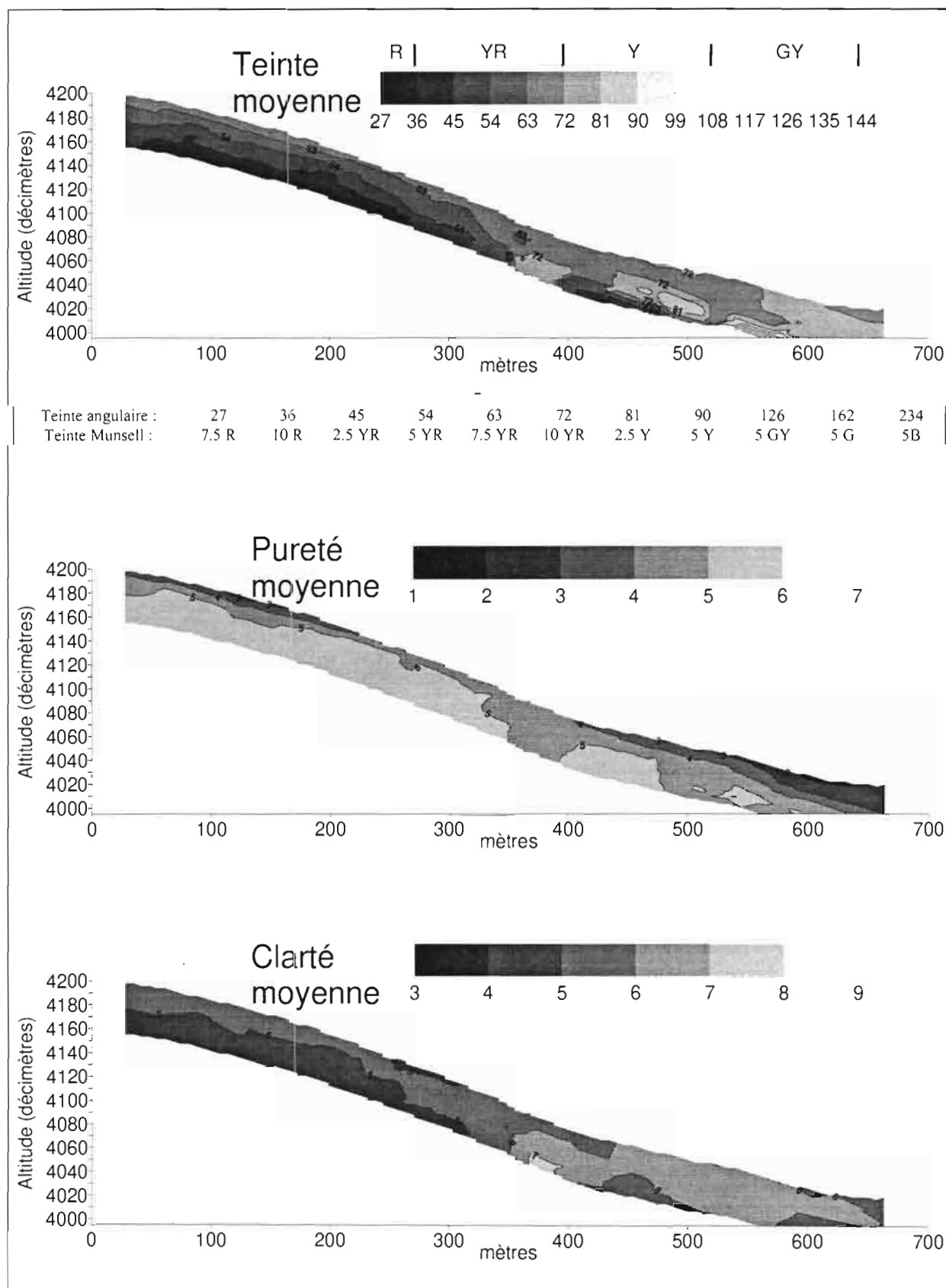


Figure IV-9. Teinte, clarté et pureté moyennes. transect B.

4.3.1.B. La séquence du red ratio moyen

La séquence du Red Ratio moyen est présentée en figure IV-10. 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

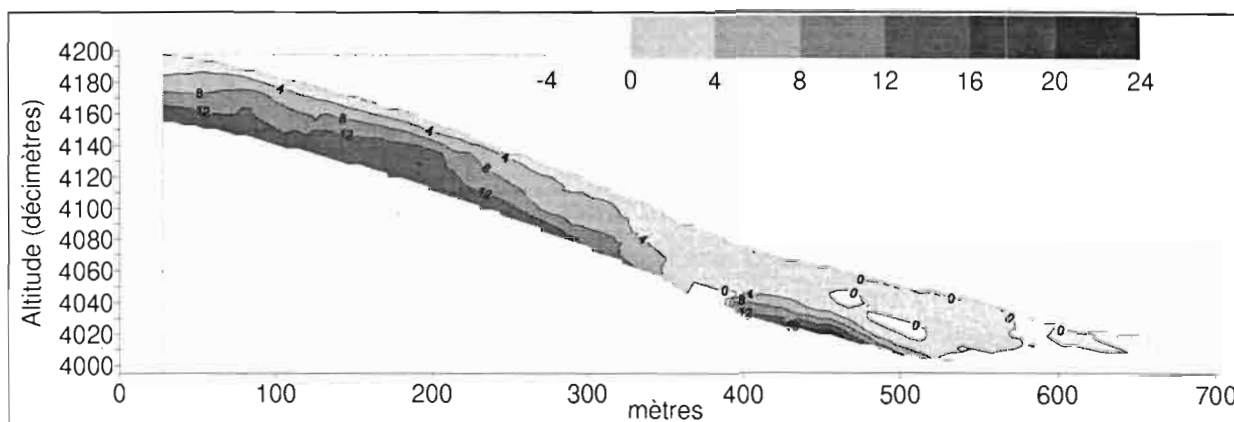


Figure IV-10. Red Ratio moyen. Transect B.

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-11. 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.

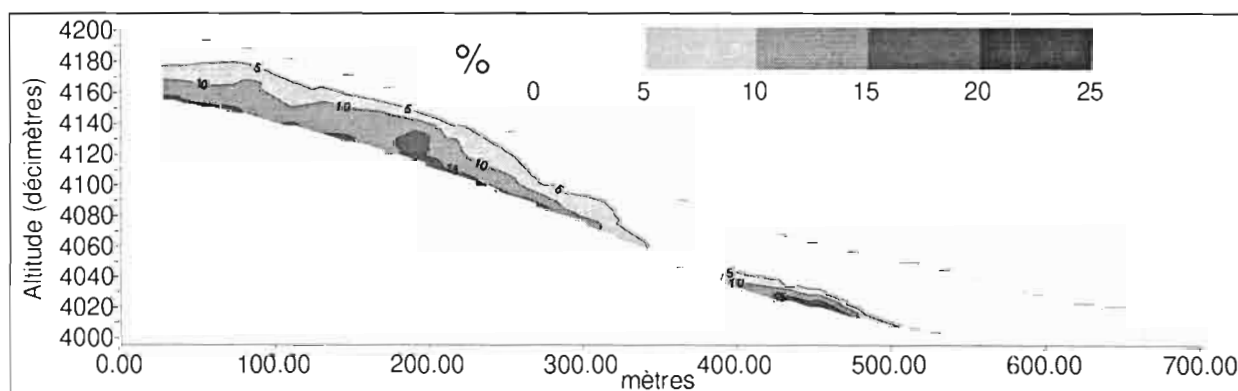


Figure IV-11. Estimation des teneurs en hématite d'après le Red Ratio. Transect B.

4.3.2. Les séquences granulométriques

Les séquences de taux d'éléments grossiers, de sable et d'argile sont présentées en figure IV-12. 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.

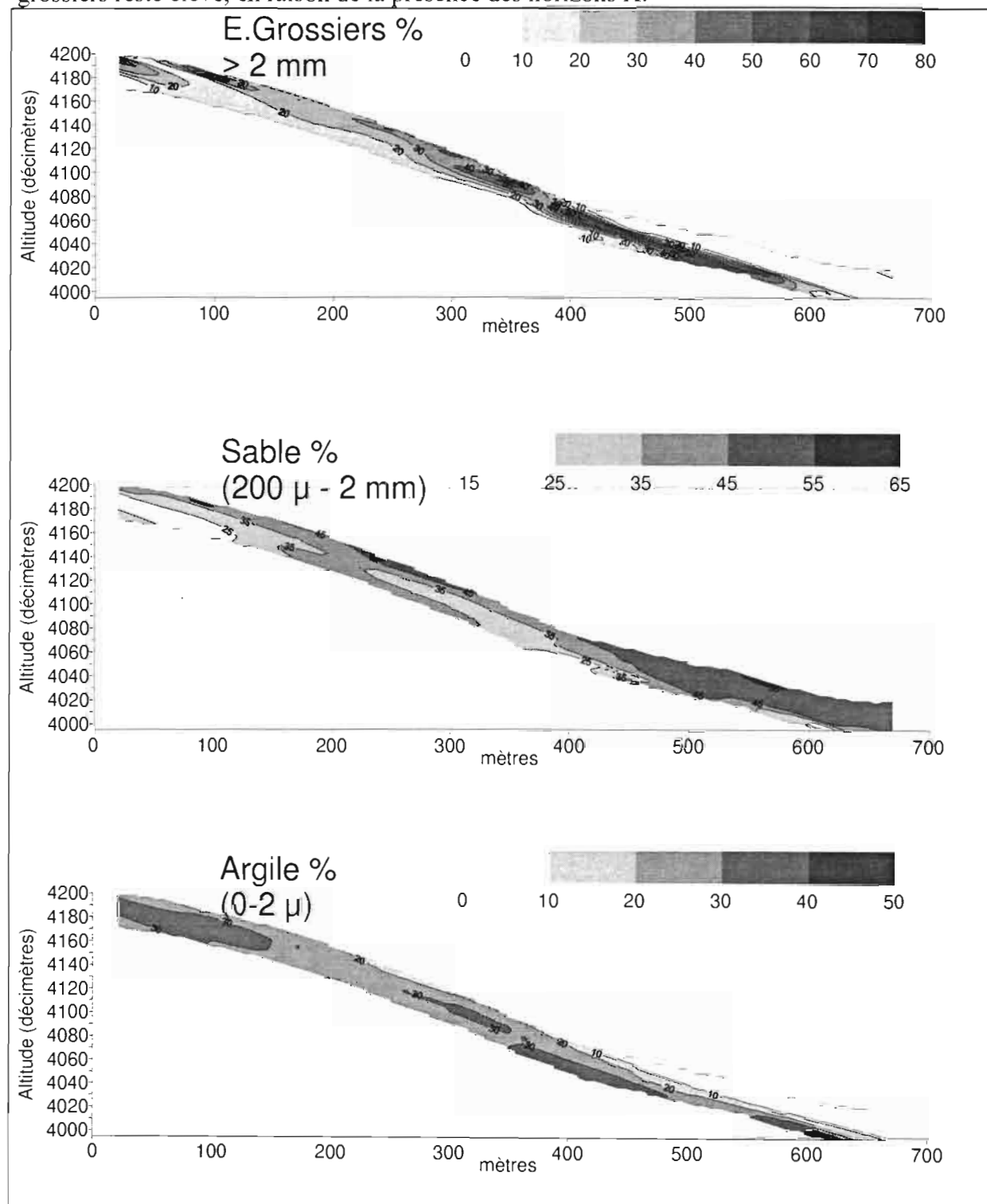


Figure IV-12. Granulométrie. Transect B.

4.3.3. La séquence de porosité

Comme pour les variables précédentes, la porosité⁴ présente une variation importante à mi-versant, au passage entre le domaine ferrallitique et le domaine ferrugineux (cf. figure IV-13). 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 Sg' 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.

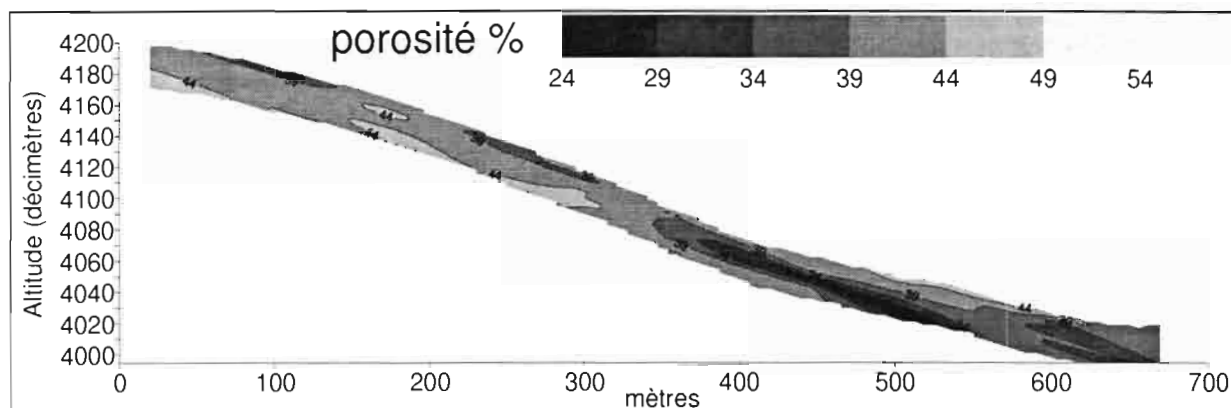


Figure IV-13. Porosité. Transect B

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 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] :

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

⁴ 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.

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-14.

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.

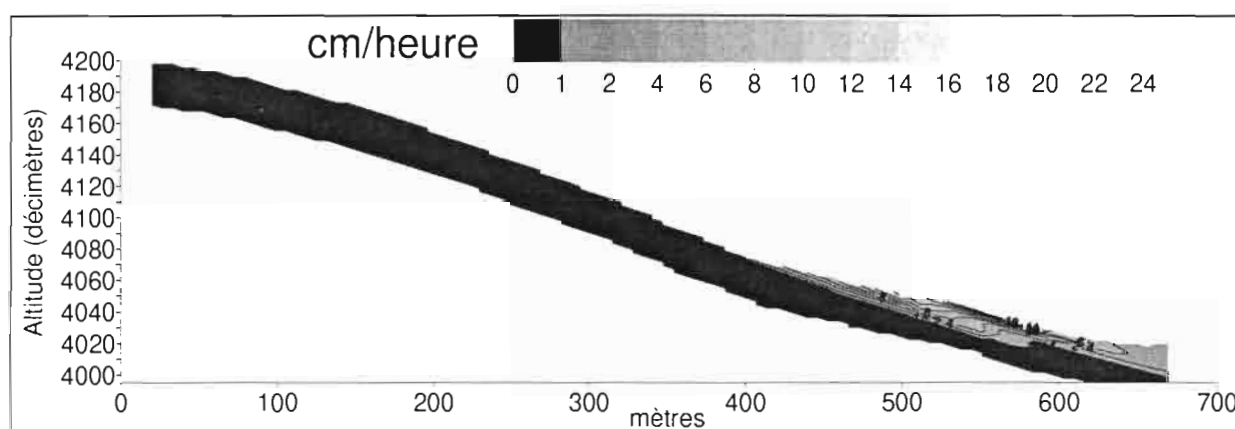


Figure IV-14. Estimation de la perméabilité par la formule de SAXTON (1986).

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 qui ont fourni des résultats complémentaires :

La première approche, s'est basée sur le découpage conceptuel de la couverture pédologique en 20 horizons. Ce découpage a été effectué en regroupant des volumes élémentaires de résolution (v.e.r.) selon une méthode classique qui reste améliorable, mais qui s'est avérée comparable à une mesure de distances mathématiques à des références préétablies.

L'analyse des caractéristiques et de la distribution dans l'espace de ces 20 horizons a confirmé l'existence de trois domaines pédologiques (domaines ferrallitique, ferrugineux et hydromorphe), et a permis d'en préciser les caractéristiques.

Cette analyse a permis, par ailleurs, d'aboutir à une interprétation génétique dans laquelle la différenciation de la pédoséquence serait liée à plusieurs facteurs :

- 1°) *trois phases d'érosion successives à partir d'un haut glacis quaternaire à surface cuirassée.* La phase d'érosion la plus ancienne, prévue par le modèle général présenté au chapitre 1, se traduit par une forte rupture de pente au sein du domaine ferrallitique, et aurait donné naissance au moyen glacis quaternaire à partir du haut-glacis quaternaire. La deuxième phase d'érosion, qui n'est pas explicitement reconnue par le modèle général, serait à l'origine

d'un glacis d'érosion s'étendant sur tout le domaine ferrugineux. Cette phase se traduit par une rupture de pente atténuée à la surface du sol, mais aussi par une forte rupture de pente du toit des horizons issus de l'altération de la roche. Enfin, la phase d'érosion la plus récente est également prévue par le modèle général. Elle se traduit par une rupture de pente à la surface du sol, et aurait conduit à la formation du bas glacis quaternaire dans le domaine hydromorphe.

-2°) *le comblement partiel de la partie inférieure du versant.* Dans les domaines ferrugineux et hydromorphe, la mise en place des horizons supérieurs (horizons A, E, X) serait due au comblement partiel des glacis d'érosion par un recouvrement colluvio-alluvial.

-3°) *la différenciation d'horizons due à des transformations au sein des matériaux pédologiques* (déferrisation, désargilification, disparition sélective de l'hématite). Parmi ces transformations, certaines se seraient produites sous l'action d'une nappe (formation de l'arène, des horizons Sg', Ea et G) ou de circulations préférentielles d'eau (formation des horizons II SCs, III SCs et B).

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 montré 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, ...).

Ces deux approches ont fourni des indices qui permettent de formuler certaines hypothèses concernant les nappes phréatiques :

- d'une part, une nappe de profondeur serait (ou aurait été) présente dans l'arène, et dans tous les domaines pédologiques ;

- d'autre part, les différents domaines pédologiques se distingueraient comme suit :

- dans le domaine ferrallitique, les traits pédologiques associés à la macroporosité de certains horizons suggèrent l'existence de circulations préférentielles d'eau depuis la subsurface jusqu'à plusieurs mètres en profondeur. Mais il n'y aurait pas (et pas eu) d'autre nappe que la nappe d'arène.

- dans le domaine ferrugineux, plusieurs indices (forte contraste entre les couches supérieures du sol perméables et les couches sous-jacentes peu perméables, hydromorphie de l'horizon S g', ..) suggèrent l'existence (actuelle ou passée) d'une nappe phréatique perchée;

- enfin, dans le domaine hydromorphe, différents indices (désargilification et déferrisation des horizons E albique; réduction des horizons G...) suggèrent l'existence d'une nappe phréatique dès la subsurface.

En définitive, ces hypothèses conduisent à un schéma hydrologique à deux nappes superposées, qui est proche du schéma de type C présenté au § 1.2.4.

Il reste à vérifier ces hypothèses par une approche plus directe des conditions hydriques sur le versant. Ceci nous conduit au chapitre suivant, consacré à l'étude de l'hydroséquence.

CHAPITRE 5. L'HYDROSEQUENCE

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

Il s'agit ici de préciser un schéma hydrologique qui reste mal connu, d'après la bibliographie présentée au chapitre 1. Il s'agit également de vérifier, par une approche directe, certaines hypothèses¹ formulées au chapitre précédent à partir des indices pédologiques.

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 de 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.

¹ Il s'agit évidemment des hypothèses sur les conditions hydrologiques actuelles, puisqu'on ne peut vérifier directement les conditions hydrologiques passées.

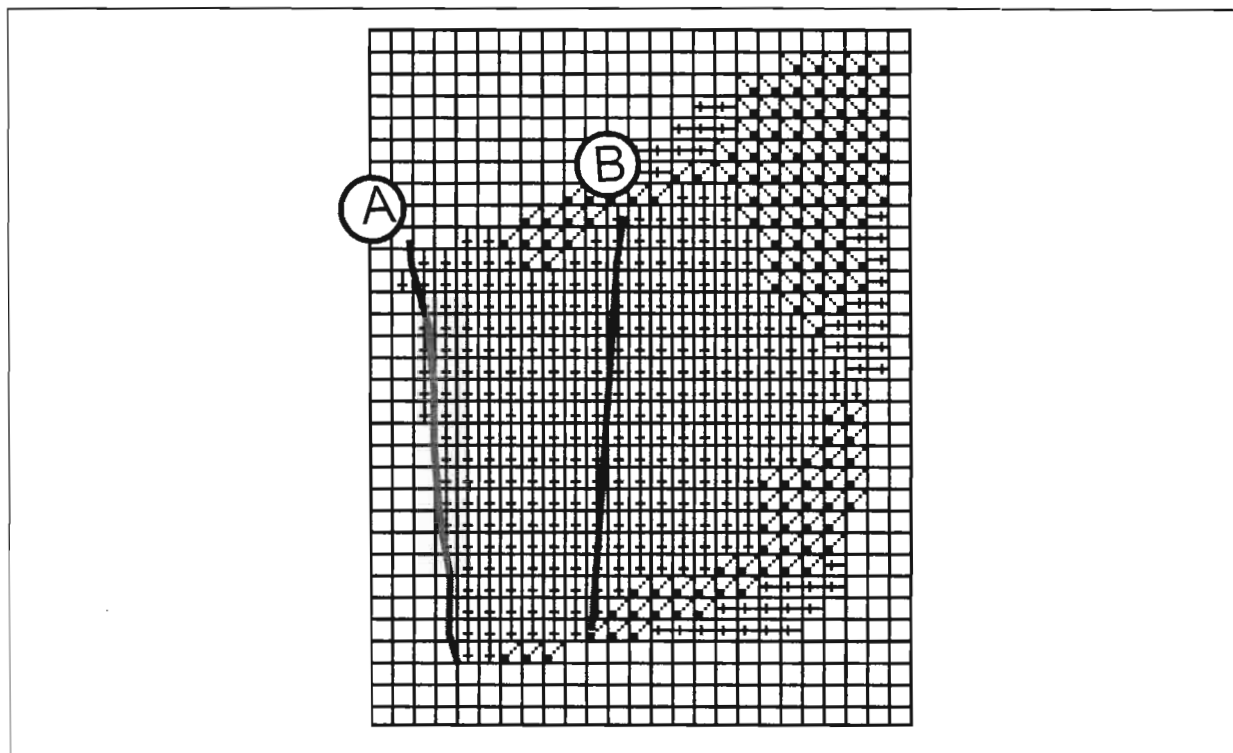


Figure V-1. Orientation des écoulements de surface et localisation des transects.

L'indice I_b de BEVEN (BEVEN et al. 1979) est un estimateur topographique de la saturation potentielle en eau des sols. Cet indice est proportionnel à la surface drainée par une maille du modèle numérique de terrain (α), et inversement proportionnel à la pente locale de cette maille ($\tan(\beta)$) : $I_b = \text{Log}(\alpha/\tan(\beta))$. En pratique, la surface drainée par une maille donnée peut être calculée 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 (DEPRAETERE, 1992). Quant à la pente locale d'une maille, elle peut être déterminée par le plan de régression qui relie les quatre points altimétriques formant cette maille.

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, présenté en figure V-2, montre que cet indice augmente généralement des lignes de crêtes vers les axes de drainage. On remarque toutefois que celui-ci reste relativement élevé dans la partie amont du transect A, ce qui confirme que cette partie peut être alimentée par des écoulements latéraux de surface. En revanche, cet indice augmente régulièrement sur le transect B.

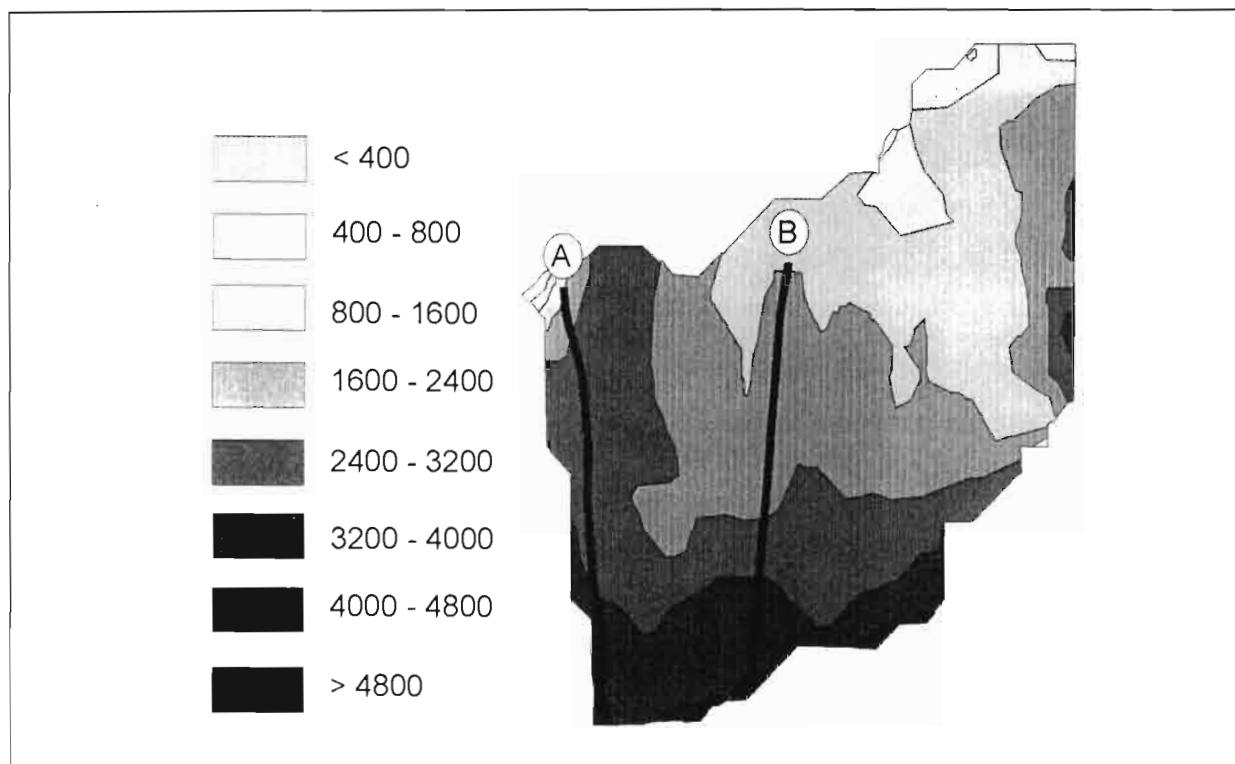


Figure V-2. Indice topographique de Beven et localisation des transects.

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.

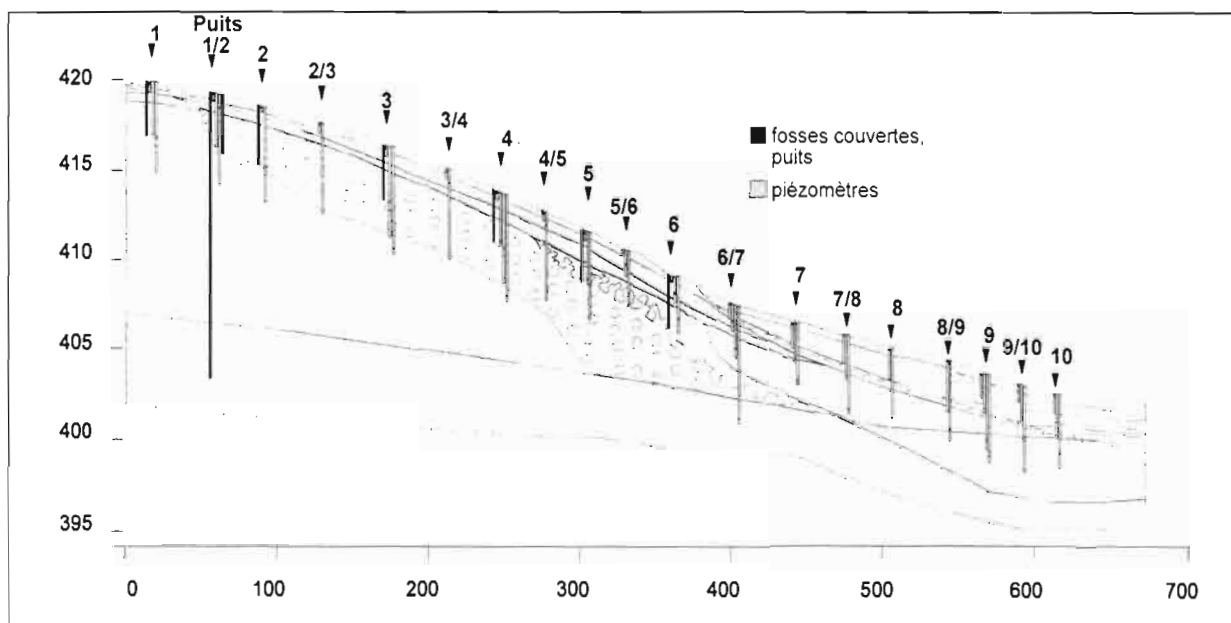


Figure V-3. Dispositif implanté sur le transect B.

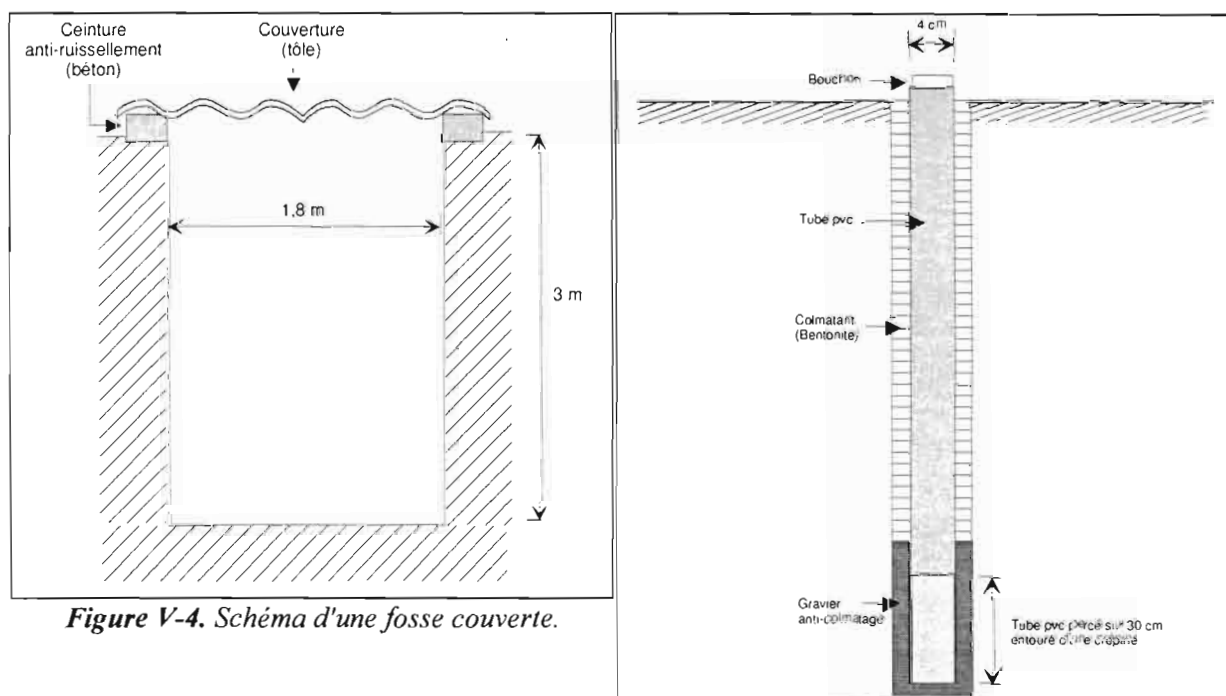


Figure V-4. Schéma d'une fosse couverte.

