

E.N.S.A. de RENNES

Département : Productions Végétales

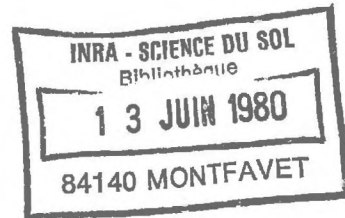
N° D'ORDRE : 79 1

SÉRIE : D

N° DE SÉRIE : 1

T TH - ID175
UNIVERSITÉ DE RENNES

Section Agronomie N2



THÈSE

présentée devant :

**L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES
(EN ASSOCIATION AVEC L'UNIVERSITÉ DE RENNES I)**

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Spécialité : Science du sol - Hydrologie et Géochimie de la surface

par

Christian BUSON

**UNE APPROCHE PÉDOLOGIQUE DU PROBLÈME DE L'ÉPANDAGE :
CARACTÉRISATION HYDRIQUE DES SOLS BRUNS SUR SCHISTES BRIOVÉRIENS
DE LA RÉGION DE VIRE (CALVADOS)
EFFET DES ÉPANDAGES DE LAITERIE SUR LES SOLS ET LES EAUX**

Préparée dans le Laboratoire de Sciences du Sol de l'ENSA-INRA - RENNES

Soutenue le 23 Mai 1979 devant le Jury :

MM. A. RUELLAN

PRÉSIDENT DU JURY

C. CHEVERRY

RAPPORTEUR

J.J. CHAUVEL

EXAMINATEURS :

P. DUTIL

R. PINOIT

*Que tous ceux qui ont rendu possible
la réalisation de ce travail
soient ici chaleureusement remerciés.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PREMIÈRE PARTIE : CARACTÉRISATION PÉDOLOGIQUE ET HYDRIQUE DES SOLS BRUNS SUR SCHISTES BRIOVÉRIENS

- I - Données géologiques
- II - Les sols
- III - Etude des propriétés hydriques des sols bruns
- IV - Etude de la circulation des eaux dans les sols

DEUXIÈME PARTIE : EFFET DES ÉPANDAGES DE LAITERIE SUR LES SOLS ET LES EAUX

- V - Les conditions de réalisation de l'épandage
- VI - Effet des épandages sur les eaux
- VII - Effet des épandages sur les sols
- VIII - Relations entre les cations fixés sur le sol et la solution du sol

CONCLUSION GÉNÉRALE

Bibliographie

Annexes

Table des matières

INTRODUCTION

Les sols sont structurés à différentes échelles. Il est important de connaître ces structures et d'essayer de comprendre comment elles se sont formées, comment elles évoluent actuellement et quels sont leurs rôles dans le fonctionnement des sols.

L'influence de l'organisation des sols - c'est-à-dire des structures pédologiques à différentes échelles et de leur arrangement dans l'espace - sur le fonctionnement hydrique des sols a déjà été mise en évidence par de nombreux auteurs. Il en est de même pour les phénomènes de transferts d'eau et de solutés, mais ceci est moins bien connu. Le travail que je présente ici est une contribution à l'étude de ces transferts d'eau et de solutés dans les sols.

L'étude porte sur des sols sur schiste briovérien, formation géologique largement représentée dans le massif armoricain. Nous étudierons dans ce cadre l'épandage des eaux résiduelles d'une fromagerie.

Dans la première partie, je présenterai les sols et j'étudierai les circulations d'eau en relation avec la morphologie des sols. Le problème de l'existence de circulations latérales dans le sol sera envisagé.

Dans la seconde partie, j'exposerai les effets d'un épandage de laiterie dans ce contexte pédologique connu : effet rapide sur les circulations d'eau dans les sols, effet à plus long terme sur les eaux drainant les terrains d'épandage, effet sur les sols tant sur le plan morphologique que physico-chimique. Dans un dernier chapitre, un modèle de prévisions sur le devenir des cations fixés par le sol sera exposé.

PREMIERE PARTIE :

Caractérisation pédologique et
hydrique des sols bruns sur
schistes briovériens.

I - DONNÉES GÉOLOGIQUES (+)

11 - PRESENTATION GEOLOGIQUE

Le périmètre de l'étude est constitué de terrains antécambriens appelés "briovériens" par Ch. BARROIS (1899) dans le Massif Armoricaïn. Ces terrains se situent dans la partie septentrionale du domaine Mancélien qui constitue le Briovérien type (cf. fig. 1.1 - COGNE, 1972).

La carte géologique (feuille de Coutances - 1966) nous situe dans le Briovérien supérieur à l'étage de la Laize. Cette formation flyscholde est percée de nombreux batholithes de granite qui induisent à leur contact le développement de métamorphites telles que cornéennes et schistes tachetés (concentration de matière carbonneuse, développement de minéraux d'andalousite, de mica).

A 4 kilomètres au Sud de la zone étudiée, un batholithe de granite à grain moyen (batholithe granitique de Vire), perce la masse briovérienne, sans que la zone étudiée ne présente de métamorphites.

Les faciès pétrographiques reconnus sur le site étudié constituent deux ensembles distincts :

- un ensemble essentiellement gréseux
- un ensemble essentiellement schisteux, incluant quelques niveaux gréseux centimétriques.

On note au sein de ces deux ensembles, quelques filons de quartz. Ces faciès sont tout à fait caractéristiques de la série de la Laize (DUPRET, 1974).

Les analyses chimiques des schistes briovériens (SAGON, 1976) montrent des teneurs élevées en silice (65% de SiO_2), des teneurs moyennes en aluminium (15-20% de Al_2O_3). Les autres éléments restent en quantités faibles : Fe (6%), K (3%), Ca, Mg, Na (< 1%).

12 - OBSERVATION AU MICROSCOPE

L'observation des lames minces réalisées dans les différents faciès rocheux rencontrés sur le terrain de l'étude donne les résultats suivants (Y. QUETE, J.J. CHAUVEL - communication orale) :

(+) On trouvera en annexe 1 des données climatiques régionales.

LE BRIOVERIEN ET LE CYCLE OROGENIQUE CADOMIEN DANS LE MASSIF ARMORICAIN

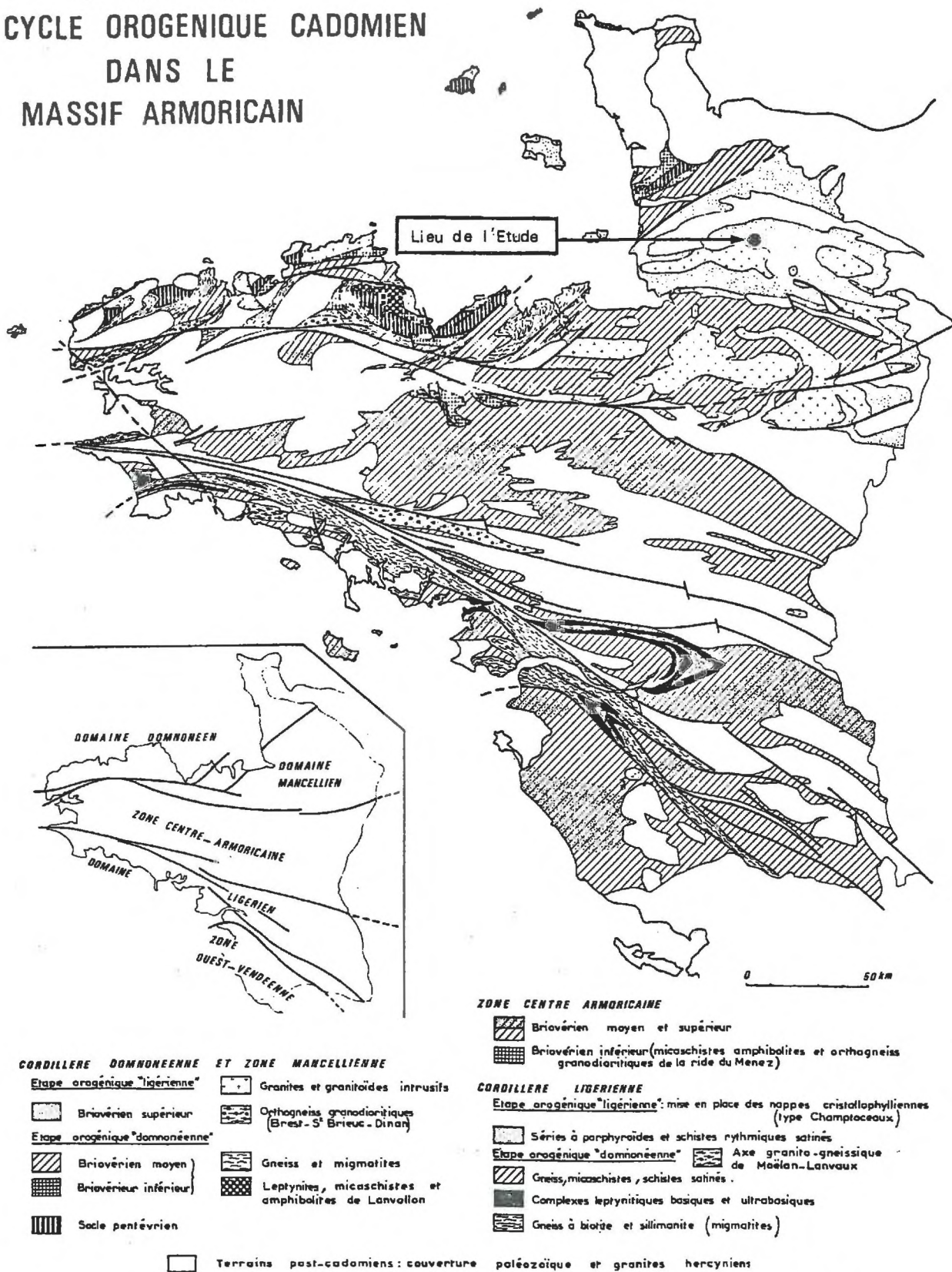


Fig. 11: Les grands domaines structuraux armoricains. d'après COGNE, 1972.

121 - La formation gréseuse

Nous étudierons successivement la matrice (éléments de taille inférieure à 30 microns) qui occupe 20 à 50% du volume de la roche, et les grains.

- La matrice finement grenue témoigne de la recristallisation de la roche. Les minéraux constitutifs de cette matrice sont du quartz, de la séricite, de la chlorite, et des feldspaths plagioclases.
- Les grains sont subanguleux et relativement bien classés (taille des grains : 40 à 80 microns). On y reconnaît principalement :
 - . du quartz (70 à 80% du volume des grains)
 - . des feldspaths plagioclases (albite) (10 à 15% du volume des grains)
 - . des muscovites (10 à 15% du volume des grains).

Certains échantillons observés montrent un arrangement des muscovites détritiques individualisant de minces bancs d'épaisseur millimétrique figurant la stratification (laminés). Cette formation est proche de celles décrites par LE CORRE (1977).

122 - La formation schisteuse

Celle-ci montre dans tous les cas un sédiment très fin (taille des grains 10 à 20 microns) constitué de quartz, séricite et chlorite; la richesse relative en grains de quartz détermine :

- des niveaux à fin débit ardoisier (où séricite et chlorite dominent et sont recristallisées dans le plan de schistosité)
- des niveaux à cassure esquilleuse, nettement plus durs, où le quartz constitue 30% du volume total de la roche.

Cette variabilité de la teneur en grains de quartz détermine sur le terrain l'individualisation de bancs de taille décimétrique soulignés par leur altération préférentielle. Les bancs gréseux repérés au sein de cette formation sont tout à fait analogues à la formation gréseuse décrite plus haut.

LE CORRE (1977) décrit des faciès comparables qu'il distingue sous le nom de "schistes silteux fins à laminés".

13 - OBSERVATIONS DE TERRAIN

La cartographie du secteur étudié oppose le *sommet de la butte* limitant à l'Est - Sud Est le périmètre de notre étude, parsemé de nombreux fragments gréseux, représentatifs de la formation gréseuse, aux *flancs* caractérisés par la formation schisteuse.

La stratification des bancs schisteux (direction N, 35 à 40° E, pendage subvertical) est parallèle à la rupture de pente supérieure de la butte. Cette observation montre le caractère structural de la topographie lié à la présence d'une formation gréseuse difficilement érodable sur les hauteurs (cf. fig. 2.2.).

14 - CONCLUSION

Nous retiendrons donc que deux faciès pétrographiques bien distincts sont présents dans la zone étudiée. Ces faciès sont tout à fait caractéristiques du Briovérien. Ils vont induire deux pédogenèses différentes qui seront présentées dans le chapitre suivant, l'accent étant mis sur le domaine schisteux.

Il est à noter par ailleurs une grande homologie entre le Briovérien normand et le Briovérien breton (DUPRET, 1974 ; LE CORRE, 1977).

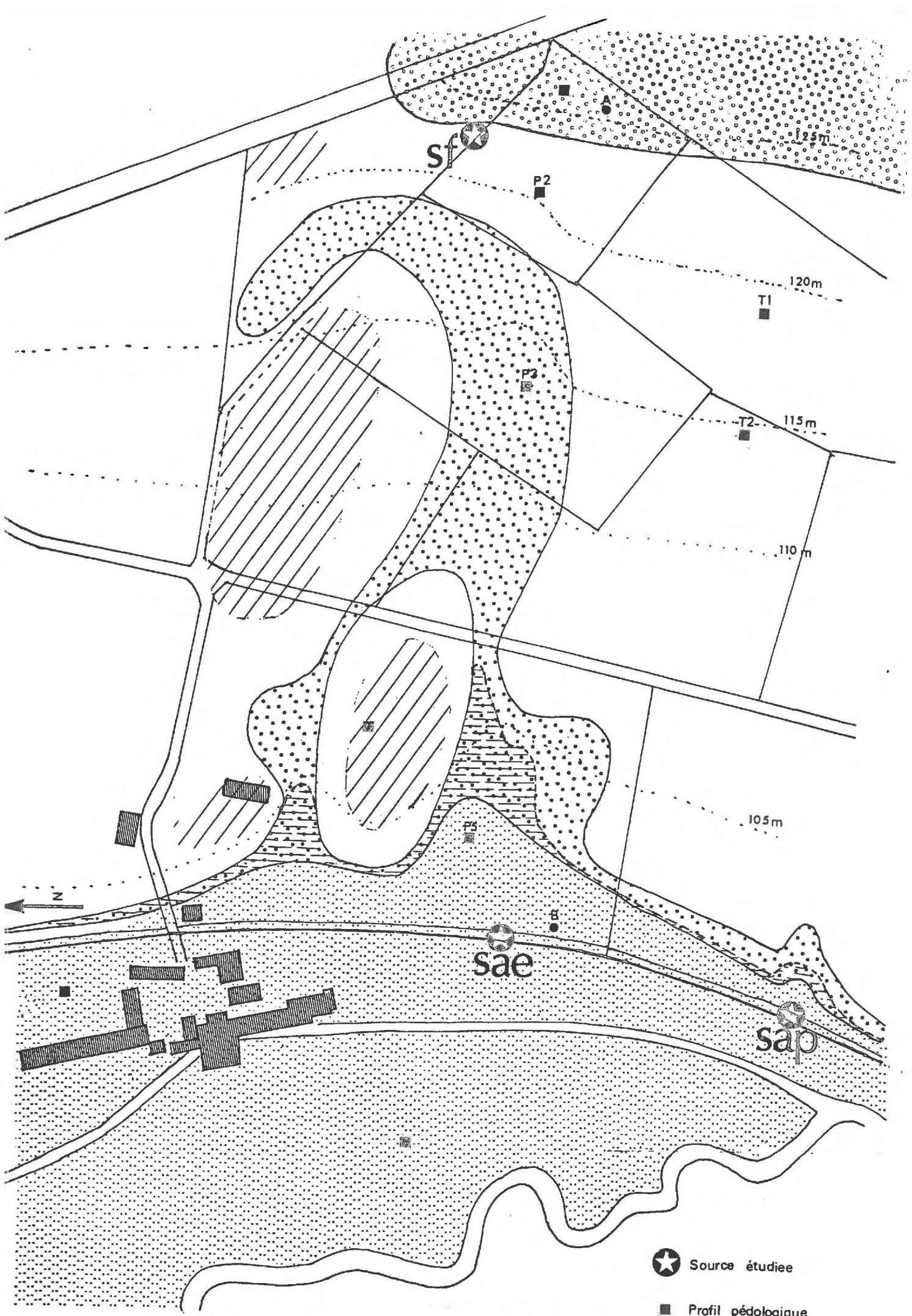


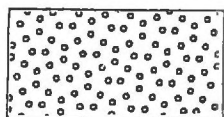
FIGURE 2.1 : Carte des sols (au 1/2.500°)

II - LES SOLS

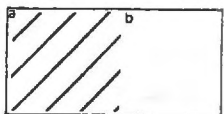
21 - LA CARTE DES SOLS

Une prospection à la tarière a permis, sur le secteur d'étude, de reconnaître les principaux types de sols et d'en faire une cartographie au 1/2500°. Nous distinguerons les unités suivantes (fig. 2.1) :

- 1 - Sols peu épais, à différenciation A_1/C , proche de celle d'un ranker d'érosion ou de pente (CPCS - 1967). L'horizon C est caractérisé par la présence de fragments de grès faiblement altérés. Ces sols recouvrent essentiellement les parties hautes du relief.
- 2 - Sols peu profonds (de 40 à 60 cm), à différenciation $A_1(B)C$. Ce sont des sols bruns modaux (CPCS - 1967). L'horizon C est caractérisé par la présence de fragments de schiste (plus ou moins grossier) faiblement altérés. C'est l'unité la plus représentée sur les versants.
- 3 - Sols profonds (> 60 cm), à différenciation $A_1(B)C$. Ce sont des sols bruns modaux (CPCS - 1967). L'horizon C est caractérisé par la présence de schiste très altéré. Ces sols occupent les fonds de talwegs secondaires.
- 4 - Association de sols profonds (> 60 cm) à différenciation $A_1g, (B)g, Cg$. ce sont des sols hydromorphes à pseudogley et gley sur matériaux colluviaux et alluviaux. Ces sols occupent les zones basses.

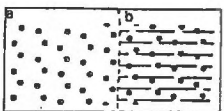
Légende de la carte

Unité 1



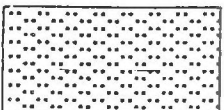
Unité 2

- a horizon C dès 25 cm
- b horizon C > 30 cm



Unité 3

- a hydromorphie > 60 cm
- b hydromorphie dès 40 cm



Unité 4

22 - CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE DES SOLS BRUNS SUR SCHISTE

L'étude morphologique a porté principalement sur les sols bruns sur schiste (Unités 2 et 3) qui constituent l'essentiel des sols de la zone d'étude. On utilisera : les définitions du glossaire de pédologie, la charte "MUNSELL" pour la transcription des couleurs avec les correspondances données par JAMAGNE (1967), le triangle de texture du Service de Cartographie de la Chambre d'Agriculture de l'Aisne (in JAMAGNE, 1967).

La description de quatre profils représentatifs est donnée en annexe 2 (P2, T1 et T2 s'apparentent à l'unité 2 ; P3 s'apparente à l'unité 3).

221 - Les horizons de surface

Ils sont occupés par une prairie naturelle composée essentiellement de graminées (ray-grass, paturin, ...) qui détermine deux horizons :

2211 - Un premier horizon superficiel (de 0 à 6-10 cm)

correspondant à l'enracinement de la prairie. C'est un horizon brun foncé à l'état humide, beige foncé à l'état sec, constitué essentiellement de terre fine limono-argilo-sableuse. Les faces des agrégats restent assez planes malgré la grande quantité de matières organiques; la structure est polyédrique très fine (2 à 3 mm de diamètre) associée localement à une structure grumelleuse. Cet horizon est très poreux car la porosité entre les agrégats est forte. L'activité biologique est très forte (nombreux vers de terre). La transition souvent très nette est liée à la variation brutale de la densité racinaire.

2212 - Un deuxième horizon (de 6-10 à 20-30 cm) brun

qui est beaucoup moins influencé par l'enracinement de la prairie : ainsi la structure polyédrique très fine de cet horizon est reprise dans une structure polyédrique moyenne. On note l'apparition de quelques éléments grossiers (schiste et quartz) à arêtes légèrement émoussées. L'horizon est poreux mais le volume des vides entre les agrégats est plus faible que pour l'horizon de surface. L'activité biologique est forte (nombreux vers de terre). La transition avec l'horizon B sous-jacent est nette et régulière.

Ce deuxième horizon peut présenter, par endroit, une structure à tendance massive; la porosité est alors très faible.

2213 - De plus, on peut trouver localement un troisième horizon correspondant à la base du labour. La structure polyédrique moyenne est alors éclatée en structure polyédrique très fine, associée à une structure grumelleuse. La richesse en graviers est plus forte que dans les horizons supérieurs. Cet horizon est poreux. La transition est nette et régulière.

2214 - On note l'importance jouée par l'implantation racinaire de la prairie sur la caractérisation morphologique des horizons de surface.

Les manifestations d'hydromorphie ne sont pas visibles dans ces horizons de surface (matrice de couleur 10 YR 3/2). La structure est nette. Des conditions localement plus fortes, d'humidité, de surpâturage, de plus mauvaise implantation des racines de la prairie, sont autant de facteurs qui accentuent la distinction entre les horizons et leurs variations internes.

Ce sont des horizons de surface à accumulation de matière organique (2 à 4% de C organique). Du fait de la culture pratiquée sur ces sols, nous appellerons ces horizons Ap₁, Ap₂, (Ap₃) suivant l'ordre d'apparition.

222 - L'horizon "structural"

Cet horizon d'épaisseur assez variable suivant les profils examinés, (de quelques cm à 60 cm) a les caractéristiques générales suivantes : la couleur est brun-jaune clair à l'état humide, tendant au beige foncé à l'état sec. La charge en éléments grossiers est moyenne (15 - 20%). Celle-ci est constituée essentiellement de graviers et de cailloux de schiste aux arêtes émoussées et de quelques quartz plus anguleux. La structure polyédrique moyenne, nette, présente une sous-structure polyédrique très fine (plus ou moins nette). La porosité intra-agrégat est forte. La porosité inter-agrégat est variable (moyenne à forte). Ce sont des horizons poreux. L'activité biologique est moyenne, toutefois, les galeries verticales de lombric, récentes ou anciennes, sont abondantes. Ces galeries sont tapissées de revêtements bruns dus principalement à la matière organique. Les racines sont peu abondantes. La transition est nette et assez régulière.

Dans la description, on est amené parfois à faire des distinctions au sein de cet horizon, déterminant ainsi deux sous-horizons. En effet, la base de l'horizon peut avoir une structure plus nette et être mieux prospectée par les lombrics. C'est en particulier le cas des sols situés dans l'axe des pseudotalwegs.

Des traces de réoxydation du fer sont parfois visibles: elles sont généralement peu importantes et liées aux galeries de lombrics et aux faces des agrégats.

On note qu'il n'y a pas de trace d'accumulation d'argile sur la face des agrégats. Ce sont donc des horizons qui ont probablement subi une altération en place, sans lessivage ni accumulation, que nous identifierons donc sous le sigle (B)₁ et (B)₂, selon l'ordre d'apparition verticale.

223 - L'horizon d'altération de la roche-mère

On peut distinguer deux types d'horizon C, suivant le degré d'altération du schiste :

- soit des horizons très riches en éléments grossiers de schiste où l'altération est modérée.
- soit des horizons où le schiste est très altéré et pris dans une masse limono-argileuse.

2231 - Les horizons C très riches en éléments grossiers

Ils représentent l'essentiel des horizons C décrits dans ces sols. Leur charge en graviers et cailloux de schiste à grain plus ou moins fin, est très importante (> 50%). Ces éléments grossiers sont souvent peu altérés mais ils s'avèrent tendres dans l'ensemble. Entre les éléments grossiers, on observe un produit d'altération limono-argileux. C'est un horizon très peu poreux. L'épaisseur de cet horizon varia de quelques dizaines de centimètres à un mètre et repose sur le Briovérien en place non altéré.

2232 - Les horizons C fortement altérés.

Localement et, en particulier, dans les sols situés dans l'axe des talwegs secondaires, le matériau géologique (à grain fin, le plus souvent) a subi une altération plus poussée, donnant naissance à un horizon C de texture limono-argileuse, à structure massive.

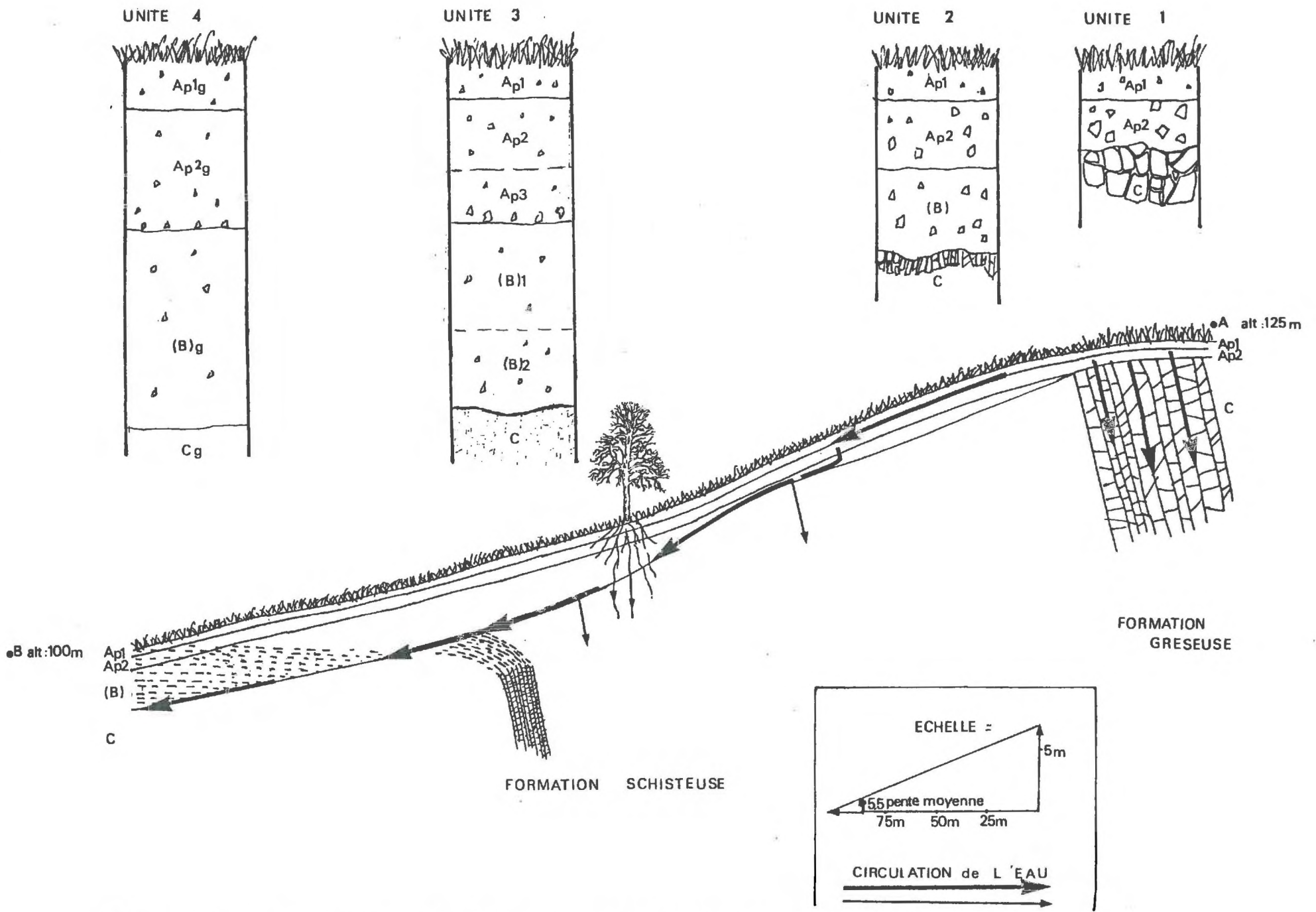


FIGURE 2.2 : Toposéquence A-B. Schéma de circulation de l'eau dans les sols

On trouve dans la masse de l'horizon de nombreux éléments grossiers de schiste très altérés de taille centimétrique. Cet horizon C a subi un colluvionnement relativement faible : 1,50 m environ d'après des observations sur une coupe (cf. fig. 2.2). Cet horizon est très peu poreux.

23 - CONCLUSION - HYPOTHESES SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU

231 - Les données morphologiques utiles

L'étude morphologique des sols bruns présentée dans les paragraphes précédents peut permettre d'esquisser le fonctionnement de la circulation des eaux dans les sols étudiés.

Pour cela, parmi les données morphologiques, nous utiliserons principalement :

- au sein de chaque horizon, la structure (forme, taille et arrangement des agrégats) et la porosité (type de porosité, volume et forme des pores).
- entre les horizons, l'aspect du contact et les variations des caractéristiques de chaque horizon.

232 - Propriétés de chaque horizon pour la circulation de l'eau

L'horizon Ap₁ est un horizon très poreux et finement structuré qui permet l'infiltration verticale et le stockage de l'eau en son sein. Les risques de ruissellement en surface sont faibles et limités par la présence de la prairie.

L'horizon Ap₂ est un horizon poreux qui permet l'infiltration de l'eau. Localement, cet horizon est très peu poreux et massif. L'infiltration et le stockage de l'eau sont alors très faibles.

L'horizon (B) a globalement des caractéristiques comparables à celles de l'horizon Ap₂ pour la circulation de l'eau. Toutefois, la base de cet horizon peut être localement plus poreuse et permettre une éventuelle circulation latérale.

L'horizon C est toujours caractérisé par une porosité très faible. L'infiltration de l'eau semble très limitée dans le cadre des profils étudiés. Ceci n'exclut pas néanmoins l'infiltration localisée d'eau à la faveur de discontinuités (racines des arbres, filons de quartz). Ce sont les zones à faciès gréseux qui sont les plus propices à de telles infiltrations localisées.

233 - Les discontinuités majeures entre les horizons

On rencontre deux types de discontinuités qui peuvent déterminer des circulations latérales :

- localement, au contact $Ap_1 - Ap_2$ lorsque l'horizon Ap_2 est très tassé.
- plus généralement au contact (B) - C

234 - Mise en place d'un schéma de circulation des eaux

Il est possible de résumer l'ensemble des caractéristiques précédentes (cf. fig. 2.2).

La circulation de l'eau sera essentiellement verticale jusqu'à l'apparition d'une discontinuité importante dans le profil. Des circulations latérales peuvent prendre naissance au-dessus des horizons peu poreux (Ap_2 tassé, C de schiste).

Des infiltrations en profondeur sont toutefois possibles notamment dans les zones gréseuses où on observe une forte fracturation de la roche et une faible altération des matériaux. De même, sur les versants, la présence de galeries racinaires, liées aux arbres (talus, vergers) ou la variation de la roche mère (bancs gréseux, filons de quartz) sont des voies possibles pour l'écoulement préférentiel en profondeur.

235 - Conclusion

Les sols étudiés ici sont assez représentatifs de sols sur schistes briovériens du Massif Armoricain (RIVIERE, communication orale ; EDELINE, KRIEGK, 1976 ; EDELINE, GAUQUELIN, 1978 ; BUSON, EDELINE, GAUQUELIN, 1979). Le schéma de circulation proposé s'appuie essentiellement sur des observations et des données morphologiques. Il apparaît donc très important de le vérifier par d'autres méthodes.

III - ETUDE DES PROPRIÉTÉS HYDRIQUES DES SOLS BRUNS

31 - INTRODUCTION

Pour caractériser le comportement hydrique des horizons décrits précédemment, des mesures de terrain et de laboratoire ont été effectuées : mesures d'humidité des sols en place, mesures de densité, mesures de perméabilité à saturation, détermination des courbes caractéristiques: $\psi = f(h)$ (au laboratoire), avec ψ : potentiel matriciel et h : teneur en eau.

Nous présenterons dans ce chapitre, les résultats des mesures d'humidité. Les données de densité, de perméabilité et les courbes $\psi = f(h)$ sont présentées et utilisées principalement pour l'interprétation de ces mesures d'humidité.

32 - MESURES D'HUMIDITE

321 - Méthode

Une campagne de profils hydriques a été menée pendant l'hiver 1977-78. Le pas de temps était relativement serré (de quelques jours à quelques semaines), dans le but de situer, outre les variations à l'échelle de la saison, les variations plus rapides à l'échelle des "événements - averses". Ce sont les profils P_2 et P_3 qui ont été étudiés.

Pour le prélèvement, deux modalités ont été pratiquées :

- prélèvements à la tarière (méthode classique; cf. AUDRY, COMBEAU, 1973) de 10 en 10 cm.
- prélèvement sur la face amont des fosses pédologiques 2 et 3 après les avoir dégagées sur 30 à 40 cm d'épaisseur; prélèvement de 7 en 7 cm environ.