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 ²

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 qui localise ce toit par rapport à la position sur le transect et le temps (cf. figure V-7). On observe aussi, sur ce bloc-diagramme, 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 : en effet, 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.

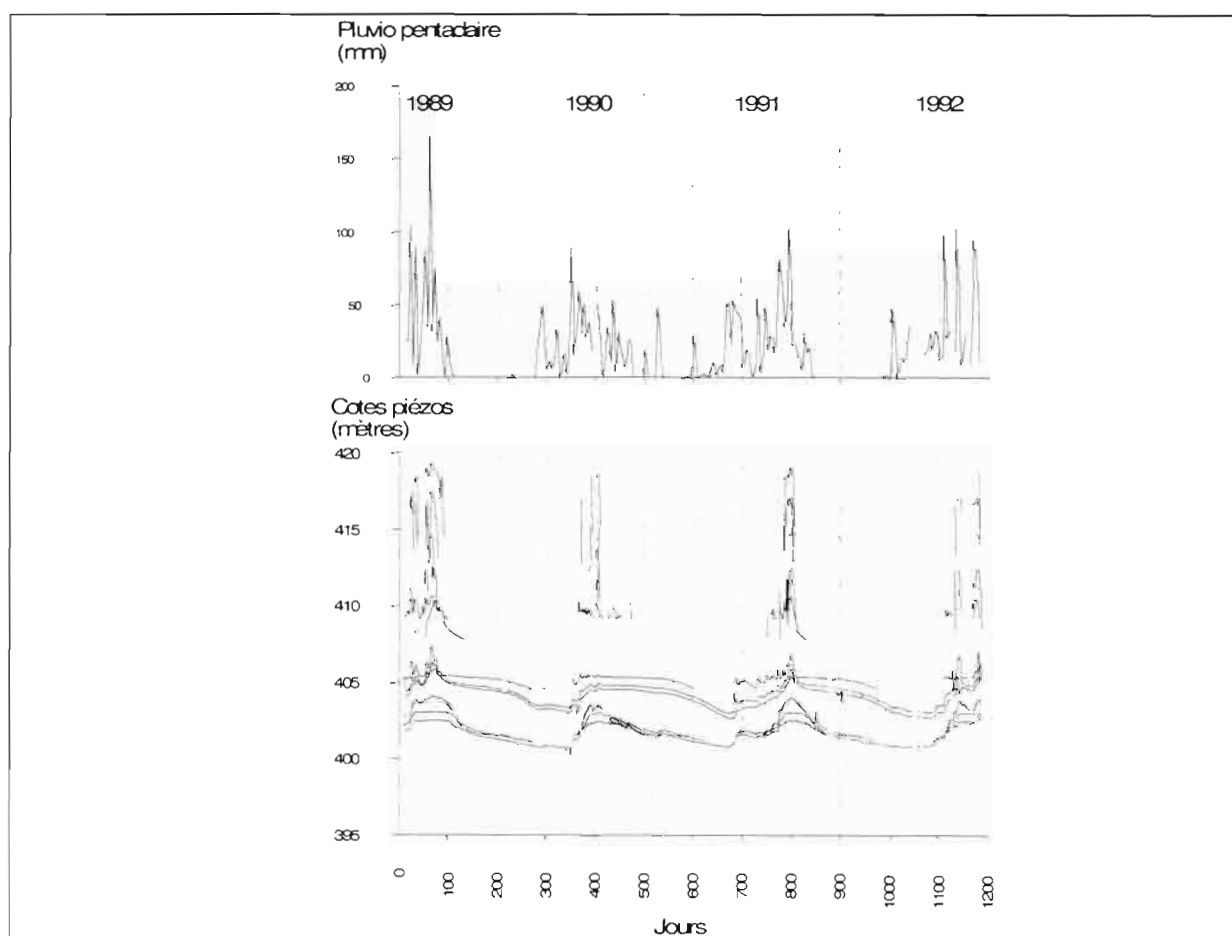


Figure V-6. Relevés piézométriques le long du transect et pluviosité. Période 1989-1992

² Dans cet examen, nous ne tenons pas compte des piézomètres implantés en profondeur sur certaines stations.

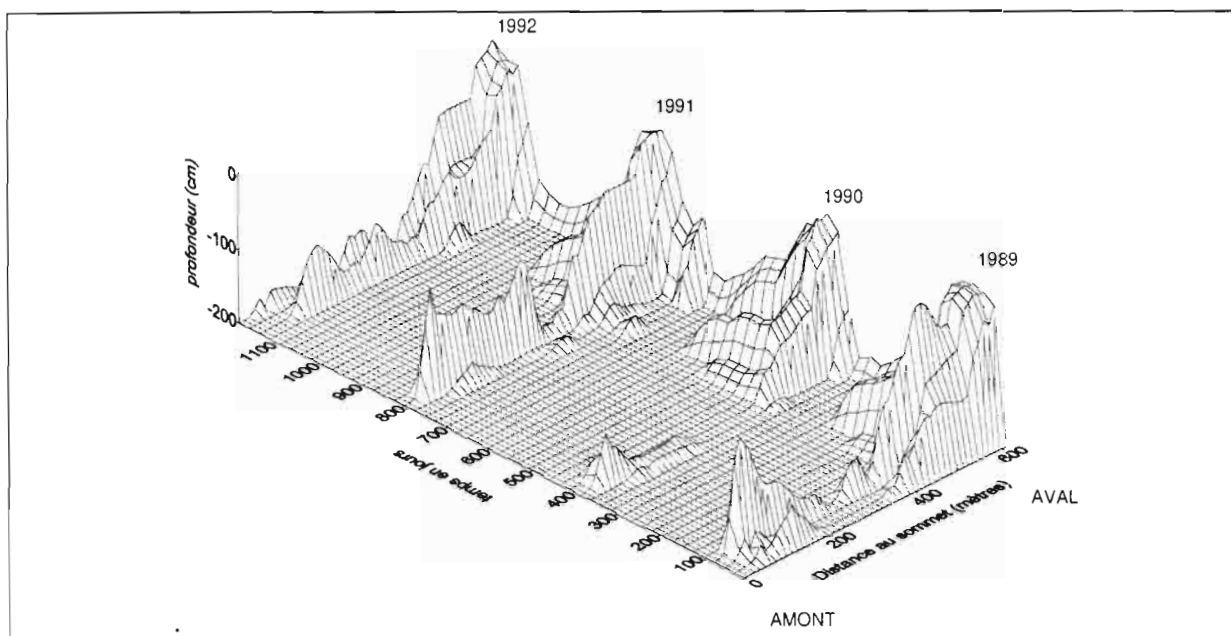


Figure V-7. Variations du toit piézométrique par rapport à la position sur le transect et le temps. Période 1989-1992

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, et 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). 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.

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.

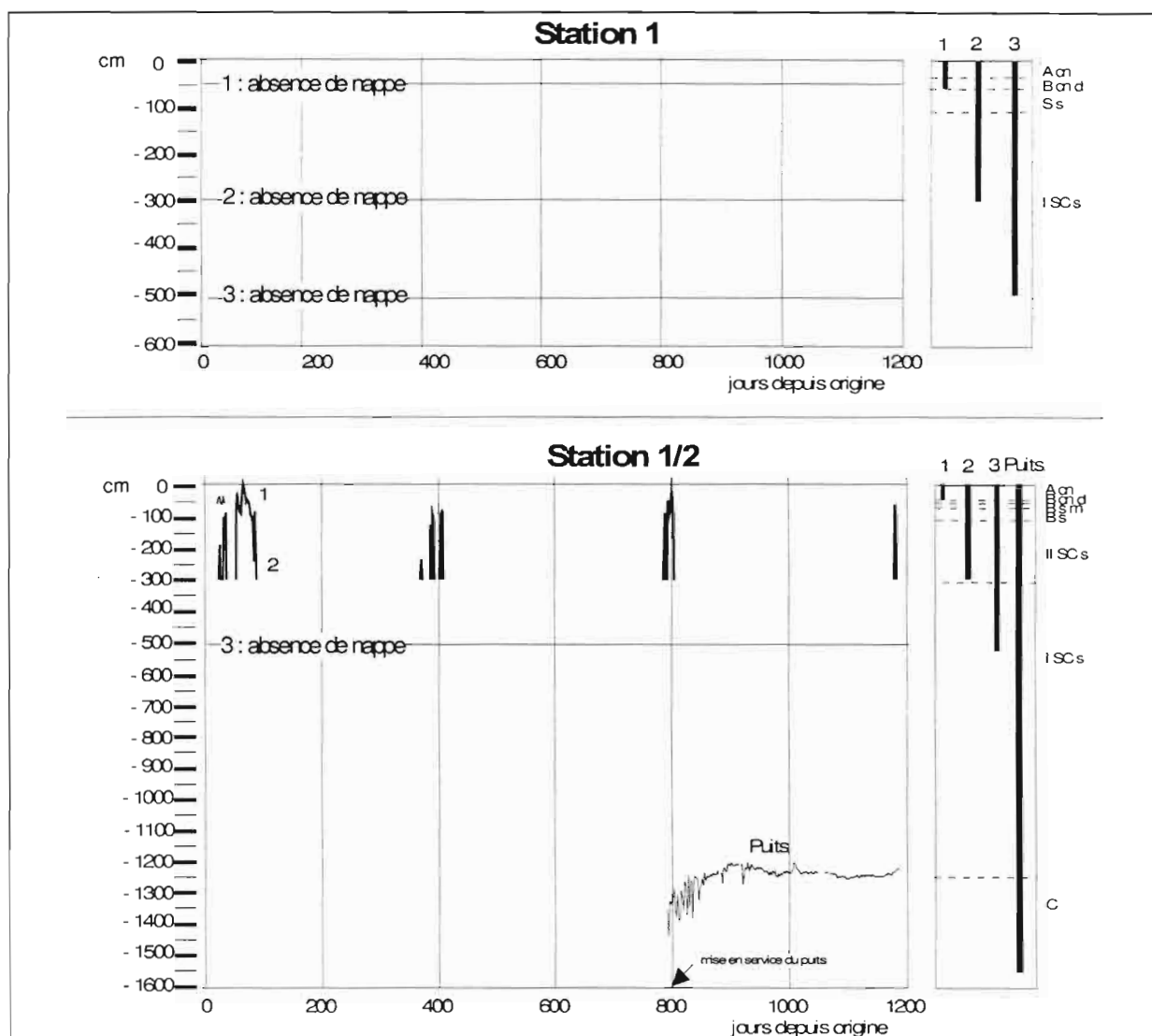


Figure V-8. Relevés piézométriques de deux stations du domaine amont ferrallitique

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 en 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.

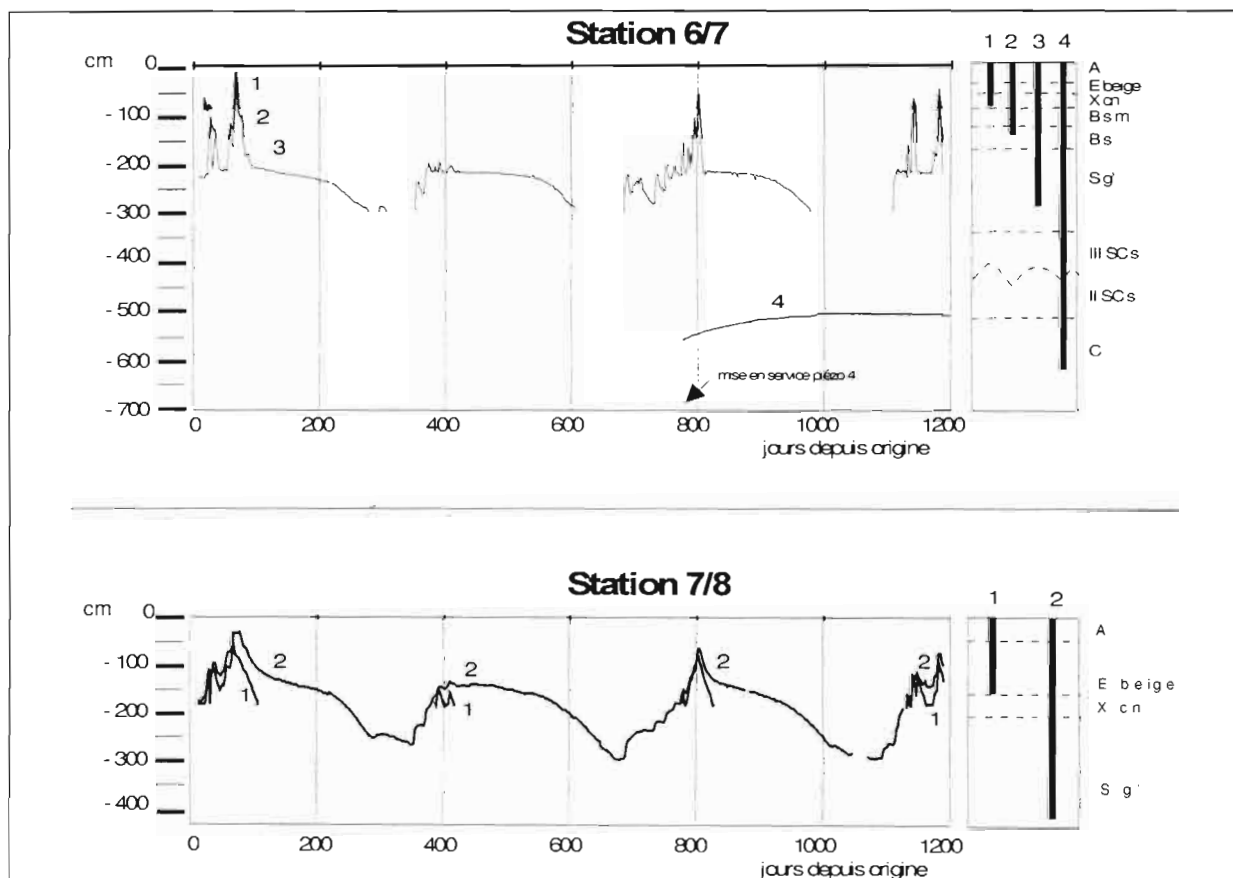
5.2.2.B.2. Station 7/8

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.



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 albiq) 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 :

- une première nappe est traversée par les piézomètres implantés dans les horizons supérieurs sableux (cf. réponses des piézomètres 1 et 2), 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.

- une seconde nappe est rencontrée par les deux piézomètres de profondeur implantés dans l'horizon argileux verdâtre G (cf. réponses des piézomètres 3 et 4). Il ne s'agit pas d'un artefact, car la cote du piézomètre 4 rejoint assez rapidement la cote du piézomètre 3 après sa mise en service. On note tout d'abord que les fluctuations de cette nappe sont décalées dans le temps par rapport à la nappe de surface. De plus, on constate qu'en phase de recharge, le toit libre de cette nappe se situe au dessus du toit de la nappe de surface, ce qui indique qu'elle est en surpression par rapport à la nappe de surface. Ce type de surpression a déjà été observé précédemment dans des horizons argileux de profondeur à faible conductivité hydraulique : selon CHEVALLIER et al. (1990), il pourrait s'agir d'un phénomène d'artésianisme; pour ZIMMER (1990), il résulterait de la compression du matériau pédologique, dont la cohésion serait insuffisante à l'état humide pour supporter le poids des matériaux sus-jacents. Notons enfin que compte tenu de sa position, la nappe de profondeur semble correspondre à la partie supérieure de la nappe d'arène.

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, en effet, 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 dans l'horizon argileux verdâtre G (cf. piézomètre 3), qui peut être en surpression par rapport à la nappe perchée.

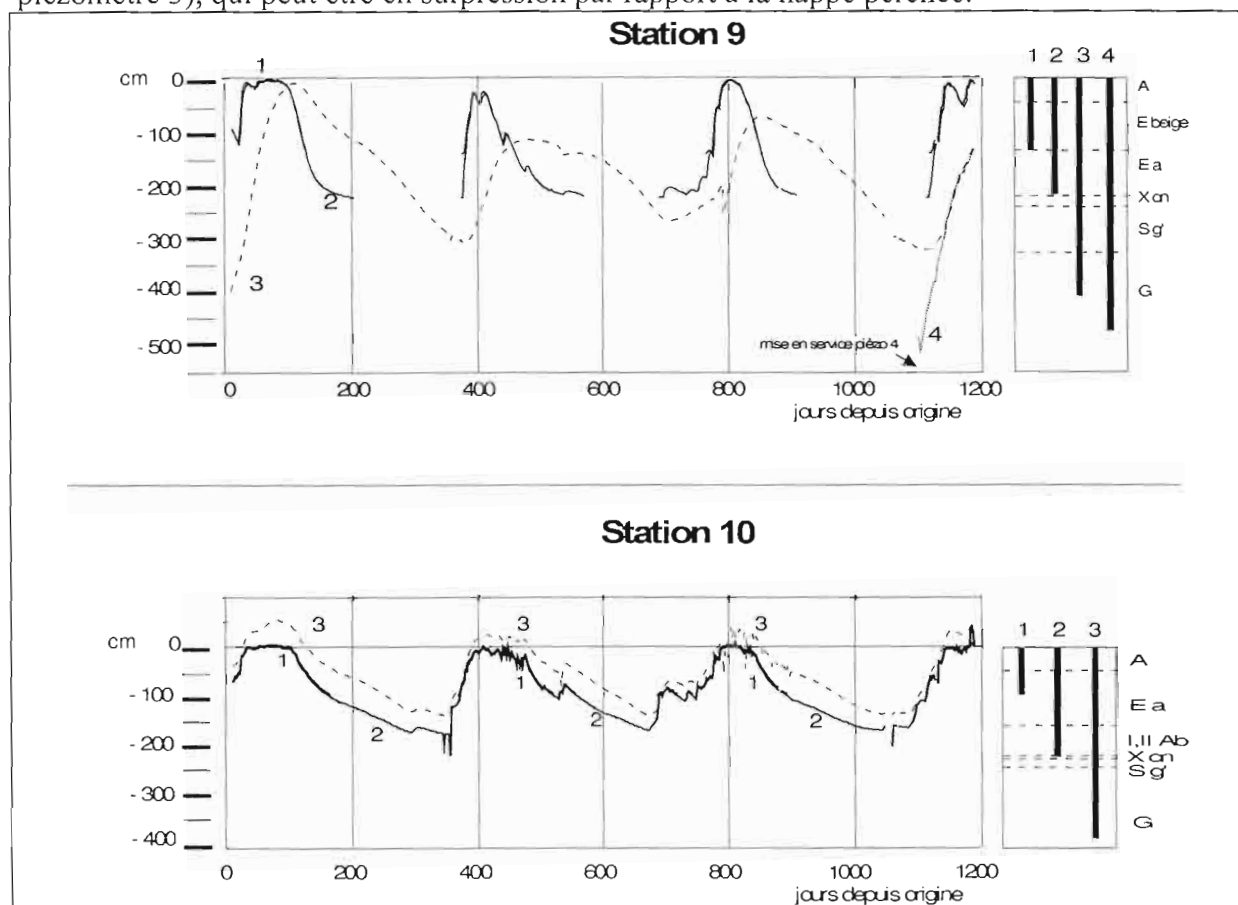


Figure V-10. Relevés piézométriques de deux stations du domaine aval hydromorphe

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

xi , zi = 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.

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.

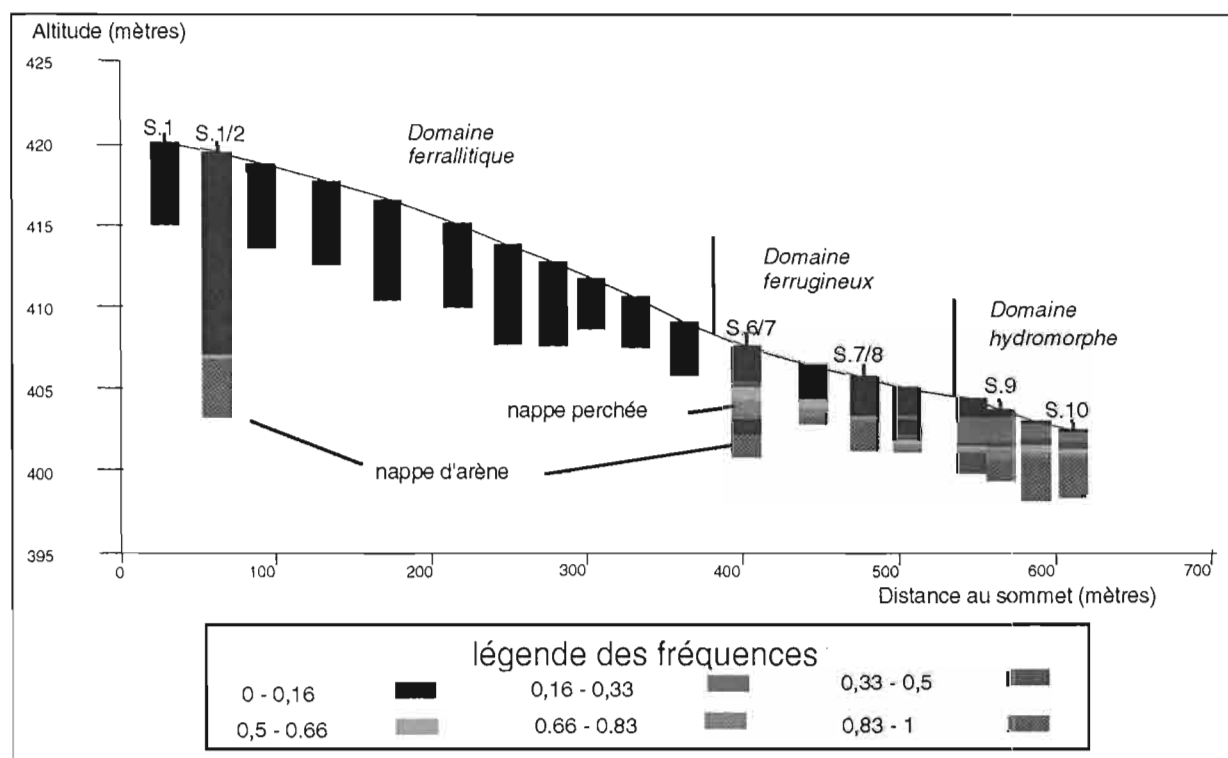


Figure V-11. Séquence des fréquences annuelles d'engorgement (calcul sur la période du 30/09/1991 au 30/09/1992).

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), ce qui pourrait correspondre à la nappe d'arène. Par ailleurs, une nappe temporaire (fréquence annuelle d'engorgement supérieure à 0,16) se manifeste ici jusqu'en surface.

En définitive, si l'on exclut la nappe d'arène qui semble présente sur l'ensemble du versant, 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.

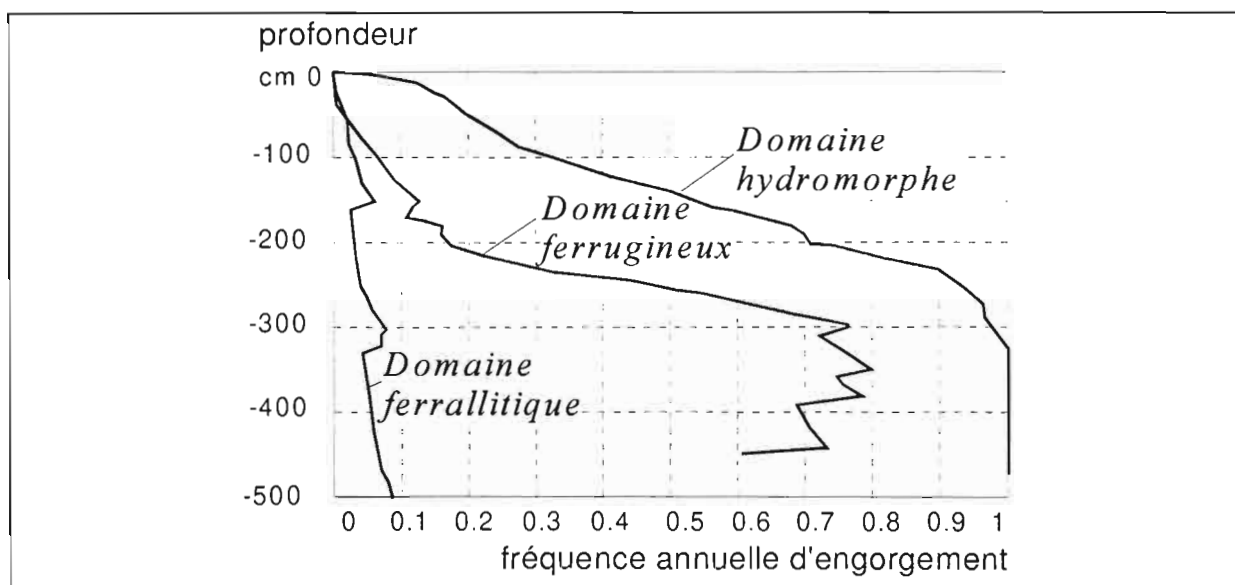


Figure V-12. Profils moyens de fréquences annuelles d'engorgement selon les domaines pédologiques. (Calculés sur la période du 30/09/1989 au 30/09/1992).

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.

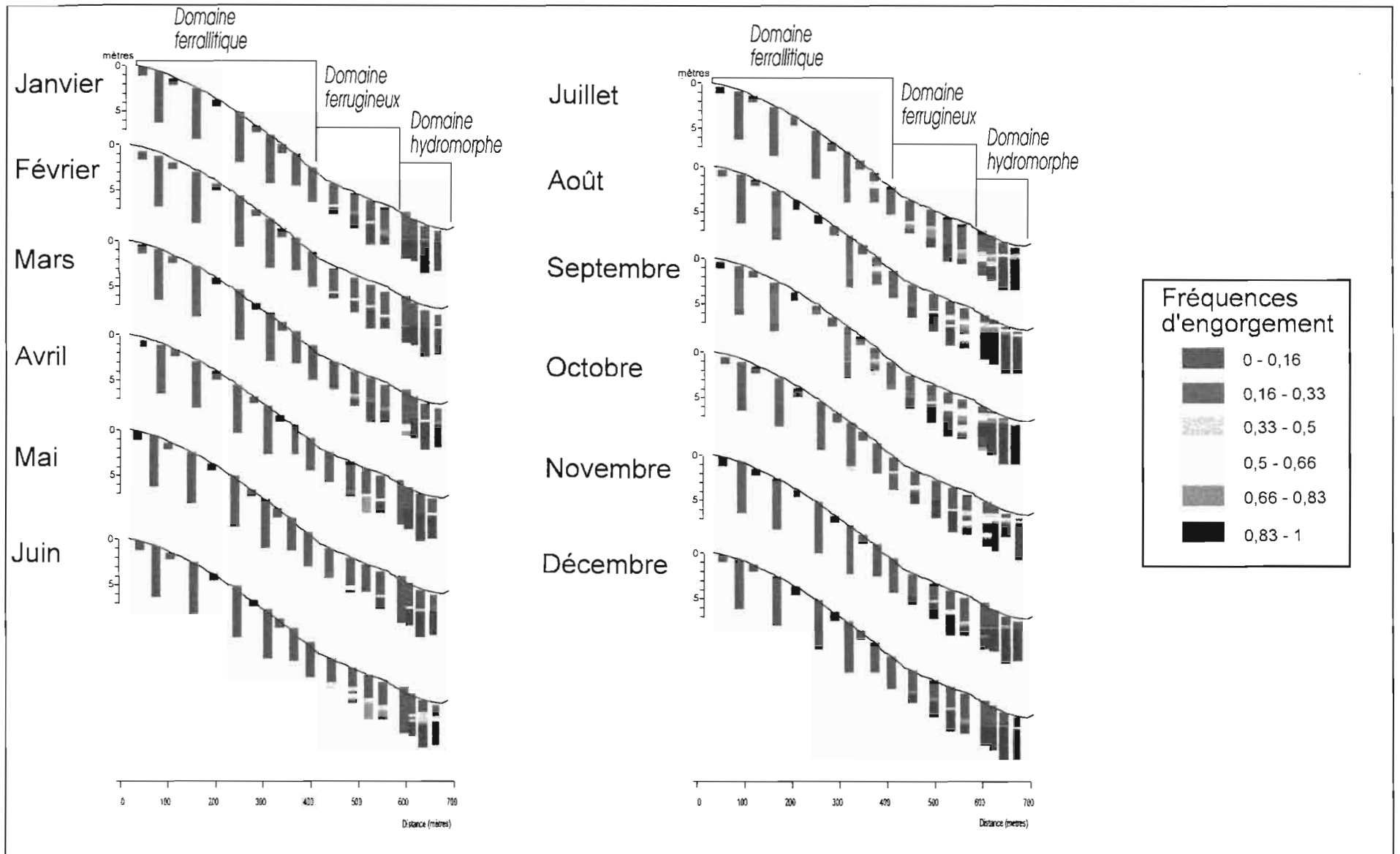


Figure V-13. Séquences des fréquences mensuelles d'engorgement (calcul sur la période du 30/09/1989 au 30/09/1992)

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 phréatiques superposées, dont les fluctuations cycliques dépendent des cycles pluviométriques saisonniers. Une de ces nappes n'est localisée qu'à l'aval du versant. Ainsi, et en résumé :

- dans le domaine ferrallitique, on trouve, en profondeur, une nappe d'arène permanente à faible battement. 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 au horizon indurés (horizons B) et à l'horizon altéritique tacheté (horizon II SC s). Cette pseudo-nappe correspond 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 dans les horizons E, X et S g' (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 l'horizon argileux verdâtre G, une nappe permanente qui peut être en surpression, et qui correspondrait à la nappe d'arène. Dans les horizons supérieurs A et E, on retrouve la nappe perchée semi-permanente observée dans le domaine ferrugineux.

Cette analyse montre, tout d'abord, que cette hydroséquence correspond à un schéma hydrologique qui a pu être observé sur d'autres versants (WOROU, 1988; FRITSCH, 1993). Il s'agit plus précisément du schéma hydrologique de type C présenté au chapitre 1 (cf. § 1.2.4.).

De plus, cette analyse confirme les hypothèses hydrologiques formulées à la fin du chapitre précédent, à partir d'indices pédologiques. Ces indices pédologiques traduisent donc effectivement les conditions hydriques actuelles, ce qui signifie qu'il existe des relations entre pédoséquence et hydroséquence, et que la pédoséquence est "hydrologiquement fonctionnelle".

Il reste toutefois à quantifier les relations entre pédoséquence et hydroséquence, ce qui nous amène au chapitre suivant.

CHAPITRE 6. RELATIONS ENTRE PEDOSEQUENCE ET HYDROSEQUENCE

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 une assez forte variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques du sol, ainsi que 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**.

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.