L'échantillonnage à partir de la fosse pédologique "rafraichie" permet de noter les variations locales d'humidité et d'interpréter plus correctement les valeurs en fonction des anomalies rencontrées (poches de matière organique, galeries de vers et de taupes, circulation d'eau observée, etc...). De plus, la précision des profondeurs de prélèvement est meilleure et l'effet de mélange dû à la tarière est annulé. Des comparaisons entre les deux modalités de prélèvement ont donné des résultats très semblables. Le prélèvement direct est donc tout à fait justifié pour la mesure hydrique des sols, en période humide.

Les échantillons sont placés dans des capsules de verre dont l'étanchéité des fermetures a été contrôlée par C. CARNET (1978). Dans l'étude présentée ici, les échantillons étaient pesés et mis à l'étuve pendant 48 heures, le jour même du prélèvement (environ 4 heures après celui-ci). 300 mesures hydriques environ ont été effectuées de Novembre 1977 à Avril 1978.

322 - Les résultats

Ils sont exprimés en % pondéral.

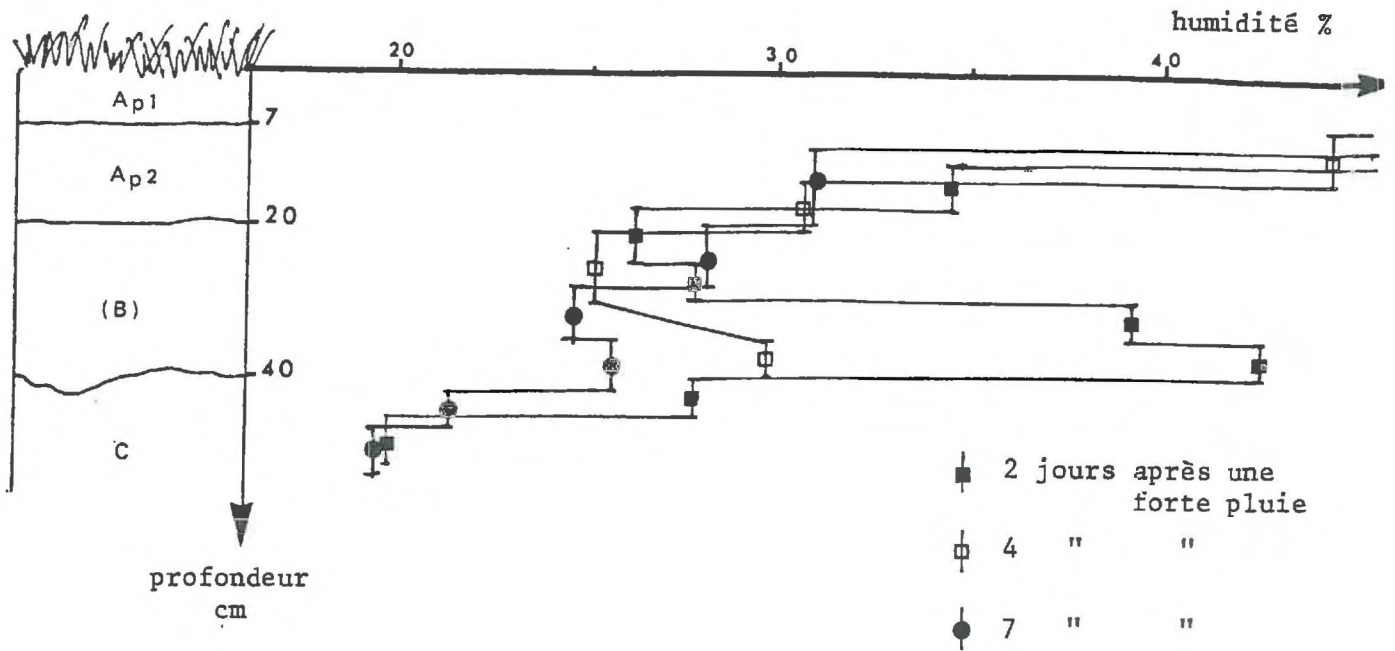


FIGURE 3.1 : PROFILS HYDRIQUES P 2

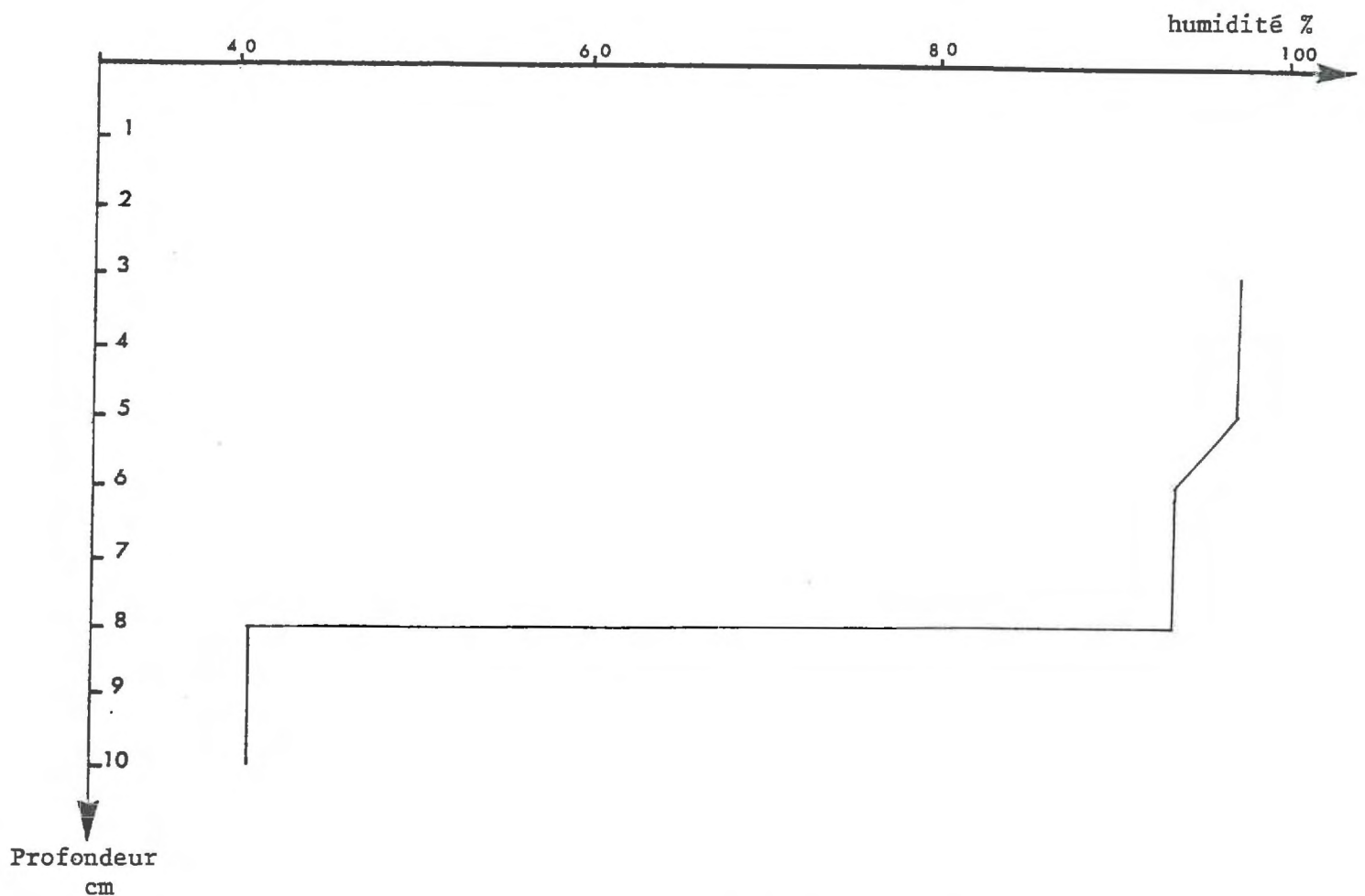


FIGURE 3.2 : VARIATIONS BRUTES D'HUMIDITE A LA BASE DE L'Ap
(cas d'un profil P2 où l'horizon Ap2 est très tassé et massif.
Circulation d'eau libre à la base de l'horizon Ap1)

L'interprétation des profils hydriques a été conduite en se rapportant à la hauteur de pluie reçue les jours précédant chaque mesure (cf. annexe 1). Des profils hydriques synthétiques (graphiques 3.1 à 3.3) qui donnent les valeurs d'humidité moyenne pendant l'hiver, 2 jours, 4 jours ou 7 jours après les pluies, ont été établis pour les profils P2 et P3 à partir des données brutes qui figurent en annexe 3.

3221 - Etude du profil P2 (graphique 3.1)

L'horizon Ap₁ resta toujours très humide (80% et au-delà). Cette valeur élevée ne doit pas être considérée comme une valeur exacte de l'humidité de la terre fine, car la grosse quantité de racines contenue dans cet horizon augmente très sensiblement la teneur en eau de l'échantillon. De plus, entre chaque échantillon, la quantité variable de racines et de feuilles prélevées peut modifier considérablement les résultats finaux.

L'horizon Ap₂ conserve une humidité nettement plus faible que l'horizon supérieur. Cette humidité moyenne assez constante (30%) augmente toutefois de quelques points après une période très pluvieuse. On n'observe pas alors de circulation d'eau au-dessus de l'Ap₂.

Le graphique 3.2 illustre les variations brutales d'humidité entre la base de l'Ap₁ et le sommet de l'Ap₂ enregistrées sur un profil très proche du profil P2, mais où l'Ap₂ est nettement plus tassé. Une circulation latérale d'eau au sommet de l'Ap₂ était alors installée.

L'horizon (B) a une humidité moyenne relativement constante sur toute son épaisseur (24,5 %). On note après les fortes pluies, une augmentation sensible de l'humidité et en particulier au contact de l'horizon C, cette augmentation correspondant parfois avec l'apparition d'eau libre à ce niveau.

L'horizon C a une terre fine nettement plus sèche (18-19 %) dont l'humidité varie peu, quelles que soient les conditions climatiques.

3222 - Etude du profil P3 (graphique 3.3)

L'horizon Ap₁ reste très humide, mais les valeurs sont beaucoup plus faibles que celles du profil P2 (55%)

L'horizon Ap₂ est beaucoup plus sec que l'horizon Ap₁. Cet horizon subit des variations faibles à la suite des pluies précédentes. Ces variations sont passagères et l'humidité redescend ensuite vers des valeurs proches de 28,5 % (pour le bas de l'horizon).

L'horizon Ap₃ est encore moins humide que l'horizon Ap₂. Il subit aussi quelques points de variation après de fortes pluies. L'humidité de cet horizon (assez constante à 24%) augmente au contact de l'horizon (B)₁.

Les horizons (B)₁ et (B)₂ conservent une humidité supérieure à celle de l'horizon susjacent. L'humidité est très constante sur toute l'épaisseur des horizons (26%), en dehors des périodes fortement pluvieuses. A la suite d'averses importantes, on note une augmentation très forte de l'humidité qui est maximale à la base de l'horizon (B)₂, au contact de l'horizon C. Les valeurs d'humidité observées restent toutefois faibles (30%), bien que correspondant à une circulation d'eau libre à la base de l'horizon (B)₂.

L'horizon C reste très sec quelles que soient les conditions de pluviométrie précédentes.

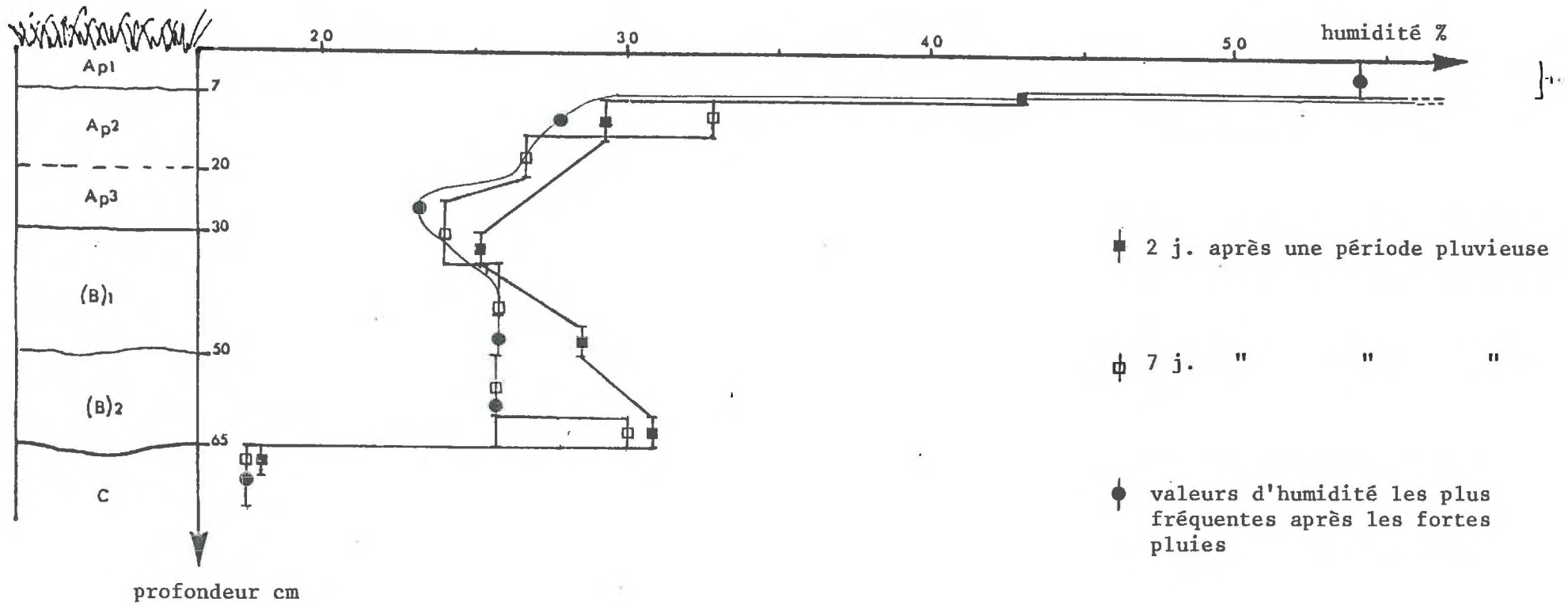


Fig. 3.3 - PROFILS HYDRIQUES P.3

En résumé, le suivi des profils hydriques après une période pluvieuse révèle que les différents horizons pédologiques se comportent très différemment. Par ailleurs, l'humidité a tendance à se stabiliser autour d'une valeur dont la signification sera précisée dans le paragraphe suivant.

33 - INTERPRETATION DES PROFILS HYDRIQUES

331 - Définition de la capacité au champ

La capacité au champ a fait l'objet de nombreuses définitions (cf. BETREMIEUX-1975). Cette notion correspond à la quantité maximale d'eau retenue par un sol en place qui a été saturé ou a subi un excès d'eau, puis a drainé et s'est ressuyé sans évaporation. Elle correspond à l'humidité au point de rupture de la courbe : $\frac{\delta h}{\delta t} = f(h)$ (FEODOROFF, 1962).

Cette notion de la capacité au champ est très contestée notamment par certains physiciens du sol qui doutent de la réalité et du sens physique de cette notion (RICHARDS, 1960 - HILLEL, 1974).

Toutefois, en région tempérée, on observe, qu'en année normale, l'humidité des sols sains (bien drainés) atteint un palier supérieur d'humidité au cours de l'hiver, palier qui n'est dépassé que pendant les quelques jours suivant immédiatement les pluies (BETREMIEUX, 1975 - CARNET, 1978). La connaissance de cette valeur du palier d'humidité en période pluvieuse, l'évapotranspiration étant très faible, donne une bonne estimation de la capacité au champ.

332 - Valeurs de la capacité au champ

Les valeurs d'humidité le plus souvent enregistrées en période humide, une fois passé les pics liés aux pluies importantes, donnent donc une estimation de cette valeur (cf. graphique 3.4 pour l'horizon (B)1 du P 3). Nous retiendrons les valeurs suivantes pour l'humidité à la capacité au champ (à $\pm 1\%$ près) :

TABLEAU 3.1	Profil P2				Profil P3					
	Ap1	Ap2	(B)g	C	Ap1	Ap2	base Ap2	(B)1	(B)2	C
épaisseur cm	7	13	20		7	18	10	20	15	
humidité à la capacité au champ %	(80)	30	24.5	19.5	(54)	28.5	24	26	25.5	16.5

Les valeurs des horizons Ap1 sont données à titre d'indication, compte tenu des réserves émises précédemment au § 322 (présence de racines).

L'examen des graphiques 3.1 et 3.3 nous montre que le temps théorique de 2 jours (VEIHMEYER & HENDRICKSON 1949) après une pluie importante, pour que le sol soit à nouveau à la capacité au champ, n'est pas applicable à l'ensemble des horizons étudiés ici. Pour les horizons profonds, un délai d'une dizaine de jours semble nécessaire, alors que pour les horizons de surface, 2 à 3 jours suffisent effectivement.

333 - Comparaison avec les humidités sous potentiels matriciels

3331 - Mesure en laboratoire des humidités sous des potentiels matriciels variables

a) Méthode

Pour mieux caractériser les horizons étudiés, des mesures d'humidités sous différents potentiels matriciels ($pF = \log \Psi$) ont été effectuées au laboratoire de façon à tracer pour chaque horizon la courbe qui relie l'humidité à un potentiel matriciel ($h = f(\Psi)$) (fig. 3.5, 3.6). Pour les pF de 2, 2.3, 2.5, 2.7 et 3, les mesures ont été effectuées avec l'appareil d'extraction à plaque poreuse.

Le pF 4.2 a été déterminé avec la presse à membrane. CARNET (1978) donne sur 4 échantillons et 10 répétitions : TABLEAU 3.2

écart type en % pondéral	pF 3	pF 2.5	pF 2
σ mini	0.43	0.31	0.48
σ maxi	0.69	0.99	1.52

Pour un même appareil, la précision est bien d'autant plus grande que le potentiel est élevé (AUDRY, COMBEAU - 1973).

A. SIMON⁽¹⁾ donne sur 28 répétitions d'un même échantillon, sur deux appareils différents :

TABLEAU 3.3	pF 2,5	pF 4.2
écart type	0.312	0.213
coefficient de variation	2.1 %	4.2 %

b) Résultats

Les graphiques 3.5 et 3.6 représentent les courbes caractéristiques $h=f(\Psi)$ des différents horizons de chaque profil.

On distingue très nettement que l'horizon Ap1 atteint des valeurs d'humidité très supérieures aux autres horizons (16 à 20% de plus en P2, 8 à 18% de plus en P3).

Les horizons Ap2 et (B) ont des courbes très semblables.

L'horizon C reste en-dessous du groupe constitué par les courbes des horizons Ap2 et (B). Ceci est vraisemblablement dû à la présence dans cet horizon C de nombreux fragments de schistes, à faible capacité de rétention pour l'eau.

Le graphique 3.7 montre l'allure des profils hydriques théoriques sous potentiels matriciels connus.

La terre fine des horizons organiques de surface est capable de retenir plus d'eau faiblement liée (entre pF 2 et 2.3) que les horizons sous-jacents. Ceci peut jouer un rôle important pour le stockage de l'eau dans ces horizons en période hivernale, où la succession des pluies maintient le sol, en surface, à un niveau de potentiel matriciel très bas.

(1) Document technique du laboratoire de Science du Sol - ENSA-INRA Rennes

Figure 3.5 : courbe $h = f(\psi)$ - P2

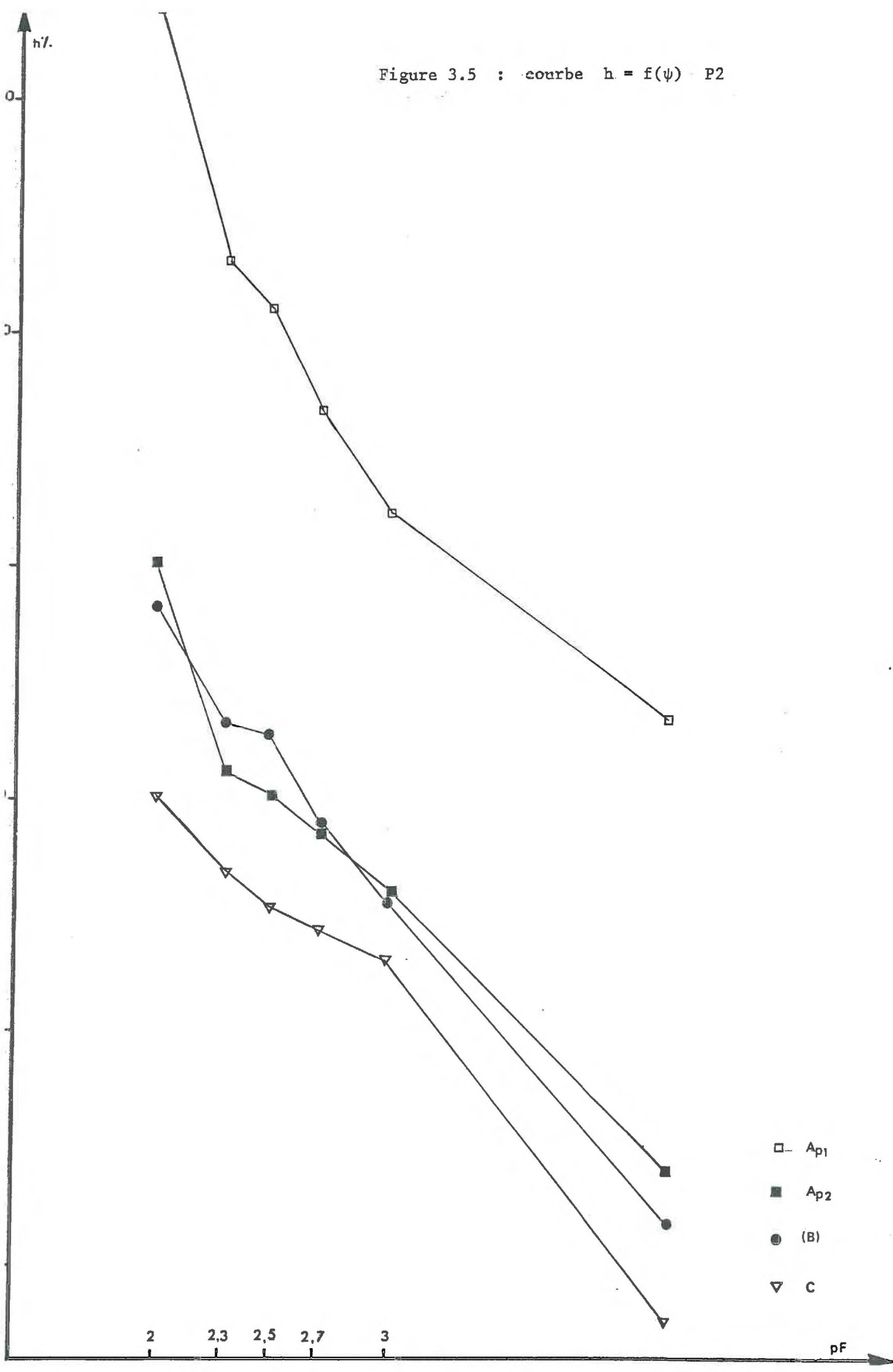
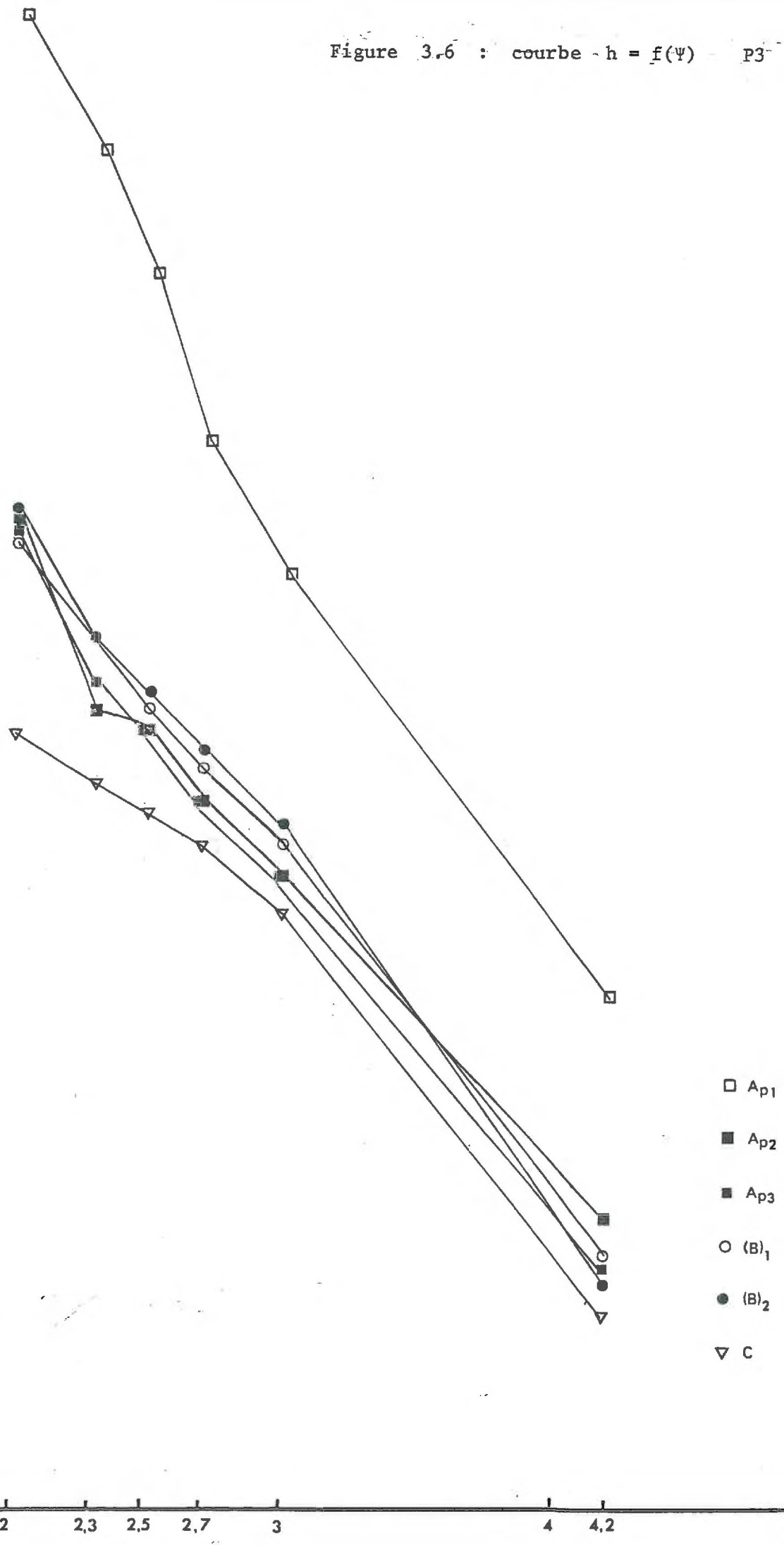


Figure 3.6 : courbe $h = f(\Psi)$ - P3



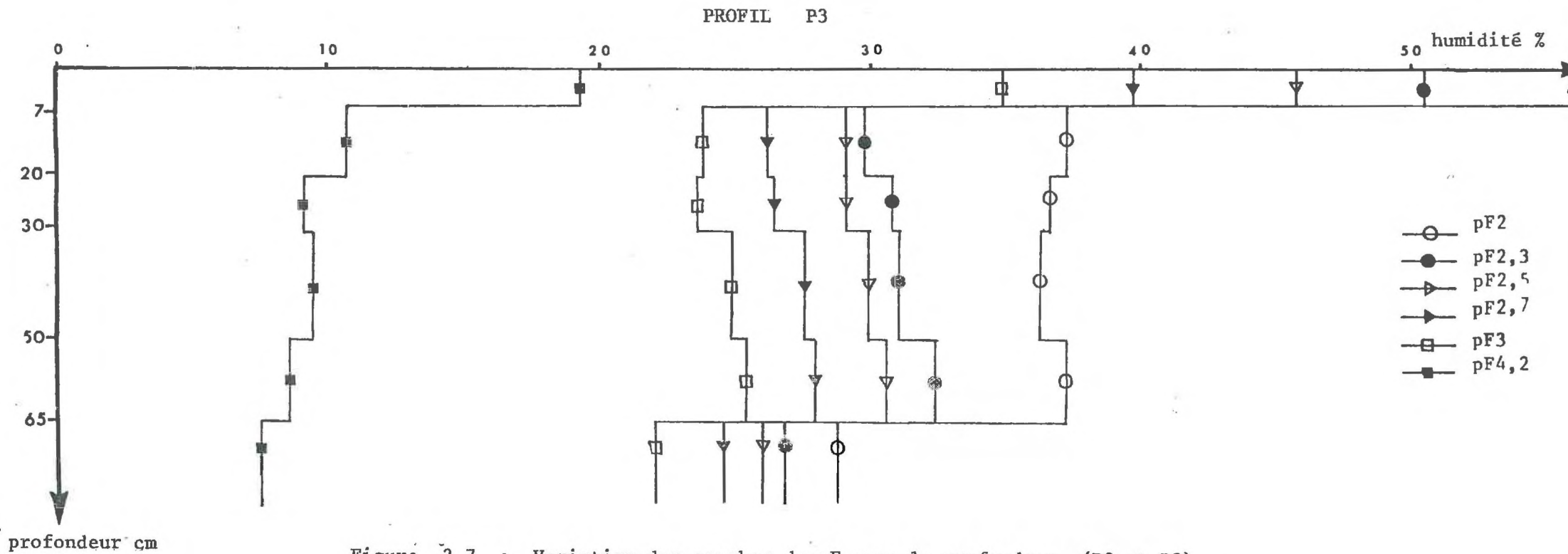
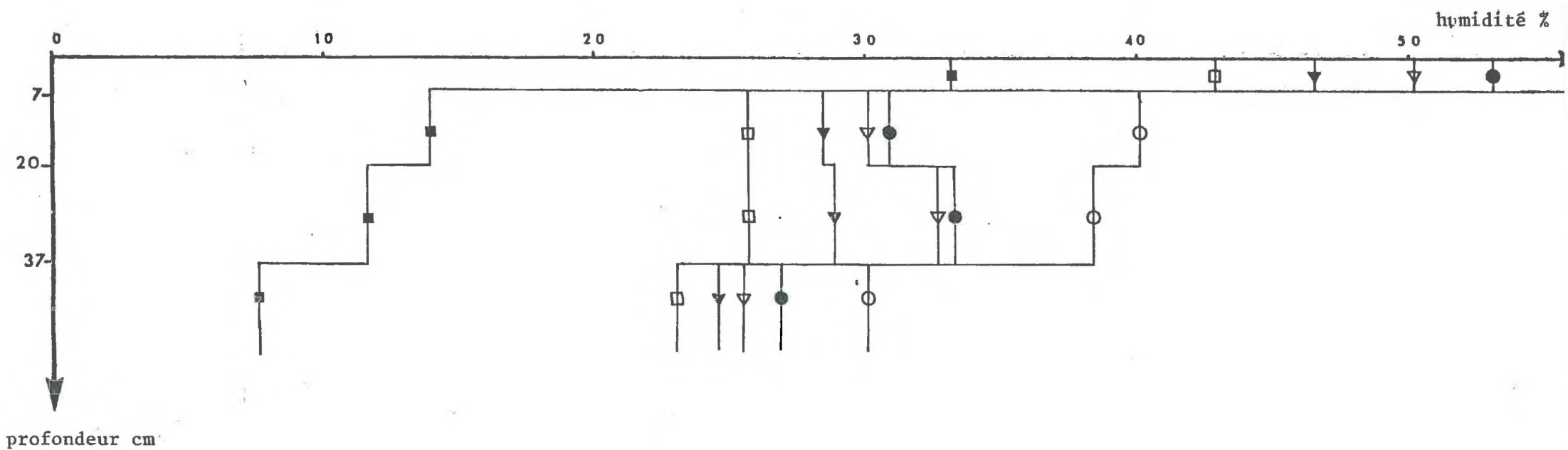


Figure 3.7 : Variation des courbes de pF avec la profondeur (P2 et P3)

3332 - Détermination du potentiel matriciel correspondant à la capacité au champ

a) Correction nécessaire

L'humidité pondérale mesurée porte sur des échantillons comportant une charge en graviers de 2 mm à 10 mm.

L'humidité sous potentiel matriciel est déterminée sur des échantillons tamisés à 2 mm.