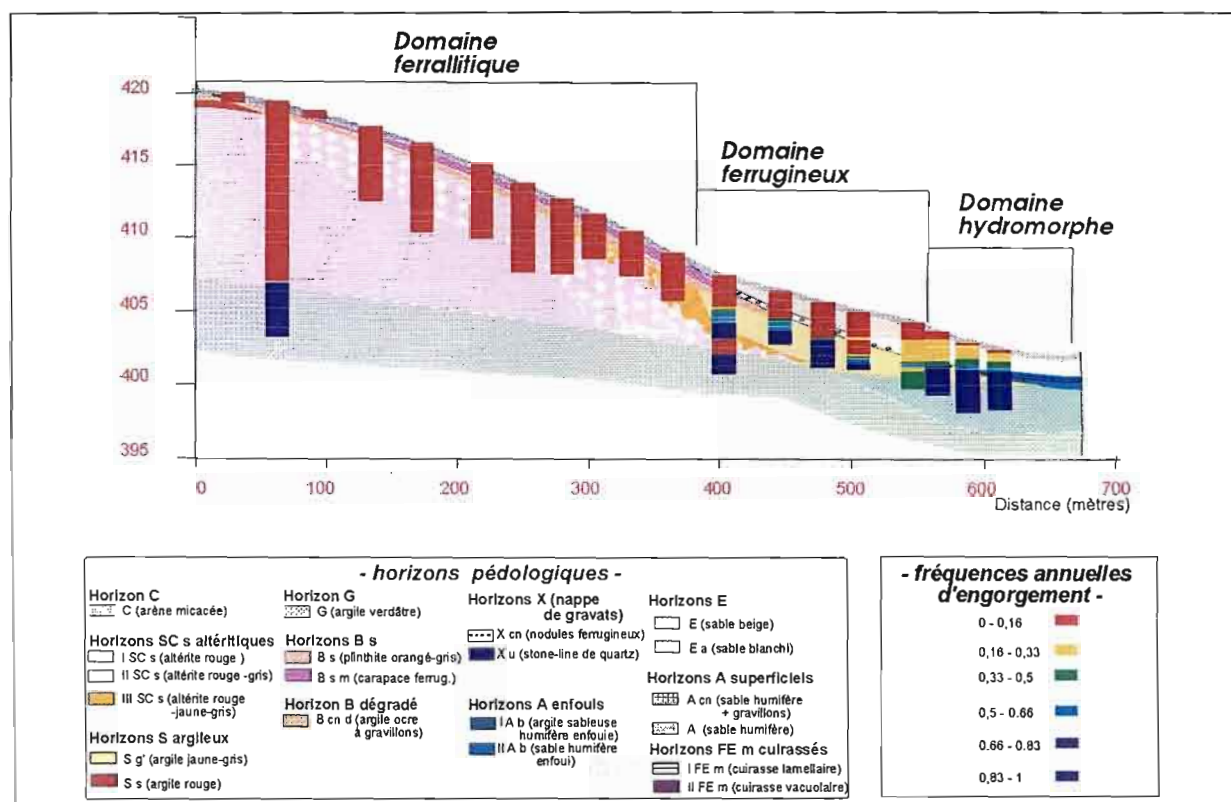


Figure VI-1. Superposition graphique de la pédoséquence et de la séquence de fréquences annuelles d'engorgement calculée sur la période du 30/09/1991 au 30/09/1992.

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	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
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
variance	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 regroupements d'horizons qui présentent une signification pédologique. En effet, :

- l'ensemble A regroupe les horizons de surface du domaine ferrallitique (horizons A et B cn d);
- l'ensemble B est constitué des horizons indurés du domaine ferrallitique (horizons B s et B s m);
- 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 (ensemble E) et l'horizon S g' argileux jaunegrise (ensemble F) se distinguent de tous les autres horizons par des fréquences moyennes annuelles d'engorgement spécifiques.

En écartant simplement les horizons A et E de l'ensemble C et les horizons Ab de l'ensemble G, on obtient les groupes d'horizons présentés au tableau VI-4, qui présentent tous une signification pédologique.

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 à signification pédologique 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.

	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 alors effectué un second test de comparaison de moyennes, qui a montré que ces fréquences moyennes sont significativement différentes entre elles au seuil de probabilité de 95 %. **On peut donc dire qu'il existe une correspondance statistiquement significative entre chacun de ces groupes d'horizons pédologiques et une valeur spécifique 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.

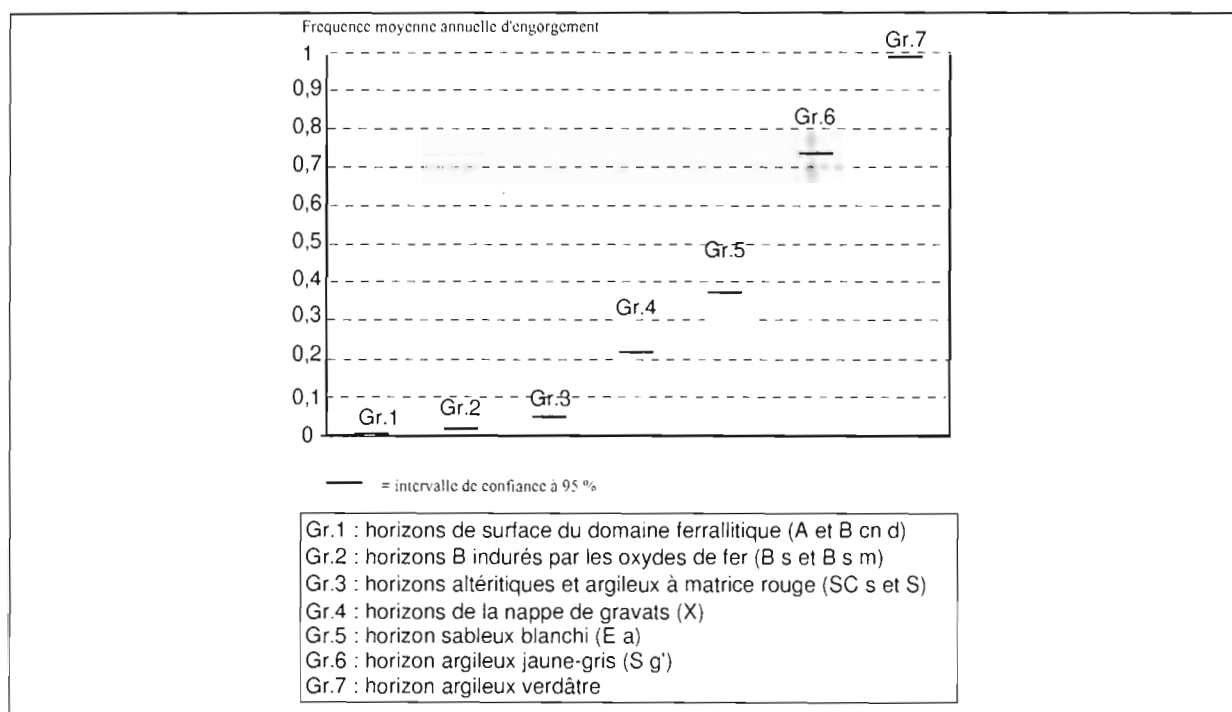


Figure VI-2. Correspondance entre groupes d'horizons pédologiques et fréquences moyennes annuelles d'engorgement.

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.

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

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.

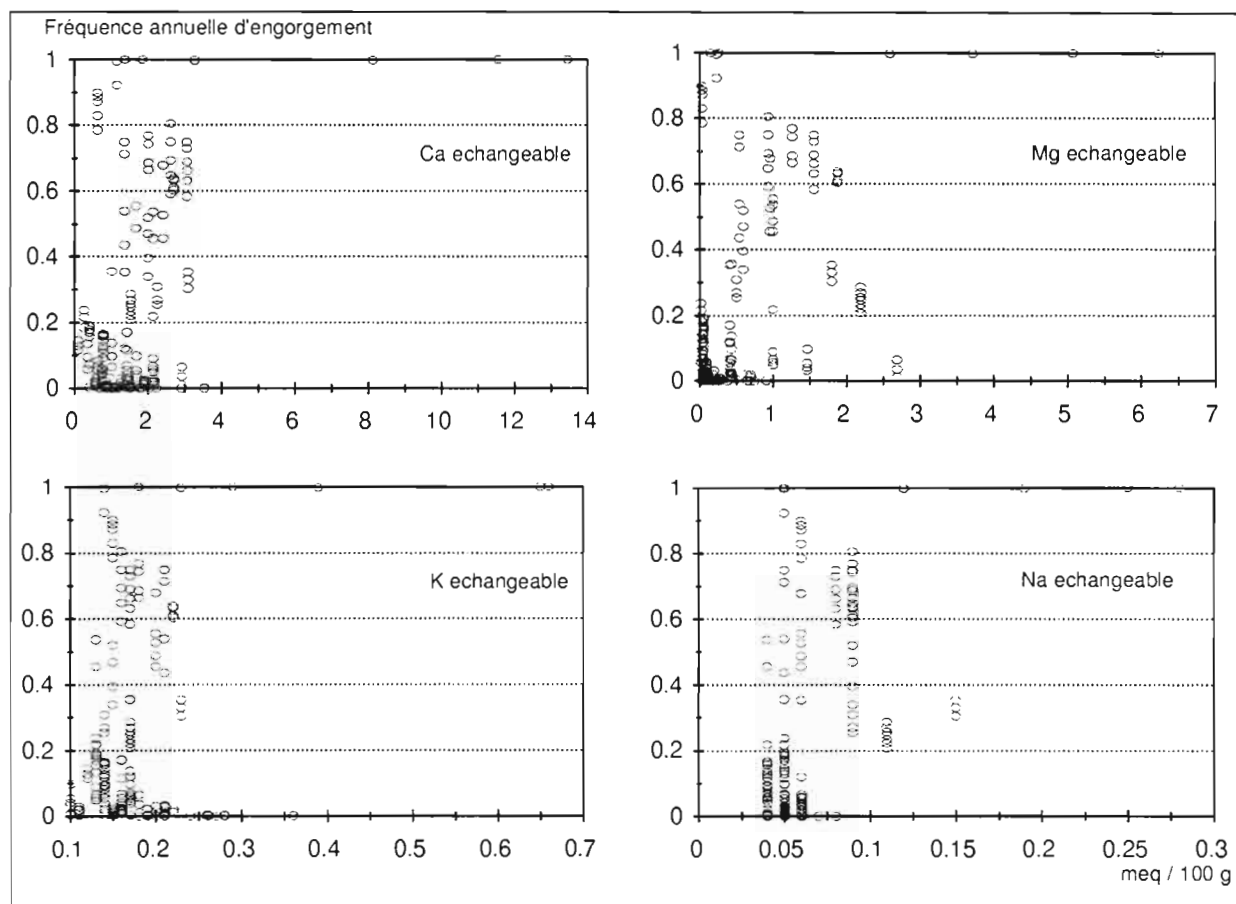


Figure VI-3. Diagrammes de dispersion des bases échangeables en fonction de la fréquence annuelle d'engorgement .

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 (cf § 4.3.1) :

- les trois composantes dissociées 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 $\frac{(10-H) \times C}{V}$ qui combine les trois composantes de la couleur Munsell (et

qui est généralement corrélé à la teneur en hématite, pouvant elle même dépendre de la durée de saturation du matériau);

- 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 $y = \frac{a}{1 + (b \times e^{-cx})}$.

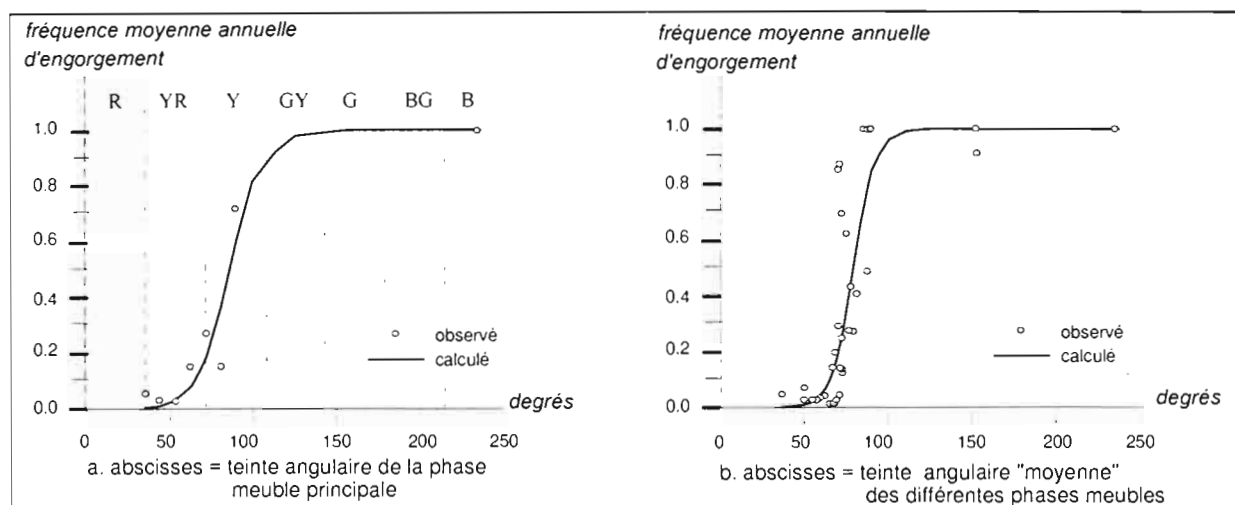


Figure VI-4. Relations entre teintes (phase principale, teinte "moyenne") et fréquence moyenne annuelle d'engorgement.

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 :

$$\text{Fré quencemoyenne annuelle d'engorgement} = \frac{1}{1 + \left(8872 \times e^{-0.10 \times \text{teinte phase principale}} \right)}$$

($R^2 = 0.95$ pour 13 observations - significatif à 99 %)

$$\text{Fré quencemoyenne annuelle d'engorgement} = \frac{1}{1 + \left(180538 \times e^{-0.15 \times \text{teinte "moyenne"}} \right)}$$

($R^2 = 0.82$ 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.

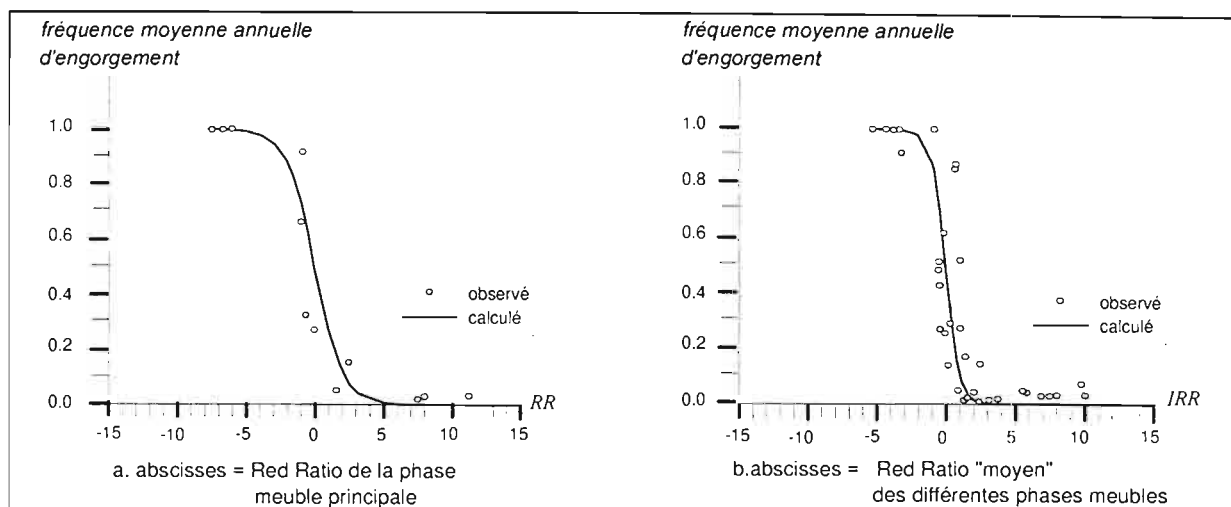


Figure VI-5. Relations entre Red ratios (phase principale, Red ratio "moyen") et fréquence moyenne annuelle d'engorgement.

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.

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. Or, comparativement au suivi de la dynamique de la nappe durant de longues périodes, l'acquisition de ces variables pédologiques reste relativement aisée, de sorte qu'elles s'avèrent particulièrement intéressantes, en tant qu'indicateurs des conditions hydrologiques.

L'emploi de tels indicateurs doit être possible, a priori, sur tous les versants du paysage de référence, dès lors qu'ils présentent les caractéristiques du versant-type défini au chapitre 1. Mais il reste à savoir, par d'autres études hydropédologiques, si ce principe peut s'étendre à d'autres paysages. Dans ce cadre, il faudrait notamment déterminer si la pédoséquence de ces paysages est, comme celle du versant étudié, "hydrologiquement fonctionnelle", c'est à dire si certaines caractéristiques du sol traduisent effectivement les conditions hydriques actuelles.

Par ailleurs, 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 des conditions hydrologiques sur ce versant et sur les autres versants du paysage de référence. Il serait toutefois intéressant d'examiner les relations obtenues entre les fréquences annuelles d'engorgement et d'autres variables physico-chimiques (la teneur en fer ferreux, notamment).

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

L'étude de l'hydropédoséquence d'un versant représentatif d'un paysage sur socle granito-gneissique à système de sol ferrallitique-ferrugineux et climat tropical à saison sèche conduit aux quatre conclusions suivantes :

1°) le modèle pédologique du paysage peut être précisé :

l'étude des horizons pédologiques et des caractères analytiques de la pédoséquence confirme, tout d'abord, l'existence de trois domaines pédologiques (ferrallitique, ferrugineux et hydromorphe), avec des variations physico-chimiques particulièrement importantes au passage entre le domaine ferrallitique et le domaine ferrugineux.

Cette étude nous permet, par ailleurs, d'aboutir à une interprétation génétique dans laquelle la différenciation de la pédoséquence serait liée à trois ensembles de causes :

- a) *d'une part, à trois phases d'érosion successives à partir d'un haut glacis quaternaire à surface cuirassée.* Cette interprétation admet l'existence d'une phase d'érosion supplémentaire par rapport au modèle présenté au chapitre I. Celle-ci serait à l'origine d'un glacis d'érosion qui s'étend sur tout le domaine ferrugineux, et qui serait d'âge intermédiaire entre le moyen glacis quaternaire et le bas glacis quaternaire;

- b) *d'autre part, à un comblement partiel du bas de versant.* Dans cette interprétation, le matériau des horizons supérieurs des domaines ferrugineux et hydromorphe (horizons A, E, et X) serait d'origine colluvio-alluviale;

- c) *enfin, à un ensemble de transformations au sein des matériaux pédologiques* (déferrisation, désargilification, disparition sélective de l'hématite, ...). Dans le cadre de cette interprétation, certains horizons pédologiques se seraient formés sous l'action d'une nappe (arène, horizons Sg', Ea et G) ou de circulations préférentielles d'eau (horizons II SCs , III SCs et B).

2°) un schéma hydrologique adapté à ce paysage serait le schéma de type C présenté au chapitre I :

Certains indices pédologiques (type d'horizons et traits pédologiques) suggèrent indirectement un schéma hydrologique à deux nappes superposées. L'étude de l'hydroséquence durant 3 cycles annuels confirme la réalité de ce schéma, en révélant l'existence d'une nappe d'arène permanente sur l'ensemble du versant, et celle d'une nappe perchée semi-permanente localisée dans les domaines ferrugineux et hydromorphe.

3°) la pédoséquence est "hydrologiquement fonctionnelle", puisque il y a adéquation entre les hypothèses sur les conditions hydrologiques formulées à partir des indices pédologiques, et l'observation directe de ces conditions.

4°) des relations quantitatives s'établissent entre la pédoséquence et l'hydroséquence :

il s'agit de relations statistiquement significatives entre les fréquences moyennes annuelles d'engorgement et les variables pédologiques suivantes :

- le type d'horizon;

- deux variables basées sur la couleur des matériaux : la teinte et le red ratio.

Il apparaît donc possible, pour les versants du paysage de référence, d'estimer rapidement la fréquence moyenne annuelle d'engorgement du matériau à partir de ces variables pédologiques.

TROISIEME PARTIE :

RELATIONS ENTRE L'HYDROPEDOSEQUENCE ET LE COMPORTEMENT D'UNE PLANTE CULTIVEE

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.

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'HYDROPÉDOSEQUENCE 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.

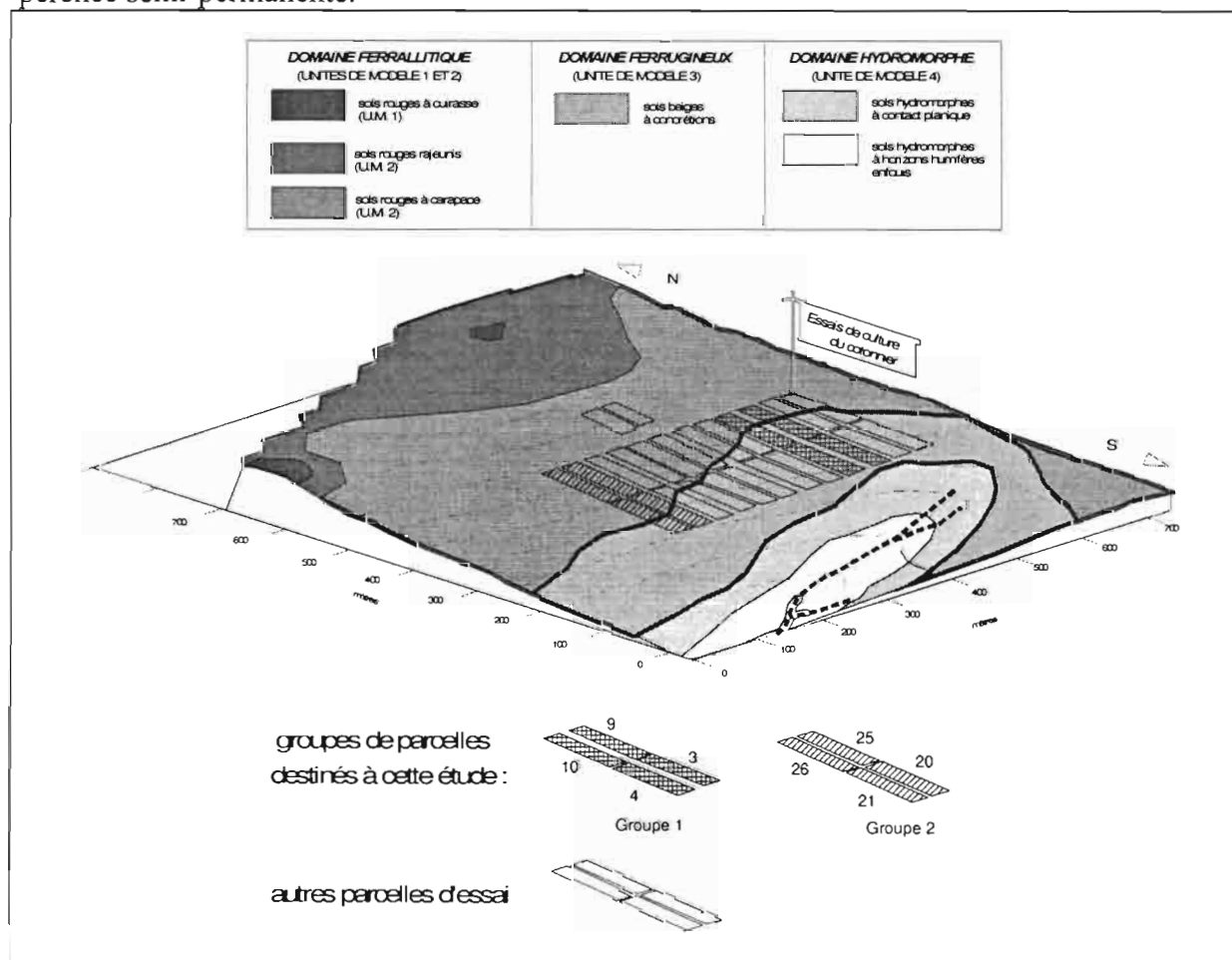


Figure VII-1. Localisation du périmètre de la station d'essai de culture cotonnière par rapport aux domaines pédologiques

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).

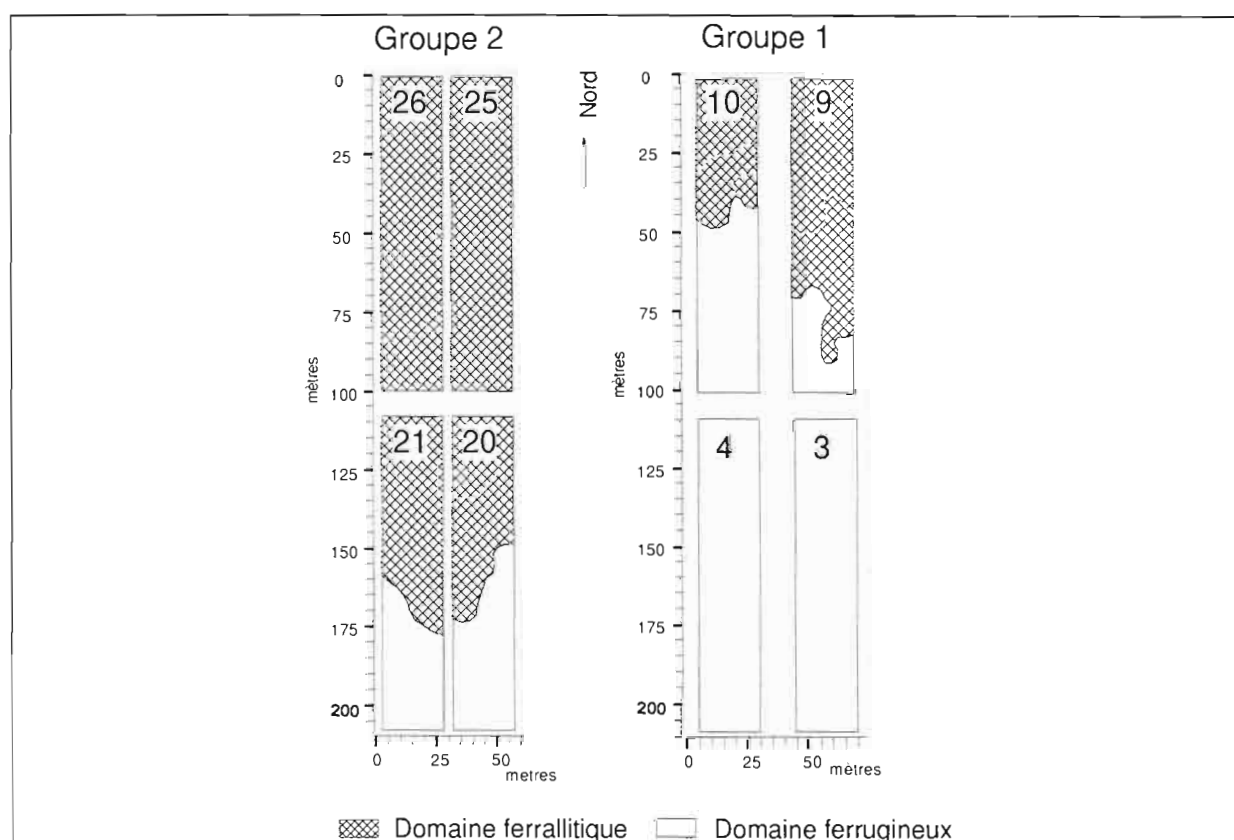


Figure VII-2. Délimitation des domaines pédologiques sur les deux groupes de parcelles

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 : Maïs-Nièbé
J : Jachère

Tableau VII-1. Antécédents culturels 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 culturels, 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	:	Pyréthroïde + 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.

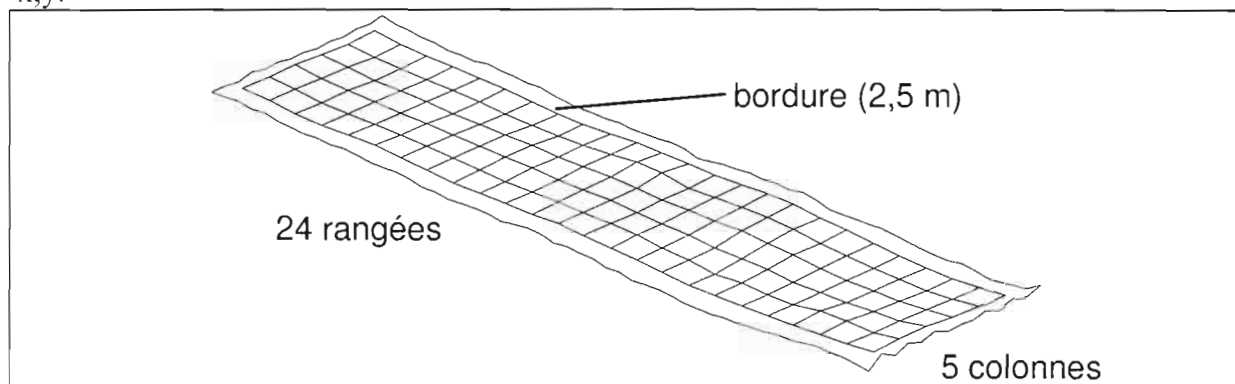


Figure VII-3. Subdivision d'une parcelle en 120 micro parcelles

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). A 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. Enfin, et grâce à cette délimitation, chaque micro parcelle a été rattachée à un deux domaines pédologiques (quelques micro parcelles étant situées à la limite entre ces deux domaines, elles ont été rattachées au domaine le plus représenté en superficie).

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 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, chaque site a été équipé d'un dispositif complémentaire¹ (tensiomètres, tubes d'accès pour humidimétrie neutronique et capteurs de solution de sol), qui était destiné à étudier les conditions de l'alimentation hydrique et minérale de la plante.

¹ Ce dispositif a été mis en place et suivi par l'équipe du laboratoire de pédologie du centre Orstom de Lomé, dans le cadre d'un programme conjoint Orstom-Cirad. Une partie des résultats obtenus a été publiée par AUDEBERT (1993)

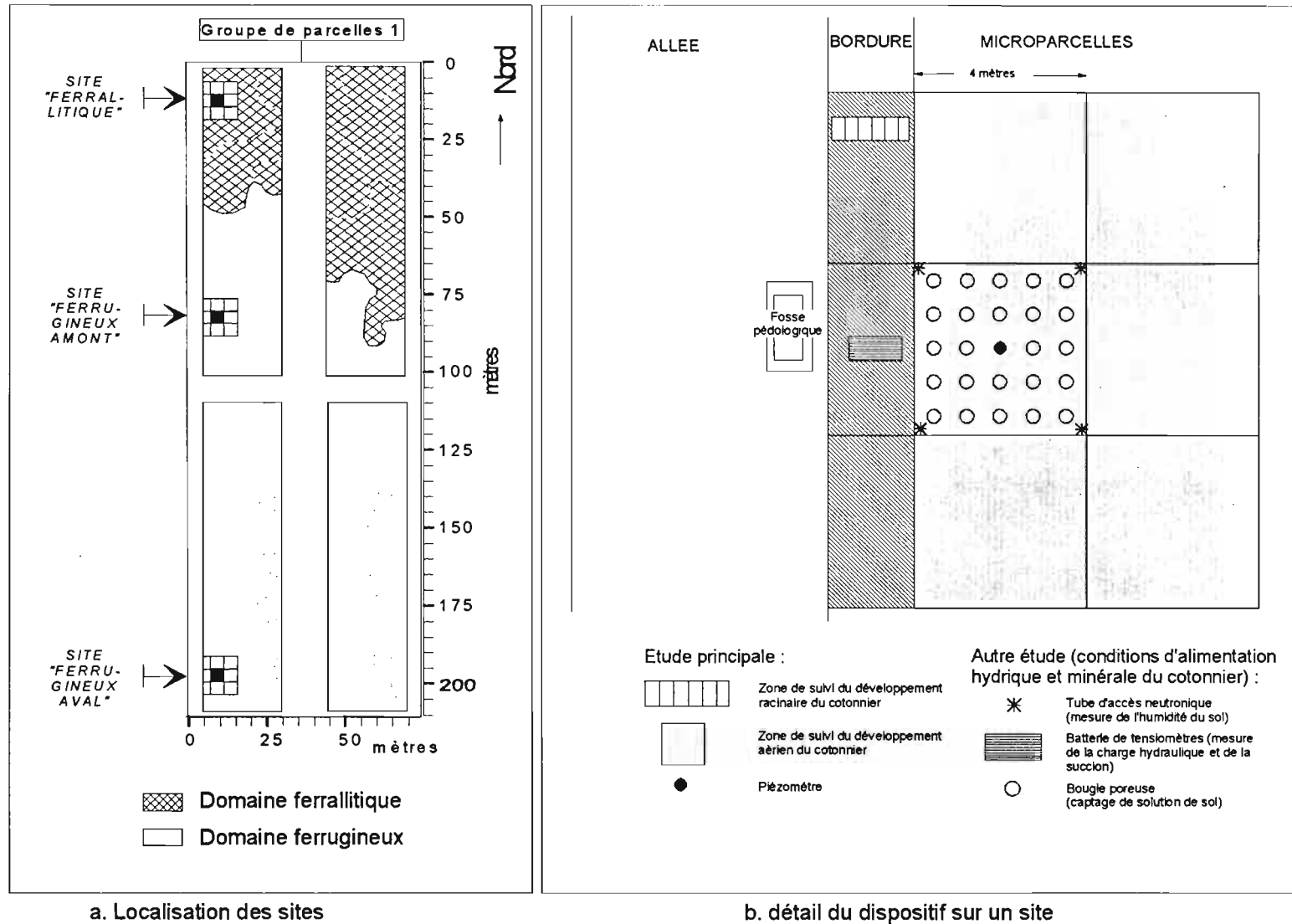


Figure VII-4. Localisation des sites étudiés et détail du dispositif.

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 culturaux. 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 culturaux.

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 bissectrice ($R^2 > 0.7$) entre les rendements des micro parcelles d'une année à l'autre.

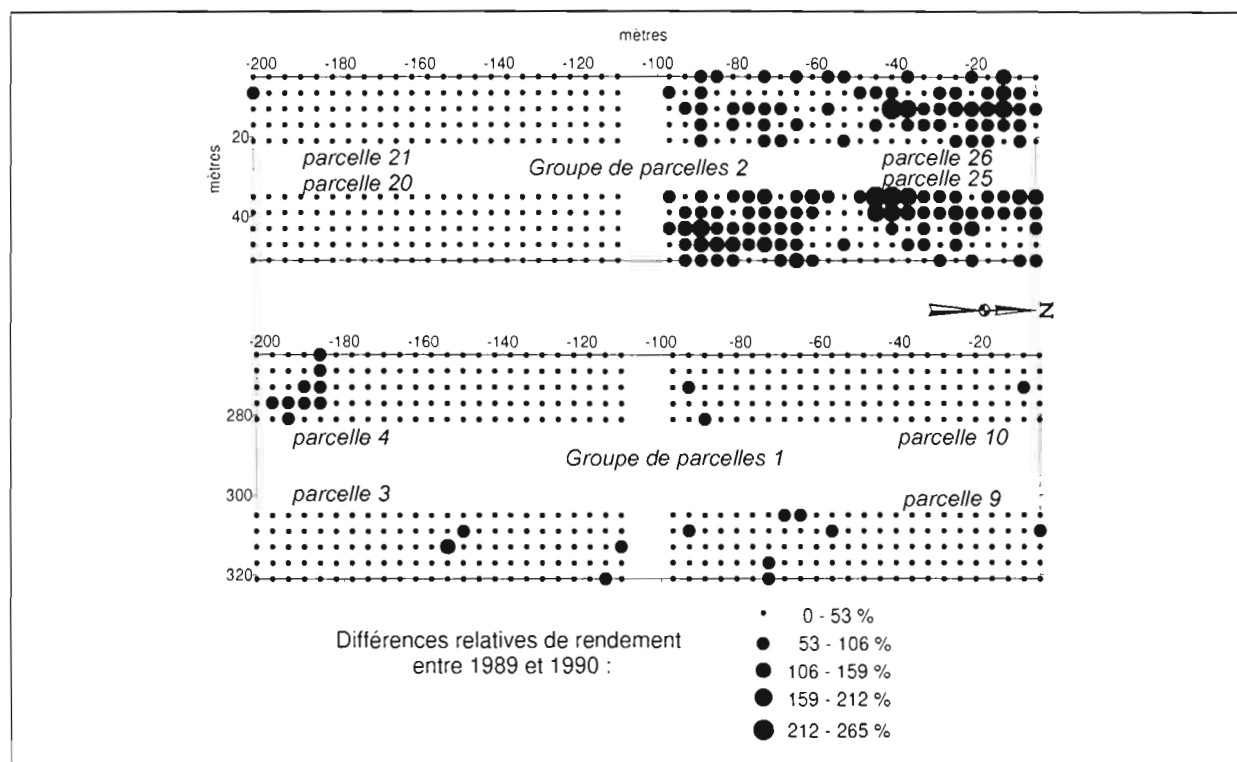


Figure VII-5. Variabilité inter annuelle du rendement des micro parcelles.

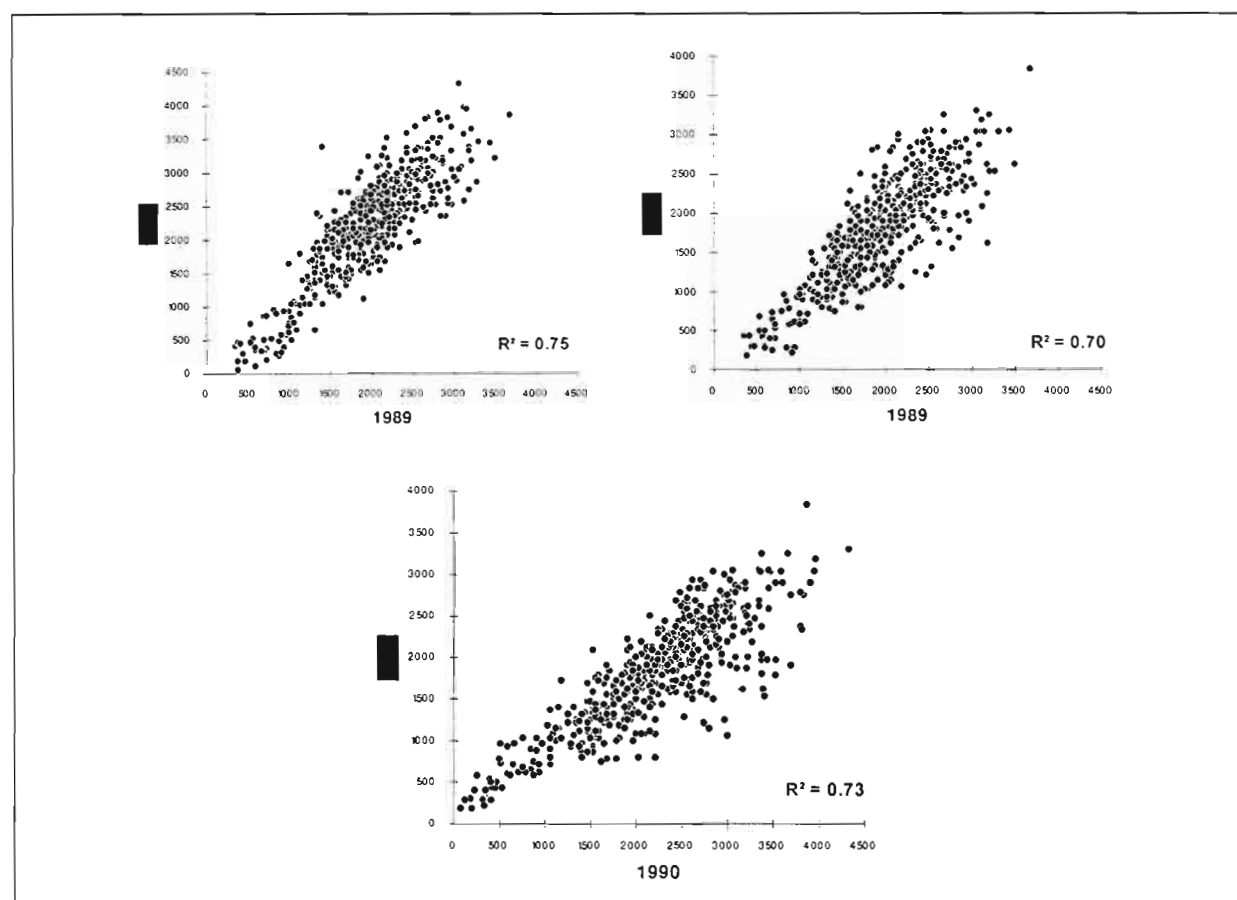


Figure VII-6. Relations entre les rendements 1989, 1990 et 1991 des micro parcelles (kg/ha). Groupe de parcelles 1.

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, et 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.

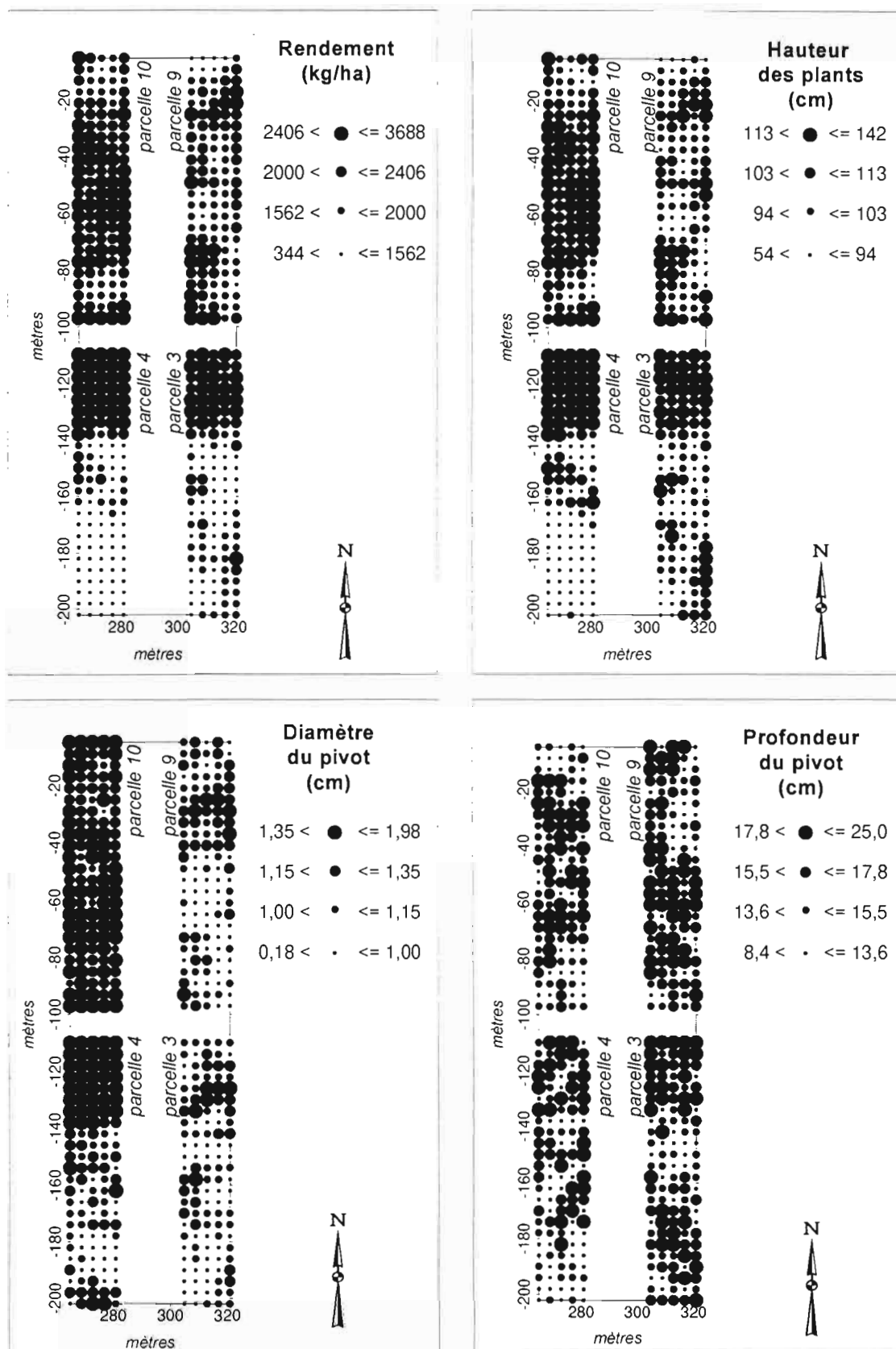
Au sein de ce groupe de parcelles, les variations spatiales de la récolte apparaissent importantes, malgré l'homogénéité du traitement agronomique. En effet, si l'on considère les paramètres statistiques obtenus à partir des mesures effectuées sur chaque micro parcelle (cf. tableau VII-3), on peut constater 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 tout d'abord observer 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.



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.

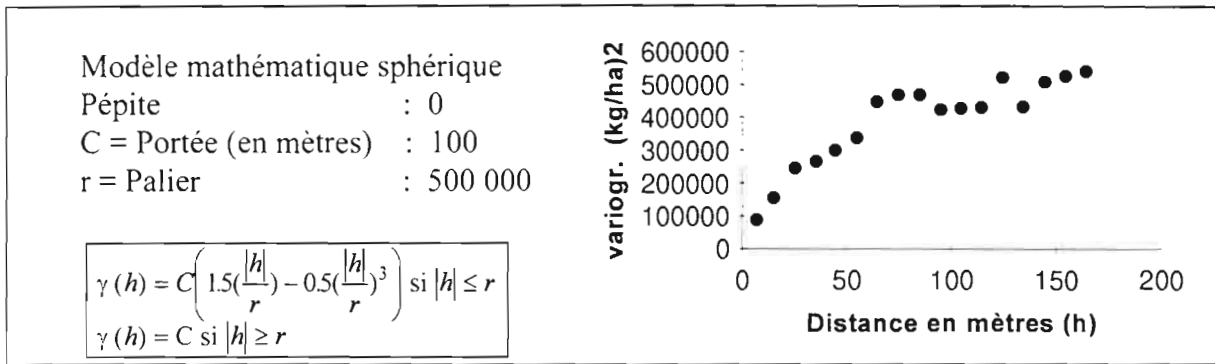


Figure VII-8. Variogramme omnidirectionnel du rendement (1989). Groupe de parcelles 1.

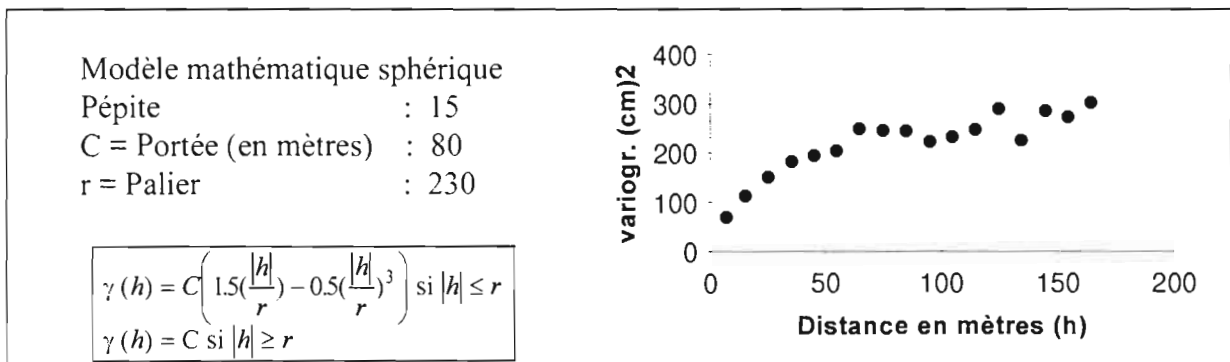


Figure VII-9. Variogramme omnidirectionnel de la hauteur des plants (1989). Groupe de parcelles 1.

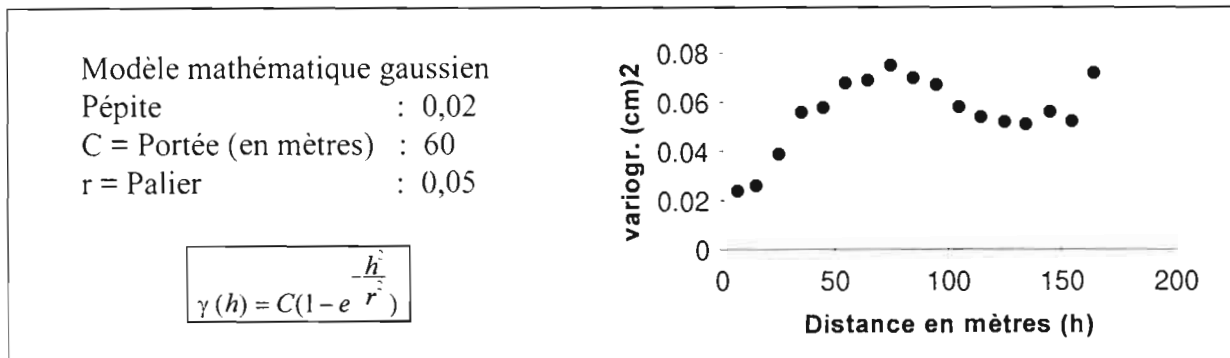


Figure VII-10. Variogramme omnidirectionnel du diamètre du pivot (1989). Groupe de parcelles 1.

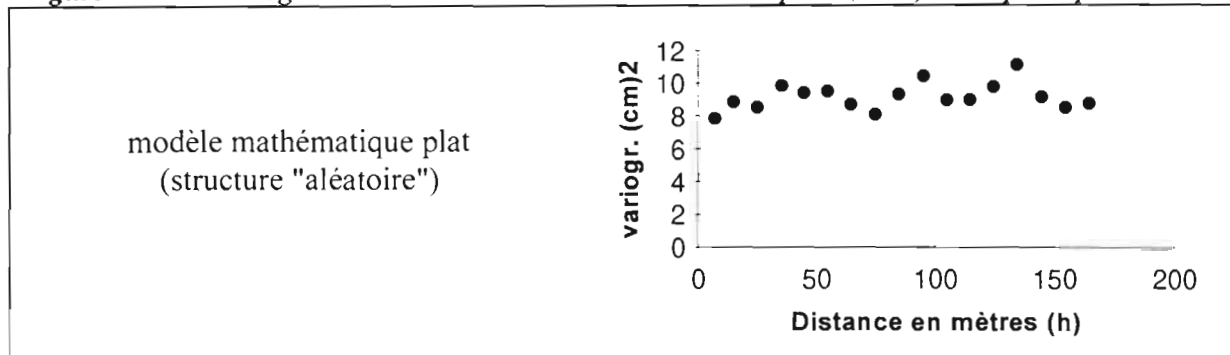


Figure VII-11. Variogramme omnidirectionnel de la profondeur du pivot (1989). Groupe de parcelles 1.

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 croit 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 hydropédoséquentielle). 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.

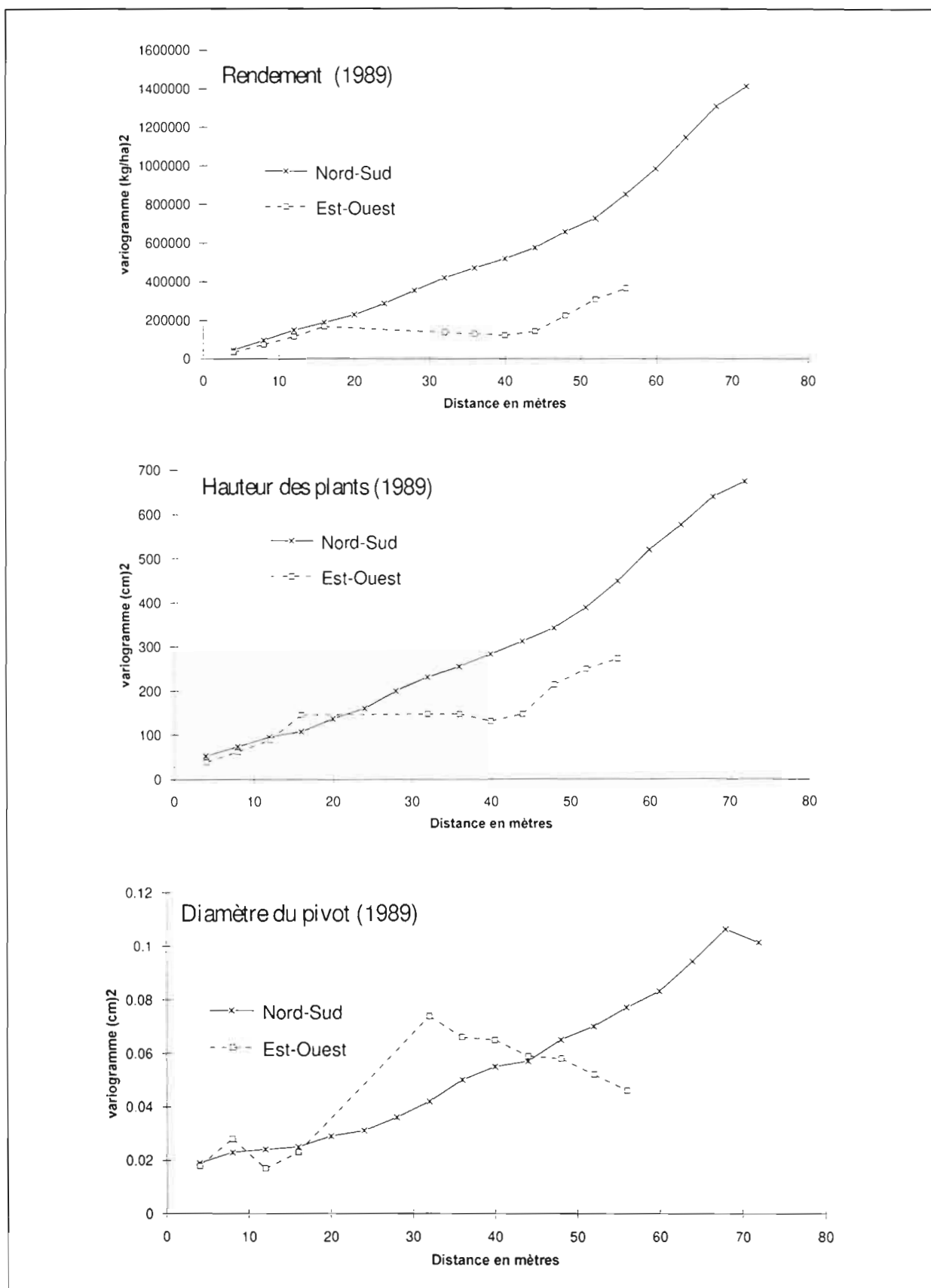


Figure VII-12. Variogrammes de la récolte selon l'axe de la toposéquence (Nord-Sud) et l'axe transversal (Est-Ouest). Groupe de parcelles 1.

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.

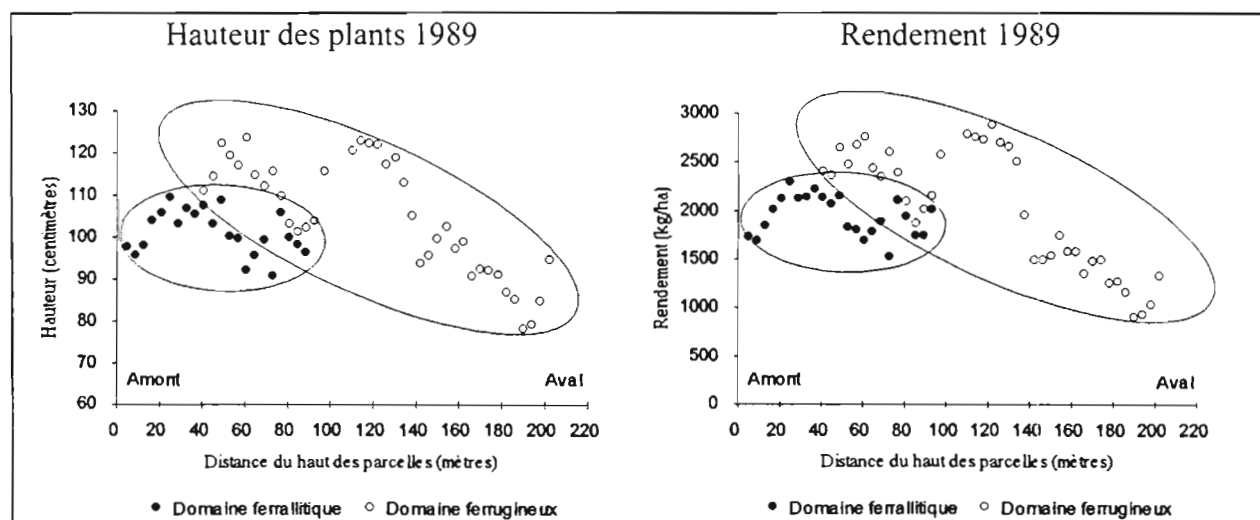


Figure VII-13. Variations de la hauteur des plants et du rendement le long de la toposéquence, selon les domaines pédologiques. Groupe de parcelles 1.

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'hydropédoséquence 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 plinthisque 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.

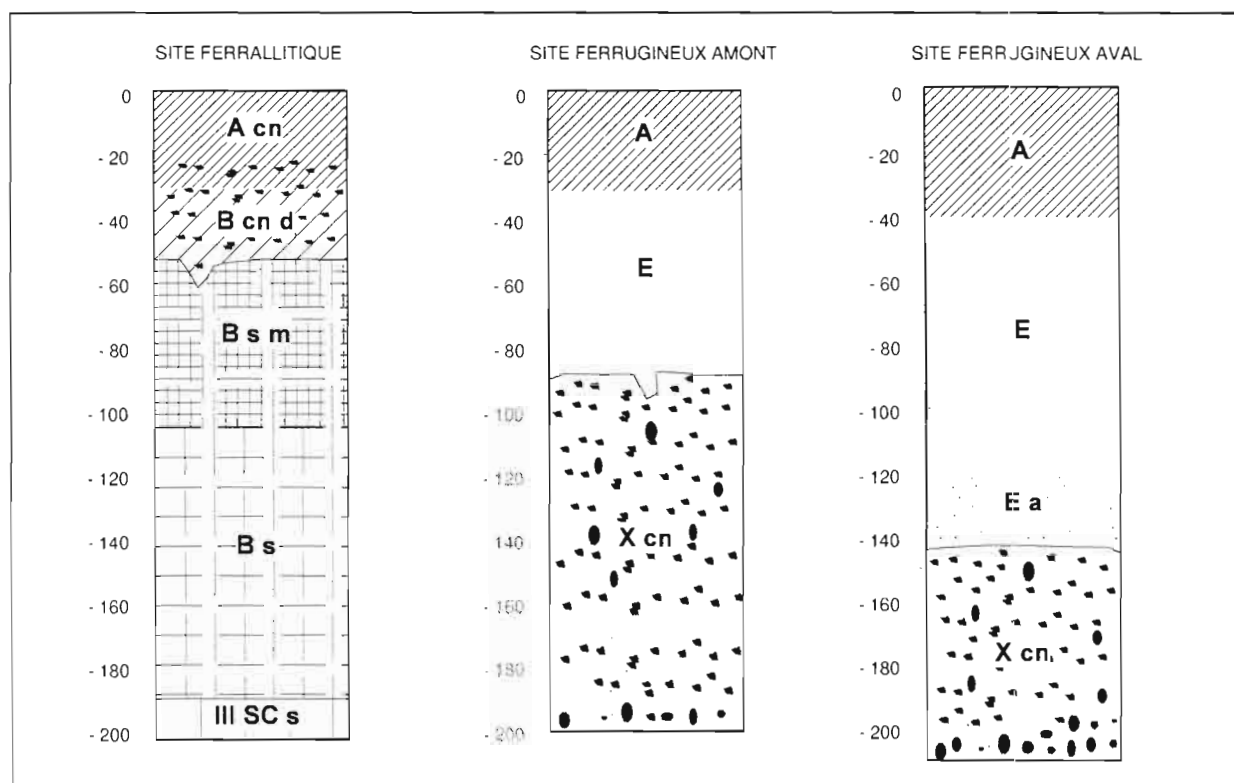


Figure VII-14. Profils pédologiques des 3 sites.

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/cm^2), 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/cm^2 . Ceci correspond, comme pour le site ferrugineux amont, à l'apparition de l'horizon X cn à nodules ferrugineux.

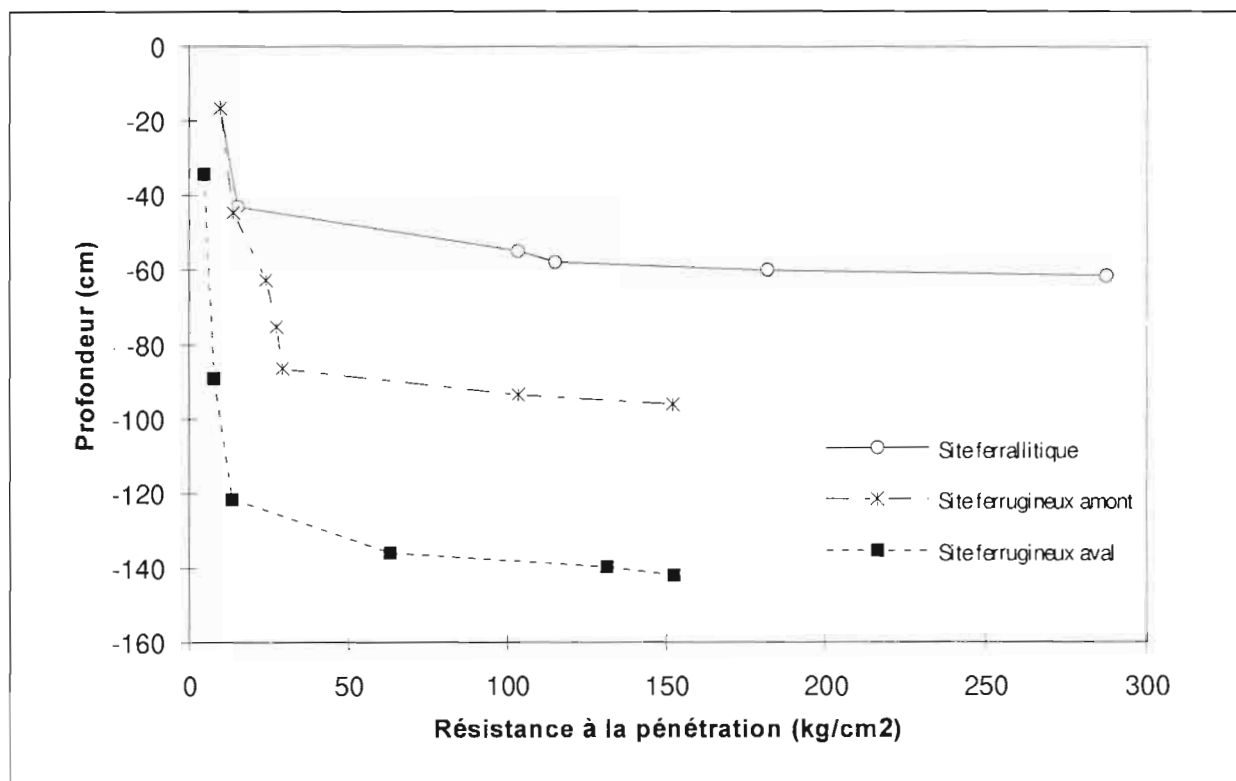


Figure VII-15. Profils de résistance mécanique à la pénétration des 3 sites.

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 $1 \text{ meq}/100 \text{ g}$ contre 2 à 3 $\text{meq}/100 \text{ g}$ 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 $5 \mu\text{mol}/\text{l}$, 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 (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.