Une correction s'impose donc pour comparer ces deux valeurs :

$$\text{soit } h = \frac{\Delta h}{\text{mes}}$$

avec Δh : variation d'humidité, en g
(terre humide - terre sèche)

mes : masse de l'échantillon sec

$$\text{mes} = \text{mtf} + \text{mgf}$$

avec mtf : masse de terre fine < 2 mm, en g

mgf : masse de graviers fins $2 < x < 10$ mm, en g.

$$h' = \frac{\Delta h}{\text{mtf}}$$

h' : humidité corrigée rapportée à la terre fine en % pondéral

$$\text{on a la relation : } h' : \frac{h}{(1-\alpha)} \quad \text{avec } \alpha : \frac{\text{mgf}}{\text{mes}}$$

Tableau 3.4

horizons	P 2			P 3				
	Ap1	Ap2	(B)	Ap1	Ap2	Ap3	(B1)	(B2)
valeur de c en % pondéral	ϵ	20	22	ϵ	22.6	22.6	10.3	14.4
valeur de h^r en % pondéral	(80)	37.6	31.4	(54)	36.8	31	29	30.4
valeur du potentiel matriciel correspondant en $pF = \log \Psi$	(<2)	$2 < pF < 2,3$	$2,5 < pF < 2,7$	(2)	≈ 2	$\approx 2,3$	$< pF <$	$\approx 2,5$

b) Résultats

Les valeurs de l'humidité à la capacité au champ correspondent à des potentiels matriciels variables avec la profondeur.

Dans le cas des horizons de surface, Ap2, ces potentiels matriciels se revèlent assez bas (pF 2 - pF 2,3). La valeur pour l'Ap1 ($pF \approx 2$) doit être considérée avec précaution de par la présence de racines. Dès l'horizon (B), on atteint des pF compris entre 2,5 et 2,7 (souvent proches de 2,5 - valeurs couramment utilisées pour les sols limoneux du Massif Armoricain).

c) Discussion

La comparaison effectuée entre la capacité au champ et la courbe $\Psi = f(h)$ réalisée au laboratoire précise la valeur du potentiel matriciel qui correspond pour chaque horizon à la capacité au champ. C'est donc à pF 2 - 2,3 au laboratoire qu'il faudrait estimer l'humidité à la capacité au champ des horizons de surface Ap1, Ap2, et à pF 2,5 pour les horizons (B).

Cette méthode donnera vraisemblablement une estimation plus satisfaisante de l'humidité à la capacité au champ que les formules proposées à partir de la valeur à pF 3 (DANCETTE & MAERTENS, 1974 ; GRAS, 1962).

Cette comparaison avec des pF déterminés au laboratoire ne donne pas le potentiel matriciel du sol en place, à la capacité au champ. En effet, les échantillons utilisés

au laboratoire sont tamisés à 2 mm et la structure est fortement modifiée. De plus, au laboratoire, on part d'un échantillon longuement saturé ce qui reste exceptionnel sur le terrain. On se trouve donc au laboratoire sur la branche haute de la courbe $\Psi = f(h)$, courbe qui présente une allure d'hystérèse (HILLEL, 1974). Par contre, sur le terrain, on est sur une branche plus basse de la courbe. Ce phénomène a déjà été précisé par ailleurs (FEODOROFF, 1969 ; VACHAUD, 1969).

Les mesures de tensiométrie effectuées sur le terrain indiquent toujours des valeurs de potentiels matriciels plus bas (VALLEE & FEODOROFF, 1974 ; Soil Survey Manuel, 1976 CZERATSKI, 1970 ; MEROT, 1978).

334 - Comparaison avec les mesures de porosité

3341 - Mesures de densité apparente

Pour déterminer la porosité en place des différents horizons, des mesures de densité apparente ont été réalisées à l'aide d'un densitomètre à membrane. Deux répétitions ont été effectuées par horizon : les deux valeurs sont très proches (0,074 d'écart type de densité ce qui donne un coefficient de variation de 0,059). Les résultats donnés au tableau 3. représentent les moyennes trouvées dans chaque horizon .

Les densités sont très faibles dans l'horizon de surface Ap1; elles augmentent très nettement dans l'horizon Ap2 et les horizons (B)2. Il est à noter que l'horizon (B) du profil 3 est légèrement moins dense que l'horizon (B)1. Ceci est à mettre en relation avec la différence de porosité et de prospection par les lombrics, décrite précédemment.

La porosité obtenue par la formule $f = \frac{dr - da}{dr}$ en % du volume total est portée également dans le tableau 3.5. La porosité des horizons de surface (Ap1) reste très importante. Elle baisse ensuite fortement dès l'Ap2. On note au profil 3, une porosité mesurée dans l'horizon (B)2 supérieure à celle de l'horizon (B)1.

Tableau 3.5

		dr	da	porosité $\frac{dr - da}{dr}$
Profil 2	Ap1 1 - 7 cm	2	0.60	70 %
	Ap2 10 - 20 cm	2.5	1.38	45
	(B)	2.5	1.45	42
Profil 3	Ap1 1 - 8 cm	2	0.78	61
	Ap2 13 - 20	2.5	1.36	45
	(B)1	2.5	1.46	41.6
	(B)2	2.5	1.31	47.4

3342 - Détermination de la fraction de la porosité remplie par l'eau à la capacité au champ

a) Correction nécessaire

L'échantillon de densité porte sur la terre fine et sur l'ensemble des éléments grossiers, alors que l'humidité ne porte que sur la terre fine et sur une partie des graviers :

$$\text{si } \beta = \frac{\text{m}_{\text{gg}}}{\text{m}_{\text{t}}}$$

m_{gg} : masse de graviers et cailloux grossiers (> 10 mm) en g.

$$\text{on a } h'' = \frac{\Delta h}{\text{m}_{\text{t}}} = h(1 - \beta)$$

m_t : masse totale en g.

$$\text{d'où } \theta = h \cdot \text{da}(1 - \beta)$$

θ : humidité volumique

b) Résultats

Tableau 3.6

	Ap1	Ap2	(B)	Ap1	Ap2	Ap3	(B1)	(B2)
β %	0	8.7	10	0	11.7	8	3.5	3
da(1- β)	0.6	1.25	1.30	0.78	1.20	1.25	1.41	1.275
θ_c %	(48)	37.8	31.8	(42)	34.2	30	36.7	33.2
X %	(69)	84	75	(69)	76	66	88	70
Y %	(22)	7.2	10.2	(19)	10.8	11.6	4.9	14.2

θ_c : capacité au champ (en % du volume)

X = $\frac{\theta_c}{\text{porosité}} \times 100$: proportion de volume des pores occupés par l'eau à la capacité au champ

Y = porosité - θ_c : porosité remplie par l'air à la capacité au champ

On nota que la capacité au champ correspond à un remplissage important des pores par de l'eau (66 à 88 % du volume des pores).

335 - Mesures de perméabilité

3351 - Méthodes utilisées

Il s'agit de déterminer le coefficient K de Darcy en conductivité hydraulique à saturation. Pour cela, trois méthodes ont été comparées sur les horizons des deux profils : la méthode VERGIÈRE (BOURRIER 1965), la méthode MUNTZ - PIOGER, la méthode PORCHET (VEILLAUX, 1978). La méthode VERGIÈRE est celle où le gradient hydraulique est le mieux maîtrisé; on peut donc admettre que c'est la méthode qui donne la meilleure estimation de la conductivité hydraulique à saturation (K_s).

3352 - Résultats (tableau 3.7)

Quelle que soit la méthode, on aboutit aux résultats suivants :

- l'horizon de surface Ap1 est significativement plus perméable que les horizons sous-jacents (de l'ordre de 10^{-4} m/s)
- dès qu'on atteint l'horizon Ap2, la perméabilité est beaucoup plus faible, surtout au profil 2
- ensuite, la perméabilité reste constante en profondeur jusqu'à la base de l'horizon (B).

De plus, des mesures effectuées dans l'horizon C mettent en évidence une baisse importante de la perméabilité de cet horizon par rapport à l'horizon (B2) (K 100 fois plus faible environ).

	Ap1	Ap2	(B1)	(B2)
P 2	$1,2.10^{-4}$	$7,9.10^{-6}$		
P 3	$1,2.10^{-4}$	$2,4.10^{-5}$	$1,5.10^{-5}$	$1,3.10^{-5}$

Tableau 3.7 : Moyenne des valeurs de K Vergière en m/s

3353 - Compatibilité avec les profils hydriques

Les écarts de perméabilité entre deux horizons peuvent expliquer les différences d'humidité enregistrées entre ces horizons (cas des discontinuités Ap1 - Ap2 et (B) - C). L'eau en excès s'accumule au-dessus des horizons moins perméables.

L'eau ainsi stockée peut alors, d'une part, pénétrer lentement pour partie dans l'horizon sous-jacent et, d'autre part, s'évacuer latéralement sur la pente au sein de l'horizon supérieur plus perméable.

34 - CONCLUSION

L'étude des propriétés hydriques permet une meilleure caractérisation des horizons distingués au chapitre précédent. Les résultats confirment en particulier les discontinuités majeures entre les horizons, mises en évidence par l'étude pédologique initiale :

- discontinuité à la base de l'horizon superficiel d'enracinement de la prairie (plus forte en P2 qu'en P3)
- discontinuité à la base de l'horizon (B) au-dessus de l'horizon C d'altération du schiste

Celles-ci se marquent en effet par des différences :

- de densité (porosité)
- de perméabilité
- de comportement hydrique (valeurs de la capacité au champ, temps nécessaire après une forte pluie pour atteindre à nouveau la capacité au champ).

IV - ETUDE DE LA CIRCULATION DE L'EAU DANS LES SOLS

41 - MISE EN EVIDENCE DES CIRCULATIONS LATERALES DANS LES SOLS

Le concept de circulation latérale de l'eau dans les sols a été évoqué par de nombreux auteurs dans l'étude de l'écoulement de l'eau dans les sols (MAIGNIEN, 1958 ; RUELLAN, 1971 ; BOCQUIER, 1973).

Plusieurs faits convergents qui montrent l'existence de ce phénomène dans le site choisi pour l'étude seront rassemblés dans ce chapitre.

411 - Propriétés hydriques des sols

Les mesures d'humidité effectuées en amont des profils P2 et P3 ont montré des augmentations importantes et fugaces de l'humidité des horizons (B) après de fortes pluies. Les valeurs de ces pics d'humidité correspondaient parfois à l'observation directe d'eau libre.

La chute du taux d'humidité qui ramène ensuite l'horizon à sa capacité au champ peut être due principalement à trois causes :

- l'évapotranspiration
- un drainage vertical
- un drainage latéral

L'évapotranspiration est très faible pendant toute la période humide et doit donc être écartée.

Le drainage vertical reste vraisemblablement faible si l'on considère :

- . l'absence d'augmentation significative de la teneur en eau de l'horizon C quand l'horizon (B) montre un pic
- . la perméabilité de l'horizon C inférieure à celle de l'horizon (B).

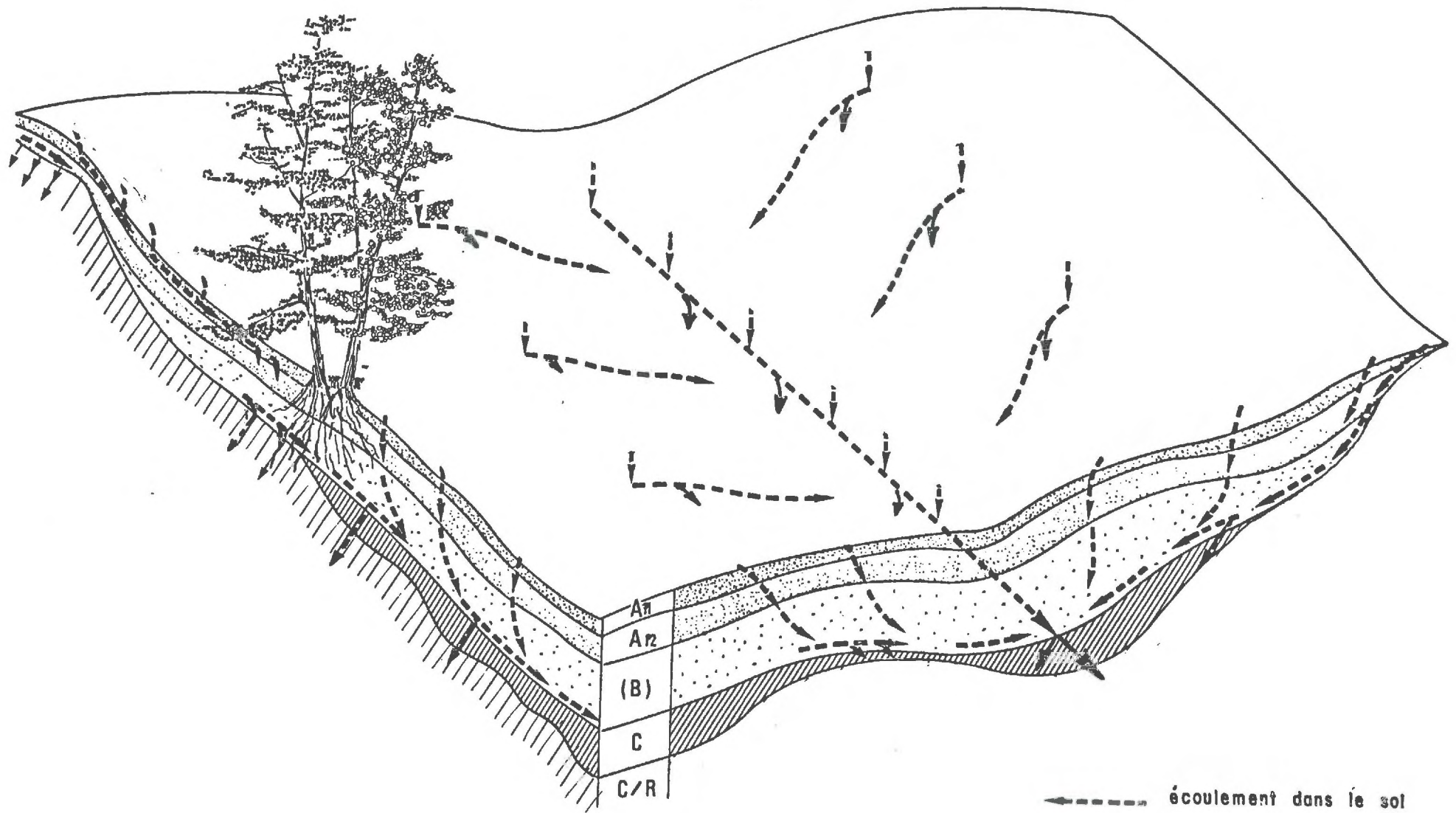
Le drainage latéral serait donc la principale cause des variations d'humidité des horizons (B).

412 - Observation directe

Au cours de l'étude des sols, il a été vérifié que l'eau s'écoulait à la base de l'horizon Ap1 (dans certaines zones peu étendues) mais plus généralement à la base des horizons (B). A titre d'indication, l'ordre de grandeur des débits peut atteindre 5l/minute sur une section de 1m de large. Aucun ruissellement de surface n'a été observé.

L'ouverture de profils pédologiques en période pluvieuse a permis de suivre des phases d'écoulement s'effectuant aux niveaux pédologiques précédemment décrits et ce, essentiellement à partir de la paroi amont des profils. Lorsque les circulations ont cessé, les parois amont des profils sont toujours restées les plus humides.

Fig. 4.1 - CIRCULATION DE L'EAU DANS LES SOLS



413 - Ressuyage des sols

A l'aide des sondages à la tarière, le ressuyage de l'horizon (B) a pu être apprécié. Il est apparu que certaines zones conservaient plus longtemps une humidité importante, sinon la saturation, à la base de l'horizon (B). Ces zones correspondent sur les pentes aux sols bruns profonds (unité 3).

Ce ressuyage retardé a été confirmé par le décalage observé entre les profils P2 et P3. En effet, l'arrêt des circulations latérales s'effectue, pour le profil 3, deux jours après leur arrêt au profil 2 situé à l'amont.

42 - SCHEMA DE CIRCULATION DES EAUX DANS LES SOLS ET CONCLUSION

L'étude menée ici, appuyée de travaux complémentaires du laboratoire de Science du Sol de l'ENSA - INRA de Rennes (RIVIERE, communication orale ; RUELLAN, 1976 ; CARNET, 1978 ; MEROT, 1978) et de communications orales avec des géologues de l'Université de Rennes (CHAUVEL, QUETE) permet l'élaboration d'un schéma de circulation de l'eau dans les sols étudiés (figure 4.1).

En période humide, lorsque le sol a bien reconstitué ses réserves hydriques, une série de pluies importantes provoque un dépassement de la capacité au champ, dans la partie supérieure des profils, et la percolation s'installe.

Cette percolation d'eau libre conduit l'eau à la base de l'horizon (B); bloquée par l'horizon C, celle-ci est principalement évacuée latéralement. Localement, lorsque l'horizon Ap2 est très tassé, un ruissellement hypodermique s'installe à la base de l'Ap1.

Les circulations latérales dans les sols sont à mettre en relation avec l'apparition de sources dites "sources folles" en raison de leur débit variable, et avec les variations de débits des ruisseaux, consécutives aux fortes pluies.

L'infiltration verticale des eaux en profondeur est néanmoins possible, notamment dans les zones où la roche mère est plus gréseuse. Ces infiltrations alimentent les puits de faible profondeur que l'on rencontre dans les matériaux briovériens. Le travail réalisé ici ne permet pas de chiffrer le rapport moyen entre les volumes circulant latéralement et les volumes susceptibles de s'infiltrer verticalement.

La mise en évidence de ces circulations latérales d'eau impose d'en tenir compte dans l'analyse du fonctionnement actuel de ces sols. Elle conduit, en outre, à envisager sous un angle différent l'aménagement de tels sols.

L'effet d'un épandage de laitier dans un tel contexte sera étudié dans la deuxième partie.

DEUXIEME PARTIE :

Effets des épandages de laiterie
sur les sols et les eaux.

Le sol cultivé est de plus en plus sollicité pour l'épuration des déchets et, en particulier, pour l'épandage des eaux résiduaires des industries agricoles et alimentaires et des élevages. Un grand nombre d'établissements utilisent cette technique d'épuration; ceci nécessite de connaître les mécanismes du pouvoir épurateur des sols et d'en connaître les limites dans chaque cas d'épandage envisagé.

La deuxième partie de ce travail portera précisément sur la mise en évidence des effets d'un épandage de laiterie-fromagerie sur les eaux et les sols. Nous envisagerons successivement l'effet d'un épandage sur les circulations d'eau dans les sols, l'effet de l'épandage sur les eaux drainant les terrains d'épandage, l'effet de l'épandage sur les sols. Dans un dernier chapitre, nous proposerons un modèle simplifié rendant compte des relations pouvant exister entre la composition cationique de la solution du sol et les cations adsorbés sur le sols.

Nous n'aborderons pas, dans cette deuxième partie, l'aspect pratique de l'organisation de l'épandage : conception des études de périmètres d'épandage et du suivi agronomique qui doivent être menés pour maîtriser l'épuration à réaliser. Ceci a déjà fait l'objet de travaux précédents (BUSON, 1977) et a été publié par l'Agence Financière de Bassin Seine-Normandie sous forme de cahier technique n°8 (Avril 1978).

V - CONDITIONS DE RÉALISATION DE L'ÉPANDAGE DE LA FROMAGERIE ÉTUDIÉE

51 - L'ÉTABLISSEMENT

Il s'agit d'une fromagerie située au Nord de Vire (Calvados). Elle est construite le long d'un bief de la Vire, ce qui permet une production d'électricité directement utilisable par l'usine. Cette fromagerie a été créée en 1908.

Sa principale activité est la fabrication de fromage à pâte molle (camembert), au lait cru, mais à moulage mécanisé.

La production a évolué de la manière suivante :

1908	500 camemberts par jour	(c/j)
1953	9000	"
1961	14000	"
1965	18000	"
1970	22000	"
1973	30000	"
1974 - 78	25000	"

La production annuelle se situe entre 6 et 7 millions de fromages (1974 : 7 millions ; 1975 : 6,5 millions ; 1976 : 6,4 millions ; 1977 : 6,22 millions)

La laiterie collecte environ 60.000 litres de lait par jour. Sur ce litrage reçu à l'usine, seulement 51.000 litres entrent en fabrication chaque jour ouvré. Ceci donne donc une moyenne de 2,04 litres par camembert. L'excédent collecté est redistribué sur les usines du groupe.

52 - LES EAUX RÉSIDUAIRES

521 - Origine

Elles sont constituées essentiellement d'eaux de lavage :

- lavage des bidons (la moitié de la collecte s'effectue en bidons)
- lavage des citernes
- lavage des machines
- lavage des sols

522 - Volume

Le volume se situe très régulièrement à 460m³ par semaine, soit un volume de 1,80 litre d'eau résiduaire par litre de lait traité. Cette valeur est tout à fait courante pour de tels établissements (MEINCK & al., 1977 - F. BERTRAND, 1977). Le volume annuel est proche de 24.000m³ d'eau résiduaire.

523 - Composition

Les eaux résiduelles ont une composition moyenne assez caractéristique des effluents de fromagerie.

pH	DCO mg/l	DBO ₅ mg/l	MES mg/l	N mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l	Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	Cl mg/l	Conduct. mmho/cm
4.34	5944	3720	400	129	6.0	449	127	18.3	153	600	3.2

L'effluent se caractérise donc par un pH acide et une forte charge organique et minérale. L'azote est essentiellement sous forme organique et la caractéristique réducteur de l'effluent bloque la nitrification de l'ammoniaque formé. Pour les cations, on note une forte prédominance des alcalins (Na⁺, K⁺) par rapport aux alcalino-terreux. Le S.A.R ($\frac{Na^+}{\sqrt{Ca^{2+}+Mg^{2+}}}$) de l'effluent est voisin de 12, ce qui, compte tenu de sa conductivité rend les risques de sodisation très élevés (RICHARDS, 1969).

53 - REALISATION DE L'EPANDAGE

Les effluents de la journée sont stockés dans une bache de 100m³ environ. En fin de journée, l'effluent est pompé et refoulé dans les canalisations enterrées. Deux canons arroseurs fixés sur des bouches de sortie assurent la répartition de l'effluent. Le débit de l'installation est de 15m³/heure environ, à raison de 7,5m³ par arroseur. Le volume journalier est donc pompé en moins de 5 heures.

La répartition de l'arrosage est représentée dans le graphique. Les canons utilisés arrosent au maximum à 15 mètres de rayon, soit une surface proche de 700m². A l'intérieur de cette surface, l'essentiel de l'arrosage s'effectue dans un rayon de 10 mètres (= 300m²).

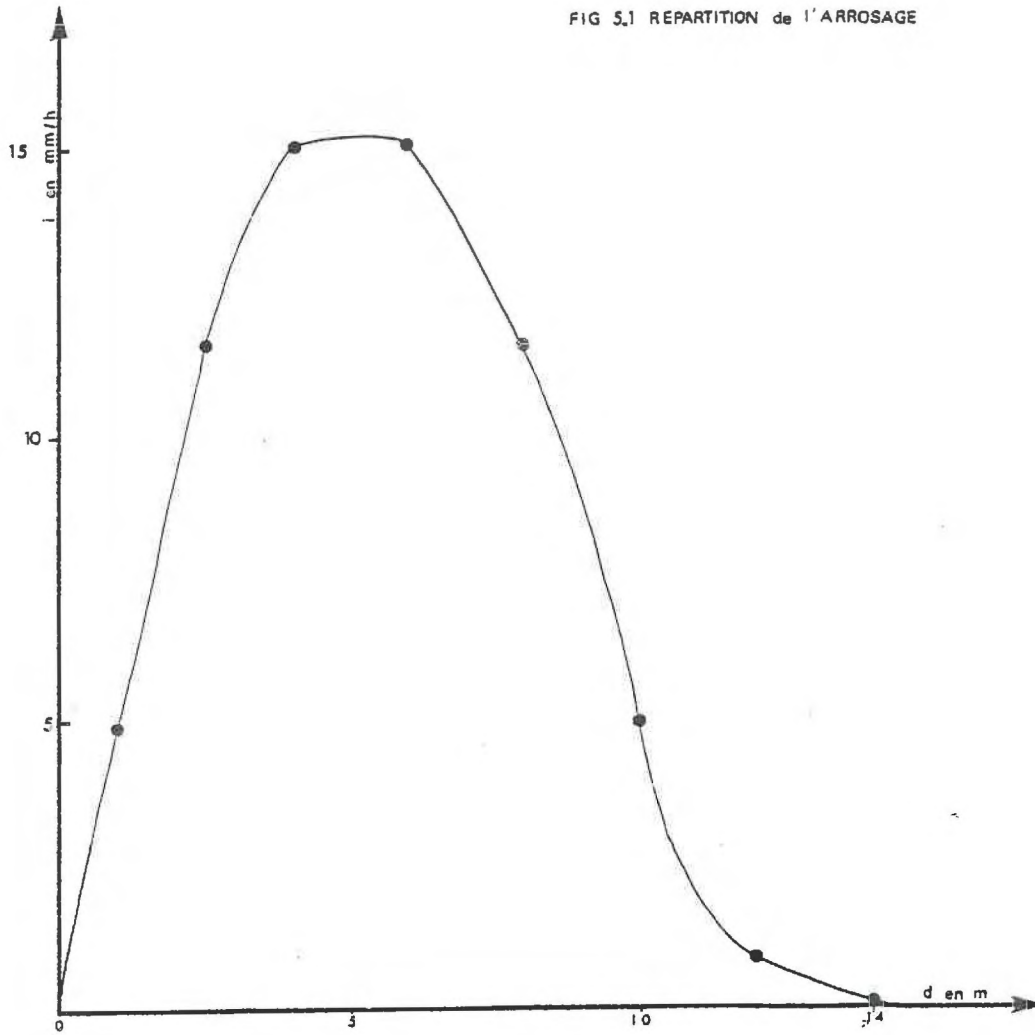
54 - LES TERRAINS UTILISES

La surface totale installée est égale à 13,6 hectares; en fait, 6,4 ha ne sont plus arrosés (parcelles proches de l'usine et de la rivière). Seules les parcelles situées sur la pente sont utilisées, soit au total, 10,2 ha. On apporte donc en moyenne, 2.000m³/ha/an, soit une pluviométrie de 200 mm.

Néanmoins, la parcelle située juste au-dessus de la voie ferrée a reçu beaucoup plus d'effluents, avant que l'installation complète ne soit réalisée (1968). Les profils P₂ et P₃ appartiennent à une parcelle qui a reçu environ 200 mm/an d'effluent depuis 1968.

Les terrains utilisés sont occupés par une prairie naturelle, de qualité médiocre, qui est pâturée, pratiquement toute l'année, par de jeunes bovins. Les exportations en éléments fertilisants sont faibles et les possibilités d'épuration par épandage sont limitées.

FIG 5,1 REPARTITION de l'ARROSAGE



55 - CONCLUSION

L'établissement a des caractéristiques très représentatives des fromageries. L'épandage réalisé s'effectue à fortes doses, sur des surfaces restreintes, depuis plus de 10 ans, en particulier dans les prairies les plus proches de l'usine. L'étude des sols et des eaux dans un tel contexte, devrait donc permettre de mettre en évidence l'effet d'un épandage important.

Chaque fois que cela sera possible, les résultats obtenus dans le cadre de cette laiterie seront comparés aux effets des épandages de laiterie étudiés par ailleurs.

VI - EFFET DES ÉPANDAGES SUR LES EAUX

Nous distinguerons dans ce chapitre, l'effet rapide de l'épandage de l'effet à plus long terme.

Pour l'effet rapide, il a paru intéressant de préciser, dans le contexte de circulation latérale étudié dans les chapitres précédents, le devenir de l'effluent immédiatement après l'épandage. On insistera essentiellement sur les questions suivantes :

- l'effluent suit-il les mêmes voies de circulation que celles décrites ou prévues ?
- l'épandage modifie-t'il les débits et la qualité de l'eau dans les sols ?

Plusieurs essais d'épandage ont été réalisés sur les prairies étudiées précédemment. Pour tester les deux cas de circulation latérale mis en évidence, des épandages ont été effectués en amont du profil P2 (circulation à la base de l'horizon A_{p1}) et en amont du profil P3 (circulation à la base de l'horizon (B)).

Pour l'effet à plus long terme, plusieurs sources influencées ou non par l'épandage de la laiterie ont été comparées.

61 - CAS D'UNE CIRCULATION A LA BASE DE L'HORIZON D'ENRACINEMENT (A_{p1})

611 - Installation (fig. 6.1)

Le profil P2 utilisé correspond à un profil où l'horizon A_{p2} très tassé et massif induit une circulation à son sommet.

Nous avons installé dans l'horizon A_{12} de ce profil un préleveur d'eau de percolation en PVC (de 20 cm de large). L'eau circulant à la base de l'horizon d'enracinement pourra ainsi être étudiée : mesures du débit sur 20 cm de largeur, prélèvements pour analyse.

L'arroseur est placé à 33 m en amont du profil P2.

L'expérience se situe après une période fortement pluvieuse. L'humidité des sols se situe autour de la capacité au champ. Le dernier épandage date de plus de 3 semaines.

612 - Effet des épandages sur les débits

Dans les quelques heures qui suivent les épandages, on observe des circulations latérales au niveau prévu (base de l' A_{p1}). Dans le même délai, il n'a pas été observé de circulation latérale à la base du (B). Les figures 6.2 et 6.3 illustrent les variations de débit.