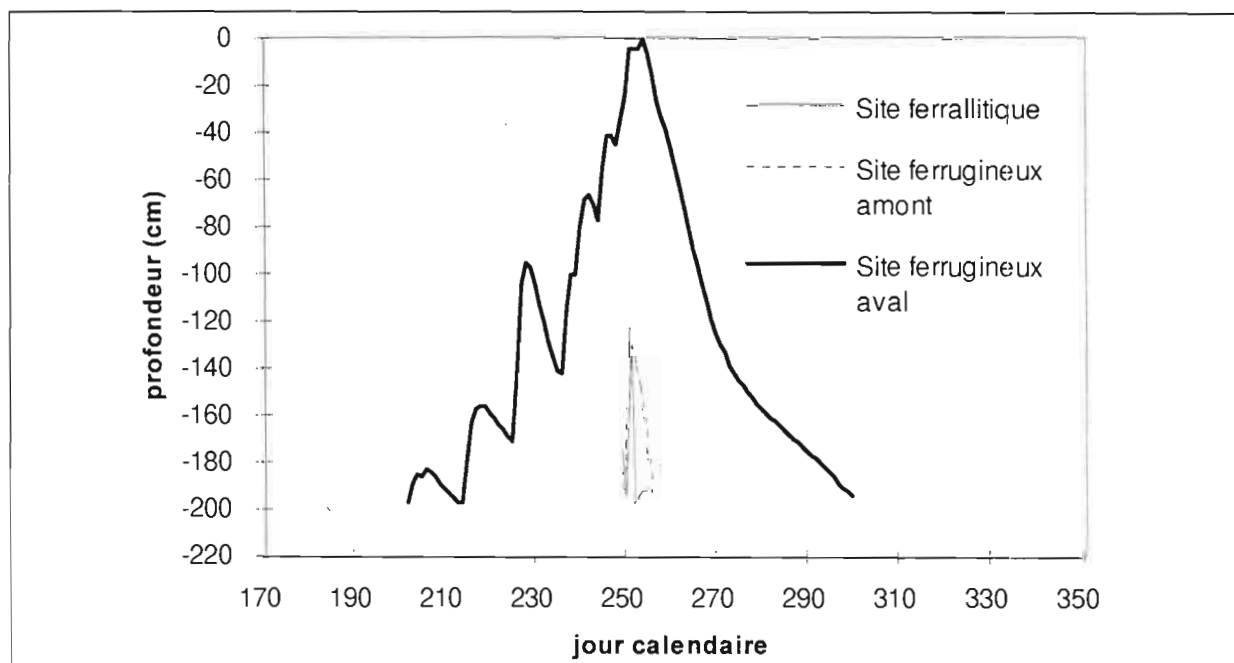


Figure VII-16. Evolution du toit de la nappe selon le site. Campagne 1991.

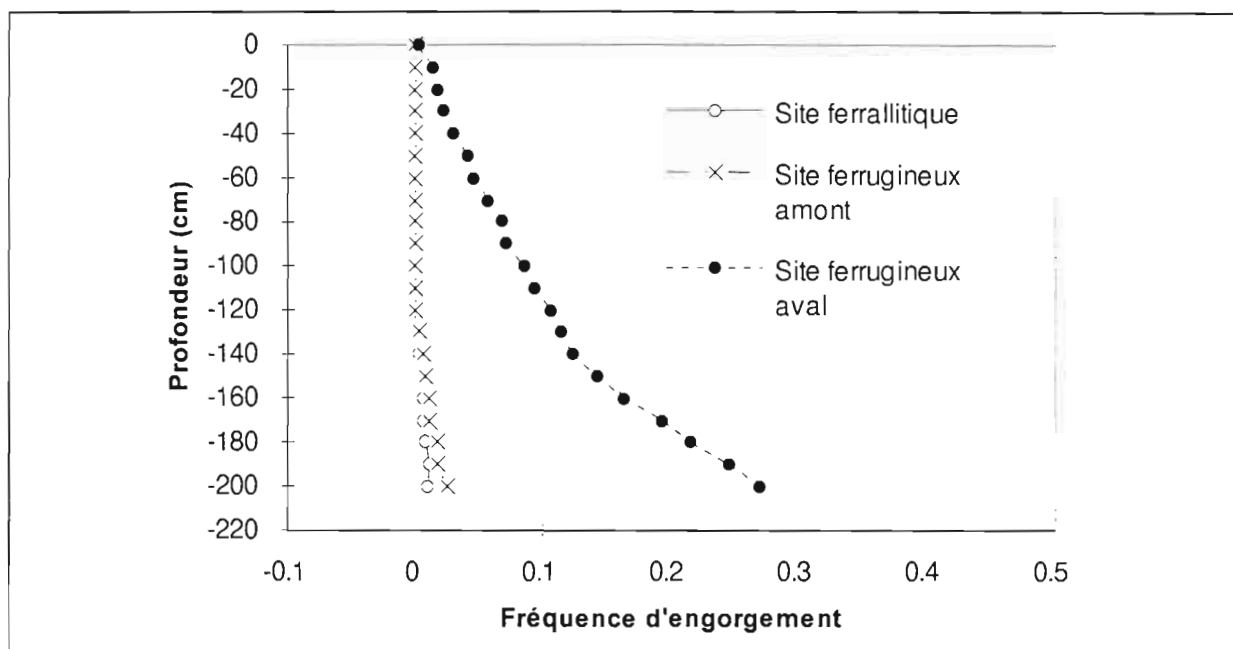


Figure VII-17. Profils de fréquence annuelle d'engorgement selon le site. Année 1991.

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.

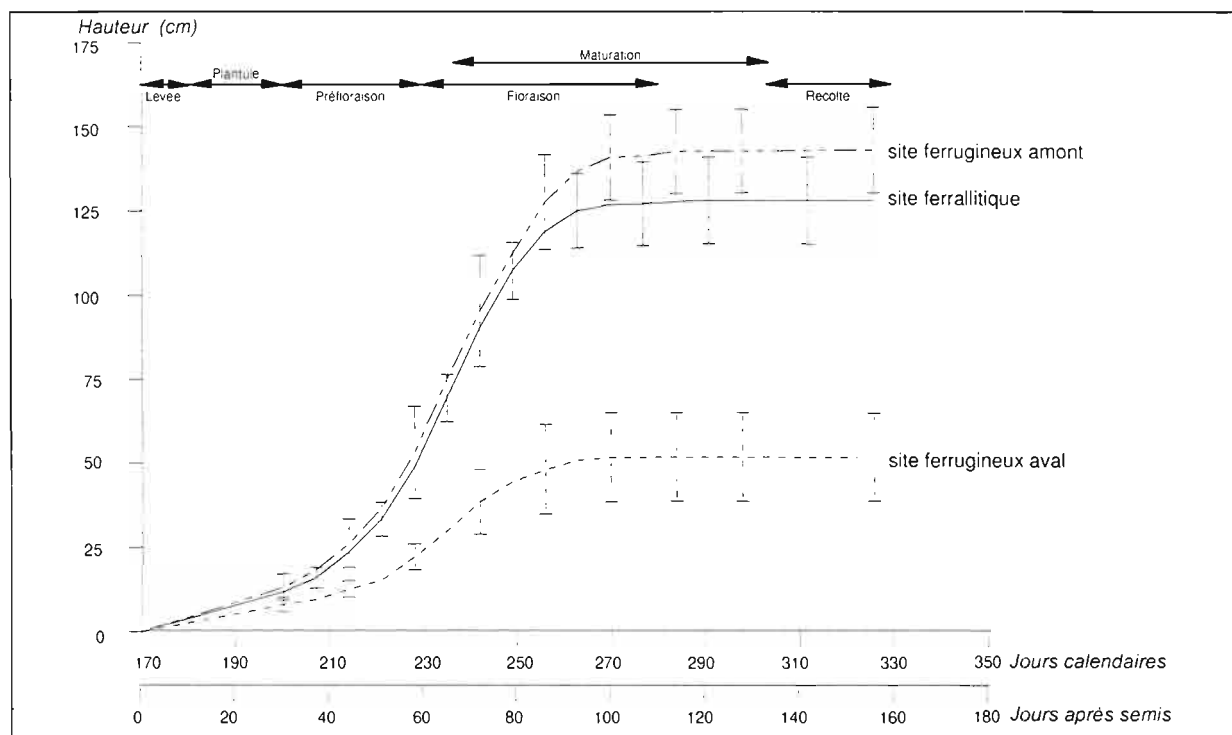


Figure VII-18. Evolution de la hauteur de la tige principale selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).

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.

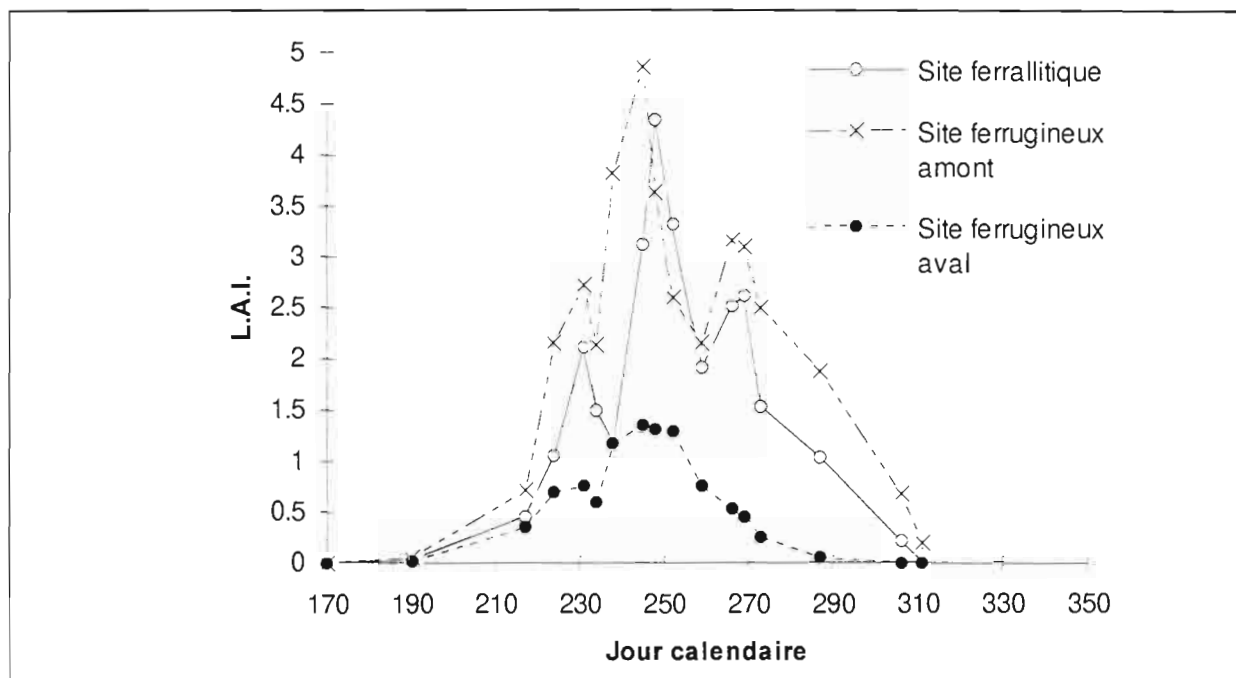


Figure VII-19. Evolution de l'indice foliaire (L.A.I) selon le site. campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).

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 du 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.

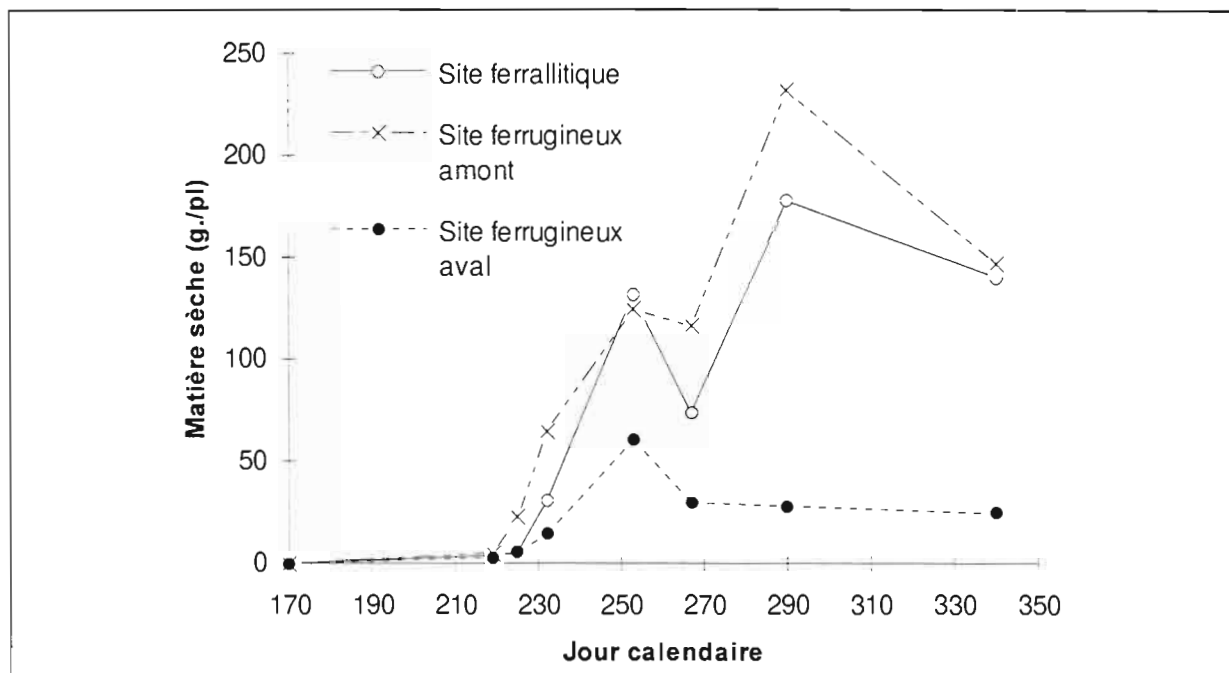


Figure VII-20. Production de matière sèche selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).

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 radicules 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 radicules 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.

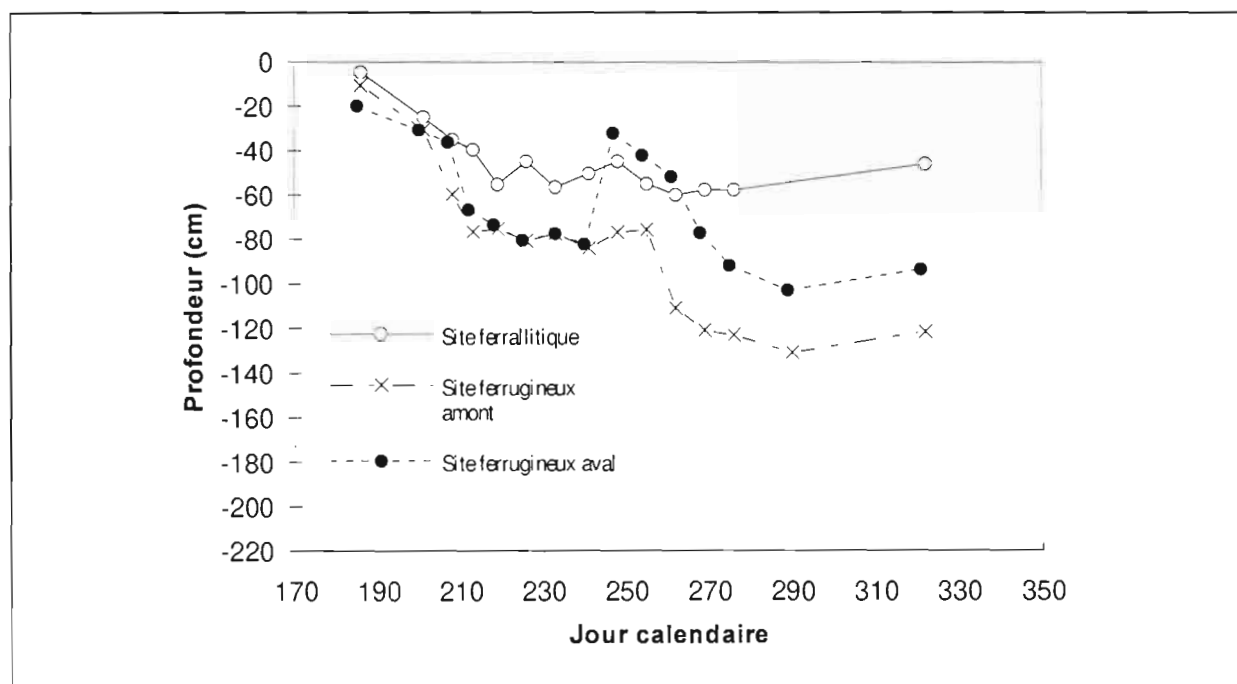


Figure VII-21. Evolution du front racinaire actif selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).

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

hydropédologique. 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.

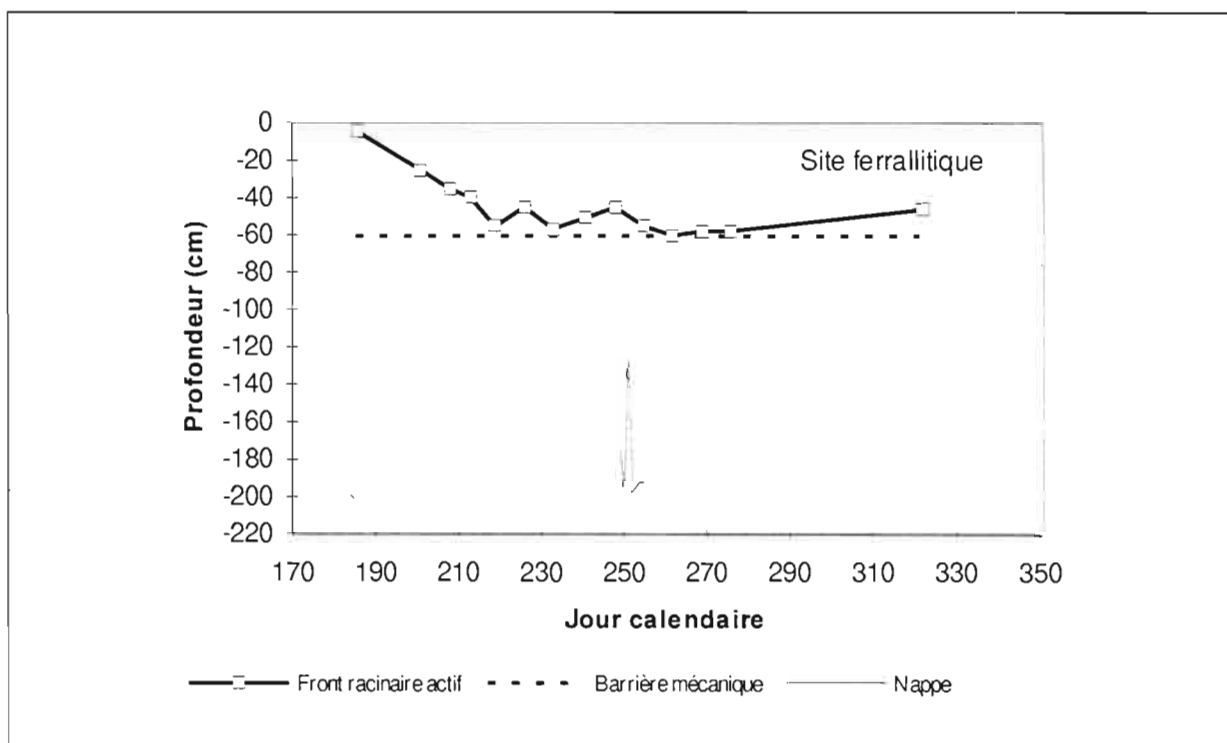


Figure VII-22. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydro-pédologiques sur le site ferrallitique.

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.

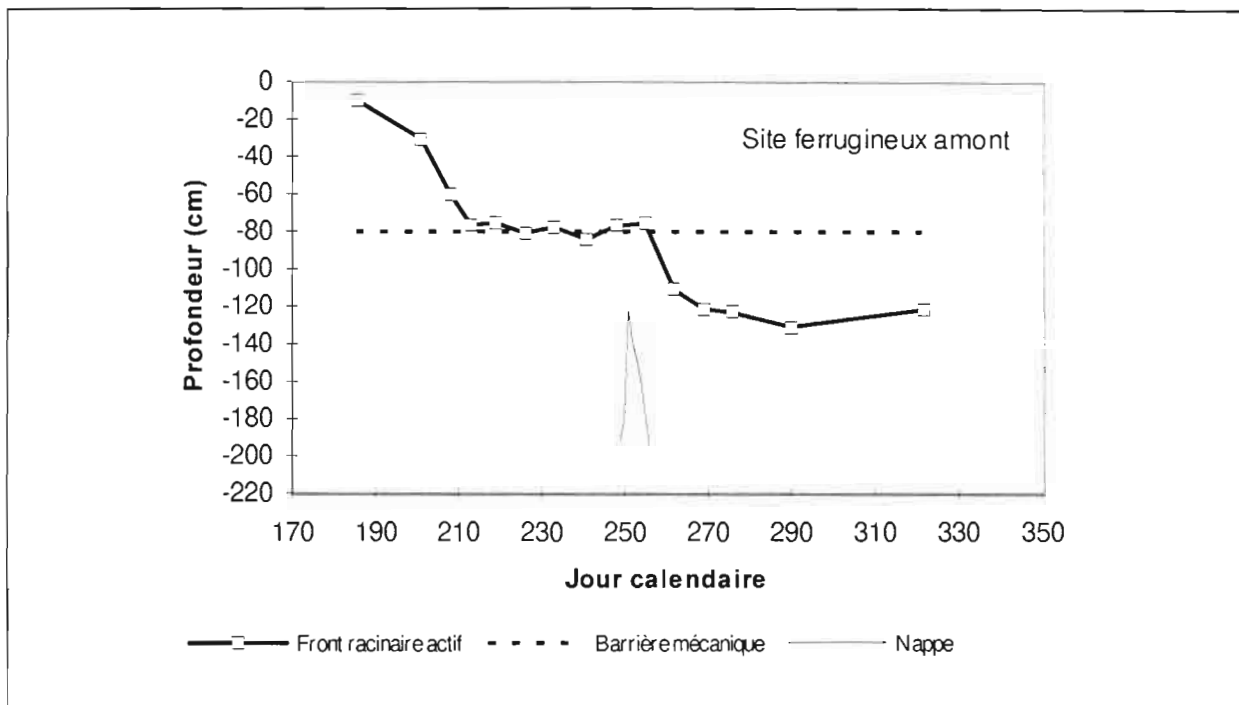


Figure VII-23. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydro-pédologiques sur le site ferrugineux amont.

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 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.

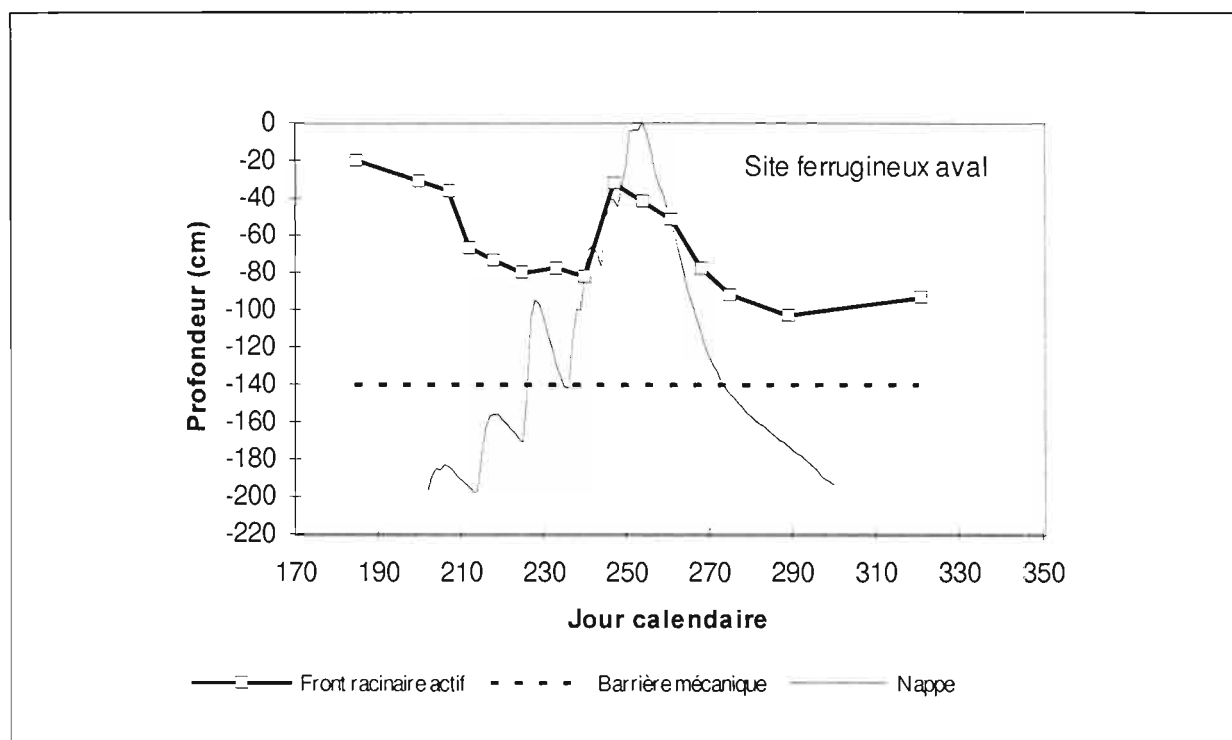


Figure VII-24. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydro-pédologiques sur le site ferrugineux aval.

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'hydropédoséquence. 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 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 chimique et de risques de toxicité aluminique, qui agissent 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 pourrait 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, et bien qu'il soit peut-être préférable de ne pas recommander la culture du cotonnier dans la partie aval du domaine ferrugineux, l'amélioration de la production dans cette partie est possible. Elle suppose certaines 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 serait 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 TROISIEME 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 hydropédologiques qui est déterminée par l'hydropédoséquence, 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 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 GENERALES

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 glacis 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 a permis d'expliquer la différenciation de la pédoséquence selon trois facteurs : le premier serait l'érosion en trois phases successives à partir d'un haut glacis quaternaire à surface cuirassée. Le second facteur serait un comblement partiel du bas de versant par des apports colluvio-alluviaux. Enfin, le troisième serait un ensemble de transformations au sein des matériaux pédologiques, qui se seraient produites sous l'action d'une nappe ou de circulations préférentielles d'eau.

Par ailleurs, certains indices pédologiques (type d'horizons et traits pédologiques) suggèrent indirectement un schéma hydrologique à deux nappes superposées.

La deuxième conclusion de cette partie de l'étude est qu'elle a permis de préciser le schéma hydrologique du paysage de référence.

L'étude de l'hydroséquence durant 3 cycles annuels confirme la réalité d'un schéma hydrologique à deux nappes, en révélant l'existence d'une nappe d'arène permanente sur l'ensemble du versant, et celle d'une nappe perchée semi-permanente localisée dans les domaines ferrugineux et hydromorphe.

La troisième conclusion est que la pédoséquence est "hydrologiquement fonctionnelle", puisqu'il y a adéquation entre les hypothèses sur les conditions hydrologiques formulées à partir des indices pédologiques, et l'observation directe de ces conditions.

Enfin, la quatrième 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 relation 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. En pratique, et pour les versants de ce paysage, ces deux variables pédologiques devraient donc permettre d'estimer rapidement la fréquence moyenne annuelle d'engorgement 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, 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 certaines 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 découpage 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. En

conséquence, ***un prolongement direct de cette partie de l'étude pourrait être une évaluation plus complète de l'aptitude agricole du versant.*** Dans ce but, 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). On notera qu'un tel prolongement justifierait la mise en oeuvre d'un programme de recherche-développement spécifique.

REFERENCES 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.), BOULAIN (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 (J.), 1971.- Pédologie. In : Atlas International de l'ouest africain, *Comm. Sci. Tech. O.U.A.*, planche 9.
- 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.), 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.- Ferrolysis, 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 foundation, 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.

- DUCHAUFOR (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.
- HUMBERT (R.P.), 1948.- The genesis of laterite. *Soil Sci.*, 65, pp. 281-290.
- 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 Physiologie, MAUNEY J.R. et STEWART Mc.D. ed., The cotton foundation, 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. Diférenciation 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.
- MAC FARLANE (M.J.), 1976. - Laterite and lanscape. Academic Press (éd.), Londres, 151 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 Physiologie, MAUNEY J.R. et STEWART Mc.D. ed., The cotton foudation, 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.), 1964.- 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.
- 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.), 1967.- Le remaniement des sols et la mise en place de la stone-line en Afrique. ORSTOM, réunion annuelle des pédologues, 1967, Bondy, 22 p. multigr.
- 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 hydropédologique 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.
- TOUPET (C.), 1971.- Eléments mensuels du climat. In : Atlas international de l'ouest africain. *Comm. Sci. Techn. OUA*, planche 12.
- 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 hydropédologique 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. RELEVES 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 glaucescens</i>				
lign. arbustifs	Caesalpiniaceae	<i>Piliostigma thonningii</i>				
	Annonaceae	<i>Annona senegalensis</i>				
	Araliaceae	<i>Cussonia kirkii</i>				
	Chrysobalanaceae	<i>Maranthes kerstingii</i>				
	Chrysobalanaceae	<i>Parrina curatellifolia</i>				
	Combretaceae	<i>Combretum collinum</i>				
	Combretaceae	<i>Terminalia avicennioides</i>				
	Combretaceae	<i>Terminalia macroptera</i>				
Euphorbiaceae	<i>Hymenocardia acida</i>					
herbacées	Graminae (Poaceae)	<i>Panicum phragmitoides</i>				
	Zingiberaceae	<i>Aframomum alboviolaceum</i>				
	Commelinaceae	<i>Cyanotis longifolia</i>				
	Compositae	<i>Aspilia helianthoides</i>				
	Cyperaceae	<i>Cyperus sp.</i>				
	Graminae (Poaceae)	<i>Andropogon spp.</i>				
	Graminae (Poaceae)	<i>Bracharia sp.</i>				
	Graminae (Poaceae)	<i>Hyparrhenia spp.</i>				
	Amaranthaceae	<i>Pandiaka Angustifolia</i>				
	Amaranthaceae	<i>Pandiaka involucreta</i>				

Tableau A.1. Espèces végétales largement réparties sur le versant.

A2. Espèces étagées

				POSITION SUR LE VERSANT			
				AMONT	MEDIAN	AVAL	GALERIE FOREST.
	famille	genre	espèce				
ligneux arborescents	Caesalpiniaceae	<i>Isobertinia</i>	<i>doka</i>	■			
	Caesalpiniaceae	<i>Detarium</i>	<i>microcarpum</i>	■			
	Anacardiaceae	<i>Mangifera</i>	<i>indica</i>		■ plantation		
	Sapotaceae	<i>Vitellana</i>	<i>paradoxa</i>		■		
	Palmae	<i>Borassus</i>	<i>aethiopicum</i>			■	
	Palmae	<i>Elaeis</i>	<i>guineensis</i>			■	
	Palmae	<i>Raphia</i>	<i>vinifera</i>			■ plantation	
Euphorbiaceae	<i>Sapium</i>	<i>ellipticum</i>				■	
ligneux arborescents.	Euphorbiaceae	<i>Marganta</i>	<i>discoidea</i>	■			
	Loganiaceae	<i>Strychnos</i>	<i>spinosa</i>	■			
	Moraceae	<i>Ficus</i>	<i>glumosa</i>	■			
	Phylgalaceae	<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>aficanus</i>		■		
Combretaceae	<i>Terminalia</i>	<i>laxiflora</i>			■		
Mimosaceae	<i>Dichrostachys</i>	<i>cinerea</i>				■	
ligneux sarmenteux.	Opiliaceae	<i>Opilia</i>	<i>celtidifolia</i>	■			
	Rhamnaceae	<i>Zizyphus</i>	<i>mucronata</i>	■			
	Annonaceae	<i>Uvaria</i>	<i>chamae</i>	■			
Connaraceae	<i>Byrsocarpus</i>	<i>coccineus</i>	■				
lianes	Vitaceae	<i>Cissus</i>	<i>populnea</i>	■			
	Diocoreaceae	<i>Dioscorea</i>	<i>spp.</i>	■			
	Vitaceae	<i>Cissus</i>	<i>sp.</i>				■
herbacées	Commelinaceae	<i>Cyanotis</i>	<i>lanata</i>	■			
	Compositae	<i>Ageratum</i>	<i>conyzoides</i>		■		
	Compositae	<i>Aspilia</i>	<i>kotschyi</i>		■		
	Compositae	<i>Tridax</i>	<i>procumbens</i>		■		
	Graminae (Poaceae)	<i>Imperata</i>	<i>cylindrica</i>		■		
	Graminae (Poaceae)	<i>Paspalum</i>	<i>scrobiculatum</i>		■		
	Icacinaceae	<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>grahemii</i>			■	
	Graminae (Poaceae)	<i>Hyperthelia</i>	<i>dissoluta</i>			■	
	Graminae (Poaceae)	<i>Selaria</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	<i>Sclena</i>	<i>bovini</i>				■
Cyperaceae	<i>Sclena</i>	<i>bulbifera</i>				■	
Cyperaceae	<i>Sclena</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.).

$$\text{Table de données } B(kn) = \begin{pmatrix} v_{11} & \dots & v_{1i} & \dots & v_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{j1} & \dots & v_{ji} & \dots & v_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{k1} & \dots & v_{ki} & \dots & v_{kn} \end{pmatrix}$$

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).



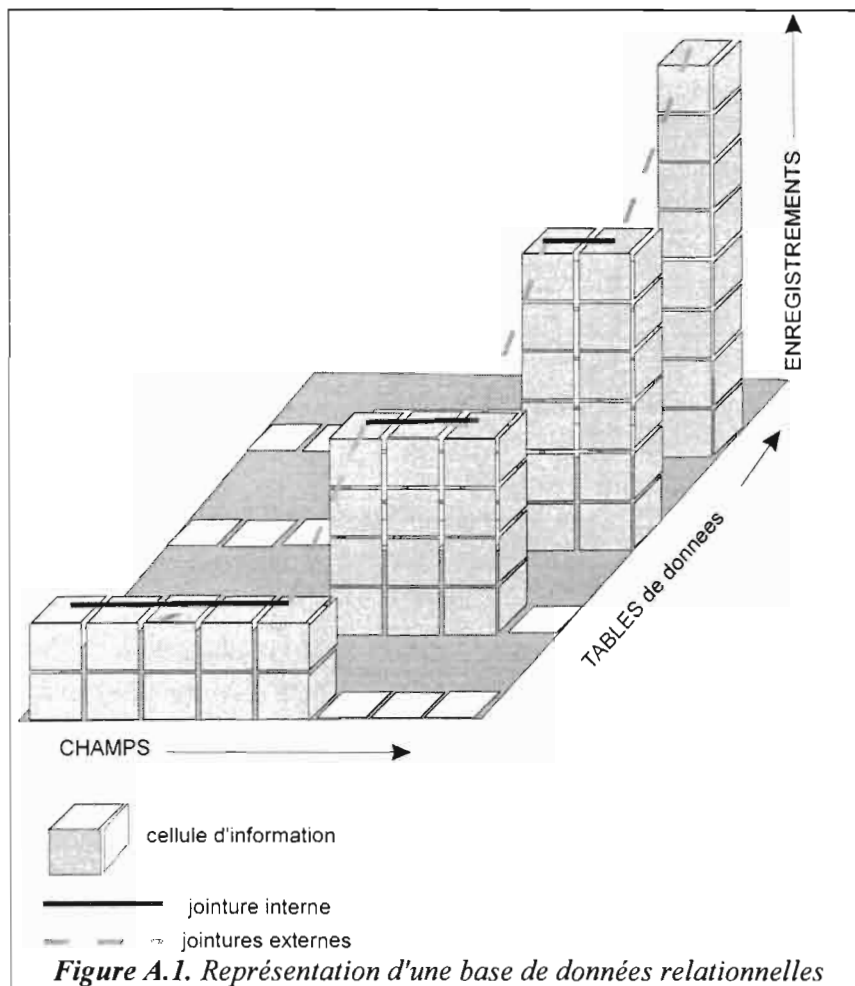
	<i>champ i-2</i> <i>nature</i>	<i>champ i-1</i> <i>ouleur</i>	<i>champ i</i> <i>forme</i>	<i>champ i+1</i> <i>diamètre</i>	<i>champ i+3</i> <i>schéma . photo de l'objet</i>	
Enr k-1	nodule à cortex	ocre	mamelonné	10		1 enregistrement
Enr j	gravillon ferr.	rouge	anguleux	7		
Enr j+1	oolithe	noir	sphérique	5		

Tableau A.3. Exemple de table de données (glossaire pédologique)

D'un certain point de vue, ce SGBD est donc d'abord une sorte de 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.

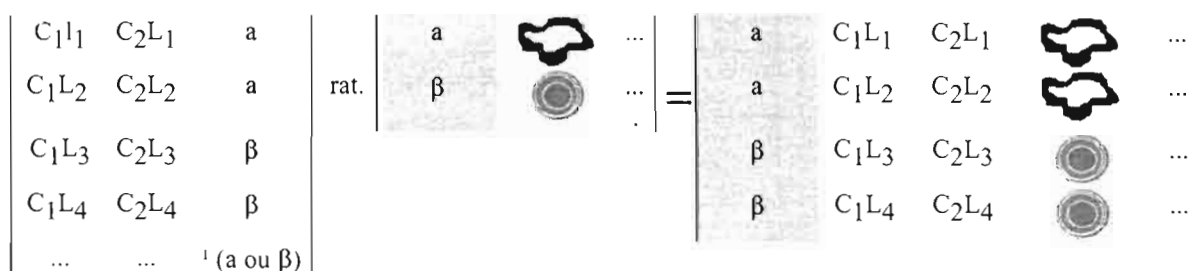


Figure A.2. Exemple de jointure entre tables de données

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. MAA 3D - D.Blavet
-----
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

```

Enregistrement 231/338                               page 1/2
Séquence 3      Profil 5      Uolume =05H03  29  à 45  cm

UUE
SYNOPTIQUE
VOLUME
F7
F9 →Edition
F10 =Aide

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>

a b c d e f g h i j k l m n o p q r s
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

"Loupe" intitulé du champ et contenu :
▶ COULEUR SEC PHASE 1 ◀  (A12)

10YR6/4

INTRODUCTION
SEQUENCE: 3
FOSSE : 5
UOLUME : 03
29 à 45 c

F7 →SYNOPTIQUE
F9 →Edition

REPERAGE Transect :N° 3 Nom : DAL111
          Profil :N° 5 Nb de volumes :
          X Y Z surface:K: V: Z:

CARACTERES Série de sol :
CONCERNANT Drainage :
LE SOLUM Engorgement :

ETIQUETTE CODAGE UOLUME :=05H03
VOLUME Type observation :FOSSE
          Observateur :D.D R.M
          Date obs. terrain:20.04.89
          Date obs. labo :21.04.92
          Type saisie :Saisie complète
          ↳UOLUME source:absent
          Photographies :pellicule - photo

LIMITES sup : 29
          inf : 45
          type:ondulée
          net?:graduelle

© ORSTOM 1993
F10 = Aide Curseur: Fin/Home=BD ←→=champs ↑↓=pages Ctrl↑ Ctrl↓=enreg.
  
```

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 :7
VOLUME : 03		TEXTURE	Texture terrain :bas
29 à 45 c			
F7 SYNOPSIS		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
F9 →Edition		MECANIQUE	1.Pénétrabilité (humide) 2.Cisaillement (sec) compacté non fragile 3. Cimentation du matériau in situ carapacé (ferrug.)
© ORSTOM 1993		COULEURS	Organisation :tacheté net
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			
F7 SYNOPSIS			
F9 →Edition			
© 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	% 1 :NOMBREcortex1Absent
VOLUME : 03		2:graviers de quartz "sain"	% 2 :PEU cortex2Absent
29 à 45 c		3:nodules/concr. rouges	% 3 :RARE cortex3Absent
F7 SYNOPSIS		ELEMENTS FIGURES	
F9 →Edition		1:Volumes diffus Fe/Mn	% 1 :MIN
		2:Paillettes muscovite	% 2 :TRAKE
		3:Absent	% 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		REFUS > 2000 µ:	42.1
VOLUME : 03		ARGILE 0-2 µ:	31.15
29 à 45 c		LIMON TOTAL 2-50 µ:	6.24
		SABLE TOTAL 50-2000 µ:	62.82
		C.E.C pour 100 g A:	13.996*
		MAT. ORGANIQUE	
		Mat org %:	1.02
		Azote %:	.52
		C/N:	11.35
		pH	
		pH eau	KCl
		5.07	4.03
		pF 3,0:	
		14.82	16.23
		FE203 %	
		total	libre lib/tot
		3.9	2.98 76.41*
		P405 %	
		total	ass ass/tot
		.34	.85 14.70*
		MINERA-LOGIE	
		Type d'argile:	
		Type de fer :	
		© ORSTOM 1993	
		F10 = Aide Curseur: Fin/Home=BD ←→=champs ↑↓=pages Ctrl↑ Ctrl↓=enreg.	
TRADUCTIONS		Page 6/8	
SEQUENCE: 3		TEXTEURE	Analyses
FOSSE : 5		D'ENSEMBLE	granulo. :
VOLUME : 03			argile :
29 à 45 c			limon total :
			Sable total :
			62.82
			↳ Texture USDA :Limon argilo-sableux
		MATIERE ORGANIQUE	Analyses
			:MO % :
			1.02
			C/N : 11.35
			↳ Type humus:null
		GEOCHIMIE	Type argile :
			Type fer :
			↳ argilogén.:
			↳ évol géoch.:
			↳ Type géoch.:
		COULEURS DES PHASES	Coul phas 1brun jaunâtre clair
			%:TNOMB
			Coul phas 2rouge
			%:PEU
			Coul phas 3
			%:AUCUN
			↳ Interprét.:
		© 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 pétroanthropique	
		Nomenclature RPF 1988	
		Pos Type Suf1 Suf2	
		I B/E en -	
		Diagnostiques FAO et ORSTOM	
		HZ diag FAO	
		caractère FAO	
		HZ Diag ORSTOM	
		carac.1 ORSTOM	
		carac.2 ORSTOM	
		© 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	Faiblement carapacé en sec.
--	---	-----------------------------

F7 = SYNCHRONISER
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

Enregistr. N° 34 PgUp

Code volume : 031003

Limites (cm) : 29 / 45	pH eau : 5.07	KCl : 4.03	pF 3,0 : 14.82	2,5 : 16.23
------------------------	---------------	------------	----------------	-------------

MAT. ORGANIQUE		PHOSPHORE		FER	
Mat org %: 1.02	P205 %: .34	total	ass	total	libre
Azote %: .52	ass/tot: .05	bilanz: 14.70*		bilanz: 76.41*	
C/N: 11.35					

GRANULOMETRIE		CATIONS	
REFUS > 2000 µ: 42.1	ARGILE 0-2 µ: 31.15	BASES	ECH.
LEHM TOTAL 2-50 µ: 6.24	SABLE TOTAL 50-2000 µ: 62.82	meq/100 g	TOT.
lf: 3.66	ll: 2.58	Ca: 1.27	3.57
Sf: 21.1	Sg: 41.72	Mg: .1	4.08
		K: .21	2.05
		Na: .06	9.21
		Total: 1.64	18.91
		CEC: 4.36	ECH/TOT%: 8.67265*
		S/T: 37.61	

C.E.C pour 100 g A: 13.996*

ESC Quitte F9 Edite F10 Aide PgDn

3. Description de volumes élémentaires par rattachement à des volumes de référence

Typ. OBS	Coord. X	Coord. Y	Altitude	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 U VueRéférence F9 Edite F10 Aide ORSTOM/INRA 1992

ANNEXE D. CODAGE NUMERIQUE DES VARIABLES DESCRIPTIVES DES VOLUMES PEDOLOGIQUES

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 extréma 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 disposions 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.

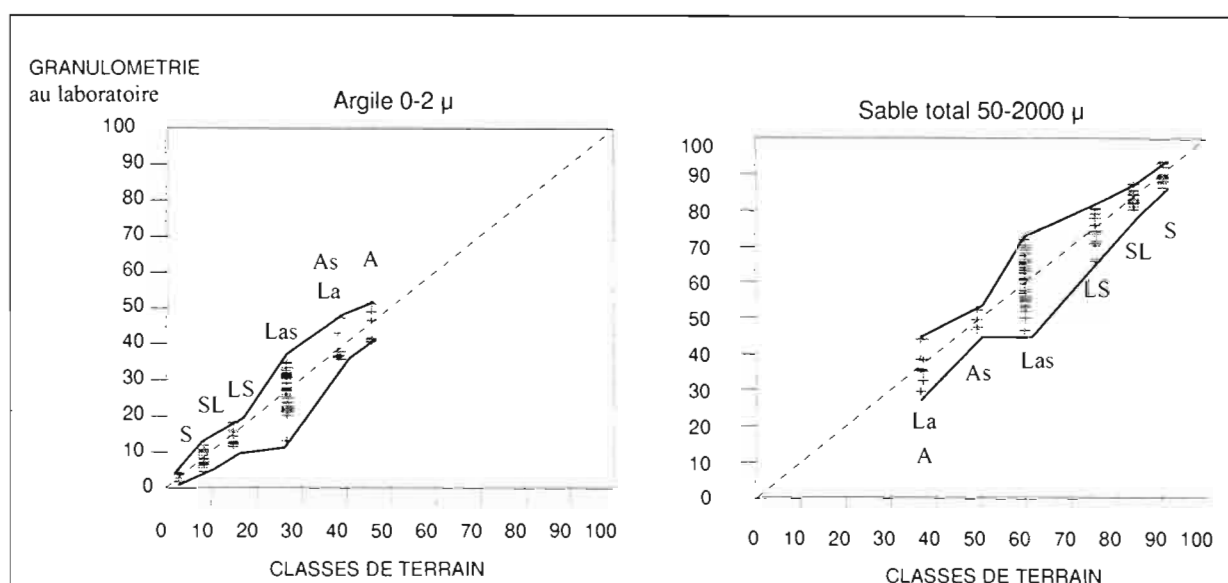


Figure A.3. Correspondance entre analyse granulométrique de laboratoire et codage de terrain.

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 extréma 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 :

$$\begin{array}{rcccl}
 & & & & \text{mod } l & \dots & \text{mod } i & \dots & \text{mod } j & \dots & \text{mod } k & \dots & \text{mod } n \\
 & & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & & & & & + & & & & \\
 \text{EG1 ou EF1} & \text{EG2 ou EF2} & \text{EG3 ou EF3} & \rightarrow & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \text{mod } i & \text{mod } j & \text{mod } k & & & & & & + & & & & \\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & \hline
 & & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0
 \end{array}$$

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 (a,...,b) 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.l	$C1 \times 0+$	$C2 \times 0+$	$C3 \times 1+$	$C4 \times 0+$	$C5 \times 0+$	$C6 \times 1+$	$C7 \times 1+$	$C8 \times 0+$	$C9 \times 0+$	$C10 \times 0=$	α
v.e.r.n	$C1 \times 0+$	$C2 \times 0+$	$C3 \times 0+$	$C4 \times 0+$	$C5 \times 2+$	$C6 \times 0+$	$C7 \times 1+$	$C8 \times 0+$	$C9 \times 0+$	$C1 \times 10=$	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).

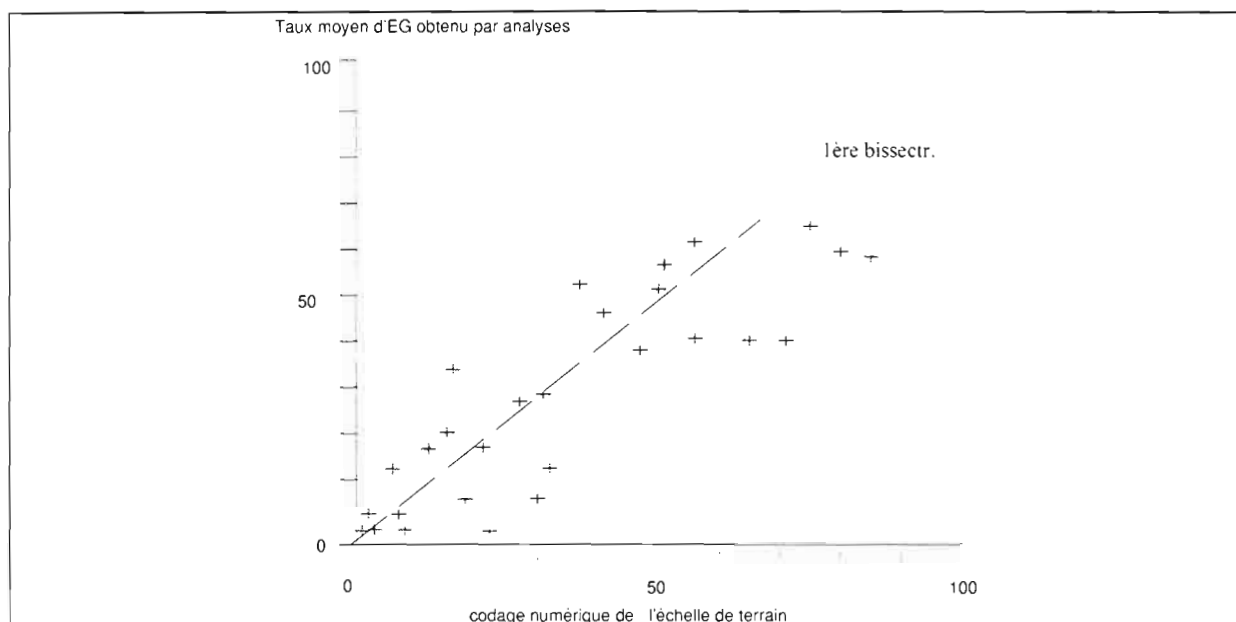


Figure A.4. Relation entre le codage de la quantité d'éléments grossiers par l'échelle de terrain et les analyses de laboratoire.

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.

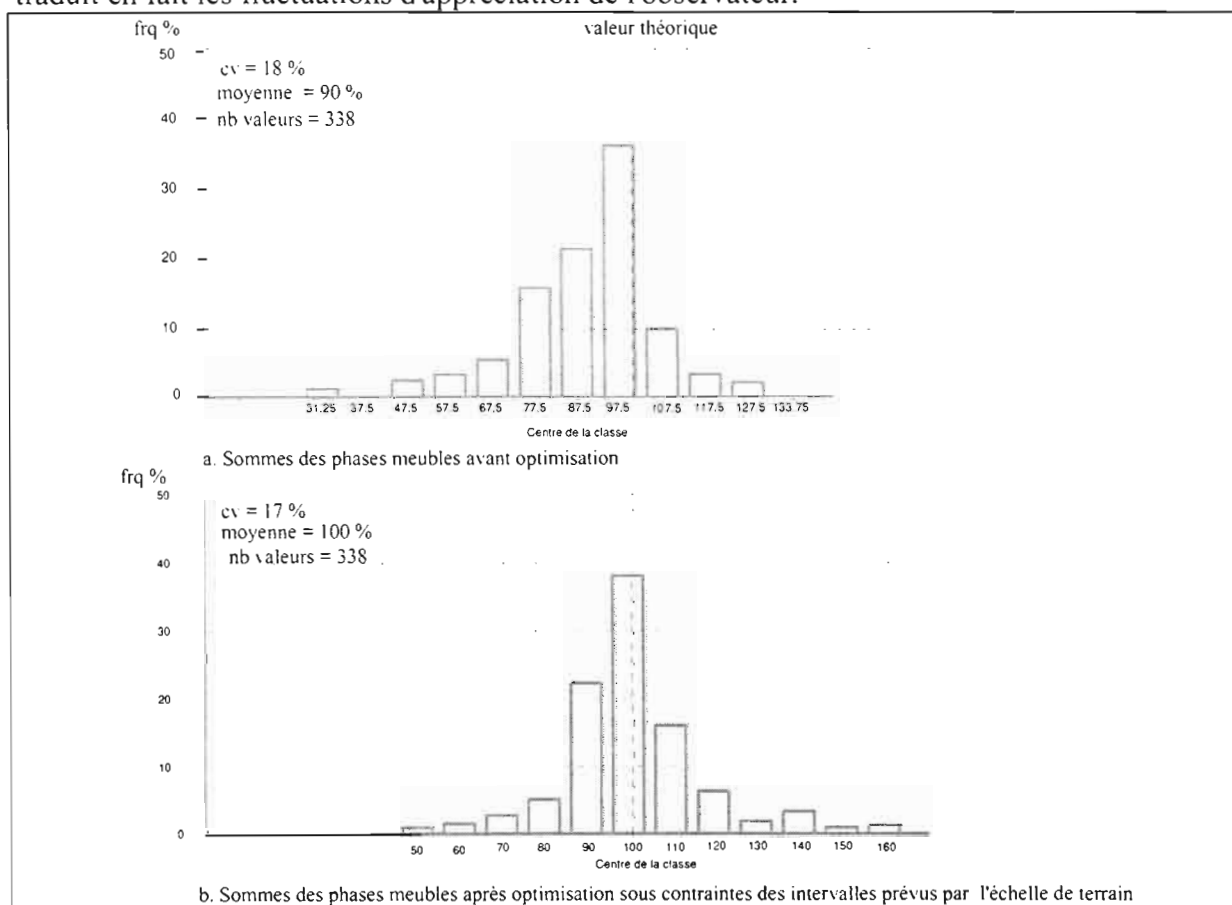


Figure A.5. Optimisation du codage numérique de l'échelle de quantification des phases meubles.

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 a priori traduire cet ordre selon une codification numérique. Toutefois, les extréma 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 COLORIMETRIQUE 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).

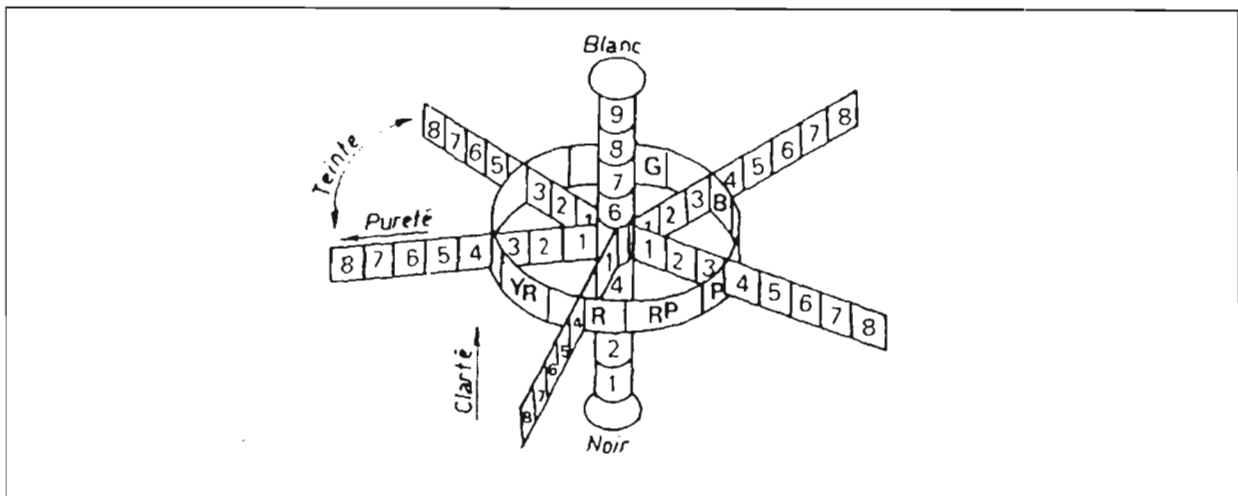


Figure A.6. L'espace des couleurs Munsell et ses coordonnées cylindriques. D'après ESCADAFAL et al., 1988.

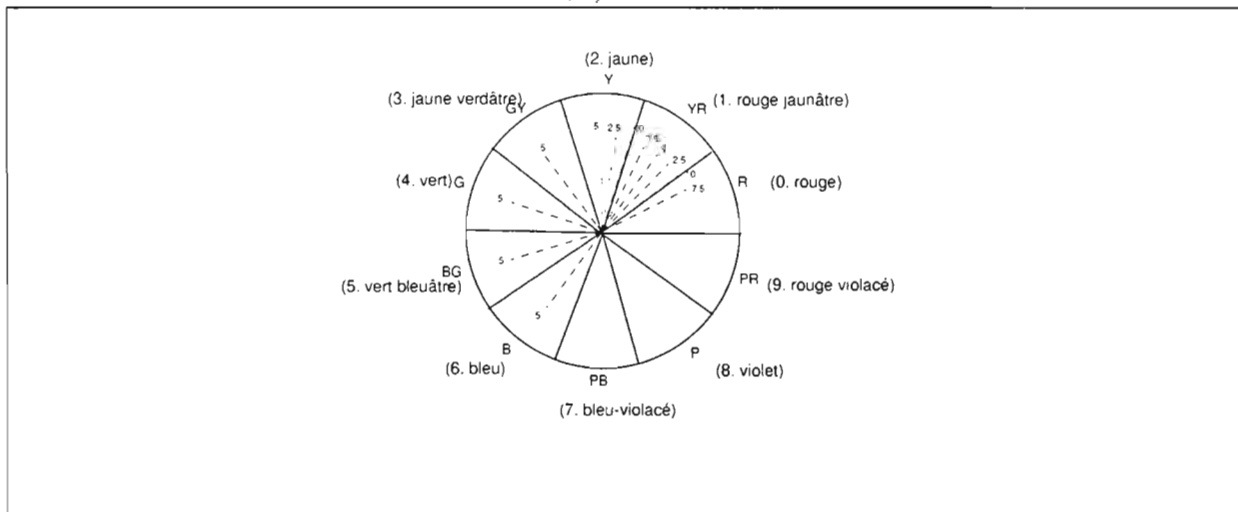


Figure A.7. Répartition des teintes Munsell sur le cercle colorimétrique.

On peut donc affecter à chaque teinte munsell une valeur d'angle H :

$$H \text{ (en degré s)} = 36 \cdot \left(n + \frac{I_{\text{teinte}}}{10} \right)$$

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	IA b	IIA 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

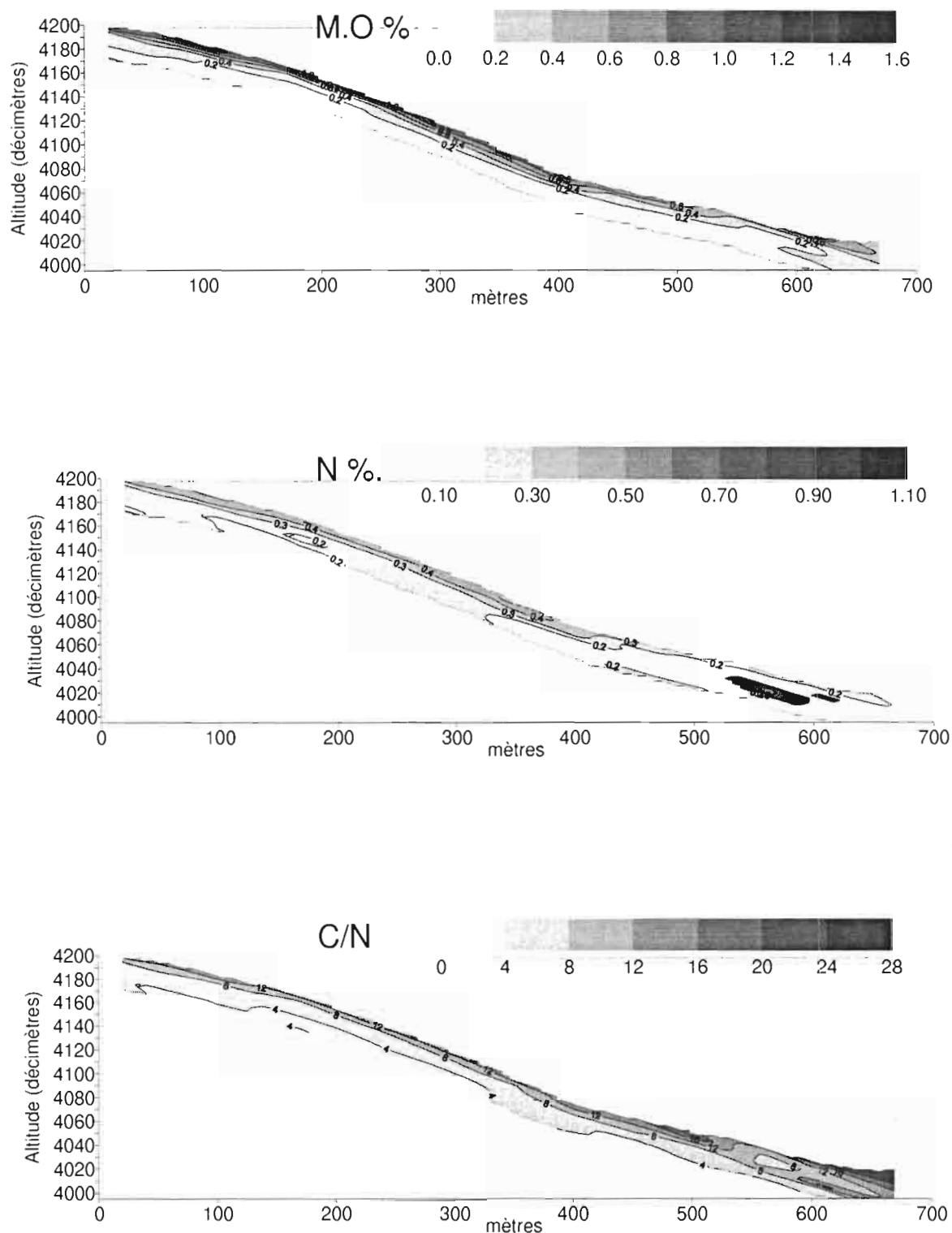
HORIZON	Fe203 %	
	total	libre
A cn	2.9	2.5
A	1.3	1.2
E	1.9	1.7
E a	1.2	1.1
B cn d	6.8	5.6
B s m	9.5	8.0
B s	11.6	9.4
S s	9.9	8.5
I SC s	8.9	7.8
II SC s	10.8	9.4
III SC s	10.6	9.6
S g	12.4	10.7
G	7.5	5.8
X cn	8.2	7.2
X u	7.9	7.1
I A b	1.3	1.0
II A b	1.4	1.2

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. SEQUENCES ANALYTIQUES DU TRANSECT B¹

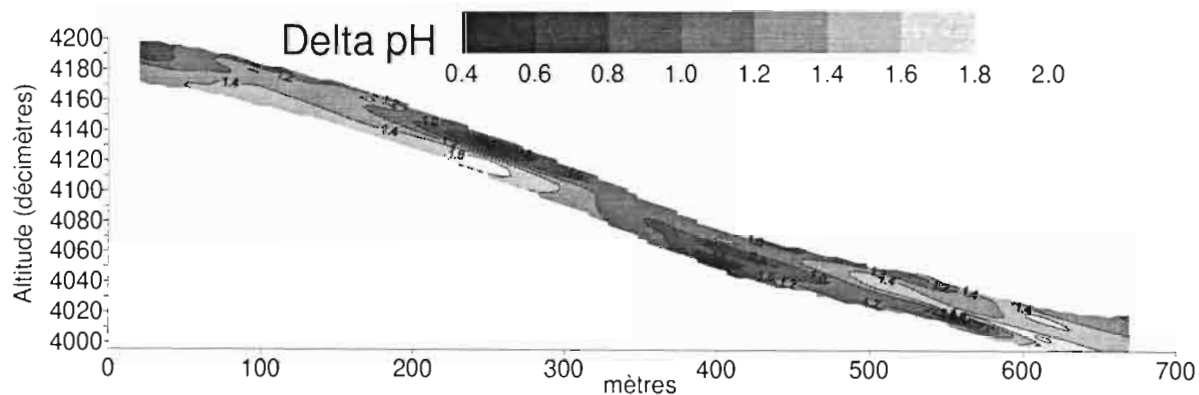
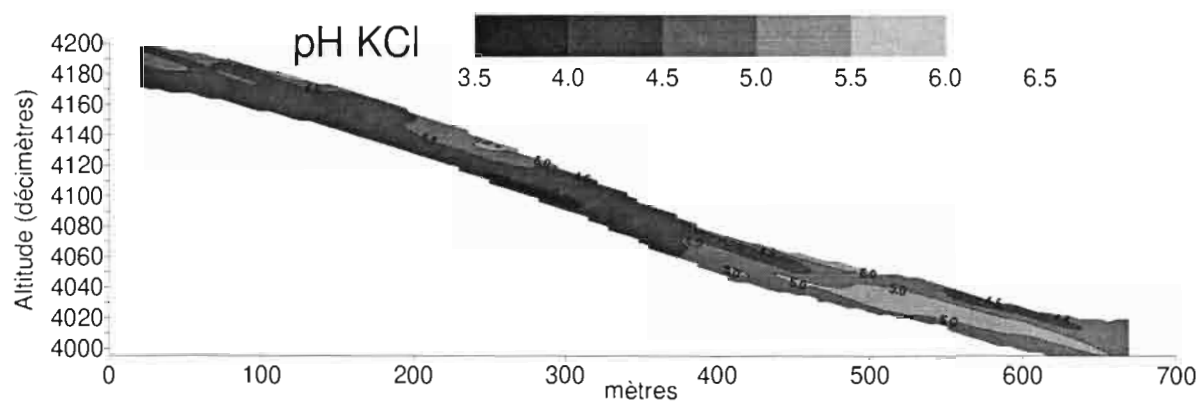
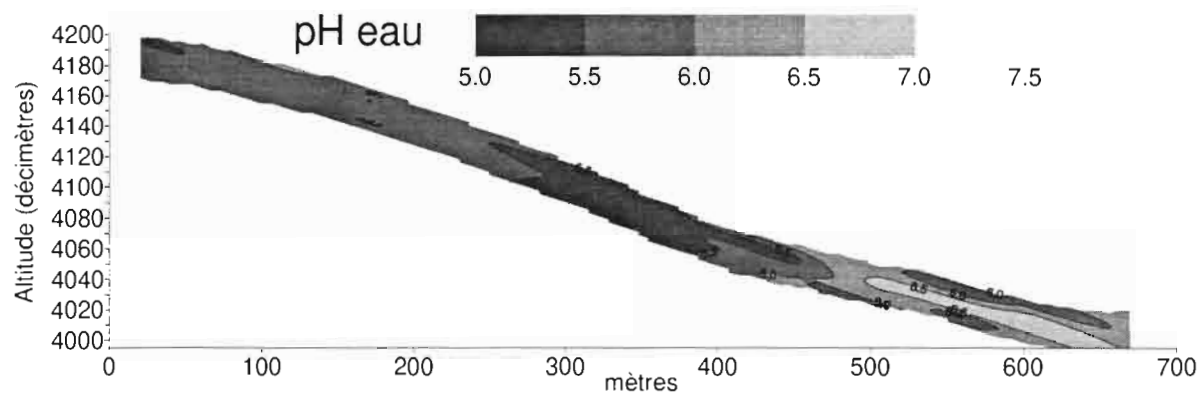
Nb : toutes les séquences ci-après concernent la fraction 0-2 mm du sol.