On peut distinguer plusieurs phases (fig. 6.2.) :

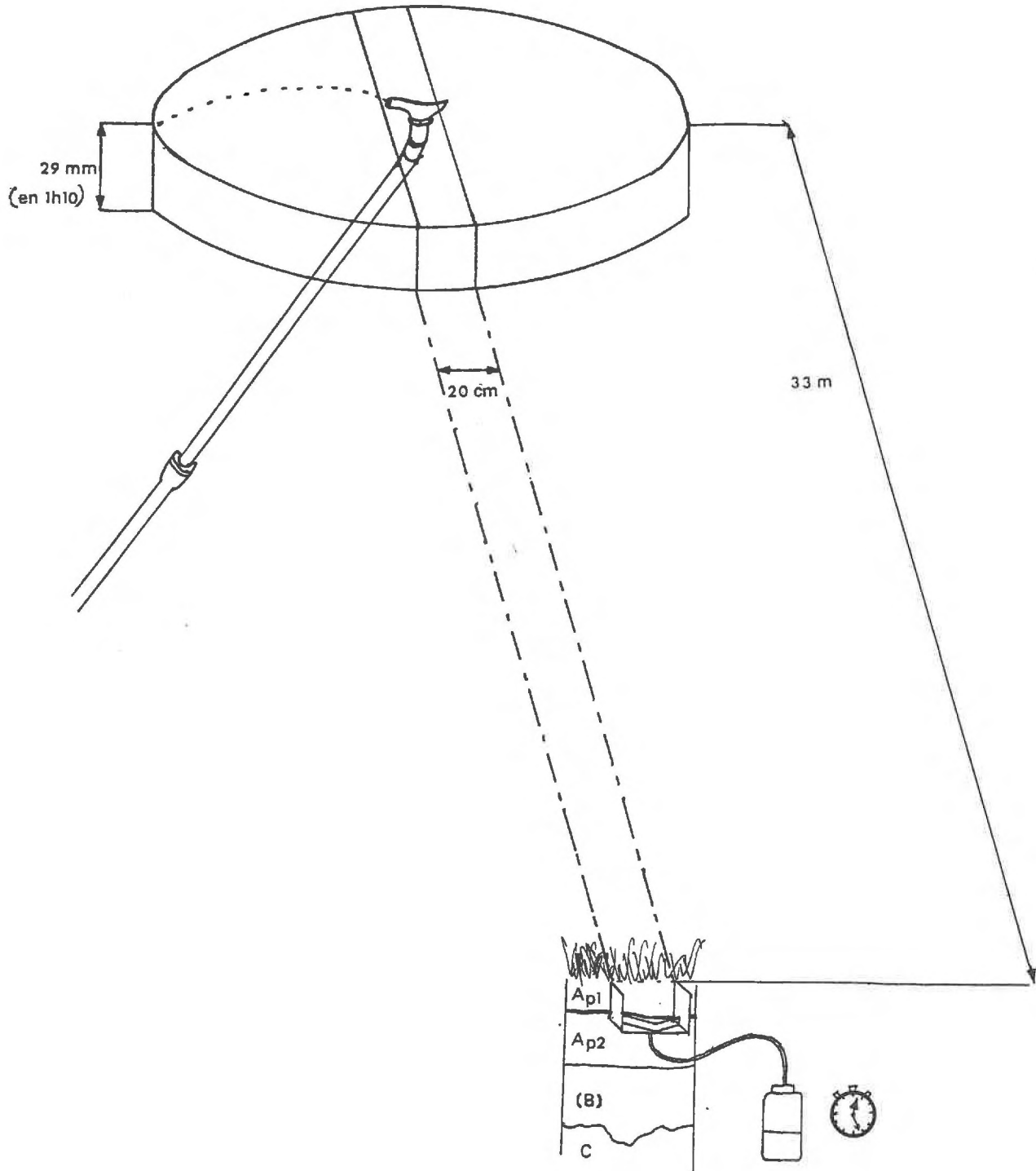
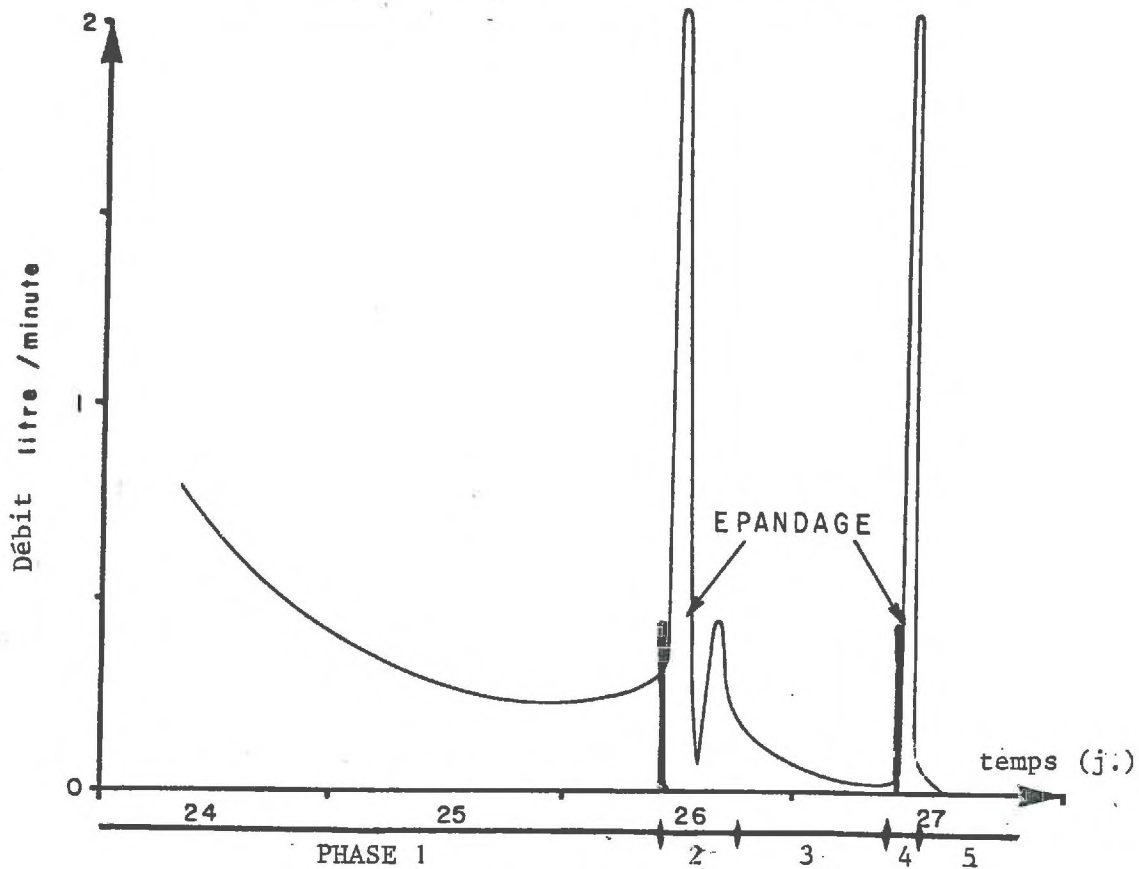


FIG. 6.1 - INSTALLATION au PROFIL 2

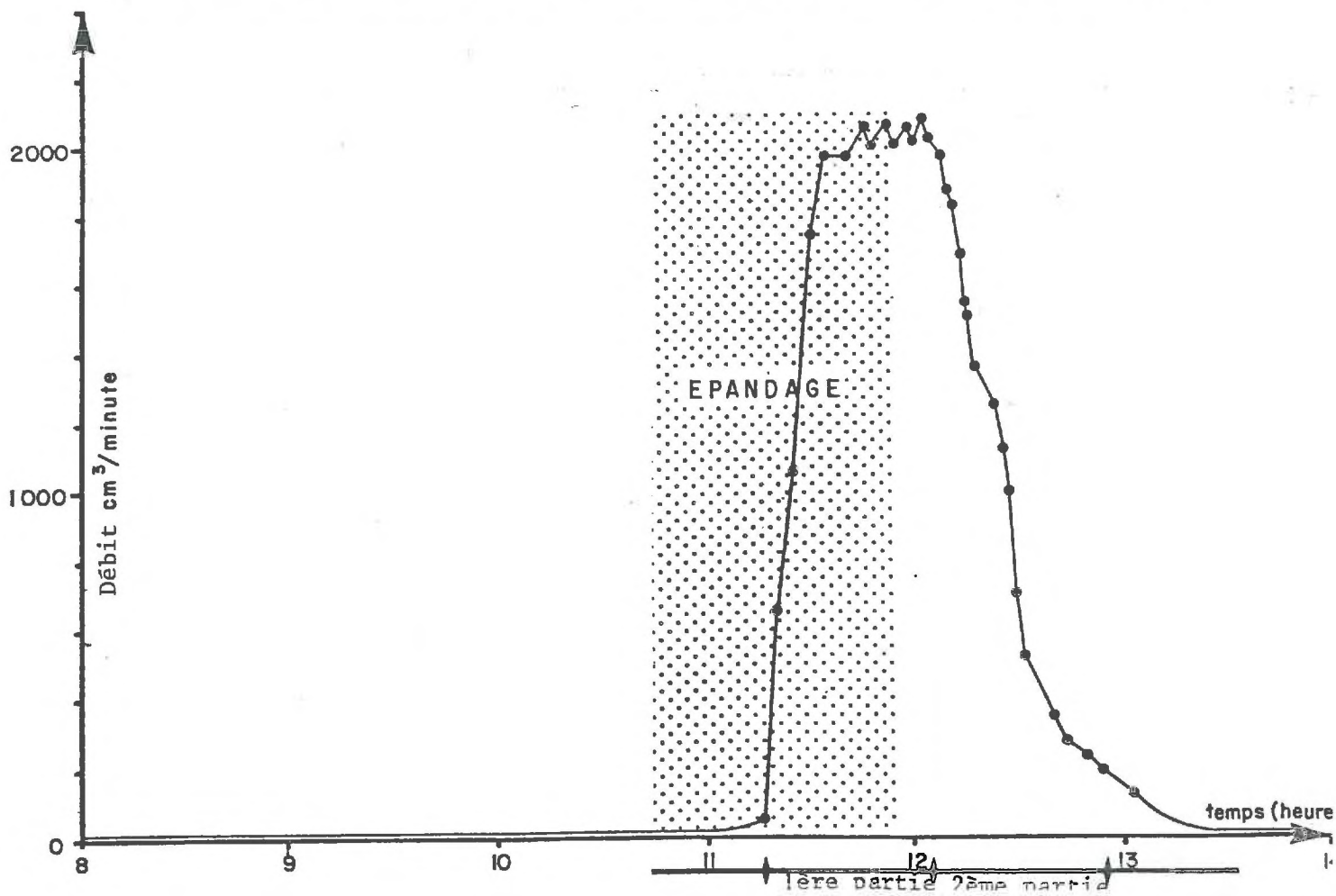
Fig. 6.2 - DEBITS A LA BASE DE L'Ap₁ - PROFIL 2



Pluviométrie des jours précédents (en mm) :

17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
18,6	0,6	0,9	0	0	7,5	1,3	0	0	3	0

Fig. 6.3 - DEBITS A LA BASE DE L'Ap₁ APRES L'EXPERIENCE - PROFIL 2 (PHASE 4)



- les 48 heures précédant l'épandage (1ère phase) où on note la décroissance régulière des débits;
- les périodes suivant immédiatement les épandages (2ème et 4ème phases) où les débits subissent une augmentation brutale suivie d'une décroissance lorsque les épandages ont cessé à l'amont. La quatrième phase (épandage du 27) a été mieux suivie (fig.6.3); on y distingue deux parties:
 - . augmentation des débits et stabilisation (1ère partie)
 - . baisse des débits (2ème partie)
- la période après les épandages (3ème et 5ème phases) où les débits rejoignent la tendance exprimée dans la première phase.

Nous retiendrons que les épandages effectués à l'amont (33 mètres) provoquent à l'aval des augmentations très fortes de débit (jusqu'à 21/minute) sans qu'on observe de ruissellement en surface.

Le temps de réponse est court : 30 minutes environ après le début de l'arrosage, ce qui situe l'ordre de grandeur des vitesses apparentes de circulation dans le sol à 1 m par minute.

Si nous supposons que l'eau recueillie n'est due qu'à la circulation latérale de l'effluent apporté par l'épandage (à la pluviométrie de l'expérience) sur un plan incliné, nous pouvons estimer la quantité d'eau qui doit passer sur un segment de 20 cm de large, perpendiculaire à la direction de l'écoulement (115 l) et le débit constant de l'eau dans le préleveur (1,64 l/minute) (fig. 6.1).

On observe qu'environ 130 l sont passés dans le préleveur et que le débit maximal est proche de 2 l. Ces deux résultats restent donc dans l'ordre de grandeur des valeurs théoriques aux variations près, dues au relief, et vont dans le sens de l'hypothèse évoquée.

6.13 - Effet des épandages sur la composition chimique des eaux du sol (tab. 6.1 et 6.2)

La composition des eaux avant épandage (1ère phase) est assez constante. On note une concentration globale faible, une dominance des alcalino-terreux sur les alcalins ($(Ca^{2+} + Mg^{2+}) > (Na^{+} + K^{+})$), un rapport Na/K élevé (≈ 11), une dominance de la forme nitrée pour l'azote ($\approx 6,5 \text{ mg/l N}$).

Immédiatement après les épandages (2ème et 4ème phases), on note une évolution brutale de la composition de l'eau. Une quantité importante des éléments apportés se retrouve dans l'eau qui percole rapidement. La quatrième phase a été étudiée plus en détail (fig. 6.4 et 6.5) :

- dans sa première partie :
 - . les concentrations globales croissent avec les débits recueillis; la somme des cations passe par exemple, de 2,3 à 20meq.
 - . le rapport alcalinoterreux/alcalins baisse (≈ 6).
 - . l'azote est essentiellement sous forme organique et ammoniacale : il y a disparition de la forme nitrate.
- dans sa deuxième partie, les concentrations globales baissent beaucoup moins que les débits. Les caractéristiques des eaux restent très proches de la première partie.

Plusieurs heures après les épandages (3ème et 5ème phases), les concentrations globales se rapprochent des concentrations avant épandage. Il reste néanmoins quelques traces des épandages précédents (valeur encore relativement élevée des cations Ca^{2+} , K^{+} , Na^{+} ; valeur encore faible de Na/K, du rapport alcalinoterreux sur alcalins)

Fig. 6.4 - PROFIL 2.

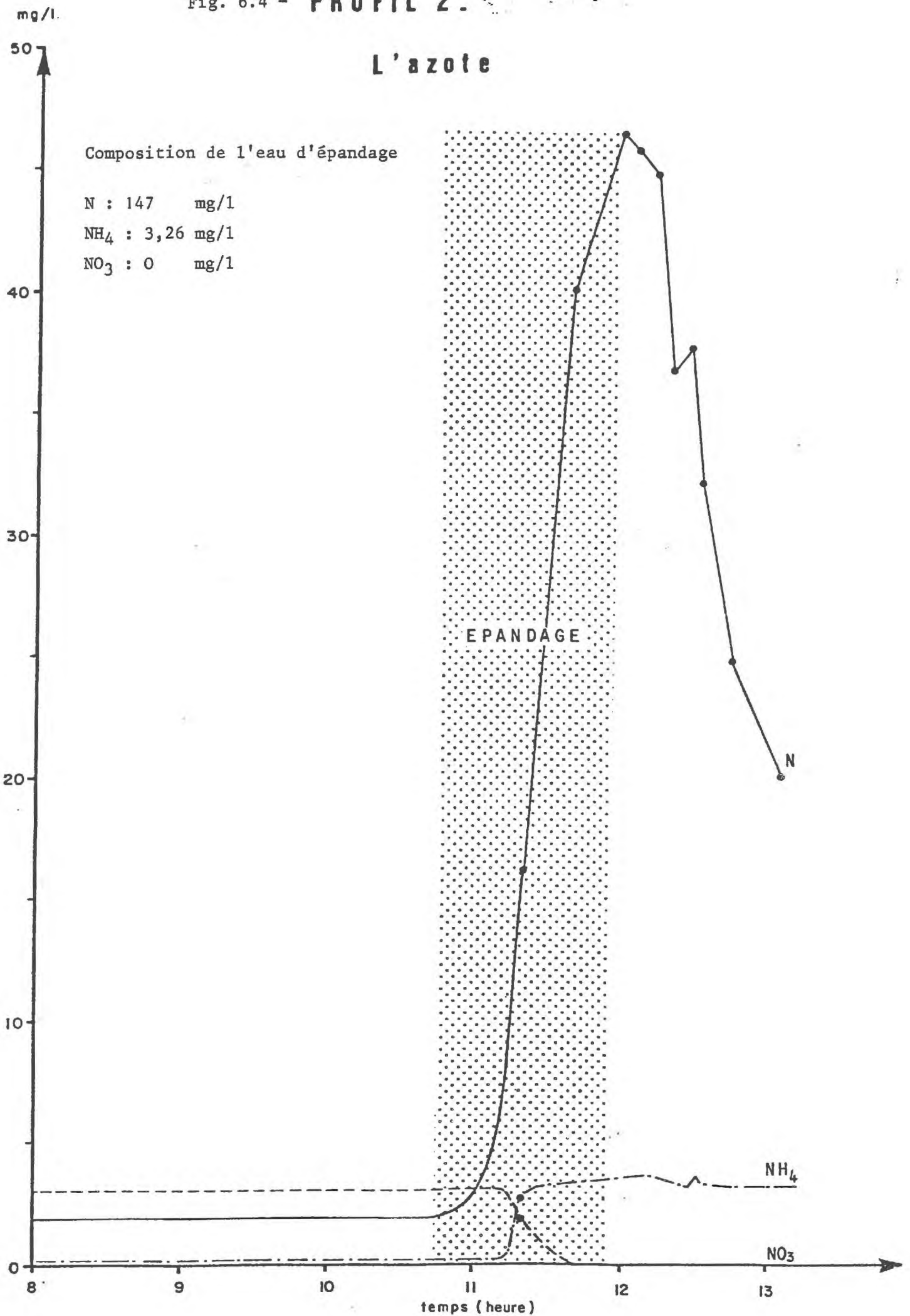


Fig. 6.5 - PROFIL 2 .

ELEMENTS MINERAUX

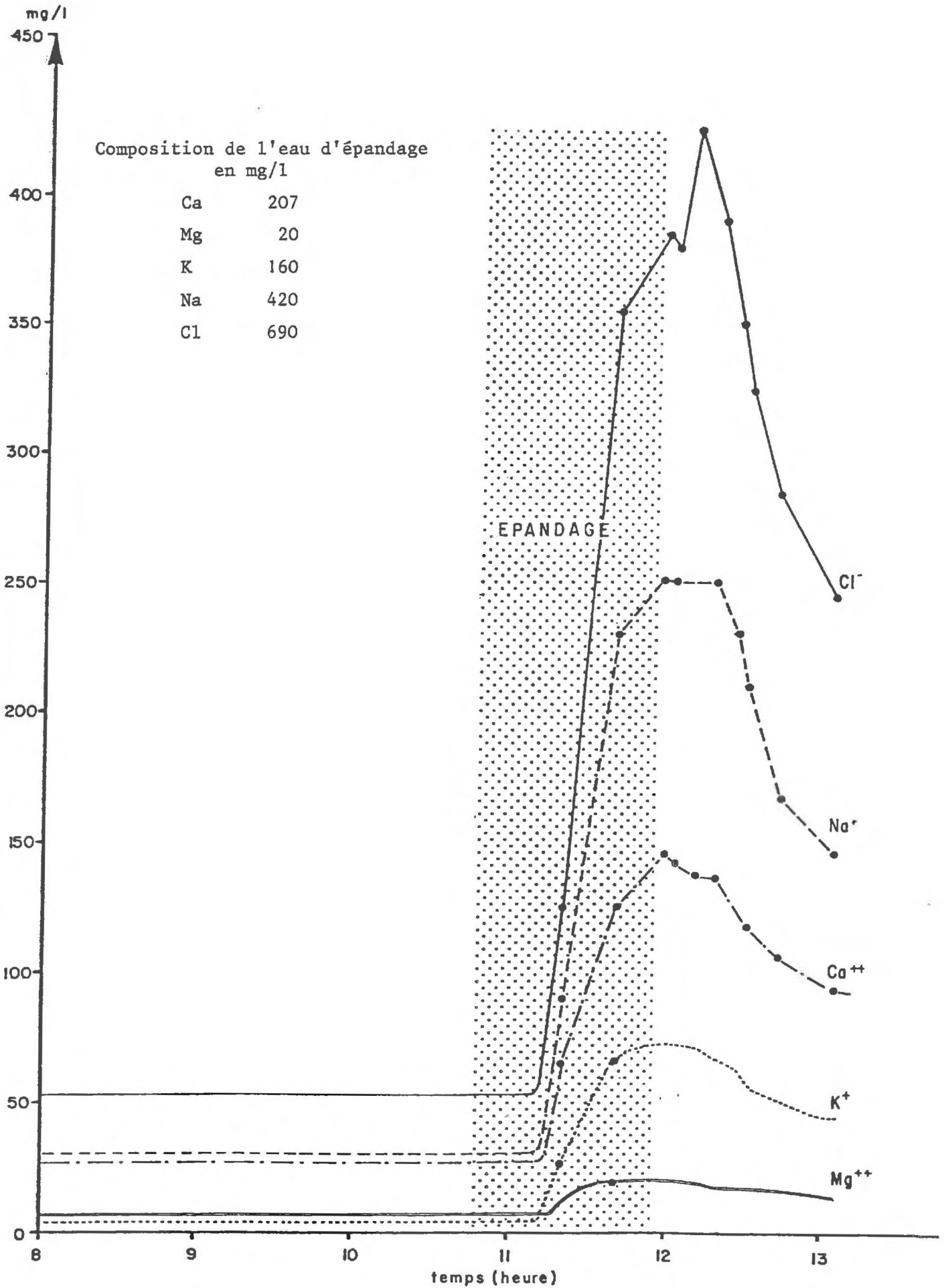


TABLEAU 6.1 : COMPOSITION DES EAUX S'ÉCOULANT A LA BASE DE L'Ap1

date	24	25	26	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	28
heure	16.35	9.30	9.30	8.00	11.20	11.40	11.58	12.04	12.11	12.18	12.27	12.31	12.43	13.05	10.00
débit cm ³ /mn	550	350	300	50	650	2100	2100	2100	1980	1400	1000	520	270	120	20
Nk mg/l	0.7	1.2	0.7		16.1	39.9	46.5	45.8	44.8	36.8	37.4	32.2	24.8	19.9	
NO ₃ N mg/l	7.8	7.8	5.2	3	1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	1.2	
NH ₄ N mg/l	0.26	0.26	0.26	0.14	2.46	3.06	3.4	3.5	3.7	3.4	3.26	3.46	3.2	3.1	0.38
Ca mg/l	23	22	16	27	64	126	146	142	139	138	118	119	107	94	31
Mg mg/l	6.4	6.4	6.8	7.6	11	20	20	20	20	18	18	18	18	15	7.4
K mg/l	2	2.9	2.3	5.2	27	66	72	72	72	68	64	58	53	46	16
Na mg/l	16	18	18	30	90	230	250	250	250	250	230	210	168	148	58
Cl mg/l	24	24	25	51	195	355	385	380	425	390	350	325	285	245	82

TABLEAU 6.2 - COMPOSITION CATIONIQUE DES EAUX A LA BASE DE L'Ap₁ (P2)
PENDANT L'EXPERIENCE

en meq/l	1° phase	3° phase	4° phase		5° phase
			1ère partie	2ème partie	
Ca	0,95	1,35	6,9	5,5	1,55
Mg	0,51	0,59	1,5	1,3	0,57
K	0,07	0,13	1,8	1,4	0,4
Na	0,78	1,30	10,6	8,2	2,5
Σ cations	2,31	3,37	20,8	16,4	5
Na / K	11	10	5,9	5,9	6,2
Ca + Mg / Na + K	1,7	1,36	0,7	0,7	0,73
Ca / Mg	1,9	2,3	4,6	4,2	2,7

Il semble donc que les épandages se manifestent par une variation importante à l'aval de la composition de l'eau du sol, immédiatement après les épandages. Cette modification est temporaire et l'eau du sol retrouve assez rapidement une composition plus proche de l'eau s'écoulant dans le sol avant les épandages.

614 - Discussion

6141 - Modèle de mélange

Si nous considérons que l'eau recueillie pendant l'expérience d'épandage est un mélange d'eau du sol et d'effluent nous pouvons décomposer la quantité d'eau recueillie Q en deux quantités : Q_0 et Q_1 .

$$\begin{aligned} Q \text{ d'eau recueillie} &= Q_0 \text{ d'eau du sol} + Q_1 \text{ d'effluent} \\ &= Q_0 + \alpha Q \quad \text{avec } \alpha = \frac{Q_1}{Q} = \text{pourcentage de mélange dans l'eau recueillie} \end{aligned}$$

La concentration C_i en un élément i dans l'eau recueillie est égale à :

$$C_i = \frac{Q_0 C_{i_0} + \alpha Q C_{i_1}}{Q} \quad \text{avec } C_{i_0} = \text{concentration en un élément de l'eau du sol} \\ C_{i_1} = \text{concentration de l'effluent en } i.$$

$$\text{d'où } C_i = (1 - \alpha) C_{i_0} + \alpha C_{i_1}$$

$$\text{d'où } \alpha = \frac{C_i - C_{i_0}}{C_{i_1} - C_{i_0}}$$

Calcul de α à partir des concentrations maximales des ions observées dans l'eau recueillie :

TABLEAU 6.9

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻
eau du sol C _{i0} mg/l	20	7	2.3	18	24
effluent C _{i1} mg/l	207	20	160	420	690
maximum observé C _{im} mg/l	139	20	72	250	425
effluent/eau recueillie α _m %	0.63	1	0.44	0.58	0.60

6142 - Comportement des ions

S'il n'y a pas d'interaction avec le sol, les valeurs de α sont les mêmes pour tous les éléments à un instant donné. L'ion Cl⁻ en quantité faible dans les sols et peu retenu dans les sols constituera ici l'élément qui donne la meilleure estimation du mélange réalisé, donc de la valeur probable de α (de l'ordre de 0,60 pour les eaux les plus concentrées).

Il semble donc que Na^+ et Ca^{2+} se comportent dans cette expérience comme Cl^- , c'est-à-dire - selon l'hypothèse précédente - comme résultant d'un mélange entre l'eau du sol et l'effluent épandu, sans interaction avec le sol. Par contre, si l'on poursuit le raisonnement sur les autres éléments, nous noterons que, à cette échelle d'observation, K^+ semble être retenu par le sol alors que Mg^{2+} semble être fourni par le sol.

6143 - Variation des valeurs de α et interprétation

Comme les concentrations des ions varient de Ci_0 à Ci_{max} , α varie dans le temps de 0 à 60 %. Le pourcentage de mélange n'est pas constant pendant l'expérience.

Au cours de la première partie de la 4ème phase, α varie comme les débits. Cette observation élimine l'hypothèse d'un mélange rapide entre l'effluent et l'eau du sol, suivi d'une circulation latérale de concentration constante (fig. 6.6).

Les résultats de la première partie peuvent s'interpréter par le déplacement distinct de l'eau du sol et de l'effluent provoqué par l'épandage, aboutissant à un mélange variable. Ce mélange variable serait dû essentiellement à la variation de débit de la circulation de l'effluent (fig. 6.7).

Dans la deuxième partie de la 4ème phase, la baisse des débits est forte alors que les proportions du mélange baissent légèrement; le mélange avec l'eau du sol est donc mieux réalisé.

62 - CAS D'UNE CIRCULATION AU-DESSUS DE L'HORIZON C D'ALTERATION

621 - Installation (fig. 6.8)

Nous nous sommes placés sur une tranchée d'évacuation des eaux du profil P3. L'eau provient d'une circulation latérale à la base de l'horizon (B). Il n'y a pas d'écoulement à la base de l'Ap₁. En effet, l'Ap₂ est moins tassé qu'au profil P2 et la discontinuité entre les deux horizons est moins marquée.

L'arroseur est situé 20 mètres en amont du profil P3.

622 - Effet des épandages sur les débits observés

Après la forte période pluvieuse, les débits d'eau circulant à la base de l'horizon (B) décroissent régulièrement et s'annulent avant l'essai d'épandage (fig. 6.9. 1ère phase).

L'épandage effectué pendant 1 h 50 provoque une nouvelle circulation à la base de l'horizon (B) (fig. 6.10. 2ème phase). Toutefois, le temps de réponse est plus long que dans le cas précédent (2 heures après le début de l'arrosage, soit une vitesse apparente de l'ordre de 0,16m par minute).

Les débits enregistrés après épandage sont faibles par rapport à ceux du profil P2. Les volumes recueillis sont faibles (15 l environ).

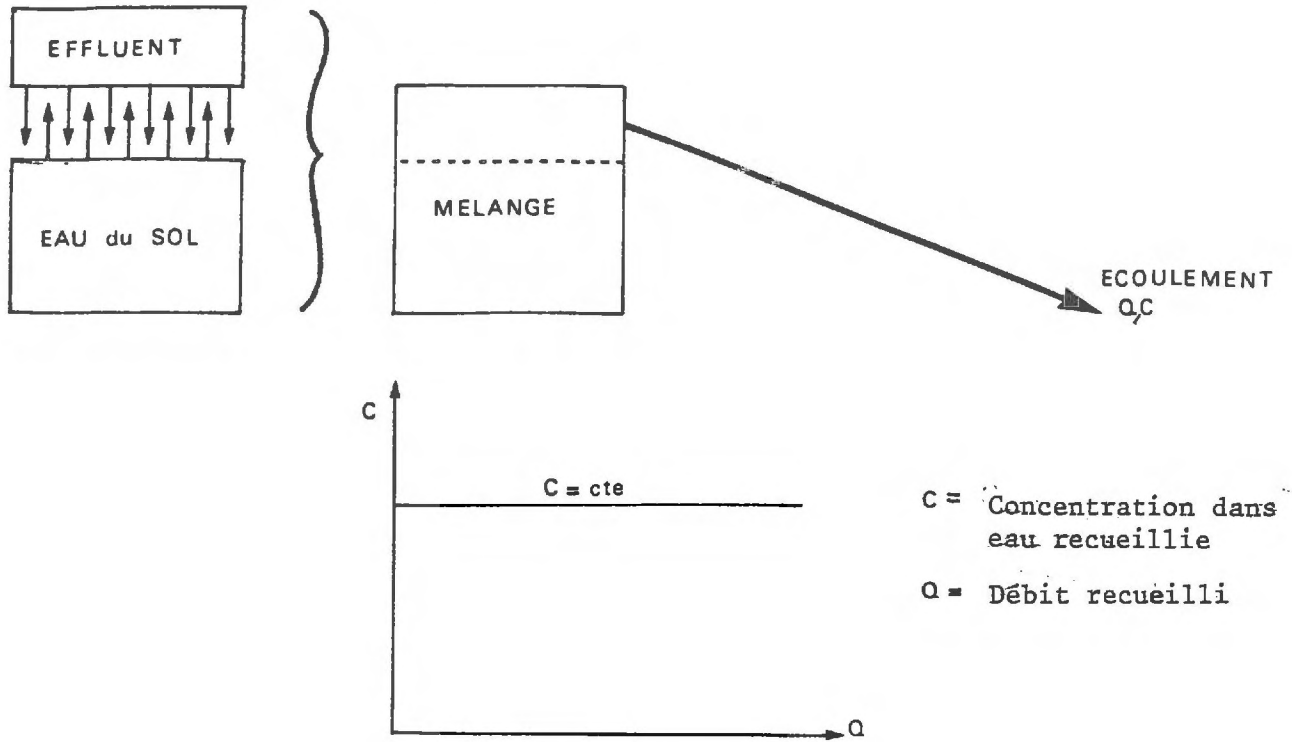


FIGURE 6.6 : Cas d'un mélange rapide entre l'effluent et l'eau du sol

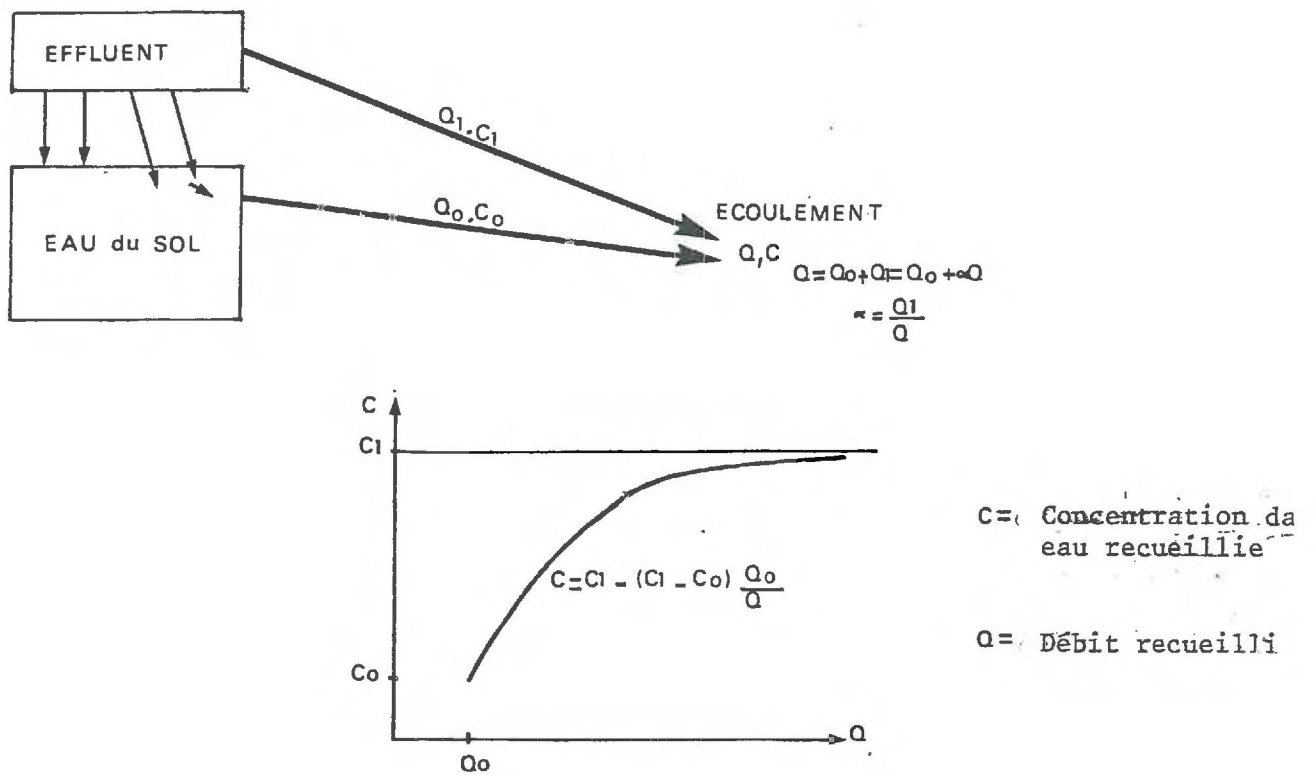


FIGURE 6.7 : Cas d'un déplacement distinct entre l'effluent et l'eau du sol

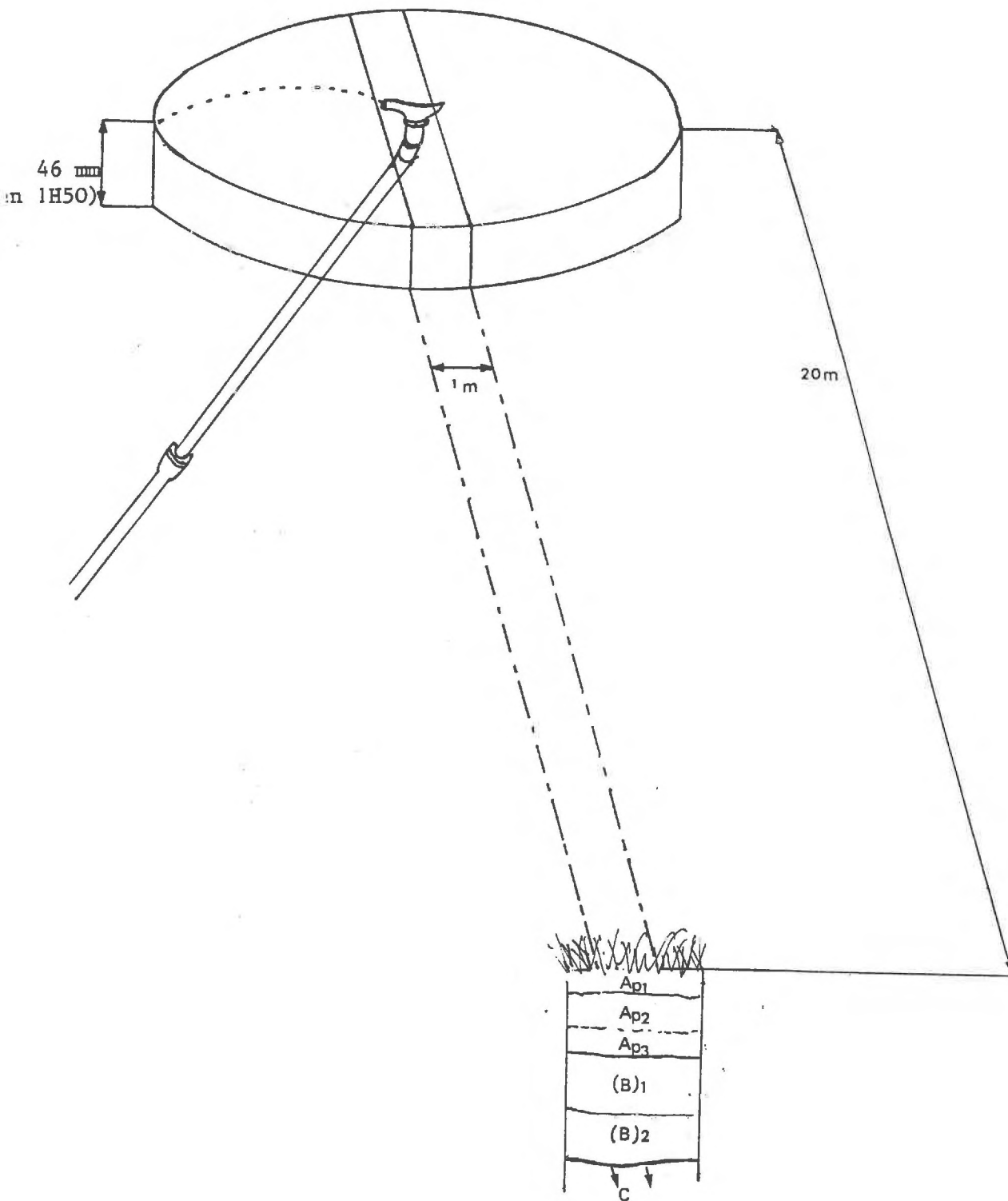


FIG. 6 .8 - INSTALLATION au PROFIL 3

Fig. 6.9 - DEBITS A LA BASE DU (B) - PROFIL 3

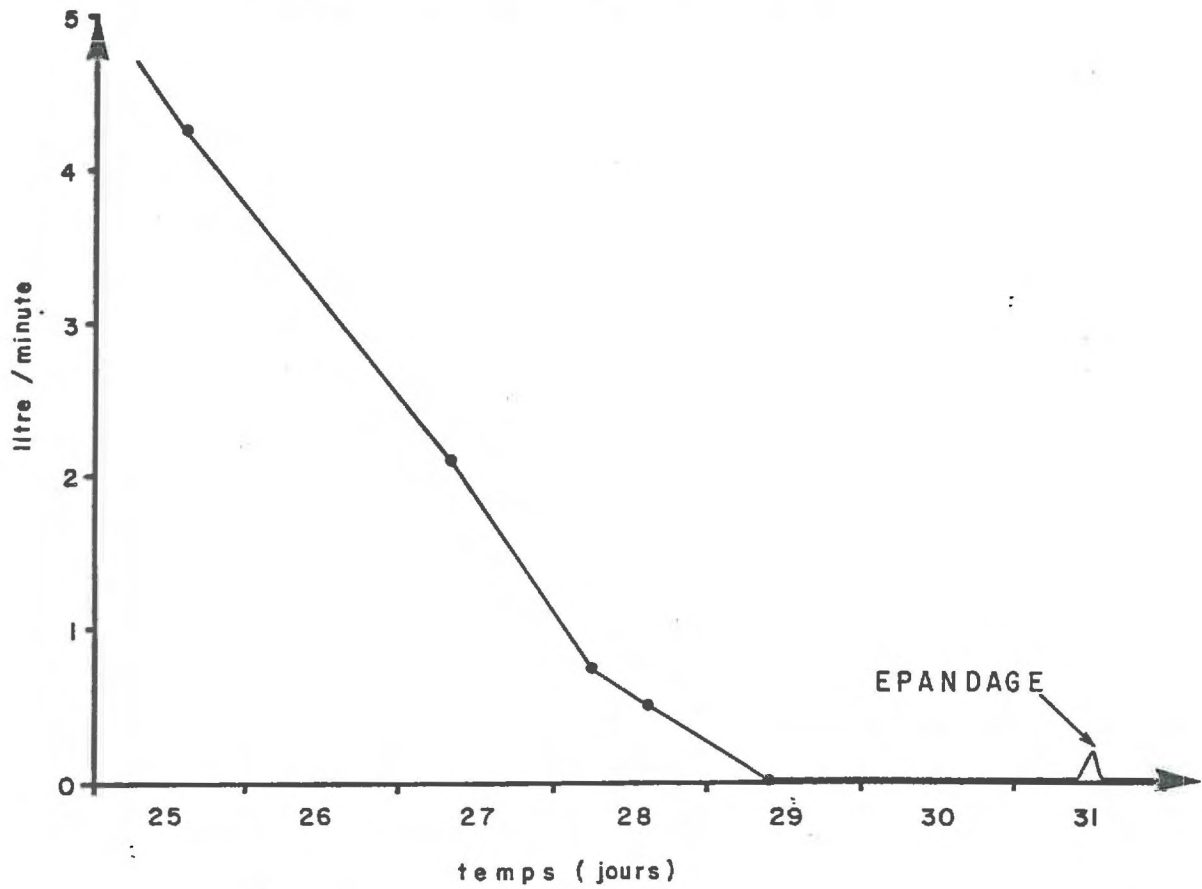
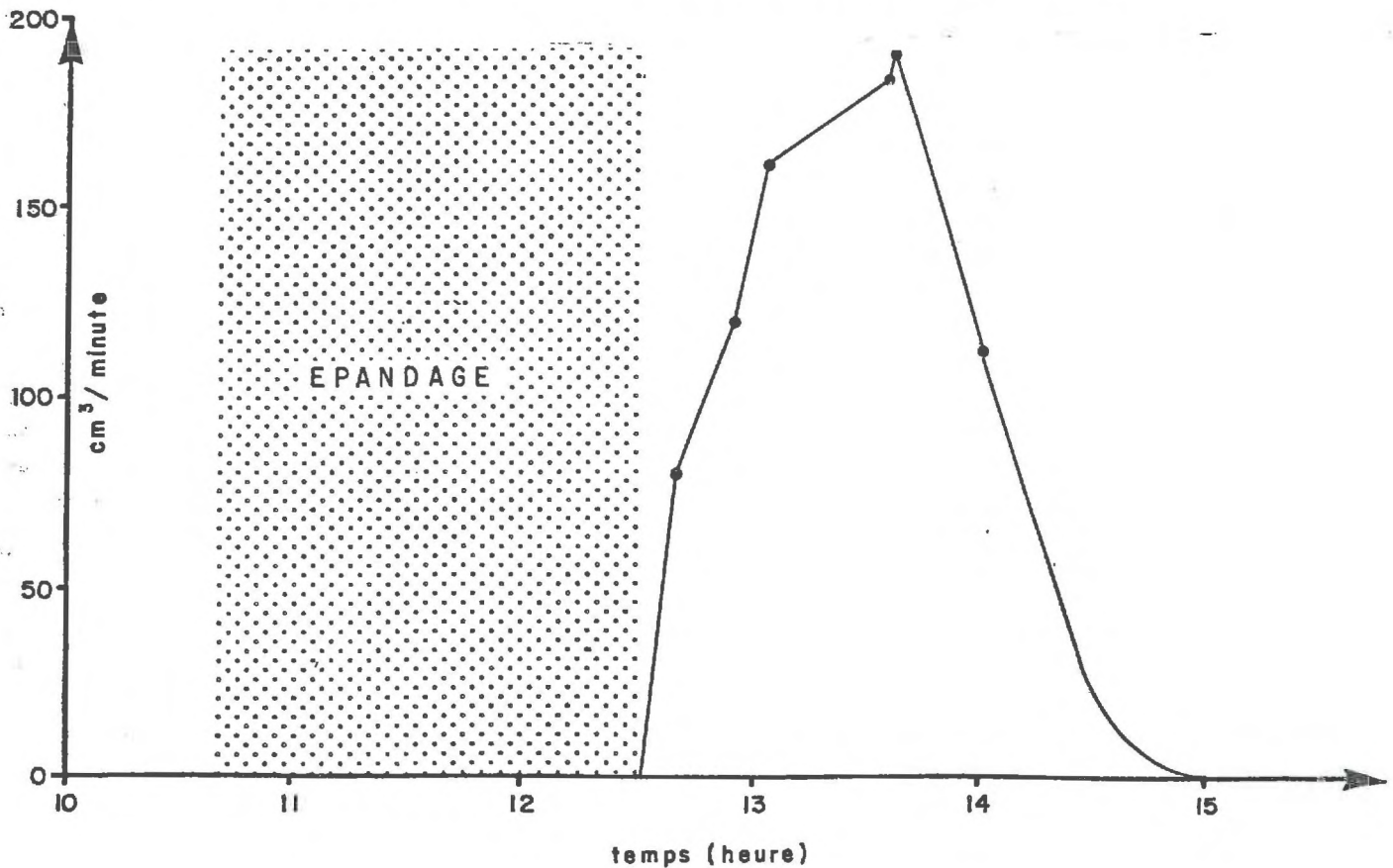


Fig. 6.10 - DEBITS A LA BASE DU (B) APRES L'EXPERIENCE - PROFIL 3



623 - Effet des épandages sur la qualité des eaux

Les eaux recueillies après épandage ont été analysées (fig. 6.11 et 6.12)

Leur composition est très éloignée de la composition de l'effluent épandu. Elle se rapproche plus de la composition de l'eau du sol sans épandage. La teneur en NO_3 n'évolue pas de manière significative et il n'y a pas d'apparition de la forme ammoniacale. De même pour Na^+ , on ne note pas d'augmentation.

Toutefois, quelques variations par rapport à la composition avant épandage sont enregistrées : augmentation de N organique et de K en début de percolation; augmentation de Cl^- en fin de percolation.

TABLEAU 6.10

date	25	27	27	28	31	31	31	31	31	31
heure	3.00	8.00	15.20	11.00	12.14	13.05	13.18	13.50	14.30	14.45
debit					100	160	175	190	20	0
Nk mg/l	1.8	-	1.1	-	5.4	2.3	1.9	1.6	1.9	1.2
NO_3 N mg/l	4.8	3.08	2.1	2.9	4.3	4.7	4.9	3.9	4.3	4.3
NH_4 N mg/l	0.76	0.10	0.5	0	0	0	0	0	0	0
Ca mg/l	31	29	30	29	24	21	25	14	17	22
Mg mg/l	5.2	5.6	5.6	6.4	10	10.8	9.8	15	12	9
K mg/l	24	18	17	18	65	56	45	34	42	25
Na mg/l	28	26	26	28	28	26	25	24	25	25
Cl mg/l	40	42	44	44	44	43	41	43	59	36
Fe	1.85									
DCO			20		101	50		30		14

624 - Discussion

L'épandage provoque une augmentation nette des débits de circulation latérale à la base du (B).

Toutefois, le mode de prélèvement ne constitue qu'un échantillonnage très ponctuel de l'eau du sol qui s'écoule à un instant donné autour de la zone arrosée. Il est difficile de se prononcer sur le devenir des éléments apportés par l'effluent. Deux hypothèses sont en effet envisageables :

- l'effluent déplace par effet de piston l'eau du sol initiale et les solutés recueillis lors de réponse à l'épandage appartiennent à cette eau initiale.
- l'épandage provoque un déplacement d'eau et de solutés appartenant, pour partie à l'effluent, mais le site choisi pour l'expérience n'a pas permis d'accéder au front de solutés de l'effluent.

PROFIL 3. Caractéristiques des eaux

Fig. 6.11 - L'AZOTE

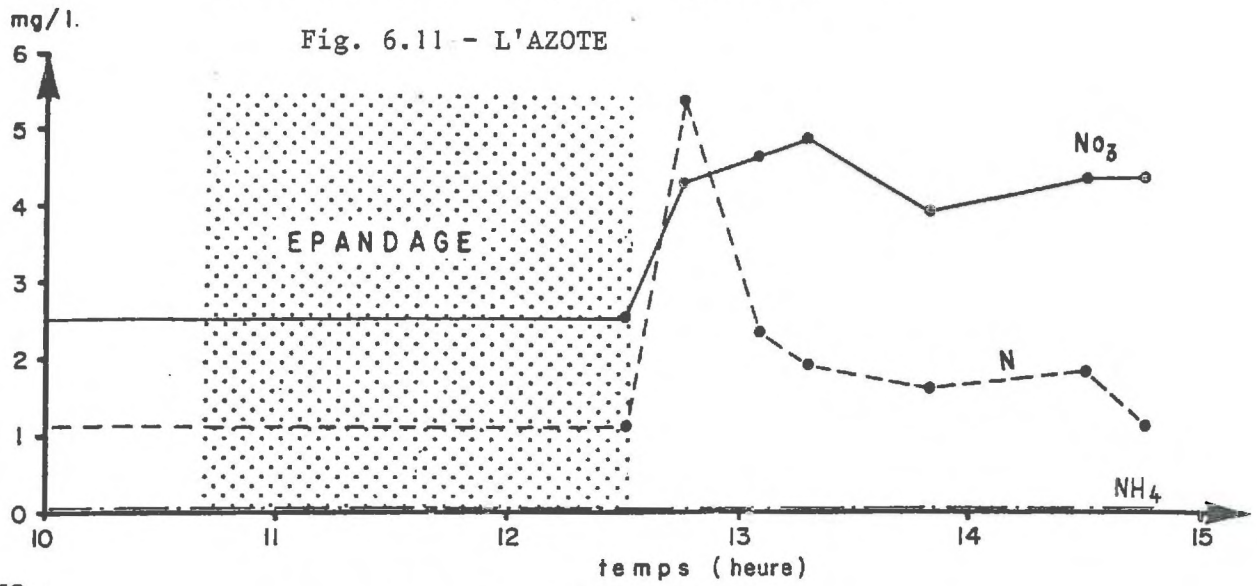
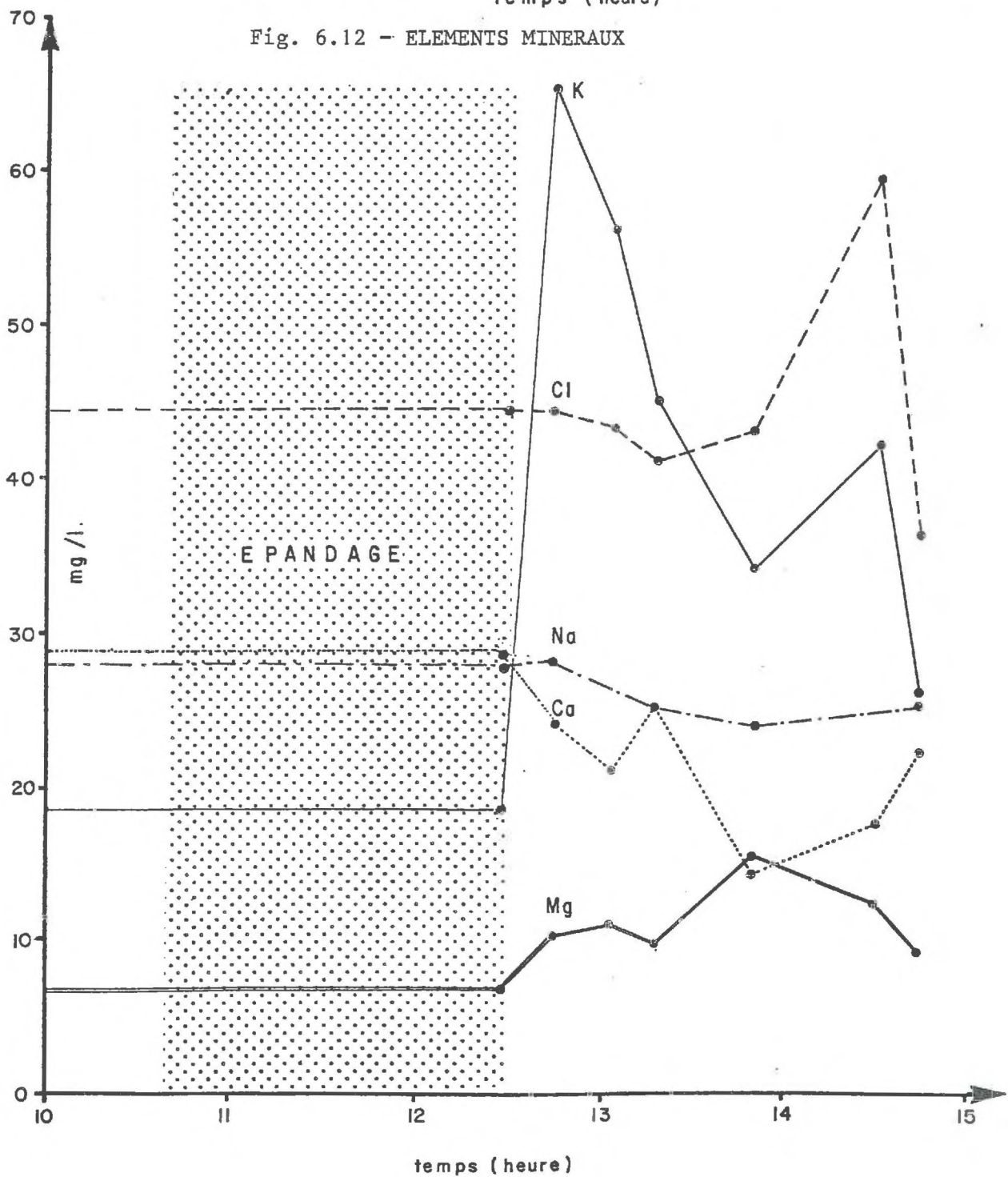


Fig. 6.12 - ELEMENTS MINERAUX



63 - EFFET DES EPANDAGES DE LAITERIE SUR LA COMPOSITION DES EAUX DE SOURCE

631 - Les sources étudiées

Pour cerner l'effet des épandages à plus long terme, trois sources ont été étudiées (cf. fig. 2.1) :

- la source folle (S.F.)

Il s'agit d'une source amont qui n'est pas influencée par l'épandage mais par des prairies. Cette source se tarit assez vite après l'arrêt des pluies. Son débit et ses arrêts sont bien corrélés avec l'humidité des sols en place.

- la source dite "aval pature" (S.A.P.)

C'est une source placée dans la zone aval (sols hydromorphes). Elle n'est pas influencée par l'épandage de la laiterie. L'eau qui s'écoule correspond à une eau influencée par une agriculture peu intensive.

- la source aval épandage (S.A.E.)

En position semblable à la source aval pature, c'est une source qui recueille les circulations latérales s'écoulant à la base du (B)g des sols à l'aval du champ d'épandage le plus ancien de la laiterie.

632 - Caractérisation des eaux de source

6321 - Les paramètres physico-chimiques

Le pH : le pH de la source A.P. est toujours plus élevé que celui de la source folle. Le pH de la source aval épandage est proche de celui de la source folle.

Le Eh : La source folle et la source A.P. ont des valeurs de même ordre de grandeur (300-400mv). La source aval épandage a des valeurs nettement plus faibles. Si nous plaçons les trois sources sur des diagrammes Eh-pH des formes du fer, la source aval épandage se situe dans le domaine du fer ferreux alors que les autres sources sont dans le domaine du fer ferrique.

La conductivité : Elle est très comparable pour les sources folle et aval paturage. Pour la source aval épandage la conductivité est nettement augmentée, ce qui est l'indice d'une charge minérale plus forte.

L'alcalinité : elle est constante pour SF et SAP. Les valeurs sont faibles. Pour la source aval épandage, les valeurs sont très élevées. A ces pH (< 8,4), l'alcalinité est due aux ions bicarbonatés HCO_3^- (G. BOURRIE, 1977) et éventuellement à des ions organiques solubles.

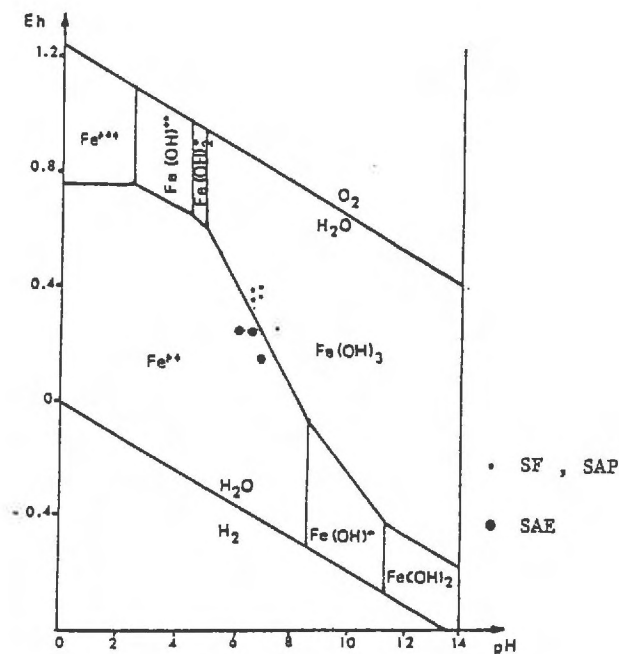


Fig. 6.13 - DIAGRAMME Eh pH d'après
STEINBERG, TOURAY, TREUIL et
MASSARD (1978)

6322 - La charge organique

DCO : La DCO est très faible pour SF et SAP. Pour SAE, elle peut être momentanément beaucoup plus élevée (200 mg/l d'O₂)

L'azote : Les valeurs de l'azote organique sont faibles pour SF et SAP; l'azote est principalement sous forme nitrique dans ces sources. Pour la source aval épandage, l'azote minéral est principalement sous forme ammoniacale.

6323 - La charge minérale

Les cations : On note des variations importantes sous l'effet de l'épandage pour les alcalins (K⁺ et Na⁺). Le rapport alcalins sur alcalinoterreux augmente très significativement à l'aval de l'épandage.

Les anions : Les augmentations importantes de cations pour la source aval épandage sont principalement compensées par l'augmentation importante du Cl⁻, l'augmentation forte des ions bicarbonates HCO₃⁻ et l'augmentation des sulfates dans les eaux à l'aval de l'épandage par rapport aux eaux de la source folle et de la source aval pâturage.

6324 - Le dosage du fer

Des dosages du fer soluble ont été effectués sur des eaux brutes prélevées dans un flacon contenant un excès d'acide chlorhydrique afin d'éviter une réoxydation du fer. Les dosages de fer soluble montrent des valeurs très faibles (0,05 - 0,1 mg/l) pour SF et SAP. Par contre, SAE est beaucoup plus riche en fer (parfois plus de 10 mg/l).

ANALYSE D'EAU

Date	13.12.77	29.12.77	19.01.78	2.03.78	8.03.78	23.03.78	30.03.78		
p ^H terrain	7,64	6,62	6,70	6,50	6,8	6,42	6,3		
E _h mV	-	-	-	-	+410	+395	+340		
conductivité mmho/cm	0,33	-	0,32	0,34	0,33	0,34	0,35		
CATIONS mg/l	NH ₄ ⁺ (N)	0,6	0,4	0,39	0,15	-	0,4	-	
	Na ⁺	13,57	13,45	12,0	9,54	11,8	10,92	11,5	
	K ⁺	2,54	1,36	1,48	1,64	1,48	0,89	1,17	
	Mg ²⁺	8,89	8,26	8,51	8,51	8,16	7,70	7,90	
	Ca ²⁺	25,29	25,6	26,0	26,12	26,52	29,12	29,52	
	Fe ²⁺			<0,05	<0,06		<0,05		

Alcalinité meq/l	0,80		0,72	0,64	-	-	0,78		
ANIONS mg/l	Cl ⁻	22,73	20,20	20,80	24,56	23,78	22,72	23,68	
	NO ₂ ⁻								
	NO ₃ ⁻ (N)	9,4	7,7	9,3	9,3	-	9,03	7,5	
	SO ₄ ²⁻	17,85	17,37	19,39	19,2	18,14	19,10	19,10	

MOLECULES NEUTRES mg/l	H ₄ SiO ₄	14,20	17,76	12,57	13,05	10,36	9,98	10,46	
	N	7	11,2	8,4	-	-	2,8	2,8	
	DCO	40	10	20	-	-	12	4	

Remarques :

ANALYSE D'EAU

Date		17.02.77	13.12.77	29.12.77	19.01.78	02.03.78	08.03.78	23.03.78	30.03.78		
p ^H	terrain		7,1	7,2	7,2	7,0	7,45	6,9	6,7		
E _h	mV						+265	+385	+340		
conductivité mmho/cm			0,28		0,26	0,27	0,27	0,26	0,28		
CATIONS mg/l	NH ₄ ⁺ (N)	0,43	0,4	0,3	0,39	0,05	-	0,3	0,3		
	Na ⁺	17	16,8	12,9	13,8	13,5	14,0	11,4	12,1		
	K ⁺	4,6	2,3	1,9	1,5	0,8	1,4	1,2	1,1		
	Mg ²⁺	8,3	7,2	6,6	5,9	7,2	6,7	6,5	7,0		
	Ca ²⁺	21,6	17	13,2	16,1	15,5	16,1	17,1	17,6		
	Fe ²⁺			0,1	0,25	<0,06		<0,06			

Alcalinité meq/l			0,63		0,52	0,60					
ANIONS mg/l	Cl ⁻	33	30,48		26,5	24,5	25,1	18,4	22,8		
	NO ₂										
	NO ₃ (N)	2,1	2,8	2,8	3,1	5,1		4,9			
	SO ₄ ²⁻		18,3	17,8	15,7	16,0	17,3	17,1	16,4		

MOLECULES NEUTRES mg/l	H ₄ SiO ₄		14,2	15,5	12,8	12,0	8,8	10,65	8,8		
	N	3,7	14,0	8,4	5,6			3,6			
	D ₂ CO	16	60	20	40			20			

Remarques :

TABLEAU 6.7 - SOURCE AVAL EPANDAGE (SAE)

ANALYSE D'EAU

Date	1.04.76	17.02.77	13.12.77	23.12.77	29.12.77	19.01.78	2.03.78	8.03.78	23.03.78	30.03.78	
p ^H terrain			6,24	6,44	6,60	6,66	6,65	6,9	6,6	6,2	
E _h mV								+ 145	+ 260	+ 255	
Conductibilité mmho/cm			1,0			1,15	0,59	0,58	0,56	0,58	
CATIONS mg/l	NH ₄ ⁺ (N)	0	0	0,6	0,4	0,4	1,55	0,78	-	1,2	-
	Na ⁺	61	128	98,9	88,55	93,15	106,95	106,95	95,94	65,67	66
	K ⁺	19	35	25,02	19,55	17,59	17,79	14,85	14,85	13,41	13,88
	Mg ²⁺	6	6,8	9,25	8,505	8,75	6,54	3,79	3,87	3,79	4,11
	Ca ²⁺	30	35,2		34,2	34,8	30,52	16,88	19,64	19,12	20,52
	Fe ²⁺	0,9	-		13,7	9,5	10,15	3,2		2,32	

Alcalinité meq/l			8,30			5,25	1,9				
ANIONS mg/l	Cl ⁻	72	185	244	158,47	155,27	127,40	85,68	79,16	79,47	78,89
	NO ₂ ⁻										
	NO ₃ ⁻ (N)	1,8	0,90	1,2	1,2	0,6	0,3	0,6		0,54	
	SO ₄ ²⁻			51,84	34,9	35,61	39,79	26,11	28,89	26,304	23,71

MOLECULES NEUTRES mg/l	H ₄ SiO ₄			17,85	18,04	19,39	17,47	12,3	11,32	12,67	12,76
	N	6,5	17,2	19,6	11,2	11,2	11,2			4,7	
	DCO	131	213	40	60	20	20	12		26	

Remarques :

TABLEAU 6.8 - COMPOSITION CATIONIQUE DES DIFFERENTES EAUX DU SYSTEME

en meq.	Source aval pâturage SAP	Source folle SF	Eau circulant (hors épandage récent) à la base de l'horizon		Source aval épandage SAE	Effluent
			Ap ₁	(B)		
Ca ²⁺	0,42	0,72	0,95	0,75	0,97	3,74
Mg ²⁺	0,27	0,32	0,51	0,23	0,36	0,74
K ⁺	0,03	0,02	0,07	0,51	0,45	3,58
Na ⁺	0,49	0,47	0,78	1,22	4,05	18,27
Σ des cations	1,21	1,53	2,31	2,71	5,73	26,35
Na ⁺ /K ⁺	16,33	20,61	11,14	2,39	9,00	5,10
S.A.R. = $\frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$	0,59	0,65	0,91	1,74	5,16	12,21
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ /Na ⁺ + K ⁺	1,34	2,11	1,72	0,57	0,27	0,21
Ca ²⁺ /Mg ²⁺	1,56	2,25	1,86	3,26	2,39	5,05

Ceci est à relier aux observations pédologiques déjà mentionnées (traces de réoxydation du fer plus abondantes dans les profils). De plus, toute la zone hydromorphe dans laquelle prend naissance la source AE montre de nombreux dépôts rouille, d'apparence floconneuse. De tels dépôts peuvent exister momentanément à l'extérieur des zones influencées par l'épandage, mais l'importance et la constance de ce phénomène au voisinage de la SAE est bien à imputer à l'épandage des eaux résiduelles de laiterie (cette observation a été retrouvée dans des terrains d'épandage d'autres laiteries).

Des déterminations microbiologiques ont permis de mettre en évidence les bactéries du fer suivantes (H. BERTRU - Communication orale) :

- genre siderobacter (siderocapsa - siderosphaera siderobacter)
- genre leptothrix

On peut penser que, sous l'influence des apports de matière organique dus aux épandages, le sol devient réducteur (cf. chapitre suivant). Le fer ferrique du sol est réduit en fer ferreux soluble qui est entraîné par les eaux de drainage. Lorsque l'eau riche en fer ferreux fait résurgence à la surface du sol (ce qui arrive dans la zone de la source AE) le contact avec l'air apporte suffisamment d'oxygène pour que le fer précipite localement à l'état ferrique, une partie de l'énergie de la réaction étant utilisée par les bactéries du fer pour leur métabolisme (A.G. RODINA, 1972).

De plus, les fonds des fossés qui drainent les sources AP et AE à l'aval des champs étudiés sont très différents on constate que , en particulier, à l'aval de l'épandage, les dépôts de "rouille" (population de bactéries du fer) sont permanents. On note parfois également des peuplements de Sphaerotilus natans qui est une bactérie commune des milieux riches en matières organiques (E.J. CURTIS, 1969, 1971).

64 - CONCLUSION

Nous avons vu dans les paragraphes 61 et 62 l'effet rapide d'un épandage sur les eaux des sols. Toutefois, en dehors des périodes consécutives à l'épandage, l'eau s'écoule dans les sols. Il paraît intéressant de comparer ces eaux, hors épandages récents, aux eaux du système. Le tableau 6.8 résume la composition cationique de la source aval paturage, de la source folle, de l'eau à la base de l'Ap₁ et du (B) (hors épandage récent), de la source aval épandage et de l'effluent.

La concentration globale en cations est croissante, des eaux de source non influencées par l'épandage, à l'effluent. Si l'effet de l'épandage se note par une concentration globale plus forte, l'écart entre l'effluent et les eaux drainant les terrains d'épandage reste important. Il y a donc une dilution importante de l'effluent dans l'eau du sol.

Pour les rapports étudiés (Na^+/K^+ , SAR, $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{K}^++\text{Na}^+$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$), c'est la source aval épandage qui semble la plus proche de l'effluent. Les sources aval épandage et folle ont une composition cationique caractéristique et éloignée de celle de l'effluent, ce qui confirme leur rôle de source témoin dans l'étude.

Les eaux s'écoulant dans le sol en dehors des périodes suivant rapidement les épandages sont de nature assez différentes :

- les eaux circulant à la base de l'Ap₁ ont une composition cationique très légèrement influencée par l'effluent et sont proches des eaux de sources sans épandage (SF - SAE).
- les eaux circulant à la base du (B) sont beaucoup plus influencées par l'eau d'épandage (Na^+/K^+ , SAR, $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{K}^++\text{Na}^+$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$). Il semble donc que, si l'effet rapide d'un épandage est moins directement perceptible que pour la circulation à la base de l'Ap₁, l'effet à plus long terme de l'épandage est beaucoup plus fort pour les eaux s'écoulant à la base du (B).

L'apport d'effluents sur quelques parcelles du bassin versant a donc une influence sur la composition des eaux de ce bassin versant. Ceci pose le problème du transfert de l'eau et des solutés dans les sols.

Le déplacement des fluides dans les milieux poreux a fait l'objet de nombreux travaux. Les équations qui régissent les transferts de l'eau d'une part (Loi de DARCY étendue à la zone non saturée - équation de conservation de la masse) et les transferts de solutés d'autre part (convection, diffusion, dispersion mécanique, équation de conservation de la masse) sont connues et explicitées par ailleurs (cf. HILLEL, 1973 ; BOAST, 1973 ; CALVET et GRAFFIN, 1974 ; GAUDET, 1978). L'obtention des paramètres essentiels de ces équations est nécessaire pour modéliser le transfert d'eau et de solutés.