G.1. Matière organique

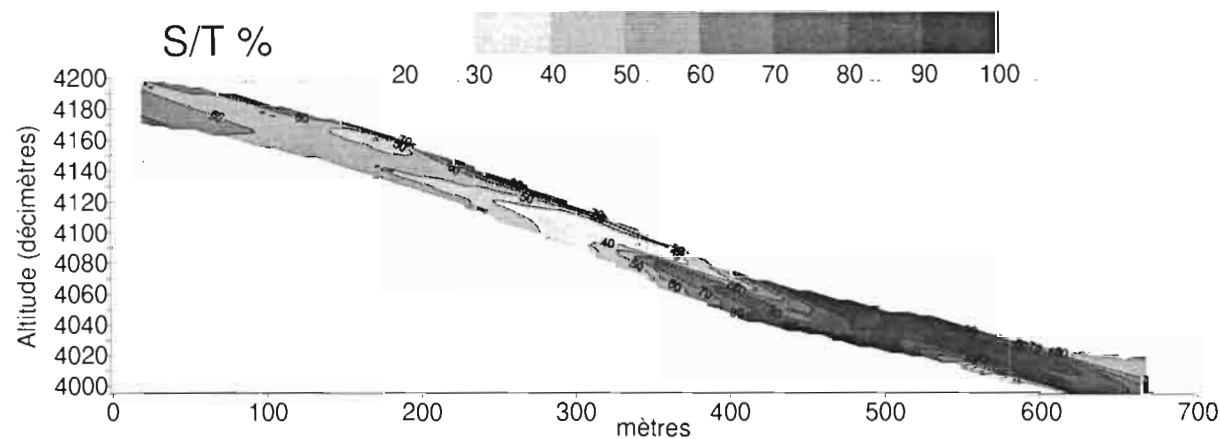
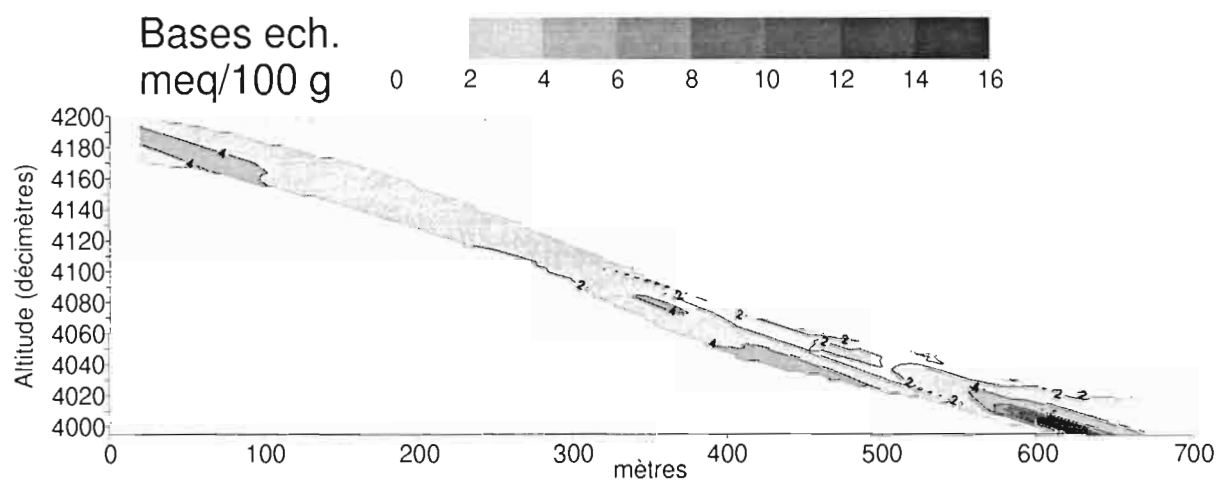
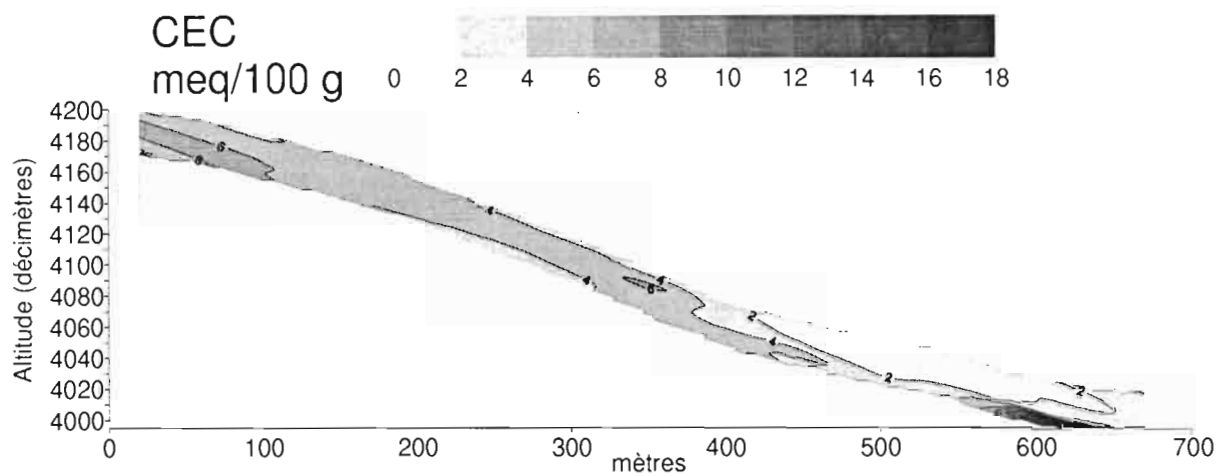


¹ Les méthodes d'analyse et de réalisation de ces séquences sont précisées au chapitre 4.1.

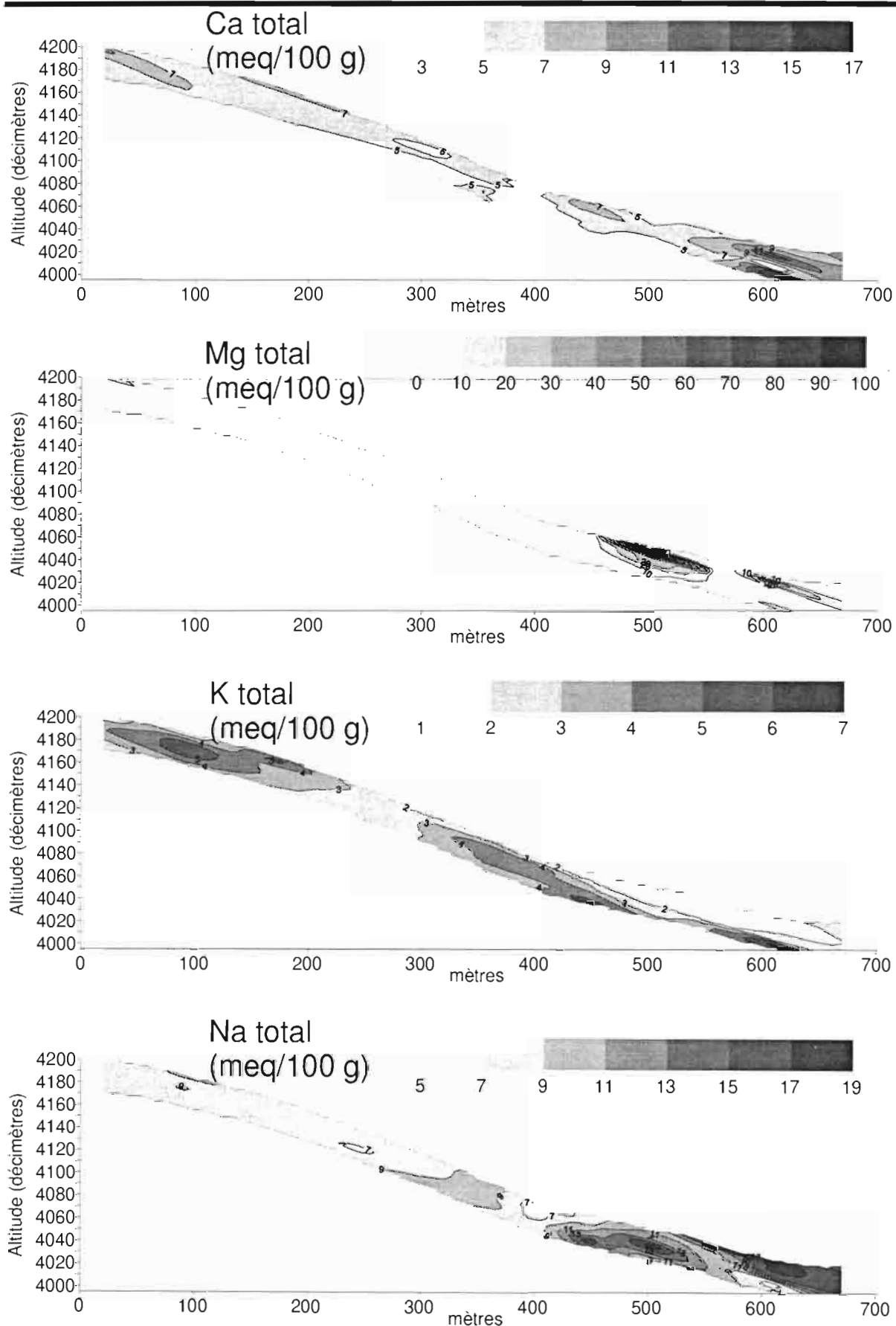
G.2. pH



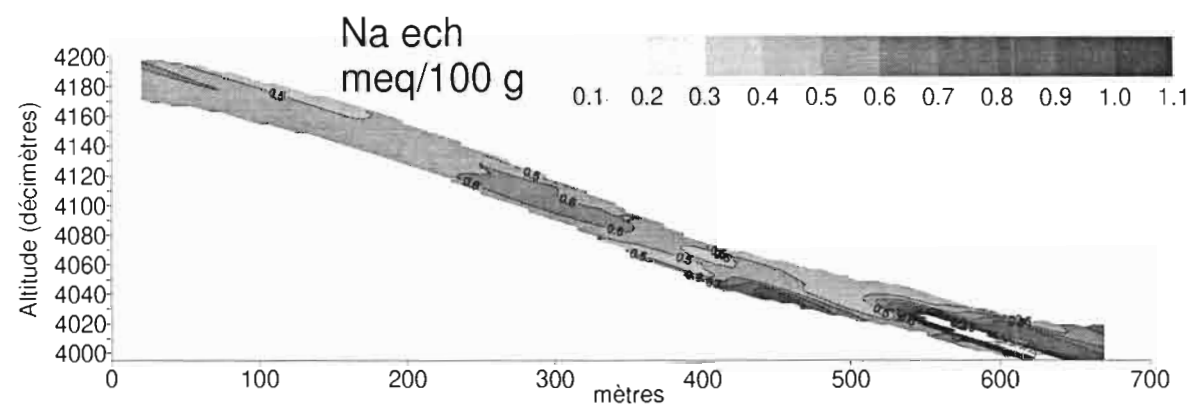
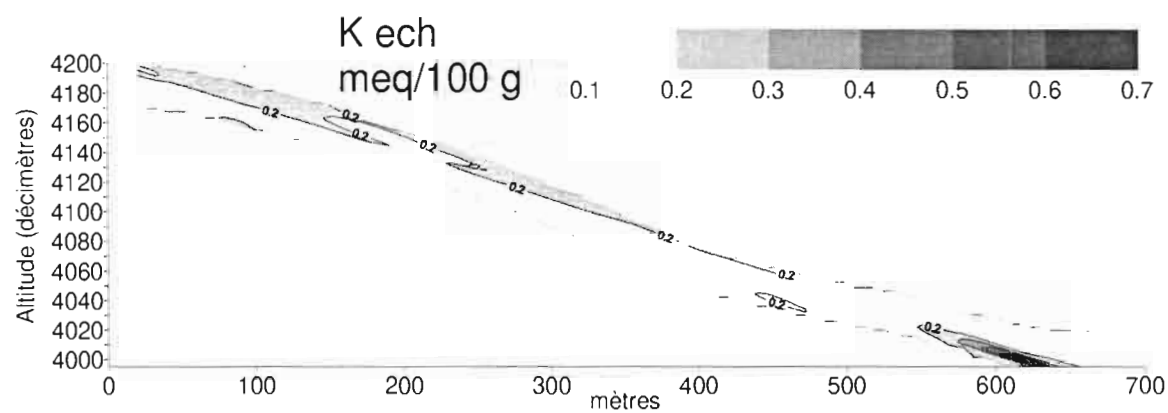
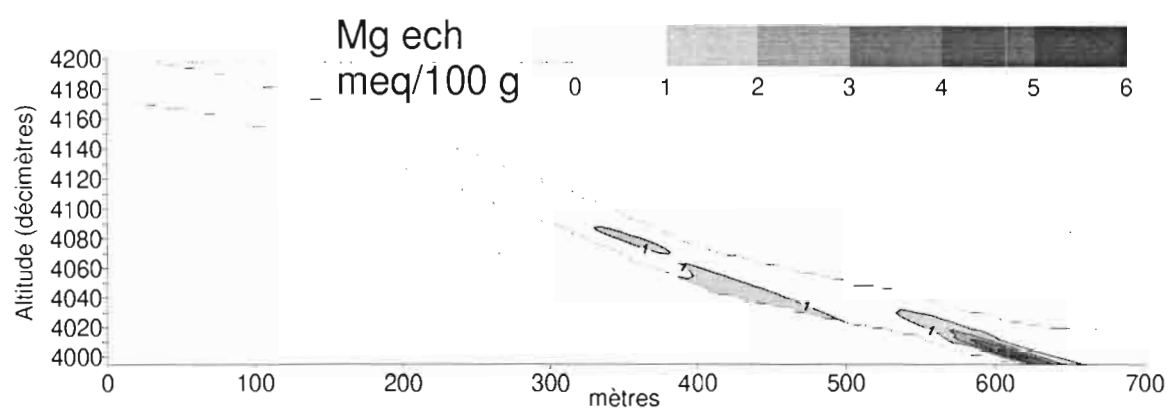
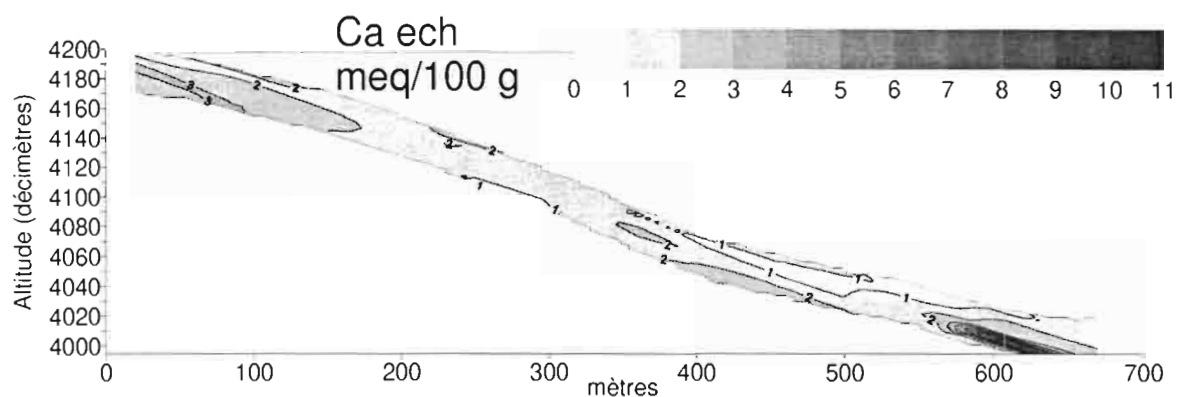
G.3. Complexe adsorbant



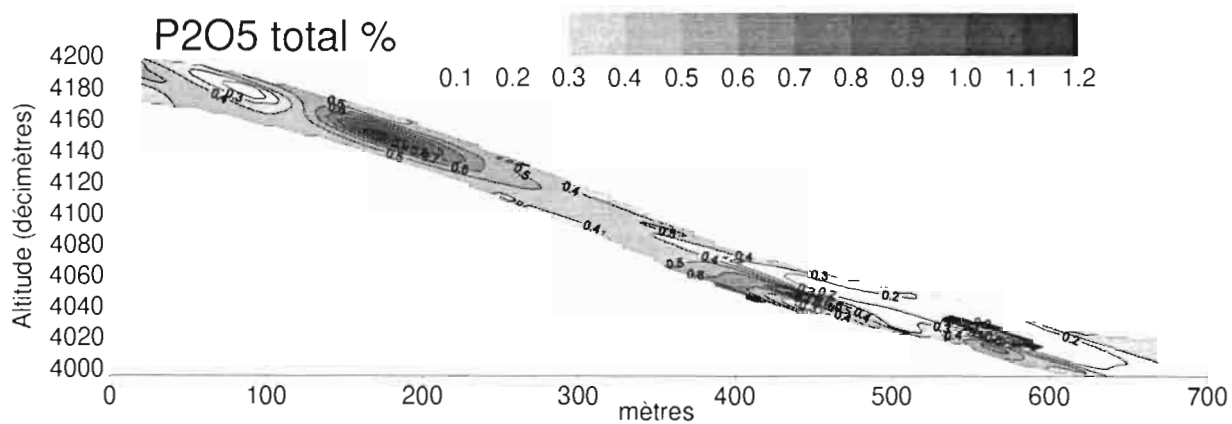
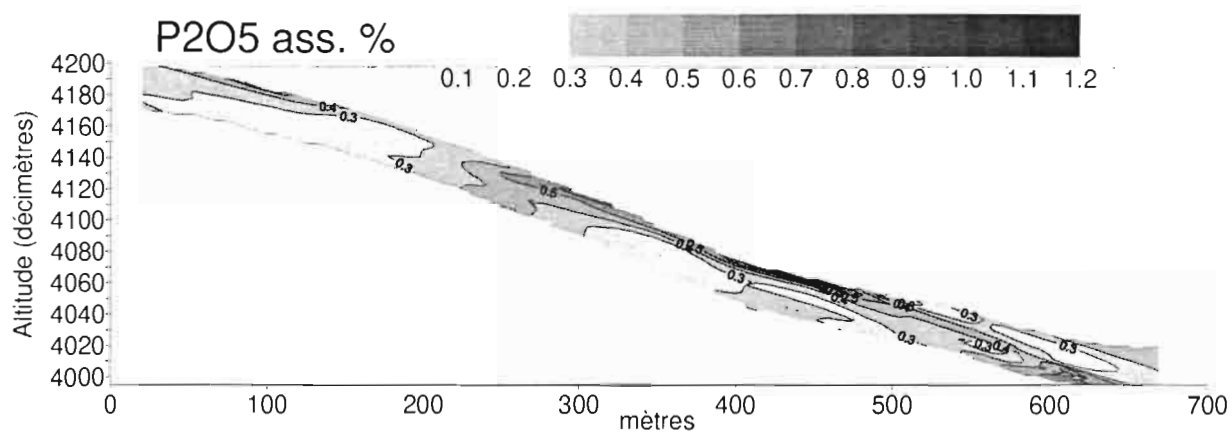
G.4. Bases totales



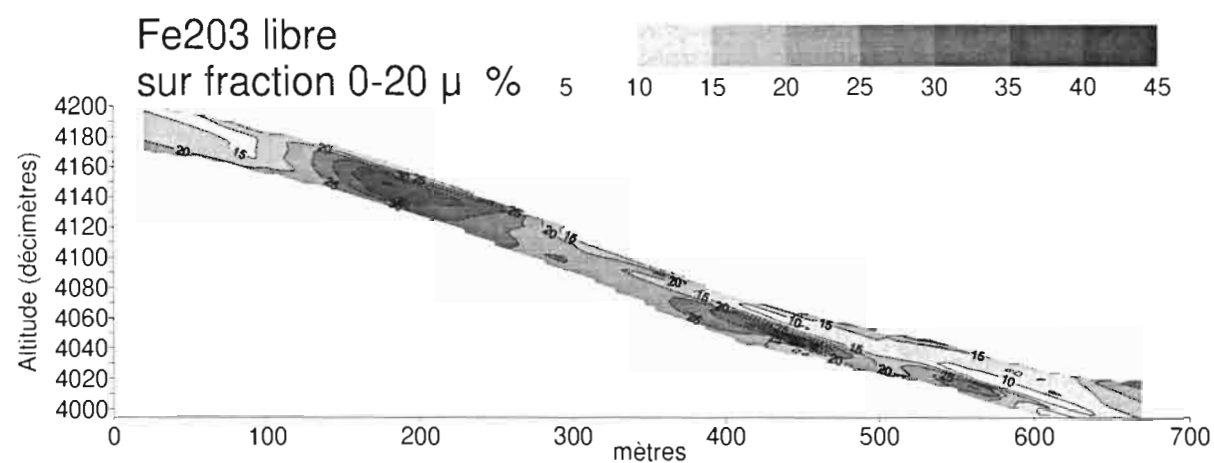
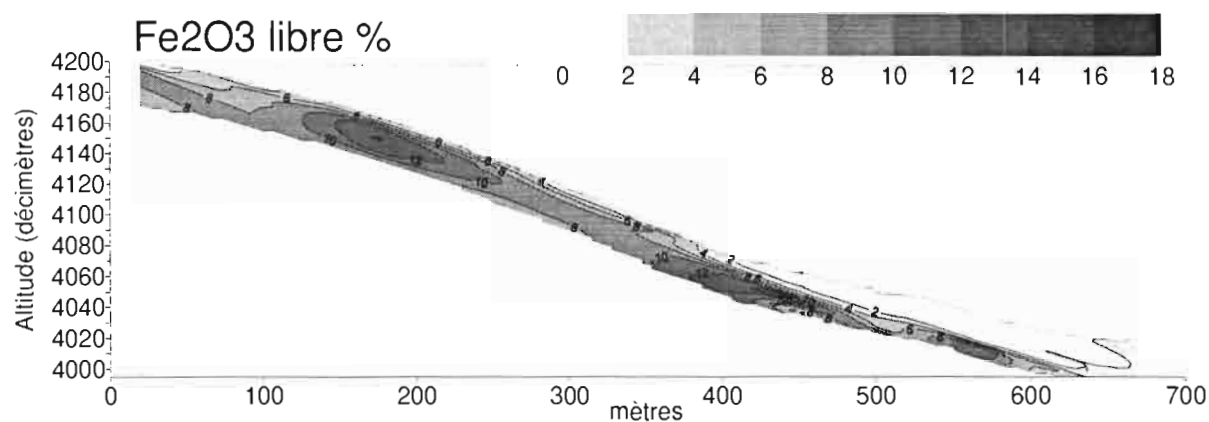
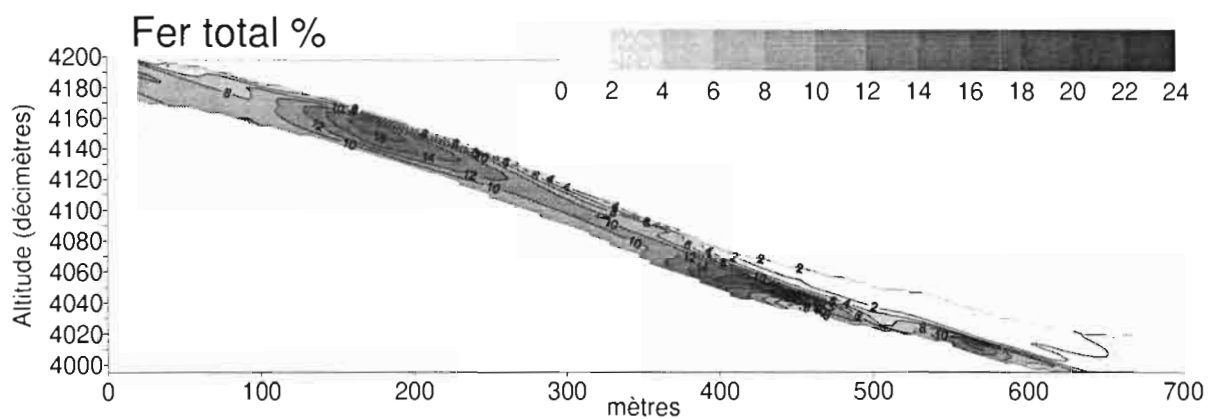
G.5. Bases échangeables



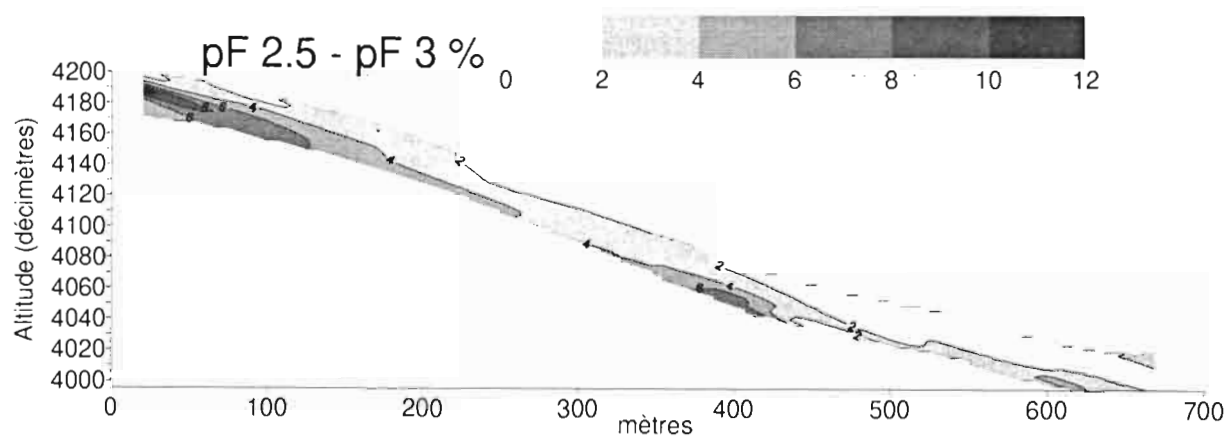
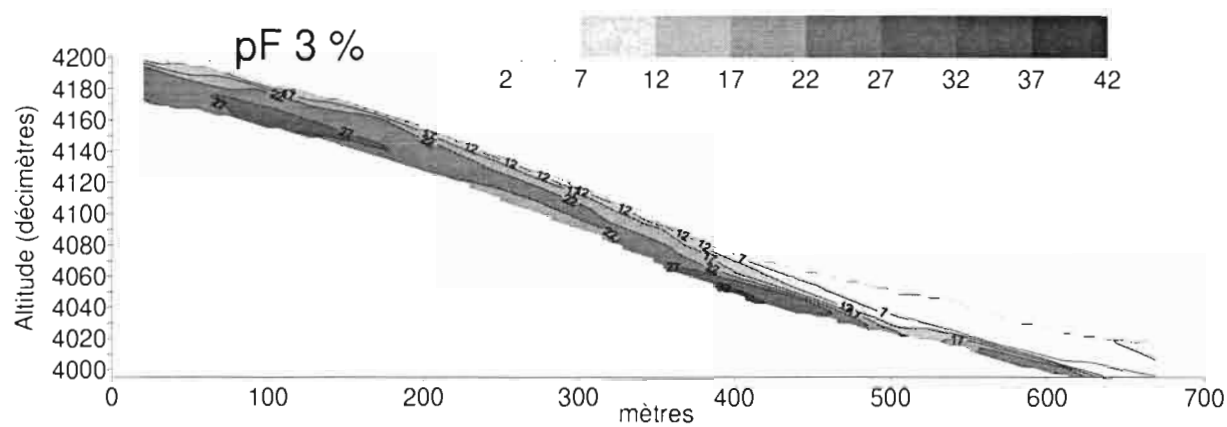
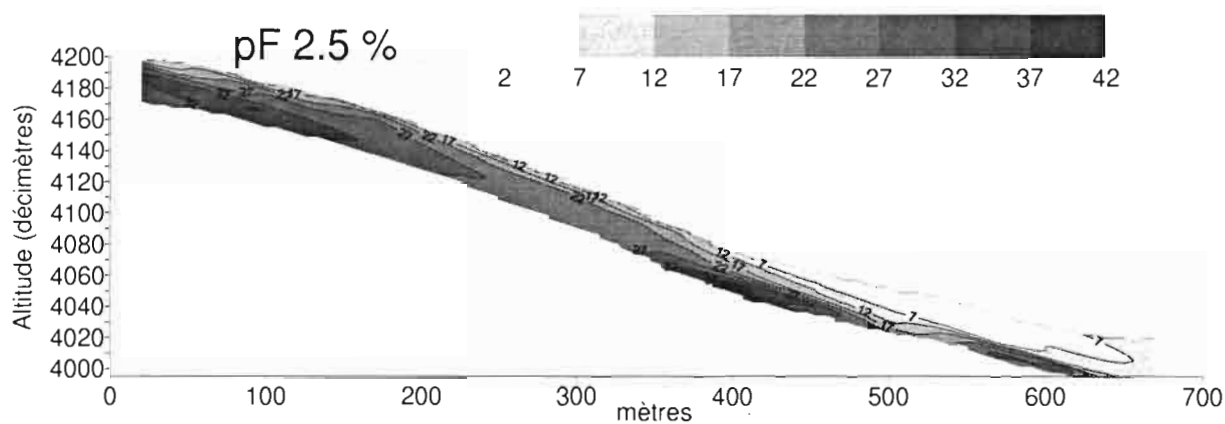
G.6. Phosphore



G7. Fer



G.8. pF



ANNEXE H. CARACTERISTIQUES 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 cm
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	E	Ea	X cn
	0 37	37 117	117 143	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 MATIERES
LISTE DES ILLUSTRATIONS

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	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
1.2.1. Le modelé-type.....	13
1.2.2. La végétation-type.....	15
1.2.3. La pédoséquence-type	15
1.2.4. l'hydroséquence-type	18
1.3. <i>Conclusion du chapitre 1</i>	21
CHAPITRE 2. CHOIX D'UN VERSANT REPRÉSENTATIF DU PAYSAGE.....	23
2.1. <i>Choix et caractéristiques de la région</i>	24
2.1.1. Climatologie de la région d'Ayengré	27
2.1.2. Géologie de la région d'Ayengré	27
2.1.3. Modelé de la région d'Ayengré.....	28
2.1.4. Pédologie de la région d'Ayengré	29
2.2. <i>Choix du versant</i>	31
2.3. <i>Conclusion du chapitre 2</i>	32
CHAPITRE 3. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU VERSANT REPRÉSENTATIF.....	33
3.1. <i>La climatologie du versant</i>	33
3.1.1. Pluviosité	33
3.1.2. Demande climatique.....	35
3.1.3. Température	38
3.2. <i>La géologie du versant</i>	39
3.3. <i>La topographie du versant</i>	40
3.3.1. Altimétrie	41
3.3.2. Formes de terrain	42
3.3.3. Pente et unités de modelé	42
3.3.4. Convexité	44
3.4. <i>La morpho-pédologie du versant</i>	44
3.5. <i>L'occupation du sol du versant</i>	47
3.5.1. L'occupation ancienne	47
3.5.2. L'occupation actuelle.....	47
3.6. <i>Conclusion du chapitre 3</i>	49
CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE.....	51
DEUXIÈME PARTIE : L'HYDROPÉDOSÉQUENCE SUR LE VERSANT REPRÉSENTATIF	53
CHAPITRE 4. LA PÉDOSÉQUENCE.....	57
4.1. <i>Les méthodes d'étude</i>	57
4.1.1. Constitution d'un outil de stockage de l'information.....	57
4.1.1.A. La table de description de v.e.r. de référence.	58
4.1.1.B. La table de données physico-chimiques.	60
4.1.1.C. La table de rattachement de v.e.r. aux v.e.r. de référence.	60
4.1.2. Acquisition de l'information pédologique	60
4.1.2.A. Etude des volumes élémentaires de résolution	60
4.1.2.A.1. Description morphologique et localisation des v.e.r	60
4.1.2.A.2. Analyse chimique, minéralogique, et micro morphologique des v.e.r de référence	63
4.1.2.B. Etude de transitions latérales au sein de la couverture pédologique	64
4.1.3. Traitement de l'information pédologique	65
4.1.3.A. Détermination de l'organisation pédologique du versant	65
4.1.3.A.1. L'identification des horizons	65
4.1.3.A.2. La localisation des horizons en coupes et plans	66
4.1.3.A.3. Le rattachement des horizons à des références.....	67
4.1.3.B. Constitution de séquences de caractères analytiques.....	67

4.2. <i>L'organisation pédologique du versant</i>	69
4.2.1. Organisation spatiale et caractéristiques des horizons pédologiques	69
4.2.1.A. Distribution des horizons dans l'espace.....	69
4.2.1.A.1. Distribution des horizons en coupes	69
4.2.1.A.2. Distribution des horizons en plans	75
4.2.1.B. Caractéristiques d'enveloppe et de contenu des horizons	76
Horizon 1 : arène micacée (horizon C).....	78
Ensemble d'horizons 2,3 et 4 : horizons altéritiques à matrice rouge (horizons SC s).....	78
Horizon 5 : horizon argileux jaune-gris (horizon S g')	79
Horizon 6 : horizon argileux rouge (horizon S s)	80
Horizon 7 : horizon argileux verdâtre (horizon G).....	80
Ensemble d'horizons 8 et 9 : horizons indurés (horizons B s plinthique et B s m)	81
Horizon 10 : horizon argileux ocre à gravillons (horizon B cn d)	82
Ensemble d'horizons 11 et 12 : horizons à nodules ferrugineux ou gravats de quartz (horizons X)	82
Ensemble d'horizons 13 et 14 : horizons humifères enfouis (horizons Ab)	83
Ensemble d'horizons 15 et 16 : horizons sableux non humifères (horizons E).....	83
Horizon 17 : horizon sableux humifère à gravillons (horizon A cn)	84
Horizon 18 : horizon sableux humifère (horizon A).....	85
Ensemble d'horizons 19 et 20 : horizons ferriques cuirassés (horizons FE m)	85
4.2.2. Interprétations génétiques	87
4.2.2.A. Interprétations individuelles des horizons	87
Horizon 1 : arène micacée (horizon C).....	87
Ensemble d'horizons 2,3 et 4 : horizons altéritiques à matrice rouge (horizons SC s).....	87
Horizon 5 : horizon argileux jaune-gris (horizon S g')	89
Horizon 6 : horizon argileux rouge (horizon S s)	89
Horizon 7 : horizon argileux verdâtre (horizon G).....	90
Ensemble d'horizons 8 et 9 : horizons indurés (horizons B s plinthique et B s m)	90
Horizon 10 : horizon argileux ocre à gravillons (horizon B cn d)	91
Ensemble d'horizons 11 et 12 : horizons à nodules ferrugineux ou gravats de quartz (horizons X)	91
Ensemble d'horizons 13 et 14 : horizons humifères enfouis (horizons Ab)	92
Ensemble d'horizons 15 et 16 : horizons sableux non humifères (horizons E).....	92
Horizon 17 : horizon sableux humifère à gravillons (horizon A cn)	93
Horizon 18 : horizon sableux humifère (horizon A).....	94
Ensemble d'horizons 19 et 20 : horizons ferriques cuirassés (horizons FE m)	94
4.2.2.B. Résumé des interprétations à l'échelle du versant.....	95
4.2.2.B.1. Origine du matériau parental des horizons.....	95
4.2.2.B.2. Transformations conduisant à la différenciation des horizons	96
4.3. <i>Les séquences de caractères analytiques</i>	99
4.3.1. Les séquences de couleur	99
4.3.1.A. Séquences de teinte, pureté et clarté moyennes.....	100
4.3.1.B. La séquence du red ratio moyen	102
4.3.2. Les séquences granulométriques	102
4.3.3. La séquence de porosité	104
4.3.4. La séquence de perméabilité	104
4.4 <i>Conclusion du chapitre 4</i>	105
CHAPITRE 5. L'HYDROSÉQUENCE	107
5.1 <i>Le dispositif</i>	107
5.1.1. Choix du transect	107
5.1.2. Instrumentation	109
5.2 <i>Résultats et interprétations</i>	110
5.2.1. Allure générale du toit piézométrique	111
5.2.2. Examen de stations piézométriques représentatives des domaines pédologiques	112
5.2.2.A. Stations du domaine ferrallitique	112
5.2.2.A.1. Station 1	112
5.2.2.A.2. Station 1/2.....	113
5.2.2.B. Stations du domaine ferrugineux.....	114
5.2.2.B.1. Station 6/7	114
5.2.2.B.2. Station 7/8	115
5.2.2.C. Stations du domaine hydromorphe	116
5.2.2.C.1. Station 9	116
5.2.2.C.2. Station 10	116
5.2.3. Séquences de fréquences d'engorgement.....	117
5.2.3.A. Séquence de fréquences annuelles d'engorgement	118
5.2.3.B. Séquences de fréquences mensuelles d'engorgement et dynamique saisonnière des nappes.....	120
5.3 <i>Conclusion du chapitre 5</i>	122

CHAPITRE 6. RELATIONS ENTRE PÉDOSEQUENCE ET HYDROSEQUENCE.....	123
6.1. <i>Relations statistiques entre la fréquence annuelle d'engorgement et le type d'horizon pédologique</i>	124
6.2. <i>Relations statistiques entre la fréquence annuelle d'engorgement et les variables pédologiques quantitatives</i>	128
6.2.1. Relations entre la fréquence d'engorgement et les variables physico-chimiques.....	128
6.2.2. Relations entre la fréquence d'engorgement et la couleur des matériaux.....	129
6.2.2.A. Relations entre la fréquence d'engorgement et la pureté (chroma).....	130
6.2.2.B. Relations entre la fréquence d'engorgement et la clarté (value).....	130
6.2.2.C. Relations entre la fréquence d'engorgement et la teinte.....	130
6.2.2.D. Relations entre la fréquence d'engorgement et le Red ratio.....	131
6.3. <i>Conclusion du chapitre 6</i>	132
CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE.....	135
TROISIÈME PARTIE : RELATIONS ENTRE L'HYDROPÉDOSÉQUENCE ET LE COMPORTEMENT D'UNE PLANTE CULTIVÉE.	137
CHAPITRE 7. RELATIONS ENTRE L'HYDROPÉDOSÉQUENCE ET LE COMPORTEMENT DU COTONNIER.....	141
7.1. <i>Matériel et méthodes</i>	142
7.1.1. Les conditions de la culture.....	142
7.1.1.A. les surfaces mises en culture et leurs caractéristiques.....	142
7.1.1.B. le matériel végétal et les techniques culturales.....	143
7.1.2. Les méthodes.....	144
7.1.2.A. méthodes utilisées à l'échelle des groupes de parcelles.....	144
7.1.2.B. méthodes utilisées à l'échelle intraparcellaire.....	145
7.2. <i>Résultats et interprétations</i>	148
7.2.1. Résultats et interprétations à l'échelle des groupes de parcelles.....	148
7.2.1.A. Les variations inter annuelles du rendement des micro parcelles.....	148
7.2.1.B. Les variations spatiales de la récolte.....	150
7.2.1.B.1. Détermination des variables agronomiques régionalisées.....	152
7.2.1.B.2. Orientation préférentielle de la variabilité spatiale des variables agronomiques régionalisées.....	154
7.2.1.C. Les variations spatiales de la récolte en fonction des domaines pédologiques.....	156
7.2.2. Résultats et interprétations à l'échelle intraparcellaire.....	157
7.2.2.A. Les caractéristiques hydro-pédologiques des sites.....	157
7.2.2.A.1. Caractéristiques pédologiques.....	158
7.2.2.A.2. Caractéristiques hydrologiques.....	159
7.2.2.B. La croissance du cotonnier selon le site.....	161
7.2.2.B.1. Evolution du système aérien.....	161
7.2.2.B.2. Evolution du système racinaire.....	164
7.2.2.C. Les contraintes hydro-pédologiques selon le site.....	165
7.2.2.C.1. Les contraintes dans le site ferrallitique.....	165
7.2.2.C.2. Les contraintes dans le site ferrugineux amont.....	166
7.2.2.C.3. Les contraintes dans le site ferrugineux aval.....	167
7.3. <i>Conclusion du chapitre 7</i>	168
CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE.....	171
CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	173
1. <i>L'inventaire des ressources naturelles en terre et en eau</i>	175
2. <i>L'évaluation de l'aptitude agricole des ressources</i>	177
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	179
ANNEXES.....	193
ANNEXE A. RELEVÉS BOTANIQUES.....	195
A1. <i>Espèces à large spectre de répartition</i>	195
A2. <i>Espèces étagées</i>	196
ANNEXE B. S.G.D.B. RELATIONNEL.....	197
ANNEXE C. EXEMPLE DE FICHE DE SAISIE INFORMATISÉE DES DONNÉES PÉDOLOGIQUES.....	200
ANNEXE D. CODAGE NUMÉRIQUE DES VARIABLES DESCRIPTIVES DES VOLUMES PÉDOLOGIQUES.....	204
D.1. <i>Codage numérique de la texture</i>	205
D.2. <i>Codage numérique de la porosité</i>	206
D.3. <i>Codage numérique de la nature et de l'abondance des éléments grossiers</i>	207
D.4. <i>Codage numérique de la nature et de l'abondance des éléments figurés</i>	209

<i>D.5. Codage numérique de la couleur et de l'abondance des phases meubles.</i>	209
<i>D.6. Codage numérique de la cimentation, de la pénétrabilité et de la fragilité du matériau.</i>	211
<i>D.7. Codage numérique de la structure et de la fissuration.</i>	211
<i>D.8. Codage numérique de la forme et de la netteté des limites inférieures des v.e.r.</i>	211
ANNEXE E. ESPACE COLORIMÉTRIQUE MUNSELL ET QUANTIFICATION DES TEINTES	212
ANNEXE F. PHYSICO-CHIMIE DES PRINCIPAUX HORIZONS	214
ANNEXE G. SÉQUENCES ANALYTIQUES DU TRANSECT B	216
<i>G.1. Matière organique</i>	216
<i>G.2. pH</i>	217
<i>G.3. Complexe adsorbant</i>	218
<i>G.4. Bases totales</i>	219
<i>G.5. Bases échangeables</i>	220
<i>G.6. Phosphore</i>	221
<i>G.7. Fer</i>	222
<i>G.8. pF</i>	223
ANNEXE H. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SITES AGRONOMIQUES	224
<i>H.1. Site ferrallitique</i>	224
<i>H.2. Site ferrugineux amont</i>	225
<i>H.3. Site ferrugineux aval</i>	226
TABLE DES MATIÈRES, LISTE DES ILLUSTRATIONS	227
TABLE DES MATIÈRES	229
LISTE DES ILLUSTRATIONS	233
<i>Liste des figures</i>	233
<i>liste des tableaux</i>	235
<i>Liste des planches</i>	236

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

<i>Figure 1. Approche générale de l'inventaire et de l'évaluation des ressources naturelles en terre et en eau en Afrique de l'ouest. D'après P. BRABANT, 1991 b.</i>	3
<i>Figure I-1. Esquisse des climats d'Afrique de l'ouest. D'après TOUPET (1971) et CHAUVEL (1977).</i>	10
<i>Figure I-2. La végétation au sud du Sahara. In VALENTIN et al., 1990.</i>	10
<i>Figure I-3. Carte des sols d'Afrique de l'ouest. D'après MOREAU (1993).</i>	11
<i>Figure I-4. Esquisse géologique de l'Afrique de l'ouest. D'après LEPRUN (1979)</i>	11
<i>Figure I-5. Extension géographique du paysage de référence.</i>	12
<i>Figure I-6. Troncature par l'érosion du versant-type. D'après LEVEQUE (1976).</i>	13
<i>Figure I-7. Le modelé du versant-type</i>	13
<i>Figure I-8. Evolution du sommet du versant-type. D'après BEAUDOU et COLLINET (1977).</i>	14
<i>Figure I-9. Répartition de la végétation le long du versant-type.</i>	15
<i>Figure I-10. Organisation pédologique du versant-type.</i>	16
<i>Figure I-12. Trois schémas possibles de fonctionnement hydrodynamique du versant-type.</i>	20
<i>Figure I-13. Résumé de l'état des connaissances sur le paysage de référence.</i>	21
<i>Figure II-1. Carte générale du Togo.</i>	23
<i>Figure II-2. Esquisse géologique du Togo. D'après LOAEC et al.(1982)</i>	24
<i>Figure II-3. Variations latitudinales du régime pluviométrique au Togo. d'après SEGUIS (1988).</i>	25
<i>Figure II-4. Pluviosité moyenne annuelle au Togo. D'après LOAEC et al. (1982).</i>	25
<i>Figure II-5. Localisation des pédoséquences avec terme amont ferrallitique sur le socle granito-gneissique togolais. D'après LEVEQUE (1979).</i>	26
<i>Figure II-6. Pluviométrie relevée à la station de Sotouboa (1984-1989). ETP Penman calculée à partir des relevés de la station de Sokodé</i>	27
<i>Figure II-7. Géologie de la région d'Ayengré. Extrait de la carte géologique au 1/200.000 ème. Feuille Sokodé.</i>	28
<i>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).</i>	29
<i>Figure II-9. Extrait de la carte pédologique au 1/200.000 ème. Région d'Ayengré. D'après LEVEQUE (1979).</i>	30
<i>Figure II-10. Transects pédologiques dans la région d'Ayengré et interprétation.</i>	31
<i>Figure III-1. Pluviosités mensuelles moyennes sur le site. Période 1974-1992.</i>	34
<i>Figure III-2. Comparaison entre le régime pluviométrique au cours des 4 années de l'étude (1989-1992) et celui de la période 1974-1992.</i>	35
<i>Figure III-3. Comparaison entre les fréquences des hauteurs quotidiennes précipitées pour la période de cette étude (1989-1992) et la période 1974-1992.</i>	35
<i>Figure III-4. Evaporation bac sur le site. Moyenne quotidienne par pentade. Période du 1.07.1989 au 31.09.1992.</i>	37
<i>Figure III-5. Relation entre l'évaporation bac mesurée sur le site et l'ETP calculée à Sokodé.</i>	38
<i>Figure III-6. Température moyenne pentadaire sur le site. Valeurs obtenues par moyenne glissante. Période 1990-1992</i>	38
<i>Figure III-7. Délimitation du secteur topographié sur le bassin versant élémentaire.</i>	40
<i>Figure III-8. Maille du levé altimétrique.</i>	41
<i>Figure III-9 : Bloc-diagramme altimétrique dérivé du modèle numérique de terrain.</i>	41
<i>Figure III-10 : Bloc-diagramme des formes de terrain dérivées du modèle numérique de terrain.</i>	42
<i>Figure III-11 : Bloc-diagramme des pentes dérivées du modèle numérique de terrain.</i>	42
<i>Figure III-12. Profil en long généralisé de la partie centrale du site.</i>	43
<i>Figure III-13. Profil en long détaillé sur deux transects</i>	43
<i>Figure III-14 : Bloc-diagramme des convexités dérivées du modèle numérique de terrain.</i>	44
<i>Figure III-15. Implantation en transects des fosses pédologiques</i>	44
<i>Figure III-16. Bloc-diagramme de reconnaissance morphopédologique sur le versant.</i>	46
<i>Figure III-17. Occupation du sol au 15/09/1990</i>	48
<i>Figure III-18. Relevé des termitières actives de macrotermes</i>	48

<i>Figure III-19. Séquence d'évolution d'un nid de macrotermes créant une macroporosité tubulaire dans le sol.</i>	49
<i>Figure IV-1. Structure générale et fonction de la base de données pédologiques.</i>	58
<i>Figure IV-2. Localisation des fosses, des sondages de raccordement et des tranchées sur deux transects.</i>	62
<i>Figure IV-3. Organisation en coupes des horizons pédologiques.</i>	70
<i>Figure IV-4. Tomographies des horizons pédologiques.</i>	76
<i>Figure IV-5. Les ensembles d'horizons selon l'origine de leur matériau parental (interprétation).</i>	96
<i>Figure IV-6. Processus génétiques et filiations entre les horizons issus de l'altération de la roche (interprétation).</i>	96
<i>Figure IV-7. Processus génétiques et filiation entre les horizons issus d'apport (interprétation).</i>	97
<i>Figure IV-8. Hypothèses hydrologiques à l'échelle du versant issues de l'interprétation des horizons.</i>	98
<i>Figure IV-9. Teinte, clarté et pureté moyennes. transect B.</i>	101
<i>Figure IV-10. Red Ratio moyen. Transect B.</i>	102
<i>Figure IV-11. Estimation des teneurs en hématite d'après le Red Ratio. Transect B.</i>	102
<i>Figure IV-12. Granulométrie. Transect B.</i>	103
<i>Figure IV-13. Porosité. Transect B</i>	104
<i>Figure IV-14. Estimation de la perméabilité par la formule de SAXTON (1986).</i>	105
<i>Figure V-1. Orientation des écoulements de surface et localisation des transects.</i>	108
<i>Figure V-2. Indice topographique de Beven et localisation des transects.</i>	109
<i>Figure V-3. Dispositif implanté sur le transect B.</i>	110
<i>Figure V-4. Schéma d'une fosse couverte.</i>	110
<i>Figure V-5. Schéma d'un tube piézométrique.</i>	110
<i>Figure V-6. Relevés piézométriques le long du transect et pluviosité. Période 1989-1992</i>	111
<i>Figure V-7. Variations du toit piézométrique par rapport à la position sur le transect et le temps. Période 1989-1992</i>	112
<i>Figure V-8. Relevés piézométriques de deux stations du domaine amont ferrallitique</i>	114
<i>Figure V-9. Relevés piézométriques de deux stations du domaine médian ferrugineux</i>	115
<i>Figure V-10. Relevés piézométriques de deux stations du domaine aval hydromorphe</i>	117
<i>Figure V-11. Séquence des fréquences annuelles d'engorgement (calcul sur la période du 30/09/1991 au 30/09/1992).</i>	118
<i>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).</i>	119
<i>Figure V-13. Séquences des fréquences mensuelles d'engorgement (calcul sur la période du 30/09/1989 au 30/09/1992)</i>	121
<i>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 .</i>	124
<i>Figure VI-2. Correspondance entre groupes d'horizons pédologiques et fréquences moyennes annuelles d'engorgement.</i>	127
<i>Figure VI-3. Diagrammes de dispersion des bases échangeables en fonction de la fréquence annuelle d'engorgement .</i>	129
<i>Figure VI-4. Relations entre teintes (phase principale, teinte "moyenne") et fréquence moyenne annuelle d'engorgement.</i>	131
<i>Figure VI-5. Relations entre Red ratios (phase principale, Red ratio "moyen") et fréquence moyenne annuelle d'engorgement.</i>	132
<i>Figure VII-1. Localisation du périmètre de la station d'essai de culture cotonnière par rapport aux domaines pédologiques</i>	141
<i>Figure VII-2. Délimitation des domaines pédologiques sur les deux groupes de parcelles</i>	142
<i>Figure VII-3. Subdivision d'une parcelle en 120 micro parcelles</i>	145
<i>Figure VII-4. Localisation des sites étudiés et détail du dispositif.</i>	147
<i>Figure VII-5. Variabilité inter annuelle du rendement des micro parcelles.</i>	149
<i>Figure VII-6. Relations entre les rendements 1989, 1990 et 1991 des micro parcelles (kg/ha). Groupe de parcelles 1.</i>	149
<i>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).</i>	151
<i>Figure VII-8. Variogramme omnidirectionnel du rendement (1989). Groupe de parcelles 1.</i>	153
<i>Figure VII-9. Variogramme omnidirectionnel de la hauteur des plants (1989). Groupe de parcelles 1.</i>	153
<i>Figure VII-10. Variogramme omnidirectionnel du diamètre du pivot (1989). Groupe de parcelles 1.</i>	153
<i>Figure VII-11. Variogramme omnidirectionnel de la profondeur du pivot (1989). Groupe de parcelles 1.</i>	153
<i>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.</i>	155

<i>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.</i>	156
<i>Figure VII-14. Profils pédologiques des 3 sites.</i>	158
<i>Figure VII-15. Profils de résistance mécanique à la pénétration des 3 sites.</i>	159
<i>Figure VII-16. Evolution du toit de la nappe selon le site. Campagne 1991.</i>	160
<i>Figure VII-17. Profils de fréquence annuelle d'engorgement selon le site. Année 1991.</i>	161
<i>Figure VII-18. Evolution de la hauteur de la tige principale selon le site. Campagne 19910. D'après AUDEBERT (1993).</i>	162
<i>Figure VII-19. Evolution de l'indice foliaire (L.A.I) selon le site. campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).</i>	163
<i>Figure VII-20. Production de matière sèche selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).</i>	164
<i>Figure VII-21. Evolution du front racinaire actif selon le site. Campagne 1991. D'après AUDEBERT (1993).</i>	165
<i>Figure VII-22. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydropédologiques sur le site ferrallitique.</i>	166
<i>Figure VII-23. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydropédologiques sur le site ferrugineux amont.</i>	167
<i>Figure VII-24. Relations entre le développement du front racinaire et les caractéristiques hydropédologiques sur le site ferrugineux aval.</i>	168
<i>Figure A.1. Représentation d'une base de données relationnelles</i>	198
<i>Figure A.2. Exemple de jointure entre tables de données</i>	198
<i>Figure A.3. Correspondance entre analyse granulométrique de laboratoire et codage de terrain.</i>	206
<i>Figure A.4. Relation entre le codage de la quantité d'éléments grossiers par l'échelle de terrain et les analyses de laboratoire.</i>	209
<i>Figure A.5. Optimisation du codage numérique de l'échelle de quantification des phases meubles.</i>	210
<i>Figure A.6. L'espace des couleurs Munsell et ses coordonnées cylindriques. D'après ESCADAFAL et al., 1988.</i>	212
<i>Figure A.7. Répartition des teintes Munsell sur le cercle colorimétrique.</i>	212

liste des tableaux

<i>Tableau III-1. Comparaison entre la pluviosité annuelle moyenne de la période 1974-1992 et les pluviosités annuelles pour la période de cette étude.</i>	34
<i>Tableau III-2. Pluviosités mensuelles moyennes sur le site. Période 1974-1992.</i>	34
<i>Tableau III-3. Evaporation bac sur le site. Moyenne mensuelle pour la période 1989-1992.</i>	37
<i>Tableau III-4. 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).</i>	39
<i>Tableau IV-1. Principales variables descriptives d'un v.e.r. de référence.</i>	59
<i>Tableau IV-2. Une échelle de terrain de quantification absolue.</i>	60
<i>Tableau IV-3. Analyses de laboratoire sur les v.e.r. de référence.</i>	64
<i>Tableau IV-4. Comparaison entre classement manuel des v.e.r. et classements numériques à l'aide d'un indice de similarité.</i>	66
<i>Tableau VI-1. Fréquences annuelles d'engorgement pour chaque horizon pédologique.</i>	125
<i>Tableau VI-2. Comparaison statistique des moyennes de fréquence annuelle d'engorgement par horizon.</i>	125
<i>Tableau VI-3. Regroupement des horizons en ensembles après le test de comparaison des moyennes de fréquence annuelle d'engorgement.</i>	126
<i>Tableau VI-4. Groupes d'horizons à signification pédologique au sein des ensembles définis par le test de comparaison de moyennes</i>	126
<i>Tableau VI-5. Fréquences annuelles d'engorgement par groupe d'horizons</i>	127
<i>Tableau VI-6. Liste des variables physico-chimiques testées</i>	128
<i>Tableau VII-1. Antécédents culturels des 8 parcelles agronomiques utilisées pour l'étude.</i>	143
<i>Tableau VII-2. Traitement agronomique sur les 8 parcelles étudiées.</i>	144
<i>Tableau VII-3. Variations spatiales de la récolte de 1989. Groupe de parcelles 1.</i>	150
<i>Tableau A.1. Espèces végétales largement réparties sur le versant.</i>	195
<i>Tableau A.2. Espèces végétales localisées sur une partie du versant</i>	196
<i>Tableau A.3. Exemple de table de données (glossaire pédologique)</i>	197
<i>Tableau A.4. Codage des variables alphanumériques.</i>	205

<i>Tableau A.5. Codage numérique de la texture</i>	206
<i>Tableau A.6. Discordance d'ordre entre l'estimation de la porosité sur le terrain et les mesures de laboratoire.</i>	207
<i>Tableau A.7. Codage numérique de l'échelle de quantification des éléments grossiers.</i>	208
<i>Tableau A.8. Codage numérique de l'échelle de quantification des phases meubles</i>	211

Liste des planches

<i>Planche 1. Profils du transect B.</i>	71
<i>Planche 2. Aspect macro-morphologique des horizons</i>	77



*"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 glacis quaternaires. Les caractéristiques et la distribution de 20 horizons pédologiques ont permis d'expliquer la différenciation pédologique du versant selon deux facteurs : érosion en glacis 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.

SUMMARY

This study deals with the hydro-pedological characterization and a first evaluation of the agricultural suitability of a hillslope that is representative of a landscape covering more than 500.000 km² in West Africa. This landscape has a tropical climate with one dry season, a savanna vegetation, a granito-gneissic bedrock, and a pedological organization with ferrallitic and ferruginous soils. The hillslope is located in Togo between 1°00'-1°01' longitude East and 8°38'-8°39' latitude North.

⊙ The study of the soil sequence permitted to recognize three pedological domains (ferrallitic, ferruginous and hydromorphic domains). These domains are delimited by slope ruptures, and are associated with several quaternary eroded piedmont slopes. The characteristics and the distribution of 20 pedological horizons permitted to explain the pedological differentiation of the hillslope according to two factors : piedmont slope erosion followed by a partial filling up of downslope; and horizons transformations due to water effects.

The study of the hydrosequence has been carried out during 3 years. This revealed the existence of a perched semipermanent water table, which is localized in ferruginous and hydromorphic domains. This also showed the existence of a deep water table in all the pedological domains.

Relations between soil sequence and hydrosequence have been studied : statistical relations have been found between , on the one hand, the annual frequency of water logging, and , on the other hand, the type of horizon and the color of materials.

Transposition of results at smaller scales would be possible, using numerical models of landscape.

⊙ A first evaluation of the agricultural suitability of this hillslope has been carried out with a cotton cultivation and homogeneous agronomical conditions. This has shown the existence of a sequence of hydro-pedological constraints : resistance to penetration in ferrallitic domain; low fertility and excess of water due to the water table in ferruginous domain.

An extension would be to study other cultivated plants on the entire hillslope.

Key Words : Togo; Granito-gneiss bedrock; Ferrallitic soil; Ferruginous soil; Hydromorphic soil; Topographic sequence; Water table; Cotton.