La méthodologie employée dans l'étude ne permet pas d'aboutir à la connaissance de ces paramètres qui régissent le transfert de l'eau et des solutés dans le sol, en place, à l'échelle de la parcelle ou du bassin versant. Les principaux inconvénients portent sur l'absence de connaissance du volume du sol réellement concerné par l'effluent et sur le caractère aléatoire et incomplet de l'accès aux sorties du système.

Toutefois, la méthodologie utilisée a permis de confirmer l'existence de circulations latérales aux niveaux prévus par l'étude pédologique et de préciser l'effet rapide des épandages sur les circulations latérales : temps de réponse, variations de débit, et, éventuellement, variations de concentrations. Il serait nécessaire d'introduire dans une modélisation les données issues de l'étude pédologique (différents horizons, épaisseurs, propriétés intrinsèques).

Du point de vue de la qualité minérale des eaux, les sources subissent d'importantes modifications sous l'effet d'un épandage ancien et à forte dose. On note principalement :

- augmentation forte de Na^+ , K^+ , Cl^{2-} , Fe^{2+}
- augmentation en DCO, N, H_4SiO_4
- baisse des nitrates

Parallèlement, nous essaierons de présenter dans le chapitre suivant l'évolution des sols soumis aux épandages de laiterie.

VII - EFFET DES ÉPANDAGES SUR LES SOLS

La comparaison portera essentiellement sur les sols bruns plus ou moins profonds étudiés dans les chapitres précédents. J'ai étudié principalement deux profils témoins T1 et T2 et deux profils sous épandage P2 et P3. Quelques remarques porteront parfois sur les sols hydromorphes recevant de l'épandage (P5).

71 - ANALYSE MORPHOLOGIQUE

711 - Couleur des sols

On trouvera dans le tableau 7.1 les couleurs humides déterminées à l'aide de la charte MUNSELL (Soil color charts) et transcrites en noms de couleur selon la correspondance proposée par JAMAGNE (1967).

La différence de couleur entre l'échantillon sec et l'échantillon humide se situe généralement à 3 unités de valeur en plus : par exemple, l'horizon Ap₁ du P2 passe de 2,5 Y 3/2 à l'état humide à 2,5 Y 6/2 à l'état sec. Ces écarts sont indépendants de l'épandage.

	Profils témoins		Profils sous épandage	
	T1	T2	P2	P3
Ap ₁	10 YR 3/3 brun foncé	10 YR 3/3 brun foncé	2,5 Y 3/2 brun gris très foncé	10 YR 3/2 brun gris très foncé
Ap ₂	10 YR 4/3 brun	10 YR 4/3 brun	2,5 Y 4/2 brun gris foncé	10 YR 3,5/2 brun gris foncé
(B)	10 YR 4/4 brun jaune foncé	10 YR 4/4 brun jaune foncé	2,5 Y 4/2 brun gris foncé	2,5 Y 4/2 brun gris foncé

Tableau 7.1 - Couleur des horizons de sol à l'état humide

Le tableau 7.1 des couleurs montre très nettement que les sols sous l'influence de l'épandage acquièrent globalement une couleur plus grise dans les horizons Ap₁, Ap₂ et (B).

712 - Taches

Les taches de réoxydation du fer sont plus marquées en zone recevant de l'épandage. Elles sont principalement marquées sur la face des agrégats et le long des galeries de lombric.

713 - Texture

Le classement des sols dans le triangle de texture (JAMAGNE, 1967) (fig. 7.1) fait apparaître une grande homogénéité des textures des sols qui appartient à la classe des limons argilosableux.

Il n'y a pas de différence significative de texture en liaison avec l'épandage. En particulier, aucune différence de teneur en argile entre les profils et les horizons n'a été observée. De même, la teneur en éléments grossiers est indépendante de l'épandage.

Les variations de texture de la roche-mère sont déterminantes dans les variations de texture des sols.

714 - Structure

La netteté de la structure est assez bonne dans l'ensemble. Les structures sont polyédriques très fines et fines, à surstructures polyédriques moyennes (ou structure polyédrique moyenne à sousstructure polyédrique fine dans les horizons profonds).

Le profil P2 a néanmoins une tendance plus massive; de même, les sols hydromorphes dans la zone basse, proche du bief de la Vire, recevant des épandages, ont une structure plus massive que les parcelles ne recevant pas d'épandage.

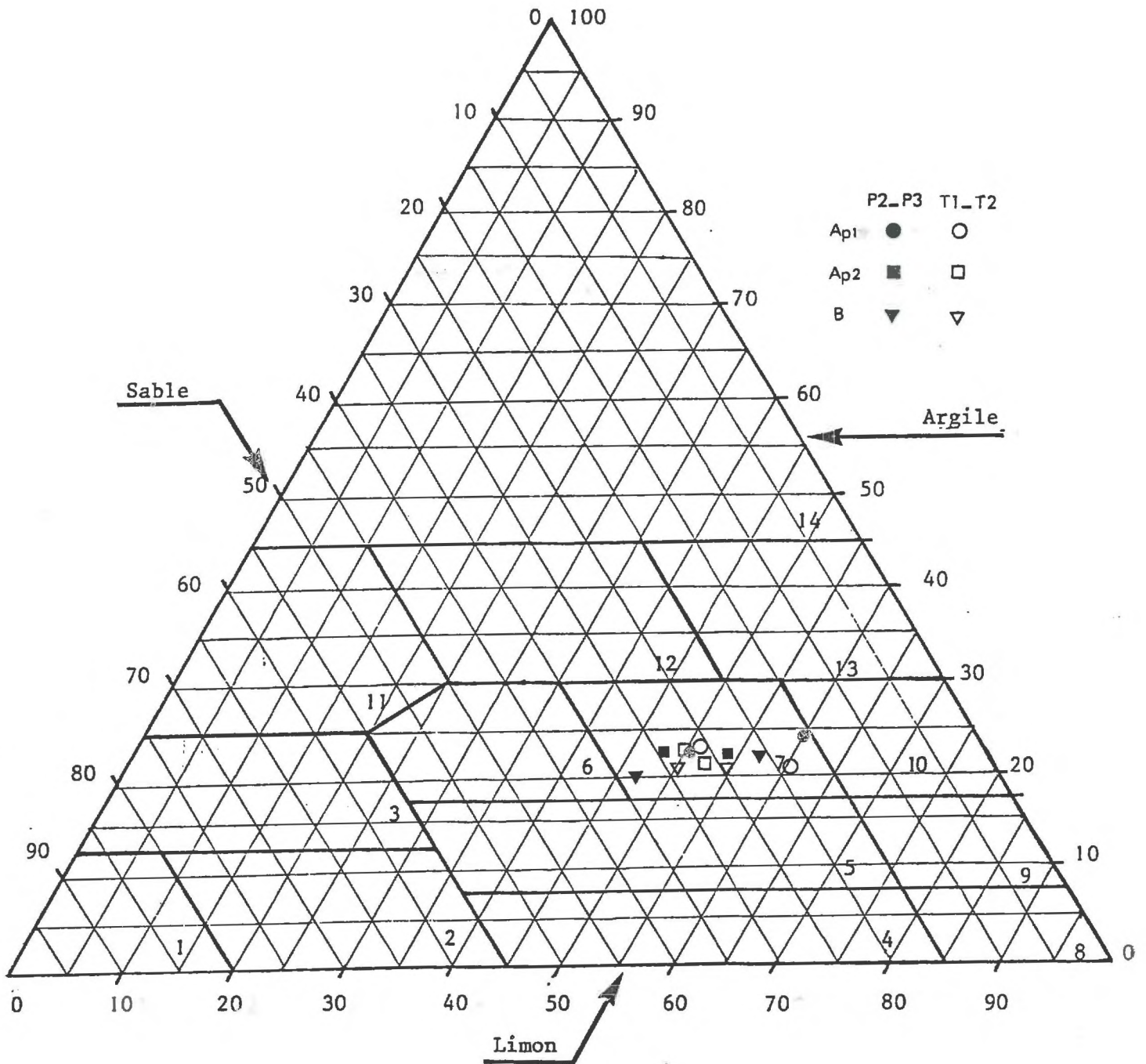
Nous retiendrons donc que, sous l'effet des épandages de laiterie, une destruction partielle de la structure des sols peut être observée. Toutefois, cette évolution n'est pas générale et apparaît surtout quand, à de forts épandages, sont associées d'autres contraintes agissant dans le même sens (hydromorphie, surpaturages).

Ce risque d'évolution défavorable de la structure avait déjà été noté par de nombreux auteurs (GRAS et MORISOT, 1973 ; CATROUX, GERMON, GRAFFIN, 1974).

715 - Porosité

Il n'y a pas de différence significative du nombre et de la taille des pores entre les deux ensembles. Il est à noter que la porosité biologique (vers, taupes) joue un grand rôle dans ces sols. Localement, lorsque la structure a une tendance massive, c'est principalement la porosité entre les agrégats qui est diminuée.

FIGURE 7.1 : Diagramme des classes de texture



- 1 - Sable
- 2 - Sable limoneux
- 3 - Sable argileux
- 4 - Limon léger sableux
- 5 - Limon moyen sableux
- 6 - Limon sablo-argileux
- 7 - Limon argilo-sableux

- 8 - Limon léger
- 9 - Limon moyen
- 10 - Limon argileux
- 11 - Argile sableuse
- 12 - Argile
- 13 - Argile limoneuse
- 14 - Argile lourde

716 - Activité biologique

Les lombrics sont abondants sur les deux ensembles. Il ne semble pas que l'épandage les élimine, bien que le contact direct avec l'effluent en détruit certains. En surface, dans les horizons très organiques recevant de fortes doses d'effluents, on note la présence d'espèces de petites tailles. Cette observation a été retrouvée également lors de l'étude des terrains d'épandage de la fromagerie d'Aunay sur Odon.

717 - Enracinement

La colonisation des racines est faible en-dessous de l'horizon Ap_1 . La distinction est plus nette (entre les horizons Ap_1 et Ap_2) pour les profils P2 et P3; mais ici, outre le facteur épandage, le facteur composition botanique des prairies et gestion agricole de celles-ci joue un rôle au moins aussi important.

718 - Conclusion

L'architecture générale des sols est conservée à la suite des épandages. On note toutefois certaines évolutions très nettes : modification de la couleur des sols qui prend des teintes plus grises, augmentation des taches de réoxydation du fer, risques supplémentaires de destruction partielle de la structure des sols.

Ces observations seront à corrélater avec les données physicochimiques que j'étudierai dans le paragraphe suivant.

72 - ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES DES HORIZONS

721 - pH des sols

Les pH (eau) se situent tous entre 6 et 7 environ. Les sols avec épandage ont des pH légèrement supérieurs aux autres.

Les différences pH (eau) - pH (KCl) varient de 0,6 à 0,8 en surface et augmentent en profondeur (1,1 - 1,2). Elles semblent plus faibles en surface dans les terrains d'épandage.

L'effet tampon du sol évite son acidification lorsqu'il est soumis aux eaux d'épandage relativement acides.

722 - Valeurs de Eh

Le potentiel redox a été mesuré sur les sols en place. Il indique le degré d'oxydo-réduction potentielle du milieu.

On note ici des différences importantes, environ 100 mV de moins, dans les zones avec épandage. Ceci est à mettre en relation avec les teintes plus grises observées en P2 et P3.

TABLEAU 7.2 - VALEUR DU pH (eau, Kcl, N/10)

	T ₁	T ₂		P ₂	P ₃	P ₅
Ap ₁	6,3 5,7	5,9 5,1		6,7 6,2	6,6 6,1	6,7 -
Ap ₂	6,1 5,3	5,8 5,1		7 6,1	7,2 6,4	7 -
(B)	6,2 5,3	5,5 4,5		7,2 6,1	6,8 5,9	6,7 -
C	6,4 5,2	5,9 4,8		7,1 6,1	7 5,9	

pH H ₂ O
pH Kcl N/10

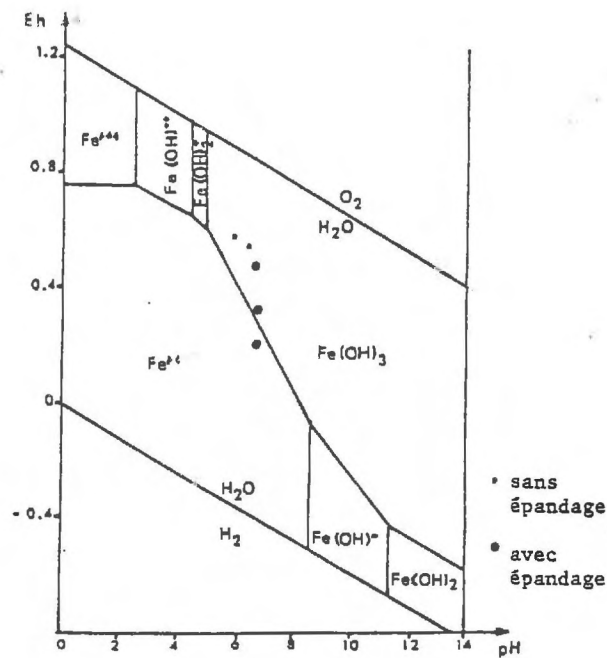


Fig. 7.2 - DIAGRAMME Eh. pH. d'après
STEINBERG, TOURAY, TREUIL
et MASSARD (1978)

TABLEAU 7.3 - POTENTIEL REDOX (E_h en mV) - (La correction dûe à l'électrode d' H_2 a été effectuée)

	T ₁	T ₂		P ₂	P ₃	P ₅
Ap ₁	+ 561	+ 585		+ 335	+491	+213
Ap ₂	+ 585	+ 587		+ 499	+ 495	+ 155
(B)	-	+ 571		-	+ 485	-

TABLEAU 7.4 - RESULTAT DES VALEURS DE C, N (et C/N) DANS LES DIFFERENTS HORIZONS

	T ₁	T ₂		P ₂	P ₃
Ap ₁	36	27,3	50,8	49,4	
	3,65	2,88		6	5,08
	≈ 10	≈ 9,5		≈ 8,5	≈ 9,7
Ap ₂	18	22,8	24,6	16,2	
	2,25	2,67		3,13	2,08
	≈ 8	≈ 8,5		≈ 7,85	≈ 7,8
(B)	8,4	10,3	16,8	8,9	
	1,24	1,55		2,24	1,20
	≈ 6,8	≈ 6,60		≈ 7,52	≈ 6,90
C	2,7	2,9	5,5	2,5	
	0,67	0,65		0,98	0,66
	≈ 4	≈ 4,40		≈ 5,6	≈ 3,75

C en ‰
N en ‰
C/N

Le profil P2 plus humide a des valeurs de Eh très faibles en surface par rapport à P3.

On note des valeurs faibles atteignant 155mV pour le sol hydromorphe (P5) subissant de très forts épandages d'effluents.

Si nous comparons les valeurs de pH et Eh avec les domaines caractéristiques de réduction du fer, on voit que les sols hydromorphes sont bien dans le domaine de la réduction du fer (fig. 7.2). Les sols bruns avec épandage se rapprochent très nettement de ce domaine réduit. Il n'est donc pas anormal d'y rencontrer plus fréquemment des indices de réduction temporaires (la réoxydation du fer étant limitée aux faces de certains agrégats ou dans les galeries de lombric). De même, la couleur plus grise des sols avec épandage peut être partiellement expliquée par cette baisse du potentiel redox (SEGALEN, 1964).

723 - Matière organique - C - N

On trouvera dans le tableau 7.4, le résultat des valeurs de C, N (et C/N).

7231 - Les données

- Le carbone organique (méthode ANNE)

Le carbone est très sensiblement plus important dans la zone d'épandage (en surface principalement). Les teneurs baissent très vite avec la profondeur; toutefois, dans le profil P2, les teneurs en carbone sont encore importantes en profondeur.

- L'azote KJELDAHL

Les valeurs sont plus importantes, là encore, sur les terrains d'épandage. Ceci est très net en surface. Les teneurs baissent avec la profondeur, avec une anomalie pour le profil P2 dont les teneurs baissent moins fortement avec la profondeur.

- Rapport C/N

Le rapport C/N est un indice de la minéralisation de la matière organique du sol. Il semble varier assez peu entre les deux ensembles.

7232 - Interprétation

Les apports d'épandage tendent à augmenter sensiblement le taux de matière organique. La matière organique du sol conserve néanmoins un C/N constant. Ce fait est lié aux autres observations de couleurs plus grises et de domaines de Eh plus bas dans les zones recevant l'épandage. Des résultats comparables ont été observés à Aunay sur Odon (1978) et Retiers (1979) sous l'effet d'épandage de laiterie.

Il semble donc que tout le carbone organique apporté par l'effluent ne soit pas complètement minéralisé et qu'une partie produise de l'humus relativement stable. L'importance de cette fraction susceptible de produire de l'humus reste probablement faible, mais il serait intéressant de pouvoir préciser la minéralisation de l'effluent de laiterie comme cela a été réalisé avec d'autres effluents d'industries agricoles et alimentaires : vinasses de distillerie, eaux résiduaires de féculerie, eaux résiduaires de sucrerie (MULLER, 1971, 1976, 1977), boues de station d'épuration (MOREL, 1977).

724 - Capacité d'échange

7241 - Les résultats

Les valeurs de la capacité d'échange sont réunies dans le tableau 7.5. On note une augmentation forte dans les sols ayant reçu de l'épandage pour l'horizon de surface. Cette capacité d'échange est probablement due à l'augmentation de matière organique (ce qui explique que T soit relativement forte dans l'horizon (B) du P2).

	T 1	T 2	P 2	P 3
Ap ₁	16	13	22	22
Ap ₂	12	12	15.5	14.5
(B)	9	9	13.5	9
C	7	8	8.9	7

Tab. 7.5 - Capacité d'échange

7242 - Essai de détermination de la capacité d'échange de la matière organique

Cette estimation sera faite en considérant que pour chaque profil, la différence de T entre les deux horizons Ap₁ et Ap₂ est due à la différence de matière organique (la teneur en argile variant peu). On suppose également que la matière organique de ces deux horizons est du même type.

- si MO 1 = teneur en matière organique de l'horizon 1
 Δ MO 1.2 = différence de teneur en matière organique entre l'horizon 1 et l'horizon 2 en % du poids sec
 CE 1 = capacité d'échange de l'horizon 1 (meq/100 g)
 Δ CE 1.2 = différence entre la capacité d'échange des horizons 1 et 2
 CEMO = capacité d'échange de la matière organique en meq/100 g.

$$\text{on a } \text{CEMO} = \frac{\Delta \text{ CE } 1.2}{\Delta \text{ MO } 1.2} \times 1000$$

On obtient les valeurs suivantes en meq/100 g.

P2	P3	T1	T2
146	133	116	105

Ces valeurs sont compatibles avec le fait que la mesure de MO n'est pas la mesure des composés humiques dont la capacité d'échange est très forte, mais bien celle de tous les composés organiques plus ou moins humifiés.

Les sols recevant des épandages augmentent donc leur teneur en matière organique riche en site d'échanges. Ce résultat a été vérifié dans l'étude du périmètre d'épandage des fromageries d'Aunay sur Odon (1978) et de Retiers (1979).

725 - Les cations adsorbés sur la capacité d'échange

7251 - La taux de saturation de la capacité d'échange

Il sera estimé par le rapport S/T. Ce rapport baisse avec la profondeur. Il est nettement plus élevé dans les sols soumis à l'épandage. Ceci est à mettre en relation avec l'augmentation du pH et avec l'écart plus faible entre pH eau et pH KCl constaté au paragraphe 721 sous l'effet des épandages.

7252 - Les cations adsorbés

- Méthode : des dosages des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ ont été effectués sur le percolat recueilli après extraction à l'acétate d'ammonium à pH 7. Pour mesurer les cations solubles comptés comme adsorbés, des dosages sur extrait aqueux avec une dilution de 1/5 ont été effectués. Toutefois, on sait qu'en apportant de l'eau distillée, la solution du sol se dilue et une partie des ions fixés sur la surface d'échange repasse en solution. De plus, cette dilution modifie les activités des ions. Les ions bivalents auront une activité plus augmentée que les ions monovalents. Les monovalents vont tendre à être chassés du complexe, les divalents restant mieux adsorbés. Entre K et Na, c'est l'ion Na, le plus hydraté, qui sera le moins retenu (RUELLAN, DELETANG, 1967). On a donc extrait Na^+ et K^+ du complexe dans l'extrait aqueux; les valeurs trouvées dans l'extrait aqueux sont donc supérieures aux valeurs des ions Na et K solubles avant extraction.

Nous raisonnerons, dans la suite de l'exposé, à partir des valeurs de cations adsorbés :

C_i adsorbé = C_i de l'extrait à l'acétate de NH_4 - C_i soluble dans l'extrait à l'eau
Ces valeurs sont donc plutôt sous-estimées.

- Ca^{2+} : c'est le cation dominant. De 85 à 90 % de S dans la plupart des horizons témoins, les valeurs baissent très nettement pour les horizons ayant reçu des eaux d'épandage (70 à 60%).

- Mg^{2+} : Le rapport Mg/S (7 à 8 % en moyenne) varie peu sous l'influence de l'épandage.

- K^+ : Pour les sols témoins, les valeurs de K/S restent faibles et variables (surtout en surface avec le niveau de fertilisation pratiquée). Les sols recevant de fortes doses d'épandage ont des valeurs de K/S très nettement augmentées.

- Na^+ : Les valeurs de Na/S sont très faibles pour les sols témoins, ce qui est classique pour les sols sur schistes briovériens. Les valeurs de Na/S des horizons recevant de l'épandage sont nettement plus fortes, notamment au profil P2. Pour le profil P3, ce sont les horizons (B) et C qui ont des rapports Na/S plus forts.

7253 : Interprétation

On retiendra donc que l'épandage a pour effet de modifier considérablement la garniture du complexe adsorbant : les ions H^+ diminuent (ce qui revient à dire que S/T augmente).

TABLEAU 7.7 - CATIONS DOSES DANS L'EXTRAIT A L'ACETATE D'AMMONIUM
(EN MEQ./100 G. DE SOL)

Ca = Mg = K = Na =		T ₁	T ₂		P ₂	P ₃
	Ap ₁	11,7 1,18 0,751 0,143	7,7 0,91 0,157 0,59	15,7 1,81 2,73 2,83	18,9 1,19 0,898 0,189	
	Ap ₂	8,6 0,60 0,172 0,161	6,9 0,58 0,097 0,085	10 1,13 1,494 2,280	12,4 0,79 0,865 0,164	
	(B)	5,9 0,39 0,092 0,119	3,1 0,27 0,073 0,047	8,8 0,93 1,362 2,080	6,1 0,69 0,605 0,268	
	C	3,9 0,31 0,107 0,094	2,8 0,33 0,143 0,052	4,4 0,54 0,914 1,252	3,60 0,540 0,440 0,202	

TABLEAU 7.8 - CATIONS DOSES DANS L'EXTRAIT AQUEUX (1/5)
(EN MEQ. /100 G. DE SOL)

	T ₁	T ₂	P ₂	P ₃
Ap ₁	0,102 0,087	t 0,131	0,358 1,31	0,127 0,087
Ap ₂	t 0,087	t t	0,102 0,650	0,102 0,087
(B)	t t	t t	0,102 0,650	0,050 0,087
C	t t	t t	t t	t t

K =	(t = traces)
Na =	

TABLEAU 7.9 - CATIONS ECHANGEABLES (EN MEQ %)

	T ₁	T ₂	P ₂	P ₃
Ap ₁	13,58	9,22	21,40	20,87
	86,00	83,00	73,35	90,54
	8,70	9,86	8,45	5,70
	4,70	1,7	11,08	3,26
	0,40	0,49	7,10	0,48
Ap ₂	9,44	7,66	14,15	14,03
	91,00	90,00	70,66	88,38
	6,35	7,56	7,98	5,63
	1,82	1,26	9,83	5,43
	0,78	1,10	11,51	0,54
(B)	6,50	3,49	12,42	7,52
	90,75	88,82	70,85	81,05
	5,99	7,73	7,48	9,16
	1,41	2,09	10,14	7,37
	1,83	1,34	11,51	2,40
C	4,41	3,32	7,18	4,78
	88,00	84,21	61,23	75,28
	7,02	9,92	7,51	11,29
	2,42	4,30	13,83	9,20
	2,13	1,56	17,42	4,22

S	=
Ca/S	=
Mg/S	=
K/S	=
Na/S	=

Les principaux cations qui augmentent sur le complexe sont Na⁺ et K⁺. La richesse en Na⁺ atteint parfois des valeurs importantes à mettre en relation avec la structure de qualité médiocre déjà mise en évidence par ailleurs (Profil P2). Les ions K⁺ sur le complexe atteignent également des valeurs fortes. Cette augmentation de K⁺ et Na⁺ se fait par départ de Ca²⁺ principalement. La proportion de Mg²⁺ sur le complexe semble rester constante.

L'évolution de la garniture cationique que nous enregistrons ici a été vérifiée également à Aunay sur Odon (1978) et Retiers (1979) sur des sols comparables du massif armoricain. On constate une évolution analogue sur d'autres sols (WATSON, 1977 ; BUSON, 1976).

726 - Acide phosphorique assimilable

On note des teneurs nettement plus fortes (. tableau 7.10) sous l'effet des épandages de fromagerie (multipliés par 10 environ). Les augmentations affectent également - mais dans une moindre mesure - les horizons sous-jacents.

	T 1	T 2	P 2	P 3
Ap ₁	0.34	0.10	3.37	2.75
Ap ₂	0.14	0.05	1.72	1.11
(B)	0.02	0.01	1.04	0.70
C	0.01	0.01	0.35	0.09

Tab. 7.10 - Teneurs en phosphore assimilable (%)

Ces résultats ont été confirmés par l'étude d'Aunay sur Odon (1978) et par l'étude de Retiers (1979). Ce comportement du phosphore est tout à fait classique et de nombreux auteurs l'ont signalé (DUCHAUFOR, 1970 ; GAUCHER, 1968). MORISOT & GRAS (1974), WATSON (1977) notent également un tel comportement du phosphore sous l'effet des épandages de laiterie.

73 - REMARQUES SUR LES PRAIRIES

Les effets sur les sols présentés précédemment ont des répercussions sur la production végétale. Nous présenterons ici quelques illustrations de ces répercussions.

731 - Modification de la flore

Les prairies naturelles recevant des eaux d'épandage de laiterie sont assez différentes des prairies naturelles sans épandage. On note en effet les modifications suivantes :

- disparition des légumineuses au profit des graminées. Ceci est dû à l'apport de matières azotées assez régulier effectué par l'épandage. Des dosages de NO₃ effectués dans l'extraire aqueux montrent une très sensible augmentation de NO₃ dans les terrains d'épandage - notamment en surface .

- apparition d'espèces plus nitrophiles : paires (Rumex acetosa, acetosella), orties (Urtica dioica), plantes rudérales bien adaptées aux milieux riches.

Ces modifications constatées dans le site d'étude semblent tout à fait généralisables, à la suite de nombreuses visites d'établissements. Rappelons toutefois que si l'épandage des eaux résiduaires modifie la composition de la flore des prairies naturelles, l'épandage de sérum (pratiqué par le passé avant la récupération de ce sous-produit) avait une répercussion plus foudroyante : brûlure des cultures (cf. WATSON & PETERSON, 1977), destruction des arbres (pommiers notamment).

732 - Modification de la composition minérale des plantes

Le sol modifiant ses réserves minérales sous l'effet de l'épandage, la composition minérale de l'herbe est susceptible de se modifier.

A titre d'illustration, des analyses foliaires ont été effectuées sur des échantillons provenant de prairies naturelles recevant ou non l'épandage .

	Ca	Mg	K	Na	P (en kg/T de matière sèche)
échantillon témoin	7.4	1.8	17	2.4	3.6
échantillon épandage	6.8	1.3	16.4	4.5	3.3

On note une forte augmentation du sodium prélevé par les plantes.

Le phosphore prélevé par les prairies recevant l'épandage reste à un niveau constant malgré l'augmentation de phosphore assimilable enregistrée.

Le rapport entre les différents cations est modifié et, en particulier, le rapport Mg/K qui baisse sous l'effet de l'épandage. Les travaux de VOISIN (1963) ont montré l'influence de telles modifications sur les maladies des bovins au pâturage (tétanie d'herbe).

74 - CONCLUSION

Les épandages de laitier pratiqués sur ces sols amènent des modifications importantes des propriétés des sols. On retiendra, sur le plan morphologique, les teintes plus grises des sols, leurs traces d'hydromorphie plus nombreuses et leur susceptibilité plus grande à la destruction.

Sur le plan physico-chimique, on note :

- une baisse du potentiel redox, une augmentation du carbone organique (C) et de l'azote organique (N), une augmentation de la capacité d'échange (T). Ces variations sont liées à l'apport organique effectué par l'épandage : les matières organiques fraîches consomment de l'oxygène pour leur dégradation (d'où baisse de Eh). Toutefois, toute la matière organique fraîche ne se minéralise pas complètement et il y a formation d'humus (d'où l'augmentation du carbone et de l'azote organiques, et de la capacité d'échange).

- une augmentation du pH, une saturation plus complète du complexe adsorbant, une composition cationique modifiée sur le complexe adsorbant, une augmentation du phosphore assimilable. Ceci est dû à l'apport minéral réalisé par l'effluent qui contribue à modifier les réserves minérales des sols.

Si certaines évolutions sont positives (augmentation des réserves minérales d'éléments fertilisants), d'autres sont plus néfastes : risques de toxicité, de carences induites, de déstabilisation de la structure, par suite de modification de la garniture cationique du complexe favorisant les monovalents (Na^+ , K^+) par rapport à Ca^{2+} . Il semble donc intéressant de prévoir ces évolutions en fonction du type d'effluent utilisé. Une méthode de prévision de l'évolution de la garniture cationique sera présentée dans le chapitre suivant.

VIII - RELATIONS ENTRE LES CATIONS FIXÉS SUR LE SOL ET LA SOLUTION DU SOL

81 - INTRODUCTION

De nombreux travaux, portant en particulier sur l'irrigation avec des eaux salées ou sur les sols salés eux-mêmes, ont abordé le problème des relations entre le sol et la solution du sol. L'accent a été mis principalement sur les relations du type $\text{Na}^+/\text{T}=\text{f}(\text{S.A.R.})$ (BOWER, OGATA, TUCKER, 1968 ; RICHARDS, 1969 ; RHOADES, 1968 ; CHEVERRY, 1972 ; RHOADES, 1972 ; AL DROUBI, 1976)

Nous présenterons ici un mode de raisonnement permettant de traiter quantitativement l'échange de l'ensemble des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ , à partir des réactions d'échange des cations deux à deux. La loi d'action de masse sera appliquée aux réactions d'échange, ce qui conduira à une formulation analogue à celle proposée par GAPON (1932), puis VANSELOW (1932) (cf. RUELLAN, DELETANG, 1967).

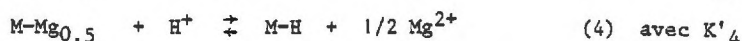
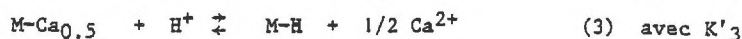
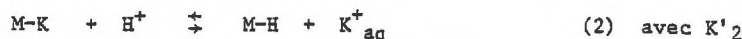
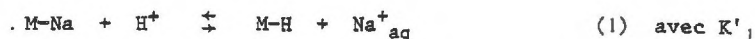
Cette méthode repose sur plusieurs hypothèses :

- il y a équilibre chimique simultané entre les cations adsorbés et ceux contenus dans la solution du sol.
- les cations sont retenus en position échangeable sur un adsorbant qui n'évolue pas au cours de l'échange.
- la constante d'équilibre est indépendante de la nature de la capacité d'échange - que celle-ci soit due aux substitutions octaédriques des phyllosilicates, à la dissociation d'hydroxyles appartenant à des molécules d'argile ou à des molécules organiques, à la fonction acide organique des molécules organiques. On peut alors considérer que la capacité d'échange est symbolisée par une molécule moyenne M- fixant les différents cations avec des constantes d'équilibre établies pour les phyllosilicates. Ce sont ces valeurs des constantes d'échanges qui seront utilisées dans le calcul. Toutefois, ceci ne constitue qu'une estimation provisoire, en l'absence de données plus complètes. Il est vraisemblable que le comportement des horizons pauvres en matière organique sera mieux pris en compte que celui des horizons organiques (FRITZ, communication orale).

82 - METHODE D'ESTIMATION DES CATIONS ADSORBES D'APRES LA COMPOSITION CATIONIQUE DE LA SOLUTION DU SOL.

821 - Ecriture des réactions d'échange

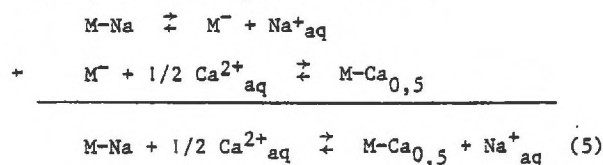
Si nous considérons les équations de dissociation des molécules (M-cations) responsables de la capacité d'échange cationique, nous avons simultanément :



où M-Na et M-Ca_{0,5} représentent les molécules M⁻ responsables du complexe où un site d'échange est occupé respectivement par un ion sodium (soit un équivalent sodium) et par un demi-ion calcium (soit un équivalent calcium).

Toute réaction d'échange entre deux cations sur le complexe peut être considérée comme la combinaison de deux équations de dissociation .

soit pour l'échange Na⁺ - Ca²⁺ :



Cette réaction est soumise à un équilibre dont la constante apparente d'échange est $K_0 = \frac{K'_1}{K'_3}$

Par ailleurs, K₀ peut s'exprimer en fonction des activités à l'aide de la loi d'action de masse :

$$K_0 = \frac{a_{M-Ca_{0,5}} \times a_{Na^+_{aq}}}{a_{M-Na} \times \sqrt{a_{Ca^{2+}}}}$$

avec a_{M-Ca_{0,5}} = activité du pôle M-Ca_{0,5}

a_{Na⁺_{aq}} = activité du sodium en solution

822 - Estimation des activités

8221 - Activité des ions en solution

soit $a_i = \gamma_i m_i$ avec a_i : activité de l'ion en solution
 γ_i : coefficient d'activité de l'ion i en solution
 m_i : modalité de l'ion i en solution

Pour calculer les activités, il faut tenir compte des coefficients d'activité des ions. Pour estimer les coefficients d'activité, il existe différentes formules dérivées de la théorie de DEBYE-HÜCKEL . Nous utiliserons celle proposée par HELGESON, JAMES (1969) HELGESON (1969) :

$$\text{Log } \gamma_i = \frac{-A Z_i^2 I^{1/2}}{1 + a_i^0 B I^{1/2}} + B_0 I$$

avec Z_i : valence de l'ion i
 I : force ionique = $1/2 \sum_i Z_i^2 m_i$

Cette force ionique peut être estimée par la conductivité de la solution (EC en mmho/cm) (GRIFFIN, JURINAK - 1973).

$$I \text{ en mole/l} = 0,0127 \text{ EC} - 0,003 \quad (\text{à } 25^\circ)$$

A, B, BO, sont des coefficients fonction de la température (à 25°, HELGESON - 1969 - donne A = 0,5095, B = 0,3284 et BO = 0,0410

a_{oi} est le rayon ionique (HELGESON - 1969 - donne $a_{oK^+} = 3$, $a_{oNa^+} = 4$, $a_{oCa^{2+}} = 6$, $a_{oMg^{2+}} = 8$)

Pour préciser encore, l'activité des ions simples en solution, il est nécessaire de tenir compte de la formation d'ions complexes. Ceci n'a pas été réalisé dans les exemples de calcul.

822 - Activité des ions adsorbés sur le sol

Nous ferons l'hypothèse proposée par VANSELOW (1932) de l'idéalité des solutions solides (MOREL, 1974), c'est-à-dire que l'activité apparente du pôle M-X est égale à sa fraction ionique sur le matériel d'échange.

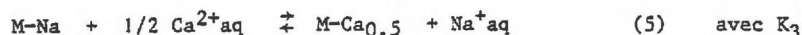
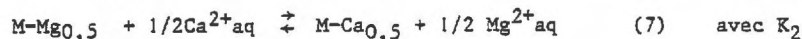
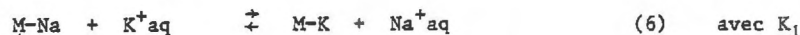
$$\begin{aligned} \text{D'où } a_{M-Ca_{0,5}} &= \frac{Ca^{2+} \text{ ech}}{T} \\ a_{M-Na} &= \frac{Na^+ \text{ ech}}{T} \\ a_{M-K^+} &= \frac{K^+ \text{ ech}}{T} \\ a_{M-Mg_{0,5}} &= \frac{Mg^{2+} \text{ ech}}{T} \end{aligned}$$

avec T : capacité d'échange totale en milliéquivalents (meq)

Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ ech : quantité de cations fixés sur le complexe, en milliéquivalents, dosés dans l'extrait à l'acétate d'ammonium (pH 7).

823 - Résolution du système d'équations

Si nous considérons la solution du sol contenant différents cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ notamment) en contact avec les molécules responsables de la capacité d'échange, nous pouvons supposer que les équilibres des réactions d'échange suivants sont atteints simultanément :



La loi d'action de masse permet d'écrire :

$$K_1 = \frac{K^+ \text{ ech} \times a_{Na^+ \text{ aq}}}{Na^+ \text{ ech} \times a_{K^+ \text{ aq}}} = 6,31 \text{ à } 25^\circ\text{C} \text{ (TRUEDELL, CHRIST - 1968)}$$

$$K_2 = \frac{Ca^{2+} \text{ ech} \times \sqrt{a_{Mg^{2+} \text{ aq}}}}{Mg^{2+} \text{ ech} \times \sqrt{a_{Ca^{2+} \text{ aq}}}} = 1 \text{ à } 25^\circ\text{C} \text{ (TARDY, GARRELS - 1974)}$$

$$K_3 = \frac{Ca^{2+} \text{ ech} \times a_{Na^+ \text{ aq}}}{Na^+ \text{ ech} \times \sqrt{a_{Ca^{2+} \text{ aq}}}} = 1,19 \text{ à } 25^\circ\text{C} \text{ (LAUDELOUT - 1968)}$$

Nous avons donc le système de 3 équations suivantes :

$$K^+ \text{ ech} = K_1 \times \frac{a_{K^+aq}}{a_{Na^+aq}} \times Na^+ \text{ ech} \quad (8)$$

$$Mg^{2+} \text{ ech} = \frac{1}{K_2} \times \sqrt{\frac{a_{Mg^{2+}aq}}{a_{Ca^{2+}aq}}} \quad Ca^{2+} \text{ ech} = \frac{K_3}{K_2} \sqrt{\frac{a_{Mg^{2+}aq}}{a_{Na^+aq}}} \times Na^+ \text{ ech} \quad (9)$$

$$Ca^{2+} \text{ ech} = K_3 \times \sqrt{\frac{a_{Ca^{2+}aq}}{a_{Na^+aq}}} \times Na^+ \text{ ech} \quad (10)$$

Soit

$$K \text{ ech} = k_1 Na^+ \text{ ech} \quad \text{avec } k_1 = K_1 \frac{a_{K^+aq}}{a_{Na^+aq}} \quad (11)$$

$$Mg^{2+} \text{ ech} = k_2 Na^+ \text{ ech} \quad k_2 = \frac{K_3}{K_2} \sqrt{\frac{a_{Mg^{2+}aq}}{a_{Na^+aq}}} \quad (12)$$

$$Ca^{2+} \text{ ech} = k_3 Na^+ \text{ ech} \quad k_3 = K_3 \sqrt{\frac{a_{Ca^{2+}aq}}{a_{Na^+aq}}} \quad (13)$$

Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , $Na^+ \text{ ech}$, représentent ici les cations (exprimés en meq) fixés sur le sol à l'équilibre.

Or, leur somme S est connue et permet d'obtenir une quatrième équation qui aboutit à la résolution du système :

$$Na^+ \text{ ech} + K^+ \text{ ech} + Mg^{2+} \text{ ech} + Ca^{2+} \text{ ech} = S \quad (14)$$

$$\text{soit } Na^+ \text{ ech} (1 + k_1 + k_2 + k_3) = S \quad (15)$$

$$\text{d'où } \frac{Na^+ \text{ ech}}{S} = \frac{1}{1 + k_1 + k_2 + k_3} \quad (16)$$

$$\frac{K^+ \text{ ech}}{S} = \frac{k_1}{1 + k_1 + k_2 + k_3} \quad (17)$$

$$\frac{Mg^{2+} \text{ ech}}{S} = \frac{k_2}{1 + k_1 + k_2 + k_3} \quad (18)$$

$$\frac{Ca^{2+} \text{ ech}}{S} = \frac{k_3}{1 + k_1 + k_2 + k_3} \quad (19)$$

824 - Conclusion

Nous disposons ainsi d'un outil de calcul permettant de prévoir la garniture cationique du complexe adsorbant d'un sol, qui serait en équilibre avec une solution de composition donnée sous des hypothèses simplificatrices énoncées précédemment (§ 81). Ces hypothèses ne sont vraisemblablement pas entièrement vérifiées, mais en l'absence de données précisant les mécanismes des échanges entre la sol et la solution, elles permettent d'ébaucher un modèle simplifié rendant compte de ces échanges.

Cette méthode sera appliquée à l'effluent (§ 83) et aux eaux de sources Sf, SAP, SAE (§ 84).

83 - APPLICATION DE LA METHODE A L'EFFLUENT

Le tableau 8.1 rassemble les étapes du calcul des activités des cations dans l'effluent.*

TABLEAU 8.1

solution	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
c _m mole/kg	3.74	0.74	3.58	18.27
Y _i pour I 35 10 ⁻³	0.5284	0.5571	0.8367	0.8413
a 10 ³	1.98	0.41	2.99	15.37

Les activités des cations permettent de calculer les constantes :

$$(11) : k_1 = 1.229$$

$$(12) : k_2 = 1.570$$

$$(13) : k_3 = 3.437$$

On aboutit alors aux fractions suivantes sur le complexe adsorbant :

$$(16) : \text{Na}^+/\text{S} = 13.8$$

$$(17) : \text{K}^+/\text{S} = 17.0$$

$$(18) : \text{Mg}^{2+}/\text{S} = 19.1$$

$$(19) : \text{Ca}^{2+}/\text{S} = 47.5$$

On peut considérer ces valeurs des cations fixés sur le sol comme le terme ultime de l'évolution des sols soumis aux épandages d'effluents. Par rapport à un sol témoin, nous notons une forte tendance à la fixation de Na⁺ et de K⁺, une augmentation de Mg²⁺, une forte baisse de Ca²⁺ (tab. 8.2). Si nous comparons ces valeurs calculées aux valeurs enregistrées au profil P2 sous épandage (tab. 8.2), nous voyons qu'aucune évolution observée ne s'effectue en sens opposé à celle prévue.

L'évolution de Ca²⁺, K⁺ et Na⁺ observée correspond bien aux évolutions prévues pour ces cations. L'évolution observée correspond à 45 à 70% de l'évolution prévisible maximale.

* L'activité des ions simples est légèrement surestimée par le fait que l'on n'a pas tenu compte de la formation d'ions complexes.

Par contre le Mg^{2+} ne subit pas l'augmentation prévue et se maintient à la même valeur. Toutefois, si l'on considère la somme ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$), on note que l'écart observé correspond à 69% de l'écart prévu. On peut donc considérer que l'état du profil P2 est celui d'un profil ayant effectué 60 à 70 % de l'évolution calculée maximale. Il est néanmoins vraisemblable que le sol sous l'effet de l'épandage n'atteindra pas les valeurs calculées car les apports d'eau extérieurs dilueront l'effluent en contact avec le sol.

TABLEAU 8.2

	Ca ²⁺ /S	Mg ²⁺ /S	K ⁺ /S	Na ⁺ /S
prévision sol + effluent	47.5	19.1	17.0	13.8
sol témoin	88	7.8	2.2	1.7
observation P2 sol + effluent	69	7.8	11.2	10
<u>écart observé</u> <u>écart maximum prévu</u>	0.46	0	0.57	0.70

84 - APPLICATION DE LA METHODE AUX EAUX DE SOURCE

Appliquons le modèle aux trois sources étudiées (voir détail des calculs en annexe). On note :

- pour la source folle (SF) et la source aval paturage (SAP) : une grande similitude : le complexe théorique des sols avec lesquels elles sont en équilibre est saturé à 98 % par des bivalents. La part des monovalents est très faible. Si nous comparons ces "sols théoriques" avec les sols témoins (tab. 8.3), on remarque que la part des bivalents et des monovalents est du même ordre de grandeur. Toutefois, les sols témoins ont des quantités de Mg^{2+} beaucoup plus faibles que les "sols théoriques". De plus, la potassium est plus important que le sodium sur les sols témoins, alors que le sodium domine sur les sols calculés.
- pour la source aval épandage (SAE), le complexe théorique en équilibre avec elle est nettement plus fourni en monovalents (Na^+ et K^+) aux dépens du Ca^{2+} . Cette évolution calculée confirme l'évolution constatée des sols à la suite des épandages. Toutefois, là encore, le rapport Mg/Ca théorique est supérieur à celui observé. Le modèle est donc plus efficace pour prévoir la somme ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) que pour prévoir Ca^{2+} et Mg^{2+} séparément.

TABLEAU 8.3

	Ca/S	Mg/S	K/S	Na/S
SF	59.2	39.6	0.3	0.9
SAP	54.6	43.8	0.4	1.2
SAE	53.5	35.0	4.7	6.8
Sol témoin	88	7.8	2.2	1.7
Sol + eff(P2)	69	7.8	11.2	10

85 - CONCLUSION

La méthode développée dans les paragraphes précédents permet de donner des indications sur le sens de l'évolution des cations K^+ , Na^+ et $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ fixés sur le complexe en relation avec l'évolution de la solution du sol.

Dans le cas de l'effluent de laiterie, il apparaît que les cations monovalents K^+ et Na^+ augmentent très fortement, alors que les cations divalents vont diminuer - la baisse de Ca^{2+} étant plus forte que l'augmentation de Mg^{2+} . Ces évolutions amènent la garniture cationique des sols à s'écarter sensiblement des valeurs considérées comme satisfaisantes pour un sol normal (GAUCHER, 1968). On retrouve ainsi l'évolution observée sur les sols recevant l'effluent.

La méthode pourrait être améliorée si l'on connaissait avec précision la nature des différentes molécules responsables de la capacité d'échange, leurs proportions relatives, ainsi que les constantes apparentes d'échanges propres à chacune de ces molécules. Actuellement FRITZ (CNRS, Strasbourg) tente un travail de ce genre portant essentiellement sur les différents pôles argileux.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude morphologique et hydrique des sols bruns sur schiste briovérien a illustré le rôle de l'organisation du sol sur la circulation des eaux : possibilité et définition des niveaux de circulation latérale dans les sols, n'excluant pas toutefois des infiltrations verticales en profondeur.

L'existence de circulations latérales permet d'appréhender l'étude des sols sous un angle nouveau lorsque l'on veut aborder la genèse des sols et leurs relations dans l'espace. Les lixiviations d'éléments solubles qu'elles occasionnent sont à prendre en compte dans la dynamique des éléments minéraux. Les possibilités de lessivage de particules fines ne sont pas exclues mais n'ont pas été constatées ici.

L'épandage de laitier, réalisé à fortes doses dans ce contexte, a des répercussions sur les sols et les eaux qui drainent ces sols.

Pour les sols, l'effet de l'épandage se marque principalement :

- par une augmentation de la matière organique fraîche, ce qui contribue à diminuer la valeur du potentiel redox, à augmenter le taux de matière organique humifiée riche en sites d'échanges et à donner aux sols une teinte plus grise;
- par une augmentation et une modification de la charge minérale : le phosphore s'accumule, les cations monovalents Na^+ et K^+ sont fixés en grande quantité après le départ des divalents (Ca^{2+} principalement). Cette évolution de la garniture cationique des sols sous l'effet de l'épandage est en accord avec le modèle simplifié développé au chapitre VIII.

Pour les eaux influencées par l'épandage, on note principalement une charge minérale nettement augmentée où les cations monovalents (Na^+ , K^+) prédominent largement. L'épandage réalisé dans de telles conditions n'est donc pas neutre vis-à-vis du milieu. Des visites effectuées dans de nombreux établissements dans diverses régions de France, laissent penser que cette situation est loin d'être exceptionnelle.

Bien qu'on ne puisse se prévaloir d'une maîtrise totale de l'épuration par épandage sur les sols, une amélioration très sensible de ces dispositifs d'épuration pourrait être effectuée à l'aide d'études pédologiques et agronomiques locales effectuées dans chaque établissement ("études de périmètres" prolongées par le suivi agronomique). Je rappellerai ici qu'un épandage satisfaisant ne peut se concevoir que dans le cadre d'une gestion agronomique des effluents, où l'essentiel des efforts seraient tournés vers la réutilisation par les cultures de l'eau et des éléments apportés par l'effluent.

Ceci amènerait à préconiser, pour la fromagerie étudiée, l'implantation de cultures fortement exportatrices (prairies temporaires de fâtuque élevée, exploitée en fâche, par exemple). Toutefois, la période du drainage hivernal restera peu propice à l'épandage, car l'excès d'eau dû à l'épandage entraîne à l'aval une partie de l'effluent. A l'aide de l'étude des sols, il faut choisir pour cette période les zones permettant le plus long séjour de l'effluent dans le sol. Pour la fromagerie étudiée, il faudra donc rechercher des sols sains sur schiste briovérien, situés plutôt en position haute sur les versants et relativement éloignés des sources et des ruisseaux. Ceci ne constituerait néanmoins qu'un moindre mal par rapport au stockage des effluents, par ailleurs difficilement envisageable (volume, odeurs..

Il apparaît important, à une époque où les économies d'énergies, d'eaux et de fertilisants sont cruciales, de s'orienter - chaque fois que cela est possible - vers l'épuration par épandage qui reprend une idée déjà ancienne du recyclage en agriculture des déchets de l'activité humaine. Pour cela, nos connaissances doivent être améliorées et, en particulier, la modélisation du fonctionnement du sol en place en tant que système épurateur reste un objectif à atteindre (GRAFFIN, 1974). Il semble nécessaire d'intégrer dans cette modélisation, les données issues de la caractérisation pédologique : stratification du milieu poreux, propriétés intrinsèques de chaque horizon, réaction physique et chimique du sol au passage d'eau et de solutés, sens et directions de l'écoulement de l'eau dans les sols.

B I B L I O G R A P H I E

- AL DROUBI A. , 1976 - Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation, application aux sols salés du Tchad. Thèse Université L. Pasteur, Strasbourg. Sc. Géol. Mém. n°46, 178 p.
- AUDRY P., COMBEAU A., HUMBEL F.X., ROOSE E., VIZIER J.F., 1973 - Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Bulletin du groupe de travail sur la dynamique des sols, n° 1 et 2. ORSTOM, 126 p. + annexes.
- BARROIS C., 1899 - Brioverian system in sketch of the geology of Central Brittany. Proc. Géol. ass., vol. XVI.
- BERTRAND F., 1977 - L'eau dans l'industrie laitière. Bulletin technique d'information du ministère de l'agriculture, n° 322, p. 475-489.
- BETREMIEUX R., 1975 - Réflexions à propos de la capacité au champ et de sa mesure. Actualisation et réhabilitation de cette notion. GEPPA, 22° réunion, Juin 1974. INRA . Département de Sciences du sol. Groupe de travail 6ter. 42 p.
- BOAST C.W., 1973 - Modeling the movement of chemicals in soils by water. Soil Science, v. 115, n° 3, p. 224-230.
- BOCQUIER G., 1973 - Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse Université L. Pasteur, Strasbourg. Sci. Géol. Mém. n°6114, 350 p.
- BOURRIE G., 1976 - Relation entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO₂ dans les eaux naturelles. Bulletin AFES, n° 3.
- BOURRIER J., 1965 - La mesure des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode VERGIERE. Bulletin technique du Génie Rural, n° 73.
- BOWER C.A., OGATA G., TUCKER J.M., 1968 - Sodium hazard of irrigation waters - as influenced by leaching fraction and by precipitation of Ca carbonate. Soil Science, v. 106, n° 1, p. 33-53.
- BUSON C., 1976 - Etude préparatoire à l'épandage de la fromagerie de Vaudes. Document CREBS-AFBSN. 17 p.
- BUSON C., 1977 - L'épandage des eaux résiduaires sur terrain agricole. Laboratoire de sciences du sol-CREBS-AFBSN. 114p; Cahier Technique n°8 . Bulletin Seine - Normandie, Avril 1978, 64 p.
- BUSON C., EDELINE P., GAUQUELIN J.L., 1978 - Etude de périmètre d'épandage de la fromagerie de l'Abbaye d'Aunay sur Odon - 14 - Laboratoire de Science du Sol ENSA-INRA Rennes, CREBS . 81 p. 2cartes au 1/10.000°.

- BUSON C., EDELINE P., GAUQUELIN J.L., 1979 - Etude de périmètre d'épandage de la laiterie Briedel de Retiers - 35 - Laboratoire de Science du Sol, ENSA-INRA Rennes, CREBS. 43 p. + annexes. 2 cartes au 1/10.000°.
- CALVET R., GRAFFIN P., 1974 - Description mathématique des phénomènes de transport des solutions aqueuses dans les milieux poreux. Annales agronomiques, n° 25 (2-3), p. 123-155
- CARNET C., 1978 - Bocage : sols et eaux. Tome II. Etude des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne : une approche du rôle du bocage. Thèse de 3ème cycle. ENSA-INRA Rennes. 236 p.
- Carte Géologique de la France au 1/80.000° - Feuille de Coutances, 3ème édition - 1966.
- CHEVERRY C., 1972 - Exemple d'application des travaux de l'U.S. Salinity Laboratory 1963-1968 sur l'alcalinisation des sols soumis à l'action des eaux bicarbonatées. Cah. ORSTOM, ser. Pédol., v. X, 2, p. 193-203.
- COGNE J., 1972 - Le Briovérien et le cycle orogénique cadomien dans le cadre des orogènes finiprécambriens. Actes du colloque international sur les corrélations du Précambrien, Agadir-Rabat. 3-23 Mai 1970. Collection intern. CNRS (Paris), n° 192, p. 193-218.
- Commission de pédologie et de cartographie des sols (C.P.C.S.), 1967 - Classification des sols Document multigrade 96 p.
- CURTIS E.J., 1969 - Sewage Fungus : its nature and effects. Water Research. Pergamon Press. Vol. 3, p. 289-311.
- CURTIS E.J., 1971 - Sewage Fungus : studies of sphaerotilus slimes using laboratory recirculating channels. Water Research. Pergamon press. Vol. 5, p. 267-279.
- CZERASKI L., 1970 - Untersuchung über die Bodenfluchte und die Bodenwasser spannung im Bereich der Feldskapazität bei Sand und Lehmboden. Landbau Forschung Volkenrode. 20, 2, p. 117-124.
- DANCETTE C., MAERTENS C., 1974 - Méthode d'estimation de la capacité au champ à partir du pF3. Bulletin AFES, Science du sol n° 3, p. 165-172.
- DANGÉARD C., DORE F., JUIGNET P., 1961 - Le Briovérien supérieur de la Basse Normandie, série à tubidites a tous les caractères d'un flysch. Rev. Géol. phys. et géol. dynam. 4, p. 251-259.
- DUCHAUFOR Ph., 1970 - Précis de pédologie. Masson. 481 p.
- DUPRET L., 1974 - Relations structurales entre les formations briovériennes de la région de Granville - St Pair (Massif Armoricain). Thèse Université de Caen. 210 p.
- EDELINE P., KRIEGK O., 1977 - Etude pédologique préalable au drainage de la région Nord de St Aignan sur Roe. Multig. 72 p. 2 cartes au 1/10.000°.
- EDELINE P., GAUQUELIN J.L., 1978 - Etude pédologique préalable au drainage - Associations syndicales d'Ambrières et de Lassay (53). 65 p. + annexes 6 cartes.
- FEODOROFF A., 1962 - Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau. Ann. agron. 13, p. 523 - 547.
- FEODOROFF A. & BALLIF J.L., 1969 - Etude de l'infiltration de la pluie *in situ* à l'aide de tensiomètres. Ann. agron., 20 (5), p.475-504.
- FRITZ B., 1975 - Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Thèse de l'Université L. Pasteur, Strasbourg. Sciences Géol. Mémoire n° 41, 154 p.

- GARRELS R.M. & CHRIST C.L., 1967 - Equilibres des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Ed. Gauthier Villars, 354 p.
- GAUCHER G., 1968 - Traité de pédologie agricole. Le sol et ses caractéristiques agronomiques. Ed. Dunod, 578 p.
- GAUDET J.P., 1978 - Transfert d'eau et de soluté dans les sols non saturés. Mesure et simulation. Thèse de l'Université scientifique et médicale et de l'Institut national polytechnique de Grenoble. 246 p.
- Glossaire de pédologie, 1969 - Description des horizons en vue du traitement informatique. ORSTOM, 82 p.
- GRAFFIN Ph., 1974 - Limites d'utilisation d'un modèle de comportement du sol sous culture irriguée pour simuler le fonctionnement du sol comme système épurateur. Ann. agron. 25 (2-3), p. 157-177.
- GRAS R., 1962 - Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône. Ann. agron. 13, p. 141-147.
- GRAS R. & MORISOT A., 1973 - Etude de l'épandage des eaux résiduaires des industries agricoles et alimentaires. Direction des Industries agricoles et alimentaires, 19 p.
- GRIFFIN R.A. & JURINAK J.J., 1973 - Estimation of activity coefficients from the electrical conductivity of natural aquatic systems and soil extract. Soil Sci., 116, 1, p. 26-30.
- HELGESON H.C. & JAMES W.R., 1968 - Activity coefficients in concentrated electrolyte solutions at high temperatures. Abstracts of papers, 115th National Meeting of American Chemical Society.
- HELGESON H.C., 1969 - Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. Amer. J. of Soil Sci., 26, p. 729-804.
- HORTENSTINE C.C., 1977 - Removal of phosphorus from sewage effluent by a typic quartzipsamment soil. Soil and Crop Sci. Soc. of Florida Proc., 37.
- JAMAGNE M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. Ann. agron. 18, n° hors série, 142 p.
- LAUDELOUT H., VAN BLADEL R., BOLT G.H., PAGE A.L., 1968 - Thermodynamics of heterovalent cation exchange reaction in a montmorillonite clay. Trans. Faraday Soc., 64, p. 1477-1488.
- LE CORRE C., 1977 - Le Briovérien en Bretagne centrale : essai de synthèse lithologique et structurale. Bull. B.R.G.M., sect. 1, 3, p. 219-254.
- MAIGNIEN R., 1958 - Contribution à l'étude du cuirassement des sols en Guinée (Afrique occidentale). Mém. du Serv. de la carte géol. - Als. Lorr., n° 16, 235 p.
- MEROT Ph., 1978 - Bocage : sols et eau. Tome I. Le bocage en Bretagne granitique : une approche de la circulation des eaux. Thèse de 3ème cycle. Université de Rennes. Multig. 196 p.
- MEROT P., 1978 - Caractérisation hydrodynamique des sols de Méjusseume à l'aide de mesures tensiométriques. Note interne du Laboratoire de Science du Sol ENSA - INRA de Rennes.
- MEINCK F., STOFF H., KOHLSCHÜTTER H., 1977 - Les eaux résiduaires industrielles. Ed. Masson. 864 p.
- MOREL J.L., 1977 - Contribution à l'étude de l'évolution des boues résiduaires dans le sol. Thèse Université de Nancy. 137 p.

- MOREL R., 1974 - Eléments de physicochimie. Document I.N.A. Paris Grignon. 190 p.
- MORISOT A. & GRAS R., 1974 - Caractérisation des effluents des industries agricoles et alimentaires. Ann. agron., 25 (2-3), p. 209-229.
- MULLER J., 1971 - Etude des eaux de féculerie et des problèmes posés par l'épandage. Résultats de la campagne 1971. Document INRA Châlons s/Marne. 28 p.
- MULLER J., 1977 - Minéralisation en sol de craie de l'azote organique des eaux résiduaires de féculerie. Ann. agron. 28 (1), p. 95-111.
- MULLER J., 1977 - Transformation dans le sol des déchets de l'industrie sucrière. Pub. Station Sci. du Sol Châlons s/Marne, n°50, 50 p.
- PERIGAUD S., 1977 - Possibilité d'utilisation des effluents d'eaux résiduaires pour l'irrigation des plantes fourragères. Fourrages, 70, p. 63-84.
- RHOADES J.D., 1968 - Leaching requirement for exchangeable sodium control. Soil Sci. Soc. of Amer. Proc., 32, 5, p. 643-647.
- RHOADES J.D., 1972 - Quality of water for irrigation. Soil Sc. 111, p. 227-244.
- RICHARDS L.A., 1960 - Advances in soil water. C.R. 7^{ème} Cong. Int. Sci. Sol, Madison, v.1, p. 67-79.
- RICHARDS L.A., 1969 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Salinity Lab. Staff Agric. Handbook, n° 60, 180 p.
- RODINA A.G., 1972 - Methods of aquatic microbiology. University Park press. p. 358-367.
- RUELLAN A. & DELETANG J., 1967 - Les phénomènes d'échanges de cations et d'anions dans les sol ORSTOM Initiation Doc. Techn. 5, 123 p.
- RUELLAN A., 1971 - Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes. Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc Oriental). Thèse Université L. Pasteur Strasbourg, Mémoire ORSTOM 54, 302 p.
- RUELLAN A., 1976 - Les études pédologiques et hydrologiques en milieu bocager; synthèse et perspectives. Compte rendu du Colloque Bocage (Rennes, juillet 1976). Les bocages, p. 145-151.
- SAGON J.P., 1976 - Contribution à l'étude géologique de la partie orientale du Bassin de Chateaulin (Massif Armoricain): stratigraphie, volcanisme, métamorphisme, tectonique. Thèse de l'Université P. et M. Curie, Paris VI, 615 p.
- SEGALEN P., 1964 - Le fer dans les sols. Initiation documentation technique ORSTOM, 150 p.
- SOIL SURVEY, 1977 - Water retention porosity and density of Field Soils. Harpenden, England, 76 p.
- STEINBERG M., TOURAY J.C., TREUIL M., MASSARD P., 1978 - Géochimie - Principes et méthodes - Approche thermodynamique. Ed. Doin, 276 p.
- TARDY Y., GARRELS R., 1974 - A method of estimating the gibbs energies of formation of layer silicates. Geochimica and cosmochimica Acta, 38, p. 1101-1116.
- TRUEDELL A.M. & CHRIST C.L., 1968 - Cation exchange in clay interpreted by regular solution theory. Amer. Jal of Soil Sci., 266, p. 402-412.

- VACHAUD G. & QUELIN , 1969 - Equations et modèles mathématiques pour le calcul des transferts d'eau dans la zone non saturée. La Houille blanche, n°8.
- VALLEE C.V. & FEODOROFF A., 1974 - Comportement d'un sol d'altération de granite sous une pes-
sière. Bull. AFES, Sci. du Sol, 2, p. 119-131.
- VEHMEYER F.J. & HENDRICKSON A.H., 1949 - Methods of measuring field capacity and permanent
wilting percentage in soils. Soil Science, 68, p. 75-94.
- VEILLAUX R., 1978 - Aspects du comportement de sols recevant des effluents de laiterie (région
de Vire, sols sur schistes). Mem. DEA, ENSAR Rennes, 100 p.
- VOISIN A., 1963 - Tétanie d'herbe. Ed. La maison rustique Paris, 296 p.
- WATSON K.E., PETERSON A.E., POWELL R.D., 1977 - Benefits of spreading whey on agricultural land.
Journal of Water Pollution, C.F., p. 24-34.

ANNEXE 1 - DONNEES CLIMATIQUES

VIRE - (altitude : 120 m)

- PLUVIOMETRIE

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
71	99,1	45,2	50,7	47,1	90,8	71,6	46,3	12,0	29,9	21,8	124,9	17,9	765
72	70	97,2	54,9	80,4	93,9	38,0	17,3	26,4	61,0	39,6	145,9	35,2	769
73	52	59,3	10,9	50	107,4	50,4	45,3	30,3	124,8	84,2	54,3	41,7	710
74	78,9	124,6	28,5	13,7	53,1	83,8	28,6	60,1	140,3	159,4	122,9	40,8	934,8
75	76,8	18,6	80,1	50,9	78,1	18,8	38,0	64,7	165,2	17,4	123,7	24,4	756,7
76	41,9	37,8	57,2	17,8	9,8	0	66,5	19,8	137,6	135,8	76,7	69,1	670
77	104,5	51,9	70	78	80	22,4	26,6	32,4	18,7	43,6	139,8	73,1	741
(moyennes 1931-1960)	96	78	76	67	63	58	71	69	62	93	107	114	
ETP (turc)	10	20	45	-70	95	110	115	95	65	35	15	10	
P - ETP	86	58	31	-3	-32	-52	-34	-26	-3	58	92	104	

- MOYENNES MENSUELLES DES TEMPERATURES MINIMALES QUOTIDIENNES

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
75	4,11	1,59	1,79	3,82	6,54	8,06	12,62	12,26	8,85	4,48	2,78	0,27
76	2,34	2,38	2,88	4,00	-	9,89	19,07	9,53	9,62	7,81	3,62	0,43
77	0,68	3,99	3,93	2,94	6,42	9,03	12,22	9,55	7,04	9,18	4,90	2,55

- MOYENNES MENSUELLES DES TEMPERATURES MAXIMALES QUOTIDIENNES

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
75	10,44	10,66	8,98	12,70	15,31	20,17	23,40	26,85	19,28	15,22	11,97	6,54
76	7,88	8,45	10,65	13,44	18,85	26,13	24,86	25,27	19,30	15,02	10,10	6,53
77	6,66	10,21	12,32	11,53	15,28	17,13	20,25	20,79	19,78	17,47	10,34	10,12

PRECIPITATIONS - VIRE 1976

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1° dec	2° dec	3° dec	Total		
J	3,0	0,5	-	1,0	0,5	0,5	-	-	0,7	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	2,0	2,1	1,1	9,3	5,5	4,4	8,0	-	-	-	2,2		7,0	2,3	32,6	41,9		
F			0,7		2,7			2,9	6,1	2,1	0,7	15,0	0,5	-	-	-	-	-	-	2,4	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-		14,5	18,6	4,7	37,8			
M											0,6	12,0	4,0	7,3	0,6	1,0	18,4	0,6	0,9	-	-	7,5	1,3	-	-	3,0	-	-	-		0	45,4	11,8	57,2			
A		0,3											0,5	8,5										4,3	4,2						0,3	9,0	8,5	17,8			
M		1,3	-	0,5	1,6	-	2,4												4,0												5,8	4,0	-	9,8			
J																																			0		
J			12,2	-	5,9	1,5	1,5	-	1,4	-	-	1,5	2,1	-	15,1	4,1	-	-	0,3	20,1											22,5	4,0	-	66,5			
A																									0,5						3,9	2,0	1,5	-	-	17,9	17,9
S	1,6							3,0	-	18,3	4,2	0,4	3,1	4,2	10,0							8,2	10,4	3,2	17,4	2,2	1,4	10,0			22,9	31,9	82,8	137,6			
O		0,4	21,6	1,2	2,0	9,5				1,5	4,1	8,2	7,8	17,0	3,3	-	3,0	12,0	1,1	2,7	10,0	5,0	-	-	-	0,4	-	11,3	30,6	2,8		36,2	60,8	29,8	135,8		
N	1,1	5,2	3,2	2,4	8,1	3,2	1,1	-	4,0	4,8	0,5	4,0	-	-	-	3,0	-	-	-	0,5						0,6	-	4,0	16,8	13,7		33,6	8,0	35,1	76,7		
D	13,0	9,4	6,6	6,7	10,0	8,6	1,7	1,4								0,6	2,1	1,6	0,3											1,5	7,6	57,4	2,6	9,1	69,1		

PRECIPITATIONS - VIRE 1977 ET 1978

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1° dec	2° dec	3° dec	Total				
J	2,0	2,1			2,4	3,8			12,0	1,2			13,0	5,8	1,6		0,6	0,1			1,4	5,9		30,6	12,0	2,0	2,0	1,0			28,5	21,1	54,9	104,5					
F		1,1	3,0	5,6	14,1	3,7		1,6	6,0			1,0		0,9	1,1	1,4	1,8	1,7	1,2	0,5		2,4										36,1	9,6	6,2	51,9				
M																																				70			
A																																					78		
M																																					80		
J					2,2	2,2	1,2	2,6	4,4		0,4	2,0		4,5			2,4									0,5							12,6	9,3	0,5	22,4			
J					2,4					6,0	0,9	1,1					0,9	1,8	0,4						10,4	1,5	1,2						2,4	11,1	13,1	26,6			
A						6,2													1,1	5,5	1,1	11,2	0,1			2,2	3,9		0,1	1	1,0	6,2	6,6	19,6	32,4				
S		4,1						2,1																		1,1	5,2	2,3				3,9		6,2	-	12,5	18,7		
O	3,2	2,8		4,3	3,9			0,6	2,1											9,6			2,4	2,4				2,1			2,3	7,9	16,9	9,6	17,1	43,6			
N	10,8	20,5	5,3		2,4	3,6	5,5	3,0			7,0	15,0	5,0	8,0	4,5	9,0	1,0				23,2	2,6	0,4	9,0	3,0					1,0	51,1	72,7	16,0	139,8					
D				0,9	5,5	9,0	1,5		5,9	6,8												4,0		0,8		3,0	1,1	16,4	0,9	2,1	1,4	29,6	-	43,5	73,1				
78 J			1,4	3,6				2,3	1,5	12,0	11,0															8,1	4,0	17,8	3,0	4,5	2,0	11,7	13,0		7,5	20,8	17,6	75,3	113,7
F	2,5		5,8	2,7	1,0					1,8	7,0	0,4	2,1		12,2	5,2		35,0	0,0	0,5						0,6	2,2	7,0	1,0					13,8	59,0	10,8	83,6		
M		5,8												8,1	11,0	5,2				14,0	1,1	9,7	4,6			5,9	4,2	0,9		6,1			5,8	62,3	36,2	104,3			

VIRE P 2

Position de pente, sous prairie naturelle de graminées, 120 m. d'altitude.

1er horizon : profondeur 0 à 7 cm

très humide - brun gris très foncé 2,5 Y 3/2 humide, gris brun 2,5 Y 6/2 sec - sans taches - nombreux débris organiques - rares graviers de schiste gréseux altéré et de quartz - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire peu nette polyédrique subanguleuse fine associée localement à une structure grumeleuse fine - volume des vides important entre les agrégats - agrégats sans pores visibles - horizon très poreux - galeries de lombric de petite taille - nombreuses racines fines entre les agrégats - très forte activité biologique - transition très nette et régulière.

Dénomination : Ap₁

2ème horizon : profondeur 7 à 19-20 cm

très humide - brun gris foncé 2,5 Y 4/2 humide, gris brun 2,5 Y 6/2 sec - sans taches - à matière organique directement décelable - graviers et cailloux abondants de schiste et de quartz terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire peu nette et généralisée polyédrique très fine à sur-structure polyédrique moyenne - volume des vides faible entre les agrégats - agrégats sans pores visibles - horizon peu poreux - galeries - racines fines entre les agrégats - activité biologique moyenne - transition nette et régulière.

Dénomination : Ap₂

3ème horizon : de 19-20 à 38-40 cm

très humide - brun gris foncé 2,5 Y 4/2 humide, gris brun 2,5 Y 6/2 à l'état sec - quelques taches liées aux faces structurales, de réoxydation du fer - graviers et cailloux de quartz et de schiste - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire peu nette et généralisée polyédrique moyenne et grossière à sous-structure polyédrique très fine (4-5 mm de diamètre) - volume des vides faible entre les agrégats - agrégats à pores peu nombreux - horizon peu poreux - revêtements organiques dans les galeries de vers de terre - quelques racines fine revêtant la face des agrégats - galeries de lombric - activité biologique moyenne - transition distincte et régulière.

Dénomination : (B)g

4ème horizon : plus de 38-40 cm

humide - gris olive 5 Y 5/2 humide, gris pale à l'état sec - taches peu étendues souvent associées aux éléments grossiers de réoxydation du fer - graviers et cailloux très abondants de schiste assez peu altéré - terre fine limono-argilo-sableuse - structure peu nette polyédrique moyenne - volume des vides faible entre les agrégats - agrégats sans pores visibles - horizon peu poreux - activité biologique nulle.

Dénomination : C

Analyses physiques

Horizon	Granulométrie %					Stabilité structurale			Réserve en eau					
	A	LF	LG	SF	SG	Log. 10S	K	Log. 10K	H.E.%	pF 4,2%	d.a.	P _m	R.U. en %	R.F.U. mm
Ap ₁	229	330	238	111	58	0,25	22,5	2,35						
Ap ₂	233	324	162	68	213	0,20	19,7	2,29						
(B)	210	305	155	74	256	0,37	3,45	1,53						
C	147	253	86	72	442	-								

Analyses chimiques

Horizon	Matière organique				pH		P ₂ O ₅ Dyer %	Capacité d'échange meq pour 100 g						
	C %	M.O.%	N %	C/N	eau	KCl		T	Ca/S	Mg/S	K/S	Na/S	S	S/T %
Ap ₁	50,8		6	8,5	6,7	6,2	3,37	22	73,35	8,45	11,08	7,10	21,4	0,97
Ap ₂	24,6		3,13	7,85	7	6,1	1,72	15,5	70,66	7,98	9,83	11,51	14,15	0,94
(B)	16,8		2,24	7,52	7,2	6,1	1,04	13,5	70,85	7,48	10,14	11,51	12,42	0,92
C	5,5		0,98	5,6	7,1	6,1	0,35	8,9	61,23	7,51	13,03	17,42	7,18	0,81

V I R E P 3

Position de pente; sous prairie naturelle de graminées; dans un talweg secondaire; altitude 115;

1er horizon : profondeur 0 à 7 cm

très humide - brun gris très foncé 10 YR 3/2 humide, gris brun pale 10 YR 6/2 sec - sans taches; à débris organiques (restes de feuilles et de racines en décomposition) - terre fine limono-argilo-sableuse - structure polyédrique subanguleuse très fine, localement grumeleuse - volume des vides très important entre les agrégats - agrégats sans pores visibles - horizon très poreux nombreuses racines fines et moyennes - activité biologique très forte - limite nette et régulière.

Dénomination : Ap₁

2ème horizon : profondeur 8 à 30 cm

légèrement humide - brun gris foncé 10 YR 3,5/2 humide, gris brun pale 10 YR 6,5/2 sec - sans taches - graviers de schiste altéré et de quartz peu altéré à arêtes anguleuses - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire nette et généralisée, polyédrique fine à sur-structure polyédrique grossière - volume des vides important entre les agrégats - agrégats à pores peu nombreux - horizon poreux - racines fines et moyennes - bonne activité biologique (galeries de lombric) - limite nette et régulière.

Dénomination : Ap₂

3ème horizon : profondeur 30 à 48-50 cm

humide - brun gris foncé 2,5 Y 4/2 humide, gris pale 2,5 Y 7/2 sec - quelques taches de reoxydation du fer dans les galeries - graviers et cailloux de schiste plus ou moins altérés - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire nette et généralisée polyédrique moyenne à sous-structure polyédrique fine - volume des vides assez important entre les agrégats - agrégats à pores nombreux très fins et fins - quelques galeries de lombric verticales - quelques racines très fines - activité biologique faible - limite distincte et légèrement ondulée.

Dénomination : (B₁)

4ème horizon : profondeur 48-50 à 60-65 cm

très humide - brun olive 2,5 Y 5/3 humide, jaune pale 2,5 Y 7/3 sec - nombreuses taches de réoxydation du fer le long des galeries de lombric et sur la face des agrégats, 2,5 YR 3/6 humide 2,5 YR 6/6 sec - quelques graviers et cailloux de schiste assez altérés - terre fine limono-argilo-sableuse - structure polyédrique moyenne très nette et généralisée à sous-structure polyédrique fine - volume des vides important entre les agrégats - agrégats à pores nombreux fins - nombreuses galeries de vers - horizon très poreux - activité biologique moyenne - limite nette et légèrement ondulée.

Dénomination : (B₂)

5ème horizon : > 65 cm

sec - olive foncé 5 Y 5/3 sur le terrain, jaune pale 5 Y 7/3 sec - quelques taches liées aux éléments grossiers très altérés - graviers et cailloux de schiste très tendres et très altérés - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire peu nette polyédrique moyenne à tendance massive - volume des vides faible entre les agrégats - agrégats sans pores - activité biologique très faible (il existe de très rares galeries verticales en cul de sac dans le sommet de cet horizon) - on note un enrichissement progressif vers la profondeur en éléments grossiers toujours altérés.

Dénomination : C

Analyses physiques

Horizon	Granulométrie %.					Stabilité structurale			Réserve en eau					
	A	LF	LG	SF	SG	Log.10S	K	Log.10K	H.E.%	pF 4,2%	d.a.	P _m	R.U. en %	R.F.U. mm
Ap ₁	256	368	227	86	63	0,07	14,8	2,17						
Ap ₂	221	343	193	78	165	0,13	10,0	2,00						
(B)	231	363	206	73	119	0,63	5,33	1,72						
C	186	328	156	75	255	1,45	0,5	0,69						

Analyses chimiques

Horizon	Matière organique				pH		P ₂ O ₅ Dyer %	Capacité d'échange meq pour 100 g						
	C %	M.O.%	N %	C/N	eau	KCl		T	Ca /S	Mg /S	K /S	Na /S	S	S/T %
Ap ₁	49,4		5,0	9,7	6,6	6,1	2,75	22	90,54	5,70	3,26	0,48	20,87	0,95
Ap ₂	16,2		2,1	7,8	7,2	6,4	1,11	14,5	88,38	5,63	5,43	0,54	14,03	0,97
(B)	8,9		1,2	6,9	6,8	5,9	0,70	9	81,05	9,16	7,37	2,40	7,52	0,83
C	2,5		0,66	3,75	7	5,9	0,09	7	75,28	11,29	9,20	4,22	4,78	0,68

V I R E T I

Position de pente; sous prairie naturelle de légumineuses et graminées; 121 m d'altitude.

1er horizon : profondeur 0 à 5 cm.

très humide - brun foncé 10 YR 3/3 humide, beige foncé 10 YR 6/3 sec - sans taches - à débris organiques (racines en décomposition) - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire nette et généralisée : polyédrique très fine (2 à 3 mm) - volume des vides important entre les agrégats - agrégats sans pores visibles - horizon très poreux - galeries - nombreuses racines fines entre les agrégats - très forte activité biologique - transition nette et régulière.

Dénomination : Ap₁

2ème horizon : profondeur 5 à 26 cm

humide - brun 10 YR 4/3 humide, beige foncé 10 YR 6/4 sec - sans taches - graviers abondants de schiste à arêtes légèrement émoussées, quelques cailloux de schiste - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire très nette et généralisée polyédrique très fine (2 à 5 mm) à surstructure polyédrique moyenne - volume des vides important entre les agrégats - agrégats sans pores visibles - horizon très poreux - nombreuses galeries de lombric - racines fines - activité biologique forte - transition nette et régulière.

Dénomination : Ap₂

3ème horizon : profondeur 26 à 35-40 cm

humide - brun jaune foncé 10 YR 4/4 humide, beige foncé 10 YR 6/4 sec - descentes de terre brune 10 YR 4/3 dans les galeries de lombric - graviers et cailloux abondants de schiste tendre terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire nette et généralisée polyédrique moyenne à sous-structure polyédrique très fine - volume des vides important entre les agrégats - agrégats à pores très nombreux, très fins - horizon poreux - nombreuses galeries de lombric verticales - activité biologique forte - transition distincte et ondulée.

Dénomination : (B)

4ème horizon : profondeur > 35-40 cm

frais - brun jaune 10 YR 5/4 humide, beige 10 YR 7/4 sec - descente de matériaux brun foncé plus riches en humus dans les galeries de lombric - quelques taches noires de réoxydation (Fe, Mn) parfois associées aux éléments grossiers - cailloux et blocs abondants de schiste très tendre - terre fine limon moyen sableux - structure massive - pores peu nombreux - horizon très peu poreux - rares galeries de lombric - activité biologique très faible.

Dénomination : C

Analyses physiques

Horizon	Granulométrie %					Stabilité structurale			Réserve en eau					
	A	LF	LG	SF	SG	Log. 10S	K	Log. 10K		pF 4,2%	d.a.	P _m	R.U. en %	R.F.U. mm
Ap ₁	229	364	238	111	58	0,53	7,3	1,86						
Ap ₂	195	333	204	107	161	0,58	10,0	2						
(B)	208	308	180	102	202	0,50	5,2	1,71						
C	168	281	155	95	301	1,44	0,85	0,92						

Analyses chimiques

Horizon	Matière organique				pH		P ₂ O ₅ Dyer ‰	Capacité d'échange meq pour 100 g						
	C %	M.O. %	N %	C/N	eau	KCl		T	Ca/S	Mg/S	K/S	Na/S	S	S/T %
Ap ₁	36		3,65	10	6,3	5,7	0,34	16	86,0	8,70	4,70	0,40	13,58	0,85
Ap ₂	18		2,25	8	6,1	5,3	0,14	12	91,0	6,35	1,82	0,78	9,44	0,78
(B)	8,4		1,24	6,8	6,2	5,3	0,02	9	90,75	5,99	1,41	1,83	6,50	0,72
C	2,7		0,67	4	6,4	5,2	0,01	7	88,0	7,02	2,42	2,13	4,41	0,63

VIRE T2

Position de pente; sous prairie naturelle de légumineuses et graminées; 115 m. d'altitude.

1er horizon : profondeur 0 à 6 cm

très humide - brun foncé 10 YR 3/3 humide, beige foncé 10 YR 6/3 sec - sans taches - à débris organiques (restes de feuilles et de racines en décomposition) - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire nette et généralisée, polyédrique subanguleuse très fine (2 à 3 mm) - volume des vides assez important entre les agrégats - agrégats sans pores visibles - horizon très poreux - nombreuses racines fines entre les agrégats - très forte activité biologique - transition nette et régulière.

Dénomination : Ap

2ème horizon : profondeur 6 à 18 cm

humide - brun 10 YR 4/3 humide, beige foncé 10 YR 6/3 sec - riche en matière organique non directement décelable - quelques graviers de schiste tendre - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire nette et généralisée, polyédrique moyenne à sous-structure polyédrique très fine - volume des vides assez important entre les agrégats - agrégats à pores très fins, peu nombreux - horizon poreux - assez nombreuses racines fines dans les agrégats - forte activité biologique - transition diffuse et irrégulière.

Dénomination : Ap₂

3ème horizon : profondeur 18 à 26 cm

horizon proche du précédent mais correspondant à la base du labour - la structure moyenne est éclatée - la porosité entre les agrégats est très importante.
plus humide - brun foncé 10 YR 4/3 humide, beige foncé 10 YR 6/3 sec - sans taches - à débris organiques (restes de fines racines en décomposition) - quelques graviers et cailloux à la base de l'horizon - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentaire nette et généralisée polyédrique très fine sans surstructure - volume des vides très important entre les agrégats - agrégats sans pores visibles - horizon très poreux - racines fines assez nombreuses entre les agrégats - forte activité biologique - transition nette et régulière.

Dénomination : Ap₃

4ème horizon : profondeur 26 à 38 cm

humide - brun-jaune foncé 10 YR 4/4 humide, beige foncé 10 YR 6/4 sec - sans taches - graviers cailloux peu abondants de schiste très tendre (quelques graviers de quartz) - terre fine limono-argilo-sableuse - structure nette et généralisée polyédrique moyenne à sous-structure polyédrique très fine - volume des vides faible entre les agrégats - agrégats à pores tubulaires très fins - horizon peu poreux - quelques racines - quelques galeries de vers - descentes par poche de matériau sus-jacent - limite graduelle et régulière.

Dénomination : (B₁)

5ème horizon = profondeur 38 à 47 cm

très humide, brun-jaune foncé 10 YR 4/4 humide, beige 10 YR 7/3 sec - nombreuses taches (liées à une origine lithologique au départ) irrégulières à limites nettes, contrastées, aussi cohérentes - cailloux de schiste tendre - terre fine limono-argilo-sableuse - structure fragmentai

nette et généralisée, polyédrique moyenne à sous-structure polyédrique très fine peu nette - volume des vides faible entre les agrégats - agrégats à pores tubulaires très fins et nombreux - porosité biologique (galeries de vers) - horizon peu poreux - galeries de lombric - racines très fines - activité biologique faible - limite distincte et irrégulière.

Dénomination : (B₂)

6ème horizon : > 47 cm

frais - jaune olivâtre 2,5 Y 6/4 humide, jaune pâle 2,5 Y 7/4 sec - nombreuses taches décrites dans le 5ème horizon - pas de trace de réoxydation du fer - graviers et cailloux abondants de schiste tendre à arêtes légèrement émoussées - terre fine limono-argilo-sableuse - structure massive - pores peu nombreux - horizon peu poreux - pas de galeries - pas de racines - activité biologique très faible.

Dénomination : C

Analyses physiques

Horizon	Granulométrie %.					Stabilité structurale			Réserve en eau					
	A	LF	LG	SF	SG	Log. 10S	K	Log. 10K	H.E.%	pF 4,2%	d.a.	P _m	R.U. en %	R.F.U. mm
Ap ₁	223	333	195	76	173	0,25	16,7	2,22						
Ap ₂	223	335	173	83	186	0,33	15,5	2,19						
(B)	203	326	177	84	210	0,47	15,0	2,17						
C	222	349	148	65	216	1,53	1,04	1,01						

Analyses chimiques

Horizon	Matière organique				pH		P ₂ O ₅ Dyer ‰	Capacité d'échange meq pour 100 g						
	C ‰	M.O.‰	N ‰	C/N	eau	KCl		T	Ca/S	Mg/S	K/S	Na/S	S	S/T ‰
Ap ₁	27,3		2,88	9,5	5,9	5,1	0,10	13	83,0	9,86	1,7	0,49	9,22	0,71
Ap ₂	22,8		2,67	8,5	5,8	5,1	0,05	12	90,0	7,56	1,26	1,10	7,66	0,64
(B)	10,3		1,55	6,60	5,5	4,5	0,01	9	88,82	7,36	2,09	1,34	3,49	0,39
C	2,9		0,65	4,40	5,9	4,8	0,01	8	84,21	9,92	4,30	1,56	3,32	0,42

ANNEXE 3 - PROFILS HYDRIQUES (en % pondéral)

- le 10 novembre 1977

P₃

Profondeur cm	Humidité %
0 - 5	53,9
5 - 10	27,4
10 - 15	24,6
15 - 20	21,9
20 - 25	19,8
25 - 30	23,0
30 - 35	23,4
35 - 40	22,0
40 - 45	22,5
45 - 50	22,4
50 - 55	22,8
55 - 60	18,9
60 - 65	21,4
65 - 70	14,9

- le 13 décembre 1977

P₂

Profondeur cm	Humidité %
0 - 7	78,3
7 - 9	45,0
7 - 19	39,0
20 - 35	24,0
45 - 55	18,0

P₃

Profondeur cm	Humidité %
0 - 7	57,3
7 - 17	26,9
17 - 24	21,6
24 - 30	24,1
30 - 34	22,7
34 - 40	23,0
40 - 47	24,5
47 - 58	29,4
58 - 64	27,9
69 - 75	17,9

- le 22 décembre 1977

P₂

Profondeur cm	Humidité %
0 - 7	102,9
7 - 12	36,4
12 - 20	29,7
16 - 20	25,6
20 - 25	20,07
30 - 35	21,15

P₃

Profondeur cm	Humidité %
0 - 7	54,1
7 - 12	30,6
12 - 17	21,6
17 - 25	22,04
25 - 35	23,6
35 - 43	25,4
43 - 50	25,8
50 - 57	25,7
57 - 61	25,6
61 - 66	25,5
65 - 67	21,6
70 - 78	16,2

- Le 29 décembre 1977

P₂

Profondeur cm	Humidité %
0 - 7	91,5
9 - 12	84,9
12 - 18	34,5
18 - 25	26,3
25 - 30	27,8
30 - 35	39,2
35 - 41	42,5
40 - 45	27,8
45 - 55	19,9

P₃

Profondeur cm	Humidité %
2 - 7	63,1
7 - 14	40,8
14 - 22	29,7
23 - 30	24,5
32 - 40	25,1
40 - 45	25,9
45 - 50	26,0
50 - 55	25,9
55 - 60	24,6
60 - 65	23,6
65 - 70	19,6

- le 19 janvier 1978

P₂

Profondeur cm	Humidité %
0 - 7	91,8
7 - 9	53,2
10 - 20	30,9
20 - 28	28,1
28 - 35	24,5
35 - 42	25,7
42 - 47	21,5
47 - 52	19,5

P₃

Profondeur cm	Humidité %
0 - 7	69,3
7 - 14	36,6
14 - 21	23,4
21 - 30	25,2
30 - 35	26,5
35 - 42	28,7
43 - 52	29,1
52 - 60	27,4
60 - 65	27,5
65 - 70	24,4
70 - 75	17,5

← base du
(B)₂ vers
68 cm

- le 1er mars 1978

P₂

Profondeur cm	Humidité %
0 - 7	78,8
7 - 14	44,5
14 - 21	30,7
21 - 30	25,2
35 - 40	29,9

P₃

Profondeur cm	Humidité %
0 - 7	54,1
7 - 15	28,3
15 - 25	23,1
25 - 35	24,5
35 - 45	25,8
45 - 55	25,6
55 - 60	27,6
60 - 65	25,4
65 - 70	15,7

- le 7 mars 1978

P₂ (Ap₂ massif)

Profondeur cm	Humidité %
3 - 5	97,73
7 - 8	93,365
9 - 11	41,28
7 - 8	99,03
19 - 11	42,66

← circulation à la base de l'Ap₁)

← " "

P₃

Profondeur cm	Humidité %
8 - 12	28,6
40 - 45	27,3
57 - 62	24,8

- le 24 mars 1978

P₃

Profondeur cm	Humidité %
0 - 6	64,5
6 - 8	43,1
8 - 15	29,3
30 - 35	25,2
45 - 50	28,5
60 - 65	30,8
65 - 70	18,0

← circ lati base (B)

- le 29 mars 1978

P₂

Profondeur cm	Humidité %
0 - 6	86,7
6 - 12	34,1
12 - 18	27,4
18 - 24	28,4

P₃

Profondeur cm	Humidité %
2 - 7	58,3
7 - 14	32,8
14 - 21	26,5
25 - 35	24,0
35 - 48	25,9
50 - 60	25,7
60 - 65	29,8
70 - 78	17,57

← circ u tion base (B₂)

CALCUL DES CATIONS FIXES SUR LE SOL EN EQUILIBRE AVEC LES SOURCES ETUDIEES

SOURCE FOLLE ($I = 4.10^{-3}$)

	Ca	Mg	K	Na
C_i en m moles/kg	0,720	0,320	0,0228	0,47
γ_i	0,7684	0,7457	0,9189	0,9342
a_i m mole/kg	0,55	0,25	0,02	0,44

 $k_1 = 0,30$; $k_2 = 42,65$; $k_3 = 63,67$

en meq %	Ca/S	Mg/S	K/S	Na/S
	59,2	39,6	0,3	0,9

SOURCE AVAL PATURE ($I = 3.10^{-3}$)

	Ca	Mg	K	Na
C_i en m moles/kg	0,425	0,272	0,03	0,49
γ_i	0,7933	0,7991	0,9380	0,9421
a_i m mole/kg	0,34	0,22	0,03	0,46

 $k_1 = 0,38$; $k_2 = 37,95$; $k_3 = 47,27$

en meq %	Ca/S	Mg/S	K/S	Na/S
	54,68	43,8	0,4	1,2

SOURCE AVAL EPANDAGE ($I = (10.10^{-3})$)

	Ca	Mg	K	Na
C_i en m mole/kg	0,87	0,364	0,45	4,05
γ_i	0,6765	0,6904	0,8902	0,9024
a_i en m mole/kg	0,59	0,25	0,40	3,65

 $k_1 = 0,69$; $k_2 = 5,16$; $k_3 = 7,89$

en meq %	Ca/S	Mg/S	K/S	Na/S
	53,5	35,0	4,7	6,8

TABLE DES MATIÈRES

	pages
Sommaire	1
Introduction	3
PREMIERE PARTIE : CARACTERISATION PEDOLOGIQUE ET HYDRIQUE DES SOLS BRUNS SUR SCHISTES BRIOVERIENS	5
I - Données géologiques	7
11 - Présentation géologique	7
12 - Observations au microscope	7
121 - La formation gréseuse	9
122 - La formation schisteuse	9
13 - Observations de terrain	9
14 - Conclusion	10
II - Les sols	13
21 - La carte des sols	13
22 - Caractérisation morphologique des sols bruns sur schiste	14
221 - Les horizons de surface	14
222 - L'horizon structural	15
223 - L'horizon d'altération de la roche mère : horizon C	15
23 - Conclusion : hypothèses sur la dynamique de l'eau	17
231 - Les données morphologiques utiles	17
232 - Les propriétés de chaque horizon pour la circulation de l'eau	17
233 - Les discontinuités majeures entre les horizons	18
234 - Schéma de circulation des eaux	18
235 - Conclusion	18
III - Etude des propriétés hydriques des sols bruns	19
31 - Introduction	19
32 - Mesures d'humidité	19
321 - Méthode	19
322 - Résultats	19
3221 - Profil P2	21
3222 - Profil P3	21
33 - Interprétation des profils hydriques	23
331 - Définition de la capacité au champ	23
332 - Valeurs de la capacité au champ.	23

333 - Comparaison avec les humidités sous potentiel matriciel	25
3331 - Mesures au laboratoire des humidités sous des potentiels matriciels variables	25
3332 - Détermination du potentiel matriciel correspondant à la capacité au champ	29
334 - Comparaison avec les mesures de porosité	30
3341 - Mesures de densité apparente	30
3342 - Détermination de la fraction de la porosité remplie par l'eau à la capacité au champ	30
335 - Mesures de perméabilité	31
3351 - Méthodes utilisées	31
3352 - Résultats	31
3353 - Compatibilité avec les profils hydriques	32
34 - Conclusion	32
IV - Etude de la circulation des eaux dans les sols	33
41 - Mise en évidence des circulations latérales dans les sols	33
411 - Propriétés hydriques	34
412 - Observation directe	34
413 - Ressuyage des sols	36
42 - Schéma de circulation des eaux dans les sols et conclusion	36
DEUXIEME PARTIE : EFFET DES EPANDAGES SUR LES SOLS ET LES EAUX	37
V - Conditions de réalisation de l'épandage de la fromagerie étudiée	41
51 - L'établissement	41
52 - Les eaux résiduaires	41
521 - Origine	41
522 - Volume	41
523 - Composition	42
53 - Réalisation de l'épandage	42
54 - Les terrains utilisés	42
55 - Conclusion	43
VI - Effet des épandages sur les eaux	45
61 - Cas d'une circulation à la base de l'horizon d'enracinement (Ap)	45
611 - Installation	45
612 - Effet des épandages sur les débits	45
613 - Effet des épandages sur la composition chimique des eaux du sol	48
614 - Discussion	52
6141 - Modèle de mélange	52
6142 - Comportement des ions	52
6143 - Variation des valeurs de α et interprétation	53

62 - Cas d'une circulation à la base de l'horizon (B)	53
621 - Installation	53
622 - Effet des épandages sur les débits	53
623 - Effet des épandages sur la composition chimique des eaux du sol	57
624 - Discussion	57
63 - Effet des épandages de laiterie sur la composition des eaux de source	59
631 - Les sources étudiées	59
632 - Caractérisation des eaux de source	59
6321 - Les paramètres physico-chimiques	59
6322 - La charge organique	60
6323 - La charge minérale	60
6324 - Le dosage du fer	60
64 - Conclusion	65
VII - Effet des épandages sur les sols	67
71 - Analyse morphologique	67
711 - Couleur des sols	67
712 - Taches	68
713 - Texture	68
714 - Structure	68
715 - Porosité	68
716 - Activité biologique	70
717 - Enracinement	70
718 - Conclusion	70
72 - Analyses physico-chimiques	70
721 - pH des sols	70
722 - Valeur de Eh	70
723 - Matière organique C/N	73
7231 - Les données	73
7232 - Interprétation	73
724 - La capacité d'échange	74
7241 - Les résultats	74
7242 - Essai de détermination de la capacité d'échange de la matière organique	74
725 - Les cations adsorbés sur la capacité d'échange	75
7251 - Le taux de saturation de la capacité d'échange	75
7252 - Les cations adsorbés	75
7253 - Interprétation	75
726 - Acide phosphorique assimilable	78

73 - Remarque sur les prairies	78
731 - Modification de la flore	78
732 - Modification de la composition minérale des plantes	79
74 - Conclusion	79
VIII - Relations entre les cations fixés sur le sol et les cations de la solution du sol	81
81 - Introduction	81
82 - Méthode d'estimation des cations adsorbés d'après la composition cationique de la solution du sol	81
821 - Ecriture des réactions d'échange	81
822 - Estimation des activités	82
8221 - Estimation des activités des ions en solution	82
8222 - Estimation des activités des ions adsorbés sur le sol	83
823 - Résolution du système d'équations	83
824 - Conclusion	85
83 - Application de la méthode à l'effluent	85
84 - Application de la méthode aux eaux de source	86
85 - Conclusion	87
CONCLUSION GENERALE	89
BIBLIOGRAPHIE	91
ANNEXES	97
Annexe 1 : Données climatiques	97
Annexe 2 : Profils - Analyses	100
Annexe 3 : Profils hydriques	109
Annexe 4 : Calcul des cations fixés sur le sol en équilibre avec les sources étudiées	113
TABLE DES MATIERES !	115

VU :

LE DIRECTEUR DE LA THESE

VU :

LE PRESIDENT DU JURY

VU ET APPROUVE

Rennes, le _____

LE PRESIDENT DE
L'UNIVERSITE DE RENNES I

VU ET APPROUVE

Rennes, le _____

LE DIRECTEUR DE L'ECOLE NATIONALE
SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES