



COMITE SCIENTIFIQUE

Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin

Détermination des vitesses de transfert de l'eau, des nitrates et d'autres solutés en zone non saturée dans un loess profond

Rapport final



République Française



Mars 2005

Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin
Jean RICHERT – Conseiller scientifique
2, rue de Rome
67309 SCHILTIGHEIM Cedex
Tel : 03 88 19 17 17 Fax : 03 88 83 30 54
<http://www.bas-rhin.chambagri.fr>



Mots clés : nitrates, vitesse de migration, lœss, tritium, phytosanitaire

En bibliographie, cette étude sera citée de la façon suivante :

RICHERT J. (2005), Détermination des vitesses de transfert de l'eau, des nitrates et d'autres solutés en zone non saturée dans un lœss profond - Rapport final. Chambre d'Agriculture du Bas Rhin / Comité Scientifique, 91p, 77 ill.

SYNTHESE

La Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin a mis en place un projet de recherche, en partenariat avec le BRGM, l'ENSAIA-INPL/INRA, le CRPG/CNRS, le Conseil Général du Bas-Rhin, le Conseil Régional d'Alsace et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, visant à déterminer les vitesses d'infiltration de l'eau et de différents solutés à travers une zone non saturée constituée de lœss profonds. Trois sites présentant des contextes agricoles contrastés ont été retenus dans le secteur d'Obernai et ont fait l'objet de carottages (3 répétitions par site). Les échantillons de sol récupérés lors de ces carottages ont été analysés dans le but d'estimer les stocks de solutés (nitrates et résidus phytosanitaires) et de tritium, de déterminer leurs profils dans la zone non saturée et de décrire les propriétés physico-chimiques des horizons de sol traversés.

La détermination de la vitesse de transfert moyenne de l'eau et des solutés étudiés dans la zone non saturée a ensuite été réalisée en associant les données tritium et les résultats des analyses des nitrates, c'est-à-dire en appliquant un principe de double datation. L'examen direct des données tritium et nitrate a permis d'estimer une vitesse moyenne de transfert. Cette estimation a été affinée et complétée par l'utilisation de modèles pour estimer les flux d'eau et de solutés ainsi que pour déterminer les vitesses de transfert annuelles et leur variabilité au cours du temps. Seule la modalité « grandes cultures » a fait l'objet de modélisation car i) un pic tritium y est parfaitement décrit ii) deux pics de nitrate bien individualisés sont observés et iii) les successions culturales y sont connues depuis 1972 avec une bonne idée des pratiques notamment en terme de fertilisation. La bonne similitude entre les données observées et simulées tant pour le tritium que pour les nitrates, permet de valider la démarche appliquée.

Les résultats de cette étude ont également été présentés, pour leurs parts respectives, par Baran *et al.* (2005) et Portal *et al.* (2004).

SOMMAIRE

I.- CONTEXTE DE L'ETUDE ET ENJEUX.....	p 13
A) <u>Contexte général et zone d'étude</u>	p 13
B) <u>Données bibliographiques initiales</u>	p 14
C) <u>Enjeux et objectifs de l'étude</u>	p 15
II.- MATERIELS ET METHODES.....	p 19
A) <u>Choix des sites</u>	p 19
1) VEREXAL.....	p 19
2) Lycée agricole (modalité LA).....	p 22
B) <u>Tracage par un marqueur inerte</u>	p 25
C) <u>Recueil des données météorologiques</u>	p 25
D) <u>Technique de carottage</u>	p 26
E) <u>Procédure de gestion des échantillons de sol</u>	p 29
F) <u>Moyens analytiques</u>	p 32
G) <u>Stratégie analytique</u>	p 33
III.- RESULTATS.....	p 35
A) <u>Localisation des différentes modalités de l'étude</u>	p 35
B) <u>Collecte des échantillons de sol</u>	p 35
1) Les carottages.....	p 35
2) Les échantillons recueillis.....	p 38
C) <u>Résultats des mesures de la densité apparente des échantillons de sol</u>	p 40
D) <u>Résultats des analyses granulométriques</u>	p 41
1) Modalité V83	p 41
2) Modalité V95	p 43
3) Modalité LA.....	p 45
E) <u>Résultats des analyses du pH eau</u>	p 47
F) <u>Résultats des teneurs en eau du sol</u>	p 49
G) <u>Résultats des analyses des formes de l'azote (NH₄⁺, nitrates)</u>	p 50
1) Dosage de la fraction d'azote ammoniacal.....	p 50
2) Dosage des nitrates	p 53
a) Modalité V83	p 53
b) Modalité V95	p 55
c) Modalité LA.....	p 56

H) <u>Résultats des analyses de dosage du traceur inerte (KBr)</u>	p 58
I) <u>Résultats des analyses du carbone total et de l'azote et du carbone organique ainsi que de la détermination des C/N</u>	p 59
1) Modalité V83	p 59
2) Modalité V95	p 60
3) Modalité LA.....	p 61
J) <u>Résultats des extractions et dosages de résidus phytosanitaires</u>	p 63
1) Cas du lindane.....	p 63
2) Cas de l'atrazine et de la dé-éthylatrazine (DEA)	p 63
a) Modalités V83 et V95	p 63
b) Modalité LA.....	p 64
K) <u>Résultats des mesures de l'activité tritium</u>	p 65
1) Modalité LA.....	p 66
2) Modalité V83	p 68
3) Modalité V95	p 69
IV.- DISCUSSION.....	p 71
A) <u>Description du contexte pédo-géologique de l'étude</u>	p 71
B) <u>Validation de la méthodologie employée</u>	p 72
1) Transport par convection dispersion.....	p 72
2) Cas des phénomènes de transfert latéral	p 75
3) Choix du paramètre représentatif des teneurs en nitrates	p 75
C) <u>Vitesses de transfert de l'eau et des solutés</u>	p 77
1) Référentiel de datation par rapport aux apports de tritium	p 78
2) Référentiel de datation par rapport aux nitrates.....	p 80
a) Cas de la modalité V95	p 80
b) Cas de la modalité V83	p 81
c) Cas de la modalité LA.....	p 83
D) <u>Qualité de l'eau infiltrée</u>	p 84
1) Le cas des concentrations en nitrates	p 84
2) Les résidus phytosanitaires	p 85
V.- CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	p 87
VI.- BIBLIOGRAPHIE.....	p 91

LISTE DES ILLUSTRATIONS

- Illustration 1** : Situation de la commune d'Obernai (IGN)
- Illustration 2** : Description du forage d'irrigation du verger VEREXAL (d'après Rose et Buart, 1987)
- Illustration 3** : Secteur d'étude VEREXAL 83 (V83)
- Illustration 4** : Secteur d'étude VEREXAL 95 (V95)
- Illustration 5** : Description sommaire du forage d'irrigation du lycée agricole
- Illustration 6** : Historique des cultures dans la parcelle n°2, secteur d'étude "lycée agricole"
- Illustration 7** : Secteur d'étude Lycée Agricole (LA)
- Illustration 8** : **A)** Précipitations à Entzheim, **B)** Evapotranspiration à Entzheim **C)** Températures à Entzheim (moyennes mensuelles sur la période d'étude janvier 1950 - décembre 2002).
- Illustration 9** : Schéma de principe d'un carottier à tarière creuse
- Illustration 10** : Vue d'ensemble du matériel de carottage
- Illustration 11** : Tête de forage à trois lames
- Illustration 12** : Gaine de prélèvement PVC engagée dans le tube échantillonneur
- Illustration 13** : Vue générale d'une colonne de sol chemisée, obturées et référencée
- Illustration 14** : Section d'une colonne de sol
- Illustration 15** : Echantillon unitaire de sol
- Illustration 16** : Homogénéisation des échantillons de sol
- Illustration 17** : Conditionnements des échantillons de sol
- Illustration 18** : Localisation des modalités V83, V95 et LA
- Illustration 19** : Dates de réalisation des travaux de sondage
- Illustration 20** : Détail des profondeurs carottées et % de récupération des échantillons de sol par modalité
- Illustration 21** : Nombre d'échantillons conditionnés en fonction des modalités expérimentales et des paramètres analytiques
- Illustration 22** : Stockage des sous échantillons conditionnés respectivement en piluliers en plastique (-20°C), en bocaux de verre (+2°C) et en barquettes en aluminium (+2°C)
- Illustration 23** : Coupe détaillée d'une colonne de sol de 5 cm de hauteur prélevées par tarière creuse lors d'un forage d'essai sur V95 et montrant la déformation des horizons
- Illustration 24** : Densité apparente mesurée pour chaque échantillon de sol collecté lors des carottages V83-A, V83-B et V83-C

- Illustration 25** : Répartition de l'ensemble des échantillons de sol de V83 A et B selon le triangle de texture GEPPA
- Illustration 26** : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage V83-A (cumul des 5 fractions en $^0/_{00}$ en fonction de la profondeur des échantillons)
- Illustration 27** : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage V83-B (cumul des 5 fractions en $^0/_{00}$ en fonction de la profondeur des échantillons)
- Illustration 28** : Répartition de l'ensemble des échantillons de sol de V95 A et B selon le triangle de texture GEPPA
- Illustration 29** : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage V95-A (cumul des 5 fractions en $^0/_{00}$ en fonction de la profondeur des échantillons)
- Illustration 30** : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage V95-B (cumul des 5 fractions en $^0/_{00}$ en fonction de la profondeur des échantillons)
- Illustration 31** : Répartition de l'ensemble des échantillons de sol de LA-A et LA-B selon le triangle de texture GEPPA
- Illustration 32** : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage LA-A (cumul des 5 fractions en $^0/_{00}$ en fonction de la profondeur des échantillons)
- Illustration 33** : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage LA-B (cumul des 5 fractions en $^0/_{00}$ en fonction de la profondeur des échantillons)
- Illustration 34** : pH des échantillons de sol extraits des carottages V83-A et V83-B en fonction de la profondeur
- Illustration 35** : pH des échantillons de sol extraits des carottages V95-A et V95-B en fonction de la profondeur
- Illustration 36** : pH des échantillons de sol extraits des carottages LA-A et LA-B en fonction de la profondeur
- Illustration 37** : Teneurs en eau massique dans les échantillons de sol issus des trois carottages de la modalité V83
- Illustration 38** : Teneurs en eau massique dans les échantillons de sol issus des trois carottages de la modalité V95
- Illustration 39** : Teneurs en eau massique dans les échantillons de sol issus des trois carottages de la modalité LA
- Illustration 40** : Teneurs en NH_4^+ des échantillons de sol issus des carottages V83-A, V83-B et V83-C (en mg/kg de sol sec)
- Illustration 41** : Teneurs en NH_4^+ des échantillons de sol issus des carottages V95-A, V95-B et V95-C (en mg/kg de sol sec)
- Illustration 42** : Teneurs en NH_4^+ des échantillons de sol issus des carottages LA-A, LA-B et LA-C (en mg/kg de sol sec)

- Illustration 43** : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans les échantillons de sol issus des carottages V83-A, V83-B et V83-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{kg}$ de sol sec)
- Illustration 44** : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans la solution du sol des échantillons issus des carottages V83-A, V83-B et V83-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$)
- Illustration 45** : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans la solution du sol des échantillons issus des carottages V83-B et V83-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$) (échelle adaptée aux détails de V83-B et V83-C)
- Illustration 46** : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans les échantillons de sol issus des carottages V95-A, V95-B et V95-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{kg}$ de sol sec)
- Illustration 47** : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans la solution du sol des échantillons issus des carottages V95-A, V95-B et V95-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$)
- Illustration 48** : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans les échantillons de sol issus des carottages LA-A, LA-B et LA-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{kg}$ de sol sec)
- Illustration 49** : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans la solution du sol des échantillons issus des carottages LA-A, LA-B et LA-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$)
- Illustration 50** : Teneurs en bromures totaux des échantillons de sol issus des trois premiers mètres des carottages LA-A, LA-B et LA-C (en $\text{mg Br}/\text{kg}$ de sol sec)
- Illustration 51** : Teneurs en bromures totaux dans les témoins négatifs, échantillons de sol issus de la modalité V95 (en $\text{mg Br}/\text{kg}$ de sol sec - limite de quantification : 0,050 $\text{mg Br}/\text{kg}$)
- Illustration 52** : Quantité d'azote organique dans les échantillons issus des carottages V83
- Illustration 53** : Quantité de carbone organique dans les échantillons issus des carottages V83
- Illustration 54** : Quantité de carbone total dans les échantillons issus des carottages V83
- Illustration 55** : Quantité d'azote organique dans les échantillons issus des carottages V95
- Illustration 56** : Quantité de carbone organique dans les échantillons issus des carottages V95
- Illustration 57** : Quantité de carbone total dans les échantillons issus des carottages V95
- Illustration 58** : Quantité d'azote organique dans les échantillons issus des carottages LA
- Illustration 59** : Quantité de carbone organique dans les échantillons issus des carottages LA
- Illustration 60** : Quantité de carbone total dans les échantillons issus des carottages LA
- Illustration 61** : Concentrations en atrazine et DEA dans les échantillons issus du carottage V83A (en ng/g de sol sec)
- Illustration 62** : Concentrations en atrazine et DEA dans les échantillons issus des carottages V95-A et V95-B (en ng/g de sol sec)
- Illustration 63** : Concentrations en atrazine et DEA dans les échantillons issus des carottages LA-A et LA-B (en ng/g de sol sec)

- Illustration 64** : Teneurs en tritium observées dans la zone non saturée des 3 carottages effectués dans la modalité LA.
- Illustration 65** : Position de l'échantillon ayant la plus forte teneur en tritium et du centre de masse pour les trois répétitions de la modalité LA
- Illustration 66** : Teneurs en tritium observées dans la zone non saturée des 3 carottages effectués dans la modalité V83
- Illustration 67** : Position de l'échantillon ayant la plus forte teneur en tritium et du centre de masse pour les trois répétitions de V83
- Illustration 68** : Teneurs en tritium observées dans la zone non saturée des 3 carottages effectués dans V95
- Illustration 69** : Réponses théoriques à une injection ponctuelle dans un milieu poreux
- Illustration 70** : Pourcentage moyen d'humidité massique dans les échantillons de sol des carottages de V83, V95 et LA
- Illustration 71** : Comparaison des données tritium pour les parcelles LA et V83
- Illustration 72** : Estimation à l'aide de la modélisation de la vitesse de transfert moyenne annuelle sur différentes périodes de temps et en fonction de 2 valeurs de porosité cinématique dans le cas de la modalité LA
- Illustration 73** : Estimation de la vitesse moyenne de migration des nitrates dans le cas de V95
- Illustration 74** : Situation des carottages V83-A, V83-B et V83-C par rapport aux emplacements d'anciens cerisiers arrachés en 1993
- Illustration 75** : Estimation de la vitesse moyenne de migration des nitrates dans le cas de V83.
- Illustration 76** : Estimation de la vitesse moyenne de migration des nitrates dans le cas de LA
- Illustration 77** : Récapitulatif des vitesses moyennes de transfert obtenues selon les méthodes de datation choisies.

INTRODUCTION

La plaine d'Obernai est une région agricole particulièrement productive du fait de l'existence d'une couverture de lœss très homogène de plusieurs mètres d'épaisseur sur l'ensemble du secteur. L'évolution de la qualité de l'eau souterraine du secteur est au cœur des préoccupations depuis plusieurs années. Les effets attendus sur la qualité de l'eau suite notamment à l'amélioration des pratiques agricoles ne sont pas encore perceptibles. En l'absence de données sur le temps de transfert des solutés dans la zone non saturée et la zone saturée, la période probable d'apparition de ces effets ne peut pas être prédite et cette question reste posée.

La revue bibliographique menée par la Chambre d'Agriculture du Bas Rhin avant le démarrage de l'étude a mis en évidence le manque de données scientifiques sur la migration des solutés (nitrates et résidus phytosanitaires) au delà de la zone racinaire et particulièrement dans les lœss. Suite à ce constat, la Chambre d'Agriculture a mis en place un projet de recherche, en partenariat avec le BRGM, l'INPL-ENSAIA/INRA, le CNRS, le Conseil Général du Bas-Rhin, le Conseil Régional d'Alsace et l'Agence de l'Eau Rhin Meuse visant à répondre à plusieurs objectifs. Le premier objectif est la caractérisation du stock de solutés (nitrates et résidus phytosanitaires) et de tritium dans la zone non saturée : trois sites présentant des pratiques agricoles contrastées ont été retenus et ont fait l'objet de carottages (3 répétitions par site) dont les solides récupérés lors de la foration ont été analysés afin d'estimer des stocks de solutés en transit dans le sol. Le deuxième objectif de l'étude est de déterminer une vitesse de transfert moyenne dans la zone non saturée en associant des données tritium et les résultats nitrate c'est-à-dire en appliquant le principe de double datation, notamment via la modélisation. Enfin, les résultats précédents doivent permettre de préciser un scénario d'évolution de la qualité des eaux souterraines du secteur.

I.- CONTEXTE DE L'ETUDE ET ENJEUX

A) Contexte général et zone d'étude

Les terres de la plaine d'Obernai, situées à l'ouest de la commune d'Obernai (*Illustration 1*) font partie des meilleures terres agricoles du département et elles permettent la production de très nombreuses cultures spéciales exigeantes (betterave industrielle, choux à choucroute, pommes de terre, tabac et autres légumes) ainsi que la pratique des grandes cultures habituelles (maïs, blé,...). La qualité de ces terres est liée à la présence sur l'ensemble du secteur d'une couverture de limons lœssiques très homogène dont l'épaisseur est comprise entre 4 et 20 mètres. Sur le plan agronomique, ces sols profonds ne présentent pas de contraintes à l'enracinement des plantes et sont très peu fragiles par rapport aux interventions et aux travaux du sol (ressuyage rapide). Ils assurent en outre une très bonne réserve en eaux pour les cultures en place et bénéficient en général d'une très bonne activité microbienne (Lebreton *et al.*, 1997).

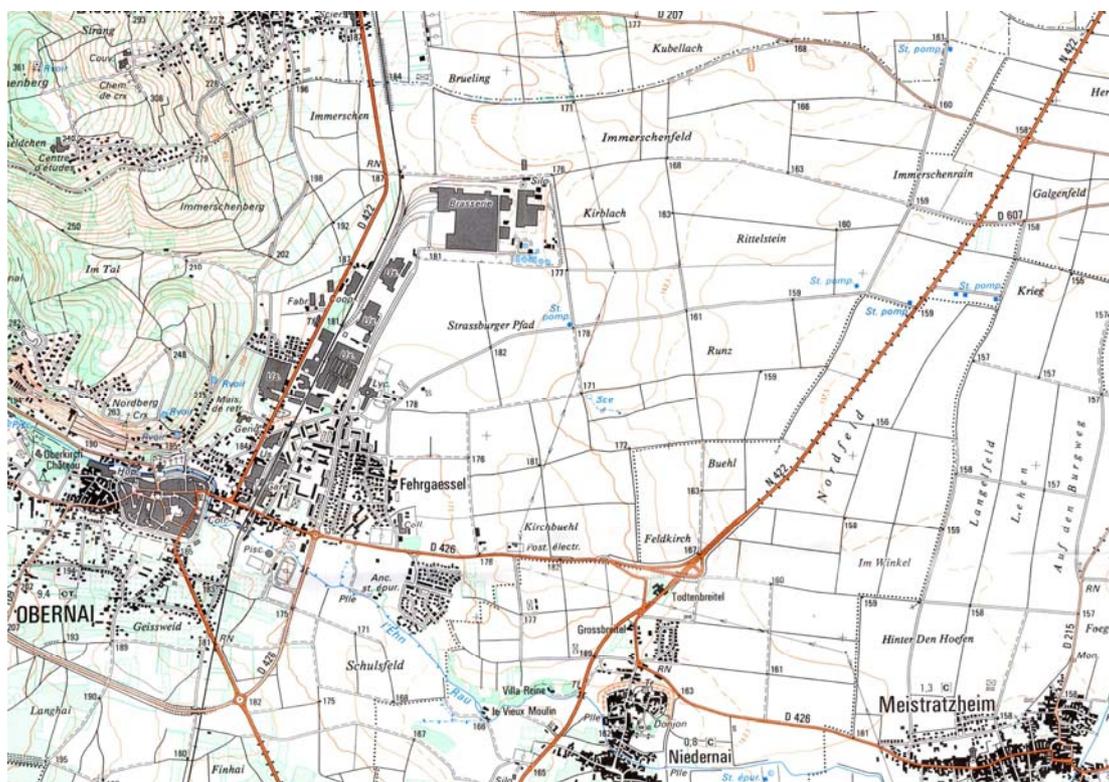


Illustration 1 : Situation de la commune d'Obernai (IGN)

A l'instar de la quasi totalité de la plaine d'Alsace, le secteur d'étude est concerné par la présence de la nappe alluviale rhénane ainsi que celle d'autres aquifères apparentés. C'est à la bordure Ouest de la plaine d'Obernai, en zone de piémont des Vosges, que l'aquifère présente la plus faible épaisseur, entre 0 et 15 mètres, la rendant de ce fait également plus vulnérable à toutes les pollutions. Au niveau des principaux ouvrages de captage pour l'adduction publique et privée (SIVOM du bassin de l'Ehn, brasserie Kronenbourg, soit un total avoisinant 3,8 millions de m³ par an), l'épaisseur de l'aquifère atteint plus de 90 m. Au niveau de la zone d'étude (Nord Est d'Obernai), celle-ci est comprise entre 10 et 20 mètres.

Depuis plusieurs années, l'évolution de la qualité de la ressource en eau souterraine du secteur est préoccupante. Même si la moyenne des concentrations en nitrates des eaux distribuées ne dépasse pas 50 mg/l (données DDASS - 2003), ponctuellement, les analyses de certaines eaux brutes révèlent des concentrations élevées, parfois supérieures à 90 ou 100 mg/l. Cette situation inquiète tous les acteurs locaux, collectivités, industriels, et agriculteurs. Dans le souci de contribuer à une amélioration de la situation dans tout le secteur, la profession agricole a, notamment, mis en place une opération de conseil collectif Fertimieux appelée "Piémont, Eau et Terroir", en partenariat avec l'Agence de l'Eau Rhin Meuse et le Conseil Général du Bas Rhin depuis 1995. Les effets attendus sur la qualité de l'eau suite notamment à l'amélioration des pratiques agricoles ne sont pas encore perceptibles. L'inertie du système de recharge de l'aquifère et le temps de transfert des solutés dans la zone non saturée sont très mal connus et de ce fait, les effets sur la ressource en eau des actions menées à la surface ne peuvent être observés qu'après un temps de réponse indéterminé pour le moment.

B) Données bibliographiques initiales

Une revue bibliographique a été conduite en 2000 par la Chambre d'Agriculture avant le démarrage du projet. Elle a révélé que très peu de travaux ont été menés sur la migration des nitrates au-delà de la zone racinaire, et encore moins, dans des sols lœssiques et sous des climats comparables à ceux d'Obernai.

Les travaux de Delphin et Schenk (1996), menés à Epfig (Bas Rhin) dans la partie supérieure (1,8 m) d'un sol de limon lœssique, et à l'aide de bougies poreuses, proposent une

vitesse de migration des nitrates dans les conditions locales estimée à environ 22 cm par an. Ces résultats ont été mesurés de façon indirecte et ils n'ont pas été reproduits, notamment pour être vérifiés, à des profondeurs plus importantes. Les travaux de Gvirtzman *et al.* (1986) menés sur des sols de lœss en Israël, ont fait appel à une datation par le tritium et ont permis de déterminer une vitesse de transfert de l'eau en zone non saturée d'environ 65 cm/an. Dans d'autres substrats homogènes, argiles ou limons, les vitesses de transferts estimées sont parfois beaucoup plus lentes encore (Joshi *et al.* 1997).

Des travaux menés en Picardie par Normand *et al.* (1999), par carottage profond dans un contexte crayeux, ont permis de mesurer, grâce à une datation au tritium, la vitesse de migration des nitrates dans ce type de substrat à environ 60 cm par an.

C) Enjeux et objectifs de l'étude

La connaissance des phénomènes locaux de recharge des aquifères a une portée générale qui dépasse les seules préoccupations du secteur d'étude. En effet, l'acquisition d'éléments sur les transferts de solutés contribue à une meilleure connaissance globale de la nappe d'Alsace, en particulier dans les secteurs géographiques concernés par les couvertures lœssiques. A l'échelle de l'ensemble de la nappe rhénane (France, Allemagne et Suisse), il est considéré que les sols de limons lœssiques ou apparentés, représentent environ 30 % de la couverture surfacique totale (Ménillet, 1995). Les couvertures de lœss très épais (supérieures à 5 mètres d'épaisseur) sont rencontrées dans le Nord de l'Alsace et le long du Piémont de la Forêt Noire ; on peut estimer qu'elles couvrent de l'ordre de 10 % de la surface de la nappe. Dans le contexte pédologique de la plaine rhénane, caractérisée par une très grande variété d'unités de sol et des couvertures généralement peu importantes, cette représentativité est particulièrement intéressante. Cela signifie que les données collectées pourraient être utilisées sur une part significative de la nappe d'Alsace dans le cadre d'étude de vulnérabilité ou de transfert.

Dans ce contexte, le projet mis en place a visé trois objectifs principaux :

*** Estimation des stocks présents**

Le premier objectif de l'étude est de déterminer les stocks de nitrates et d'autres solutés, notamment certains produits phytosanitaires, présents dans la zone non saturée située au dessus de l'aquifère en réalisant des carottages de sol dans des secteurs d'étude appropriés.

L'analyse des carottes de sol vise à quantifier les stocks de molécules en transit, et de les localiser dans les profils de sol. Outre les nitrates, les autres solutés objet des investigations de l'étude sont l'atrazine, herbicide du maïs régulièrement utilisé en Alsace et dont des traces sont régulièrement détectées dans les eaux souterraines du secteur, et son métabolite principal la dé-éthylatrazine (DEA). Il est à noter que, postérieurement à l'étude, toute utilisation agricole, ou non agricole, de l'atrazine est interdite depuis septembre 2003. Le lindane a été choisi comme traceur de pratique phytosanitaire ancienne et a également été recherché dans certains échantillons. L'utilisation du lindane en agriculture est interdite depuis 1998.

** Détermination des vitesses de transferts des nitrates et du temps de réponse de l'aquifère

La revue bibliographique réalisée sur le sujet a souligné la carence d'éléments scientifiques sur les vitesses de transfert de l'eau et des solutés tels que les nitrates dans le contexte de la zone étudiée. Par analogie avec le principe d'une chromatographie, le second objectif de cette étude est l'acquisition de références scientifiques sur les transferts, spécifiques aux conditions pédo-climatiques locales. Ces références doivent permettre de caler des modèles hydrodynamiques et donc contribuer à projeter dans le temps l'évolution de la qualité de la nappe. En effet, la connaissance des vitesses de transfert est nécessaire pour prévoir le temps de réponse du système sol/aquifère, c'est-à-dire le délai minimal nécessaire avant d'observer une modification de l'état des eaux souterraines conséquemment à un événement en surface.

A ce stade, l'hypothèse est faite que, au sein de la zone non saturée, les transferts latéraux sont vraisemblablement très faibles par rapport aux transferts verticaux. Par contre, au sein de la zone saturée, les moyens mis en oeuvre pour cette étude ne permettent pas de quantifier des apports latéraux sans doute plus importants qu'en zone non saturée. C'est pourquoi, l'étude se focalise sur la zone non saturée du sol, depuis la surface jusqu'au toit de l'aquifère, ou, selon le cas, jusqu'aux horizons dans lesquels les transferts latéraux pourraient ne plus être négligeables.

*** Prospective d'évolution qualitative des eaux souterraines du secteur

La connaissance acquise, via cette étude, des profils de concentration en nitrates et autres solutés dans les différents horizons de la colonne de sol située au dessus de l'aquifère permet de disposer d'éléments prédictifs de l'évolution de la qualité des eaux souterraines du secteur d'étude. Deux scénarios avaient été envisagés avant le démarrage de l'étude :

- une augmentation à venir des concentrations dans les eaux souterraines, issues des pratiques de fertilisation des années 1970, qui ne serait pas encore parvenue à la nappe

- une diminution, si ce panache de nitrates est en cours de dilution.

A partir du prélèvement et de l'analyse de colonnes de sol, la stratégie choisie pour répondre aux objectifs de ce projet, et en particulier pour déterminer les vitesses de transfert, a fait appel au principe d'une datation multiple. Trois sources de datation différentes ont été utilisées pour mener à bien ce projet :

- l'étude du transfert des nitrates sous des parcelles agricoles ayant subi à un moment connu un changement radical de système d'exploitation (arrêt de fertilisation par exemple),
- l'injection dans le sol, à un instant donné, d'un marqueur inerte (bromure)
- la datation de l'eau interstitielle du sol par le dosage du tritium, dont le pic des apports atmosphériques correspond à 1963 (apport par les essais nucléaires atmosphériques).

Ces trois sources de datation ont été choisies car leurs signaux de départ respectifs correspondent à des temps de migration dans le sol très différents : de quelques mois dans le cas de l'ion bromure, quelques années pour le cas des modifications de fertilisation, à plus de 40 ans dans le cas du tritium. En l'absence de références, le choix de ces échelles devait permettre un calage des vitesses de transfert, soit par rapport à un phénomène lent (temps de migration long, comparable à celui du tritium), rapide (temps de migration très court, comparable à celui de l'ion bromure) ou intermédiaire. L'utilisation de ces différents référentiels de datation permet de se rapprocher des conditions de migration des solutés, quelles que soient les hypothèses envisagées (transfert très lent ou très rapide). Pour fixer un cadre de temps à l'étude, et en vue des travaux de modélisation ultérieurs, le début de la période d'étude est fixé à 1950.

Ce projet a été monté par la Chambre d'Agriculture du Bas Rhin entre novembre 1999 et décembre 2001, sous la tutelle scientifique du Comité Scientifique de la Chambre d'Agriculture du Bas Rhin. Il a rassemblé dans le cadre d'un Comité Technique et Scientifique spécifique les partenaires suivants : le "service eau" (Orléans) et le "service géologique Alsace" (Strasbourg) du BRGM, le laboratoire "sols et environnement" de l'INPL-ENSAIA/INRA de Nancy, le CRPG du CNRS de Nancy, le lycée agricole d'Obernai, le verger expérimental VEREXAL et l'Agence de l'Eau Rhin Meuse

Le financement du projet a été assuré par la Chambre d'Agriculture du Bas Rhin, le Conseil Général du Bas Rhin, la région Alsace, l'Agence de l'Eau Rhin Meuse, le BRGM, l'INPL-ENSAIA/INRA et le CNRS.

II.- MATERIELS ET METHODES

A) Choix des sites

Le secteur d'étude, périmètre de la commune d'Obernai, est situé sur la bordure ouest de la plaine alluviale du Rhin. La géologie du secteur est constituée d'alluvions quaternaires, recouvertes de quelques mètres de lœss, le tout reposant sur des formations imperméables de l'oligocène. Les alluvions quaternaires sont constituées d'un mélange de sable, de graviers et de galets, avec des intercalations de lentilles argileuses. Ces alluvions sont le siège de la nappe alluviale d'Alsace.

1) VEREXAL

Le verger expérimental d'Alsace (VEREXAL) a été mis en place en 1981, sur des terrains préalablement cultivés par l'exploitation agricole du lycée agricole d'Obernai. Malheureusement, les pratiques agricoles antérieures à la mise en place du verger ne sont pas connues. Après trois phases successives d'agrandissement, en 1983, 1986 et 1995, le verger couvre aujourd'hui une superficie d'environ 7 hectares, regroupés autour des bâtiments techniques et administratifs. Encadré par la Chambre d'Agriculture du Bas Rhin, VEREXAL fait partie du réseau national de stations expérimentales du CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes). Les activités principales du verger sont l'acquisition de références technico-économiques sur la production de fruits en Alsace, l'expérimentation variétale, l'expérimentation en protection des plantes, la mise au point de différents itinéraires techniques de production,... Les espèces fruitières étudiées sont la pomme, la prune quetsche d'Alsace, la cerise, la poire, la mirabelle,...

Plusieurs types d'équipements existent sur le site. Au sein des bâtiments, une grande chambre froide régulée, un atelier et des locaux techniques sont disponibles. Une station météorologique automatique a été installée sur site en 1990, fournissant des chroniques continues depuis cette date. A proximité immédiate, un puits d'irrigation a été réalisé en 1987, donnant notamment des indications sur la piézométrie et la qualité des eaux de la nappe. La coupe lithologique au niveau de l'ouvrage a été décrite précisément, laissant à disposition des références locales sur les horizons traversés, jusqu'au fond de l'ouvrage, situé à environ 38 mètres (*Illustration 2*). Le niveau de la nappe est situé juste sous les dépôts lœssiques, à une profondeur de 7,3 mètres au niveau de cet ouvrage.

Projet ou chantier: VEREXAL
 Entreprise de sondage: Mentzler
 Numéro du dossier: _____

Numéro du sondage: _____
 Indice national: 271-8-90
 Date d'exécution: Décembre 1986 - Avril 1987
 Emplacement: Obernai
 Coordonnées Lambert: X=981,500 Y=1098,27
 Altitude: Z = \pm 180 m

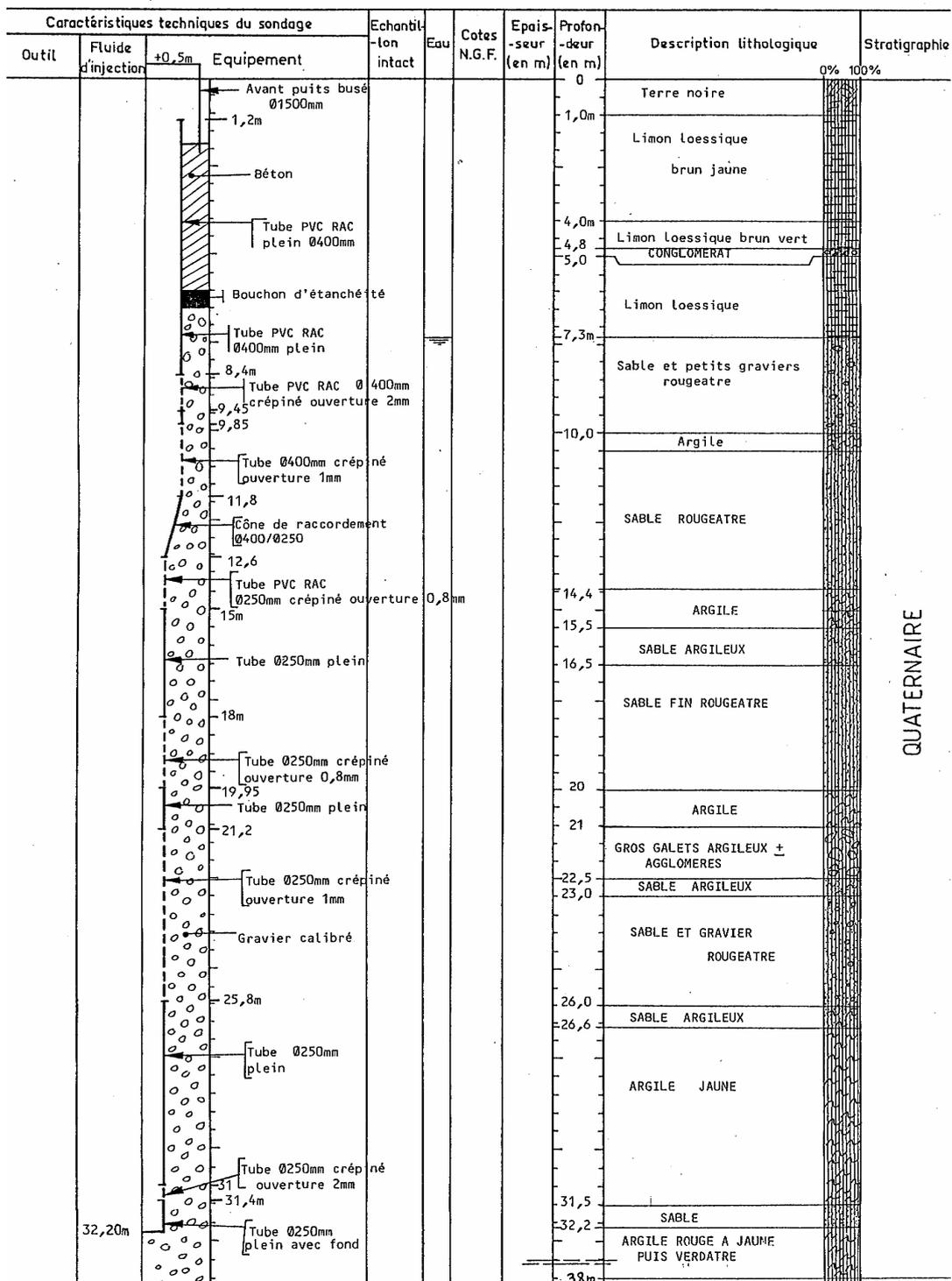


Illustration 2 : Description du forage d'irrigation du verger VEREXAL (d'après Rose et Buart, 1987)

Les sols présents au niveau du verger sont des sols limoneux, calcaires, profonds, sur loess, de texture limon argileux. Le pH moyen de ces sols est situé aux alentours de 8 et leur teneur en matière organique varie entre 1,8 et 2 %.

Deux secteurs particuliers du verger VEREXAL, ont retenu l'attention dans le cadre de cette étude. Ils sont distants d'environ 200 mètres mais présentent des conditions de sols *a priori* similaires :

- VEREXAL 1983 (modalité V83) : une partie du verger, correspondant à environ 4 hectares, a été mise en place en 1983. Auparavant, ces terrains étaient exploités de façon conventionnelle par le lycée agricole d'Obernai dans le cadre de rotations de grandes cultures (betterave industrielle, blé,...). Avec la mise en place du verger en 1983, les apports de fertilisants azotés sur ces parcelles ont été quasiment supprimés. Très ponctuellement, certains apports d'azote ont pu être réalisés, mais toujours à des doses comprises entre 0 et 40 unités d'azote. Dans le cadre d'un verger, enherbé, ces doses d'apport sont sans conséquences pour les horizons inférieurs du sol. L'exploitation de cette parcelle a donc subi une modification majeure, passant d'une fertilisation annuelle classique à un arrêt de fertilisation. Ce phénomène, daté précisément à 1983, devrait pouvoir être observé au niveau de la colonne de sol sous jacente.

Un sous-secteur du verger mis en place en 1983 avait été implanté en cerisiers à kirsch dès 1983. En 1993, ces arbres ont atteint des gabarits importants (\varnothing 15-25 cm), et ils ont été arrachés et la parcelle a été dessouchée. Une grande partie du gros bois a été exportée à cette occasion tandis que le petit bois, les souches et le reste de gros bois a été broyé et enfoui sur place. Aux points de dessouchage, les horizons supérieurs (jusqu'à 60-80 cm) ont été perturbés. Une partie de cette zone a ensuite été plantée de pommiers, une autre partie a été maintenue en herbe, sans implantation d'arbre, depuis 1993. C'est cette dernière zone qui a été retenue pour la réalisation des forages. (***Illustration 3***).

- VEREXAL 1995 (modalité V95) : un autre secteur, d'une surface avoisinant environ 2 hectares, a été mis en verger en 1995. De la même façon que le secteur VEREXAL 1983, ces terrains étaient auparavant exploités de façon conventionnelle par le lycée agricole d'Obernai dans le cadre de rotations de grandes cultures (betterave industrielle, blé,...). Un sous-secteur de VEREXAL 1995 a été identifié : enherbé dès 1995, il n'a jamais été planté et

n'a jamais reçu d'apport de fertilisants azotés depuis (*Illustration 4*). L'exploitation de cette parcelle a donc également subi une modification majeure, passant d'une fertilisation annuelle classique à un arrêt total de fertilisation. Ce phénomène, daté précisément à 1995, devrait pouvoir être observé au niveau de la colonne de sol sous jacente.



Illustration 3 :
Secteur d'étude VEREXAL 83 (V83)



Illustration 4 :
Secteur d'étude VEREXAL 95 (V95)

2) Lycée agricole (modalité LA)

Le lycée d'enseignement général et technique agricole (LEGTA) d'Obernai possède une exploitation agricole de polyculture élevage. Les terres exploitées se situent d'un seul tenant à la périphérie de la commune d'Obernai, au voisinage immédiat du verger VEREXAL. La parcelle "n° 2" du lycée agricole est située à environ 1 km au Nord Est de VEREXAL 83 et VEREXAL 95 et couvre près de 23 hectares. Mise en culture, puis exploitée depuis 1972 par le lycée agricole, elle était auparavant la propriété des hospices civils et laissée majoritairement à l'état de pâtures faiblement exploitées. Peu d'informations sont disponibles sur l'occupation du sol avant cette date.

Comme pour le cas de VEREXAL, le sol de la parcelle d'étude du lycée agricole est un sol limoneux, calcaire, profond, sur lœss, présentant une texture de limon argileux. Son pH moyen est situé aux alentours de 8 et la teneur en matière organique avoisine 2 %. Le substrat lœssique atteint une profondeur d'environ 15 mètres au droit du puits d'irrigation du lycée agricole, situé à moins de 100 mètres du secteur d'étude. La lithologie traversée par l'ouvrage a été décrite sommairement par l'entreprise qui a réalisé le forage pour le compte du lycée agricole en 1998 (*Illustration 5*). Le niveau libre de la nappe, légèrement en charge à cet endroit, se situe aux alentours de 11 mètres au niveau de l'ouvrage.

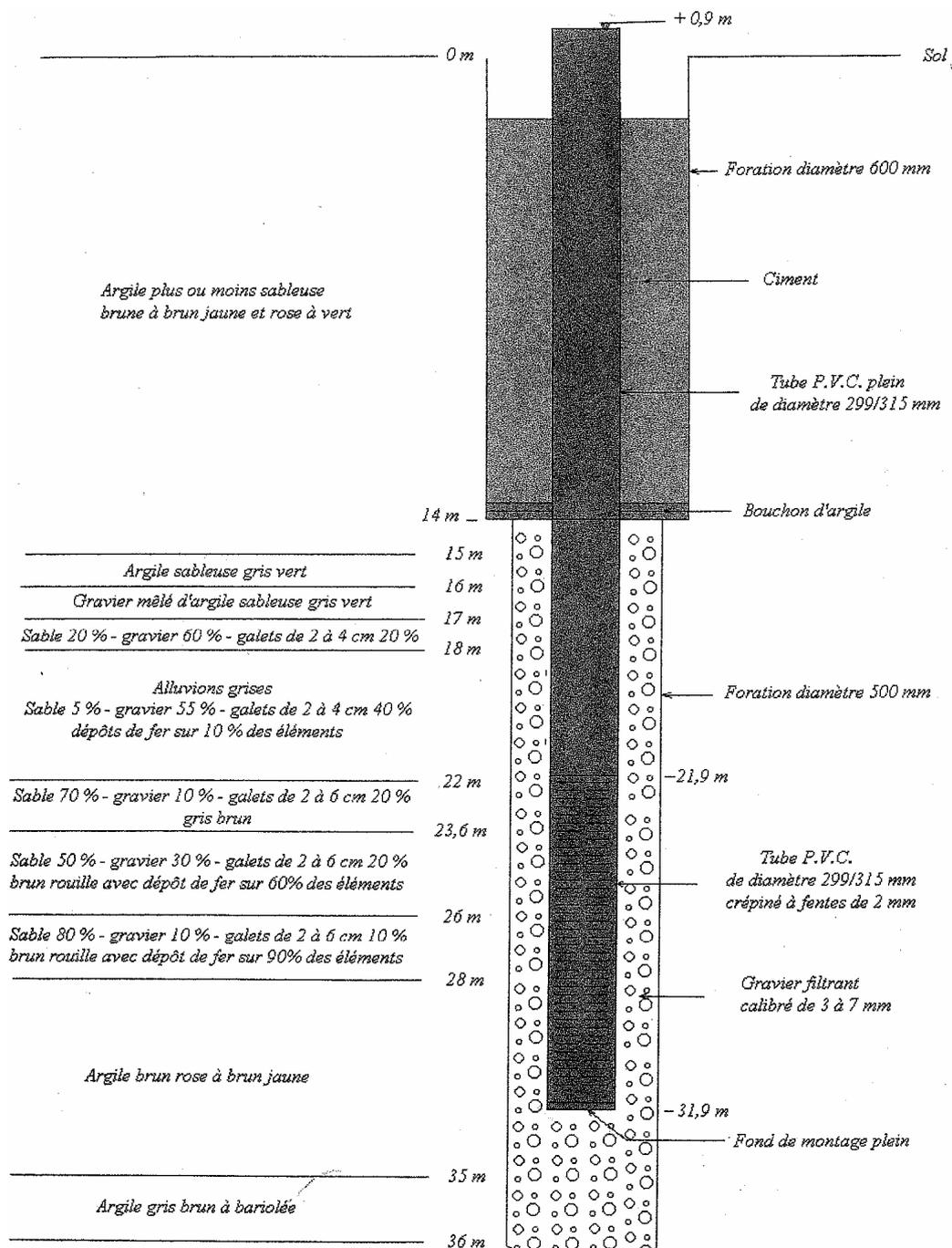


Illustration 5 : Description sommaire du forage d'irrigation du lycée agricole

Les chroniques de culture et les pratiques culturales de l'exploitation du lycée agricole sur cette parcelle ont été collectées et reconstituées à partir des enregistrements récents et des archives du lycée. Le cas échéant, certaines données ont été extrapolées, à dire d'expert, sur la base des pratiques habituelles des agriculteurs du secteur. A trois reprises, des échanges de parcelles avec les exploitants agricoles du voisinage ont eu lieu, entraînant une moins bonne

connaissance des pratiques à ces périodes. Pour ces années, correspondant à la culture du chou à choucroute ou de pommes de terre, les pratiques culturales ont été répertoriées, quand elles étaient disponibles, ou estimées au regard des pratiques moyennes du secteur (**Illustration 6**).

Une zone particulière de la parcelle a été dédiée à cette étude, notamment dans le cadre de l'usage de traceur inerte (**Illustration 7**).

Année	Culture en place	Année	Culture en place
2002	Betterave industrielle	1986	Betterave industrielle
2001	<i>Pomme de terre</i>	1985	Blé tendre
2000	<i>Chou à choucroute</i>	1984	Betterave industrielle
1999	Blé tendre	1983	Blé tendre
1998	<i>Pomme de terre</i>	1982	Betterave industrielle
1997	Betterave industrielle	1981	Blé tendre
1996	Maïs grain	1980	Betterave industrielle
1995	Betterave industrielle	1979	Blé tendre
1994	Blé tendre	1978	Betterave industrielle
1993	Maïs grain	1977	Blé tendre
1992	Betterave industrielle	1976	Betterave industrielle
1991	Blé tendre	1975	Blé tendre
1990	Betterave industrielle	1974	Betterave industrielle
1989	Maïs grain	1973	Blé tendre
1988	Betterave industrielle	1972	Betterave industrielle
1987	Blé tendre	< 1972	Jachère

Illustration 6 : historique des cultures dans la parcelle n°2, secteur d'étude "lycée agricole" (*en jaune* : années et cultures correspondant à des échanges de parcelles)



Illustration 7 : Secteur d'étude Lycée Agricole (LA)

B) Tracage par un marqueur inerte

La datation par l'utilisation du tritium, traceur injecté environ 40 ans auparavant, ainsi que par le choix des parcelles expérimentales ayant subi un arrêt de fertilisation (temps de migration compris entre environ 20 ans pour VEREXAL 83 et 8 ans pour VEREXAL 95) a été complétée par une source de datation ayant subi un temps de transfert court (quelques mois). Ceci avait pour objectif de disposer de référentiels de datations calés sur des échelles de temps complémentaires, de façon à pouvoir balayer une large gamme de vitesses de migration.

Le traceur choisi a été l'ion bromure, inerte par rapport au sol et aux cultures. Sa grande solubilité et le fait qu'il ne soit pas adsorbé au complexe argilo humique du sol et, en général, peu absorbé par les plantes en font un marqueur hydrodynamique intéressant. L'application, à l'aide d'un pulvérisateur d'expérimentation, d'une dizaine de litres d'une solution de bromure de potassium (KBr, Merck) a été réalisée le 26/03/2002 à la dose de 80 kg/ha sur une surface d'environ 400 m² dans la parcelle d'étude du lycée agricole. Les coordonnées de la zone traitée ont été relevées précisément pour pouvoir y positionner ultérieurement les engins de carottage. La date d'application s'est située juste après les semis de betterave, de façon à ce qu'aucun travail du sol n'intervienne avant la réalisation de la campagne d'épandage, perturbant le transfert du traceur dans le sol.

C) Recueil des données météorologiques

Une station d'enregistrement automatique des données météorologiques avait été installée sur le site du verger VEREXAL en 1990. Depuis cette date, un historique des données pluviométriques quotidiennes est donc disponible directement sur le site d'étude.

Les données d'évapotranspiration (ETP) et de température de la chronique 1950 à 2002, ainsi que les données de pluviométrie antérieures à 1990, proviennent de la station météorologique d'Entzheim, située à une douzaine de kilomètres au Nord Est du site d'étude (***Illustration 8***). Une corrélation satisfaisante ($r^2 = 0,61$) a été démontrée entre la pluviométrie mesurée à Entzheim et celle mesurée sur le site d'étude (Baran *et al.*, 2005).

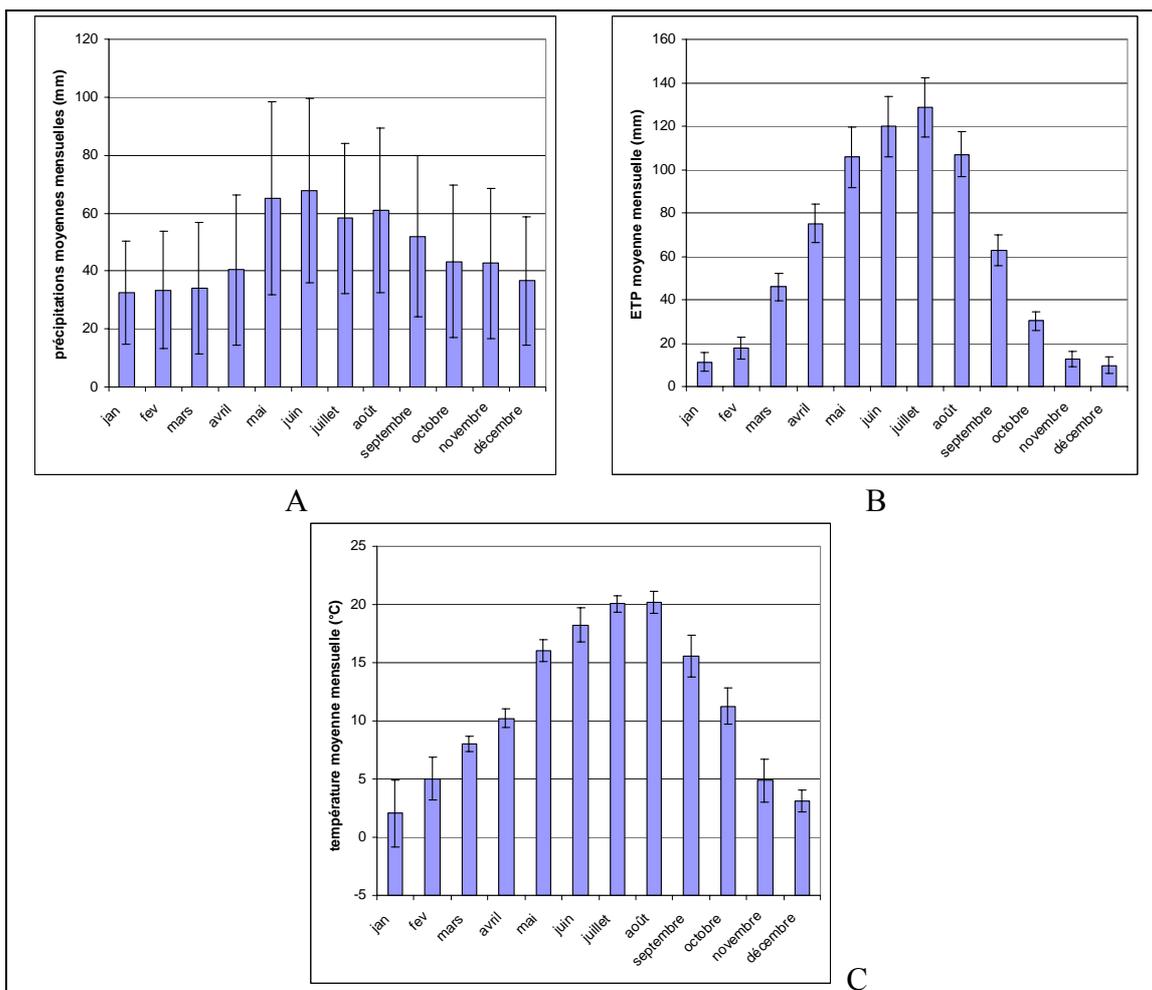


Illustration 8 :

A) Précipitations à Entzheim, corrigées pour être extrapolées à Obernai, B) Evapotranspiration à Entzheim et C) Températures à Entzheim (moyennes mensuelles sur la période d'étude janvier 1950 - décembre 2002).

D) Technique de carottage

Le principe de l'étude consiste à extraire des colonnes de sol intacte, et à les considérer comme un support de la mémoire d'événements passés (modification de pratiques agricoles, application d'un traceur, apport de tritium atmosphérique par les précipitations,...). Ceci permettra de quantifier les solutés en transit dans le sol et, à la manière d'un chromatogramme, de constater les vitesses de transfert de ces solutés. Pour cela, le prélèvement des sols doit satisfaire à plusieurs impératifs :

- préserver les sols prélevés de toute contamination extérieure, à la fois lors de l'opération de forage, puis pendant la manipulation des échantillons
- conserver l'humidité et tous les paramètres originels du sol lors du prélèvement
- ne pas remanier les échantillons de sol
- permettre le prélèvement d'une quantité de sol suffisante pour l'ensemble des analyses prévues.
- atteindre les profondeurs maximales théoriques de la zone non saturée du sol, soit 17 mètres (épaisseur maximale de la couverture lœssique, au niveau de la parcelle du lycée agricole) et assurer une récupération maximale du sol.

Il est donc apparu indispensable de réaliser le carottage en l'absence de tout fluide de forage (eau, boues de polymères, hydrocarbures,...) tout en utilisant une méthode de forage non destructive. Le matériel de carottage et le carottier doivent en outre être adaptés à un travail dans les conditions particulières des limons lœssiques, substrat meuble et souvent de faible cohésion. Afin de protéger les échantillons des conditions extérieures, il a également été décidé de sélectionner un matériel capable de prélever puis de restituer les carottes de sol chemisées sous gaine plastique transparente.

Après une revue complète des techniques de carottage existantes et des entreprises en mesure de les mettre en oeuvre, il a été choisi de réaliser les ouvrages en utilisant la technique de la tarière creuse (***Illustrations 9 et 10***). Une tête de forage à lame (***Illustration 11***), suivie d'une tarière creuse forcent la pénétration dans le sol du tube échantillonneur interne. Chaque passe du carottier permet une avancée théorique maximale du tube de 1,50 mètre et nécessite l'ajout de segments de tarière supplémentaire en surface. Le tube échantillonneur est récupéré à l'issue de chaque passe à l'aide d'un câble équipé d'une pince de repêchage.

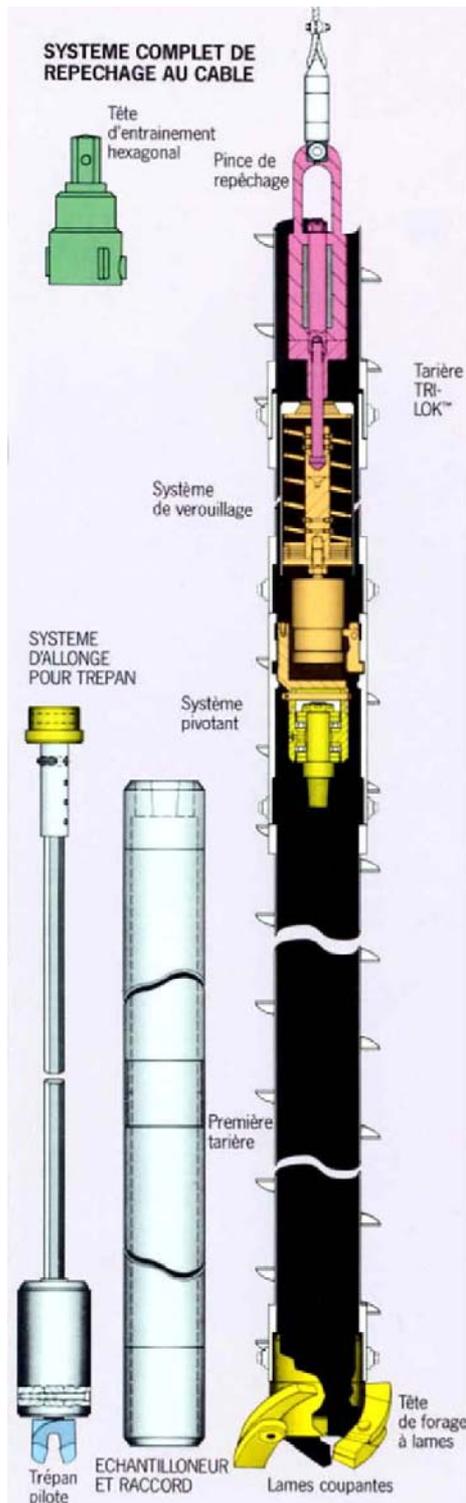


Illustration 9 : schéma de principe d'un carottier à tarière creuse (Ste COREIS)



Illustration 10 : vue d'ensemble du matériel de carottage (ici sur V95)



Illustration 11 : tête de forage à trois lames



Illustration 12 : gaine de prélèvement PVC engagée dans le tube échantillonneur

Le carottage par tarière creuse permet une foration à sec, sans fluide lubrifiant, garantissant ainsi un échantillonnage intact des horizons traversés. En outre, cette technique non destructive permet de limiter le remaniement et la déformation des échantillons de sol

prélevés, et conditionne les carottes directement sous gaine PVC transparente, assurant à la fois la bonne protection des échantillons et le contrôle visuel de l'état des carottes prélevées (**Illustration 12**). Par contre, comme il ne possède pas de clapet de fermeture en tête de carottier, cet outil n'est pas adapté au prélèvement d'horizons de granulométrie trop importante (sable, gravier) ou trop chargés en eau. De même, l'outil est adapté pour traverser et prélever des terrains meubles, mais en cas de présence d'obstacles durs (dalle rocheuse, gros galets,...) des méthodes destructives devront être employées pour le franchissement. Les éléments lithologiques disponibles au niveau des puits d'irrigation de VEREXAL et du lycée agricole, ainsi que les références connues sur les formations lœssiques du secteur d'étude indiquent que la couche de lœss est très homogène sur toute son épaisseur et ne présente pas de cailloux. Par contre, ponctuellement, des concrétions calcaires ("poupées" de lœss) de taille variables ont été décrites dans ces sols.

Comme les vitesses de migration attendues sont faibles, le référencement précis des cotes de profondeur des échantillons prélevés est une nécessité de l'étude. Pour cela, la cote de référence 0 de chaque ouvrage est située à la surface du sol et matérialisée par seuil. Les cotes de profondeur sont relevées à chaque début et fin de passe de carottier. La position verticale du mat de carottage est contrôlée régulièrement de façon à éviter toute dérive du carottier. Sur chaque modalité (V83, V95 et LA), trois forages sont réalisés, portant les indices de répétition A, B et C. Les trois répétitions sont réalisées en ligne et les ouvrages sont à chaque fois distants de 1,50 mètres du précédent.

L'entreprise COREIS, basée à Razès (87 Limoges) a été retenue pour la réalisation des travaux. Elle a mis en oeuvre une tarière creuse de section 216 mm (tarière : Ø extérieur 194 mm - Ø intérieur 108 mm), équipée d'un carottier à trois lames, assurant le prélèvement des échantillons sous gaine PVC transparent de section 86 mm. Le matériel de sondage est monté sur un engin à chenille (**Illustration 10**).

La mise en oeuvre du chantier requiert la présence d'un chef de chantier et de deux foreurs. A la fin des opérations de carottage, les ouvrages sont immédiatement rebouchés à l'aide d'argile gonflante (bentonite EXPANGEL), de façon à protéger la nappe sous jacente.

E) Procédure de gestion des échantillons de sol

D'après les références établies par Delphin et Schenk (1996) la vitesse de migration établie dans les horizons supérieurs de sols limoneux alsaciens se situe aux alentours de 22 cm

par an. En faisant l'hypothèse que l'ordre de grandeur de cette vitesse soit similaire sur toute la hauteur du profil étudié, cela signifie qu'un horizon de 22 cm d'épaisseur capitalise une année d'historique sur la parcelle. Un compromis entre la précision des résultats attendus et les coûts engendrés a été fixé en retenant une maille des échantillons de 10 cm : selon l'hypothèse évoquée ci-dessus, cela signifie que chaque échantillon de 10 cm d'épaisseur capitaliserait environ 6 mois d'historique sur la zone d'étude.

Les échantillons de sols prélevés par le carottier sont conditionnés sous forme de colonnes chemisées (PVC transparent) ce qui permet un contrôle visuel immédiat de leur intégrité (***Illustration 13***). Elles sont obturées de façon étanche dès leur remontée en surface, mesurées, annotées des profondeurs de départ et d'arrivée puis stockées en chambre froide (2°C) jusqu'à leur conditionnement.



Illustration 13 : vue générale d'une colonne de sol chemisée, obturée et référencée

Le conditionnement des échantillons a lieu dans la mesure du possible dès l'extraction des échantillons. Les colonnes de sols sont mesurées puis débitées en tronçons cylindriques de 10 cm de hauteur à la scie circulaire (***Illustration 14***). Le sol contenu dans chaque cylindre est ensuite extrait de la gaine PVC (***Illustration 15***), pesé puis soigneusement homogénéisé (***Illustration 16***). Le volume de l'échantillon étant connu, cette étape permet de mesurer la densité apparente du sol prélevé. Chaque échantillon est répertorié et reçoit ensuite un numéro unique indiquant la modalité d'origine, le forage et la cote de profondeur. Le temps à l'air libre de chaque échantillon est réduit au maximum de façon à éviter tout dessèchement du sol.

L'échantillon est ensuite immédiatement réparti selon le schéma suivant, par ordre de priorité (***Illustration 17***) :

- 80 g de sol frais sont conditionnés en boîte pilulier plastique étanche,

immédiatement stockés à -20°C , et destinés à l'analyse des teneurs en nitrates, en azote ammoniacal et en eau massique (laboratoire SADEF, 68 700 Aspach le bas).

- 120 g de sol frais sont prélevés et conditionnés en sachet plastique, puis stockés à 2°C , en vue de la mesure de la granulométrie 5 fractions et du pH, et le cas échéant des teneurs en bromure) (laboratoire SADEF, 68 700 Aspach le bas)

- 300 g de sol frais sont conditionnés en barquette aluminium pour l'extraction et le dosage ultérieur des résidus phytosanitaires (atrazine, dé-éthylatrazine et lindane), ainsi que du carbone et de l'azote organique (CNRS et INPL-ENSAIA/INRA, Nancy).

- la masse de sol restant (médianes comprises entre 520 et 650 g de sol frais, selon la modalité considérée) est pesée puis conditionnée en bocaux de verre étanche (bocaux à conserve, Le Parfait 0,75 l) puis conservée à 2°C pour le dosage du tritium. Les bocaux sont stockés bas-en-haut de façon à éviter la formation de condensation sur le couvercle des bocaux et le risque de perte d'eau interstitielle (BRGM, Orléans).



Illustration 14 :
Section d'une colonne de sol



Illustration 16 :
Homogénéisation des échantillons de sol



Illustration 15 :
Echantillon unitaire de sol (h=10 cm)



Illustration 17 :
Conditionnements des échantillons de sol

Chaque échantillon est numéroté et étiqueté (encre indélébile sur étiquette autocollante supportant le stockage au congélateur) puis enregistré sur une fiche de suivi logistique (numéro d'échantillon, masse de sol, date et heure du prélèvement, remarques complémentaires). L'ensemble des échantillons, conditionnés selon les exigences relatives aux paramètres analysés, sont stockés sur le site de VEREXAL (en congélateur à -20°C ou en chambre froide à +2°C) jusqu'à la fin des opérations de carottage et de manutention des échantillons. Un suivi régulier des températures de stockage permet de s'assurer de la continuité de la chaîne du froid. Après 4 jours de stockage sur site, les échantillons sont livrés par véhicule frigorifique thermo-régulé aux laboratoires chargés des analyses et immédiatement stockés aux températures appropriées.

F) Moyens analytiques

Les échantillons sont transmis aux laboratoires chargés des analyses, accompagnés de leur fiche de suivi logistique.

Le dosage du tritium présent dans l'eau interstitielle des échantillons de sol a été mis au point et réalisé par le laboratoire du BRGM d'Orléans, selon le protocole et les seuils de détection décrits par Baran *et al.* (2005). La période de réalisation de ces dosages a été comprise entre janvier 2003 et mai 2004.

Les extractions et dosages des résidus phytosanitaires (atrazine, DEA et lindane) et du carbone et de l'azote organique dans les échantillons de sol ont été mis au point et réalisés respectivement par le laboratoire "sols et environnement" de l'INPL-ENSAIA/INRA de Nancy et le CRPG/CNRS de Nancy, conformément aux protocoles et aux seuils de détection et de quantification décrits par Portal *et al.* (2004). La période de réalisation de ces dosages s'est déroulée de juin 2003 à juin 2004.

Le dosage des nitrates de l'azote ammoniacal, des bromures ainsi que la détermination de la granulométrie et du pH des échantillons ont été réalisés par le laboratoire SADEF, basé à 68 700 Aspach le bas, entre octobre 2002 et mars 2003.

Etant donné le caractère très spécifique de l'étude lié à la faible quantité de matière et à la recherche des plus basses limites de quantification, les modes opératoires normalisés ont été adaptés tout en respectant leur principe :

- préparation de l'échantillon pour analyse sur terre fine sèche (NF ISO 11464)

- mesure de l'humidité massique (séchage à 105°C) (NF ISO 11465) nécessaire pour le calcul de la densité apparente sachant qu'une pesée en frais de la totalité de l'échantillon correspondant à un volume prédéfini est réalisée sur site

- extraction de l'azote minéral (par une solution de KCl molaire) et de mesure de l'azote nitrique (colorimétrie, méthode de Griss) et de l'azote ammoniacal (colorimétrie, méthode de Berthelot). La limite de quantification est de 0,1 mg/kg de N-NO₃ et l'incertitude du résultat exprimé varie entre +/- 10 % relatif de la valeur d'analyse

- détermination granulométrique en 5 fractions : argile, limon fin, limon grossier, sable fin, sable grossier (NF ISO 11277). Incertitude relative +/- 0,1 % sur la valeur absolue

- mesure du pH eau (NF ISO 10390). Incertitude +/- 0,1 unité pH

- dosage des bromures après extraction avec une solution de CaCl₂ 0,1 mM, par chromatographie ionique par détection conductimétrique (données BRGM). Seuil de détection à 0,1 mg/kg et incertitude relative de 2,5 % (valeur > 0,200 mg/kg) à 5 % (valeur < 0,200 mg/kg).

G) Stratégie analytique

L'étude concerne trois modalités (V83, V95 et LA) répétées chacune à trois reprises, correspondant au total à sondages carottés jusqu'au toit de l'aquifère (respectivement environ 7,30 et 17 mètres).

Pour les modalités V83 et V95, situées au niveau du verger VEREXAL, le nombre théorique d'échantillons à prélever est de 438 échantillons (à raison de 10 échantillons par mètre linéaire carotté X 7,3 mètres de profondeur X 3 répétitions X 2 modalités)

Pour la modalité LA, située sur la parcelle n°2 de l'exploitation du lycée agricole, il est prévu un nombre théorique de 510 échantillons (à raison de 10 échantillons par mètre linéaire carotté X 17 m de profondeur X 3 répétitions)

Le nombre théorique total atteindra donc **948 échantillons** unitaires de sol. Face à un nombre d'échantillons aussi important, et afin de rationaliser et d'affiner l'approche expérimentale, la stratégie analytique suivante est retenue. Le paramètre prioritaire ayant motivé cette étude étant le paramètre azote, les teneurs en nitrates et en azote ammoniacal de l'intégralité des échantillons seront analysées.

En ce qui concerne les résidus phytosanitaires, l'azote et le carbone organique, lors d'une première phase, l'intégralité des échantillons d'une seule répétition (répétition A) par

modalité est analysée. En fonction des résultats, dans une seconde phase, l'analyse intégrale des échantillons d'une seconde répétition (répétition B) par modalité est réalisée, complétée par quelques analyses ponctuelles ciblées d'échantillons issus de la troisième répétition (répétition C) de chaque modalité destinée à procéder à des vérifications.

Dans le cas des dosages de l'activité tritium, l'analyse d'une centaine d'échantillons est prévue dans le cadre de l'étude. Devant la multitude d'échantillons recueillis disponibles pour l'analyse, la stratégie suivante a été adoptée pour sélectionner les échantillons à doser et leur ordre de passage. Durant la première phase du projet, la modalité LA, située sur la parcelle du lycée agricole présentant le profil le plus long a été retenue, de manière à augmenter les chances de voir le pic de tritium dans sa totalité. Les premières mesures ont été faites sur des échantillons très espacés répartis sur l'ensemble du profil de la répétition LA-A. Au vu des résultats, des échantillons complémentaires ont été choisis de manière à bien décrire le pic tritium qui semblait se dessiner. De manière à tester l'homogénéité de l'infiltration au sein d'une même parcelle, les deux autres répétitions (LA-B et LA-C) ont été étudiées en se focalisant sur les profondeurs auxquelles le pic d'activité tritium est attendu au vu des résultats du premier carottage. Afin de tester l'homogénéité de l'infiltration dans le secteur en comparant les différentes parcelles, quelques analyses ont été effectuées sur une des répétitions des modalités V83 et V95. Dans une deuxième phase du projet, quelques échantillons ont été retenus pour compléter la deuxième et la troisième répétition du profil obtenu dans la modalité LA (LA-B et LA-C). Ensuite l'effort analytique a porté sur les deux autres modalités V83 et V95 afin d'essayer de détecter un éventuel pic tritium au droit de ces deux parcelles. Deux répétitions par modalités (V83-A, V83-B, V95-A et V95-B) ont été considérées et très peu de dosages ont été effectués sur les échantillons de la troisième répétition (V83-C ou V95-C) considérant que la variabilité intra-parcellaire était faible au vu des résultats de la modalité LA.

III.- RESULTATS

A) Localisation des différentes modalités de l'étude

Les modalités V83, V95 et LA ont été reportées sur un support cartographique (*Illustration 18*) et leurs coordonnées Lambert (Lambert II étendues) ont été relevées :

V83 : $x = 982\ 150$; $y = 2\ 398\ 550$

V95 : $x = 982\ 370$; $y = 2\ 398\ 550$

LA : $x = 983\ 450$; $y = 2\ 399\ 220$

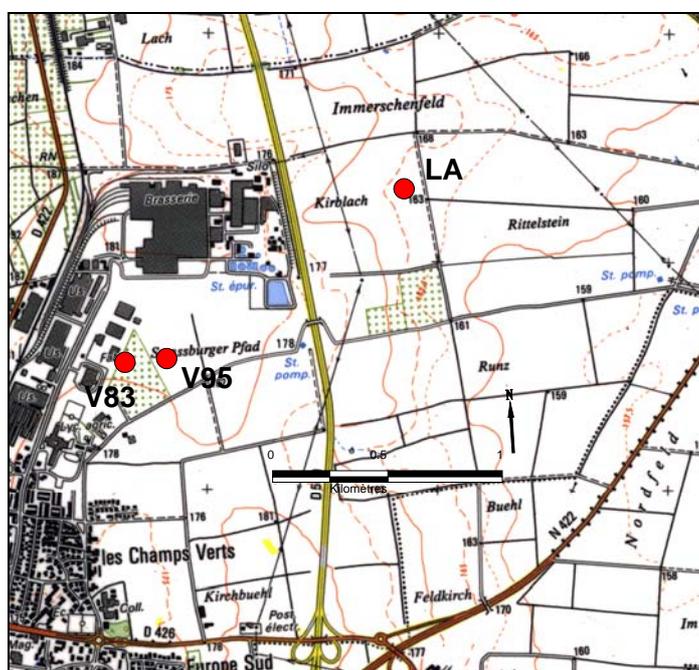


Illustration 18 : localisation des modalités V83, V95 et LA

B) Collecte des échantillons de sol

1) Les carottages

Le chantier de carottage s'est tenu du 26/08/2002 au 05/09/2002 à raison d'une séquence de 5, puis de 4 jours de sondage, à un poste par jour (*Illustration 19*). Les conditions météorologiques ont été sèches durant toute la durée des travaux, permettant aux outils de carottage un travail dans des conditions favorables ainsi que l'absence de risque de contamination des échantillons de sol par de l'eau de pluie.

Sondages	V83-A	V83-B	V83-C	V95-A	V95-B	V95-C	LA-A	LA-B	LA-C
Date des travaux	26/08 - 27/08	27/08	27/08 - 28/08	28/08	28/08 - 29/08	29/08	30/08 - 03/09	03/09 - 04/08	04/09 - 05/09

Illustration 19 : Dates de réalisation des travaux de sondage

Plusieurs difficultés sont apparues lors des travaux. Il s'est avéré que la texture limono-argileuse des lœss à carotter ne permet pas de réaliser des passes complètes de carottier (1,50 mètre) avec une récupération de l'échantillon suffisante. Des phénomènes de "fuites de l'échantillon" ont été observés : la pénétration du tube échantillonneur, forcée par la tarière creuse, permet un prélèvement pouvant aller jusqu'à 80 cm de hauteur de sol. Au delà, la force nécessaire pour que l'échantillon de sol pénètre dans le tube échantillonneur est supérieure à la force de fuite du sol, qui est expulsé sur les côtés de la tête de forage sans pénétrer et qui se tasse le long de la paroi de l'ouvrage. Afin de garantir une récupération des échantillons de sol supérieure ou égale à 75 %, les conditions de sondage ont été revues. La longueur des passes a été limitée à 80 cm au maximum, et adaptée selon le taux de récupération mesuré après chaque passe, jusqu'à des passes de 40 cm.

Modalité	Profondeur forée (m)	Nombre de passes	Long. moy. / passe (m)	% moyen de récupération
VEREXAL 1983				
V83-A	9.2	11	0.84	83.6
V83-B	8.3	11	0.75	82.4
V83-C	8.3	11	0.75	83.9
VEREXAL 1995				
V95-A	7.6	10	0.76	77.8
V95-B	6.8	9	0.76	72.8
V95-C	6.8	9	0.76	80.1
Lycée Agricole				
LA-A	13.9	29	0.48	77.9
LA-B	13.2	31	0.43	91.7
LA-C	13.3	32	0.42	89.2
TOTAL	87.4 m			83.1 %

Illustration 20 : Détail des profondeurs carottées et % de récupération des échantillons de sol par modalité

La longueur totale carottée atteint 87,4 mètres, réalisée en 153 passes de carottier, contre 94,8 mètres prévus initialement en fonction des niveaux piézométriques attendus. Le rendement global de récupération des échantillons de 83,1 % doit être considéré comme un résultat très satisfaisant au regard des formations lœssiques particulièrement meubles qui ont été carottées (*Illustration 20*).

* V83 :

Les profondeurs carottées au niveau de V83 sont comprises entre 8,3 et 9,2 mètres, donc supérieures aux 7,3 mètres attendus. Le carottage a été arrêté lors de son arrivée dans des horizons de sables grossiers, où les transferts latéraux de solutés ne sont vraisemblablement plus négligeables. La longueur moyenne des passes de carottier, de 75 à 84 cm, a permis de récupérer globalement entre 82,4 et 83,9 % de la colonne de sol. Les taux de récupération par passe les plus faibles (entre 55 et 62 %) concernent les échantillons de surface ou ceux prélevés dans les horizons très sableux les plus profonds.

** V95

Les profondeurs carottées au niveau de V95 sont comprises entre 6,8 et 7,6 mètres, à peu près conformes aux 7,3 mètres attendus. Le profil de V95 semble plus hétérogène que celui de V83, notamment du fait de la présence de lentilles argileuses à plusieurs niveaux. Le carottage a été arrêté peu après le franchissement d'horizons de sables grossiers rouges (entre 6,2 et 7,1 mètres de profondeur), où les transferts latéraux de solutés ne sont sans doute plus négligeables. La longueur moyenne des passes de carottier, 76 cm, a permis de récupérer globalement entre 72,8 et 80,1 % de la colonne de sol. Les taux de récupération par passe les plus faibles (entre 47 et 54 %) concernent les échantillons de surface ou les échantillons prélevés dans les horizons très sableux les plus profonds.

*** LA

Les profondeurs carottées au niveau de LA sont comprises entre 13,2 et 13,9 mètres, supérieures aux 11 mètres prévus, mais inférieures à 17 mètres, profondeur du niveau piézométrique captif. Le carottage a été arrêté lors de son arrivée dans des horizons plus argileux, chargés en eau, où les transferts latéraux ou par remontée de nappe ne sont sans doute plus négligeables. Le profil présente une remarquable homogénéité. Quelques

concrétions calcaires ("poupée de lœss") de 4 à 6 cm de diamètre ont, très occasionnellement, légèrement perturbé l'avancée du carottier.

La longueur moyenne des passes de carottier a parfois été réduite jusqu'à 42 cm pour pouvoir récupérer correctement le matériau. Globalement le taux de récupération atteint entre 77,9 et 91,7 % de la colonne de sol. Les taux de récupération par passe les plus faibles (entre 52 et 62 %) concernent les échantillons perturbés par la présence de concrétions calcaires.

2) Les échantillons recueillis

Les colonnes de sol recueillies à l'issue de chaque passe du carottier sont sectionnées pour aboutir à des échantillons cylindriques de 10 cm de hauteur. Au fur et à mesure de la collecte et de la préparation des échantillons, plusieurs éléments ont dû être adaptés à partir du protocole d'origine. Si la longueur forée par le carottier a toujours été un multiple de 10 cm, la longueur des carottes de sol, variable en fonction du taux de récupération des échantillons, est rarement un multiple de 10 cm. Statistiquement, il s'est donc avéré, que pour le dernier échantillon de chaque passe, la hauteur de la colonne de sol résiduelle ne soit pas égale à 10 cm. C'est pour cela, que dans le cas d'échantillons de hauteur trop faible, la quantité de matériaux disponible n'a permis de réaliser que les analyses les plus prioritaires (azote, granulométrie,...).

Le taux de récupération et les éventuels tassements des échantillons ont été pris en compte pour le référencement des profondeurs d'origine des échantillons. Si la récupération de la colonne de sol est de 100 % les cotes de profondeur réelles sont adoptées. Par contre, pour des taux de récupération inférieurs, et dans l'impossibilité technique de préciser quelle portion de la colonne est manquante ou même si l'échantillon a été tassé, il a été décidé d'extrapoler de façon linéaire les cotes de profondeur des échantillons des colonnes récupérées avec celles de la portion carottée. Ainsi, avec une récupération de 50 % (cas le plus défavorable observé), un échantillon de 10 cm de hauteur, sera considéré comme représentant en réalité 20 cm et sera affecté des cotes de profondeur qu'aurait un échantillon de 20 cm.

	Nitrates NH4 et MS	Résidus phytosanitaires	Granulométrie et pH	Dosage du tritium
VEREXAL 1983				
V83-A	77	76	74	73
V83-B	68	68	67	67
V83-C	68	68	68	68
VEREXAL 1995				
V95-A	52	52	52	52
V95-B	45	45	45	45
V95-C	47	47	47	47
Lycée Agricole				
LA-A	104	104	103	101
LA-B	117	117	115	114
LA-C	103	103	103	103
Nombre total	681	680	674	670

Illustration 21 : Nombre d'échantillons conditionnés en fonction des modalités expérimentales et des paramètres analytiques

Le nombre total d'échantillons unitaires collectés s'élève à 681, contre 948 prévus dans le protocole théorique (**Illustration 21**). Ces échantillons unitaires ont généré un total de 2705 sous-échantillons conditionnés individuellement en fonction des paramètres analytiques mesurés ultérieurement (**Illustration 22**).



Illustration 22 : Stockage des sous échantillons conditionnés respectivement en piluliers en plastique (-20°C), en bocaux de verre (+2°C) et en barquettes en aluminium (+2°C)

C) Résultats des mesures de la densité apparente des échantillons de sol

Les mesures de la densité apparente des échantillons de sol ont été réalisées par pesée des échantillons de sol frais non remanié correspondant à des volumes connus (\emptyset des carottes constant : 86 mm - hauteur des cylindres mesurée pour chaque échantillon), juste avant leur conditionnement. L'examen détaillé de ces résultats a montré une très forte variabilité qui ne semble pas liée aux changements texturaux ou à la profondeur. Les échantillons prélevés ont vraisemblablement subi des déformations et compactations différentes selon leur position finale dans la passe de carottier.

L'illustration 23 montre les microdéformations observées sur un échantillon, tandis que **l'illustration 24** donne un exemple des résultats obtenus dans le cas du carottage V83-A (les autres résultats ne sont pas montrés). Les échantillons supérieurs de chaque colonne de sol extraite sont décompactés, tandis que les échantillons inférieurs ont été compactés, ce qui donne à la courbe cette apparence en "dents de scie". Les données collectées seront donc difficiles à prendre en compte pour les besoins de la suite de l'étude, notamment pour les travaux de modélisation prévus dans le cadre de l'étude. C'est pourquoi Baran *et al.* (2005) proposent de retenir une densité apparente moyenne de 1,57 (de 1,46 à 1,68) établie sur des bases bibliographiques dans des sols de loess.



Illustration 23 : Coupe détaillée d'une colonne de sol de 5 cm de hauteur prélevée par tarière creuse lors d'un forage d'essai sur V95 et montrant la déformation des horizons

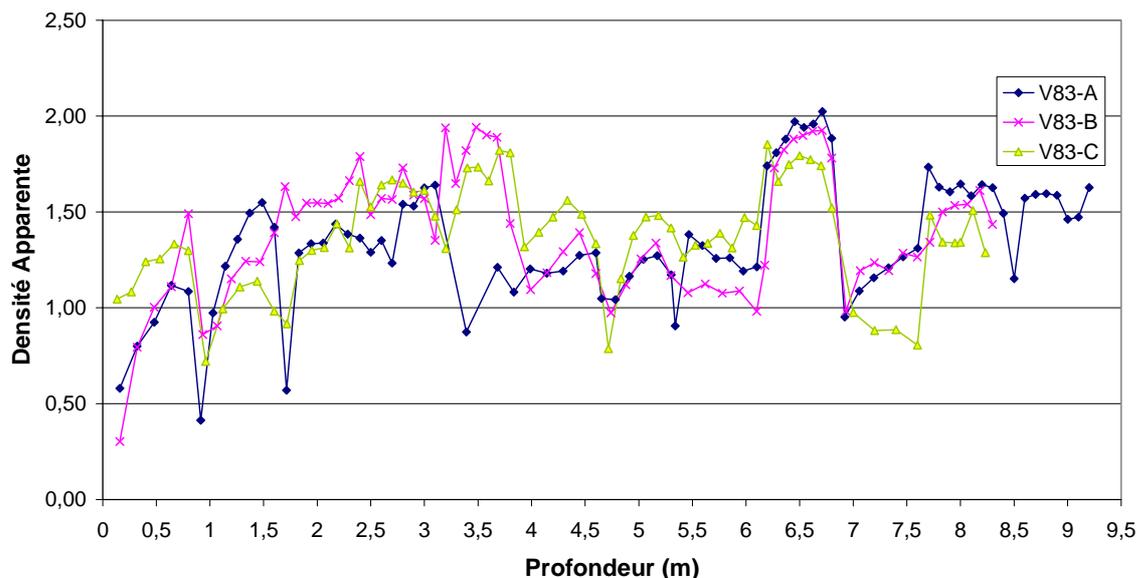


Illustration 24 : Densité apparente mesurée pour chaque échantillon de sol collecté lors des carottage V83-A, V83-B et V83-C

D) Résultats des analyses granulométriques

Les mesures de granulométrie ont été réalisées par le laboratoire SADEF (68700 Aspach le bas) sur toute la hauteur des profils A et B de chaque modalité. Comme les résultats sont relativement proches entre chaque forage A et B, le choix a été fait de pas procéder aux mesures complémentaires sur le forage C de chaque modalité.

Il apparaît que les colonnes des modalités V83 et V95 sont moins homogènes individuellement que celles provenant de la modalité LA.

1) Modalité V83

L'illustration 25 montre que la répartition des textures (présentée ici selon le diagramme de texture GEPPA) est très semblable entre V83-A et V83-B. Les échantillons de sol ont essentiellement des textures de limon argileux (La) ou de limon sablo argileux (Lsa). A partir de l'étude détaillée des profils V83-A et V83-B (Illustrations 26 et 27) on peut montrer que jusqu'à une profondeur de 3,50 mètres, les horizons traversés sont de texture limono argileuse (La). Les horizons traversés par la suite sont plus hétérogènes et plus sableux (de sable S à limon sablo argileux Las). Une lentille sableuse (S) est très nettement visible aux alentours de 4,30 mètres sur le profil V83-B, alors qu'elle est plus atténuée sur V83-A (sable argilo limoneux, Sal). De 5 mètres à 7,30 mètres, les profils sont à nouveau plus homogènes,

passant de limon (L) à limono sablo argileux (Lsa). Les carottages ont été arrêtés dans des horizons sableux (S) situés à 9,20 mètres pour V83-A et à 8 mètres pour V83-B.

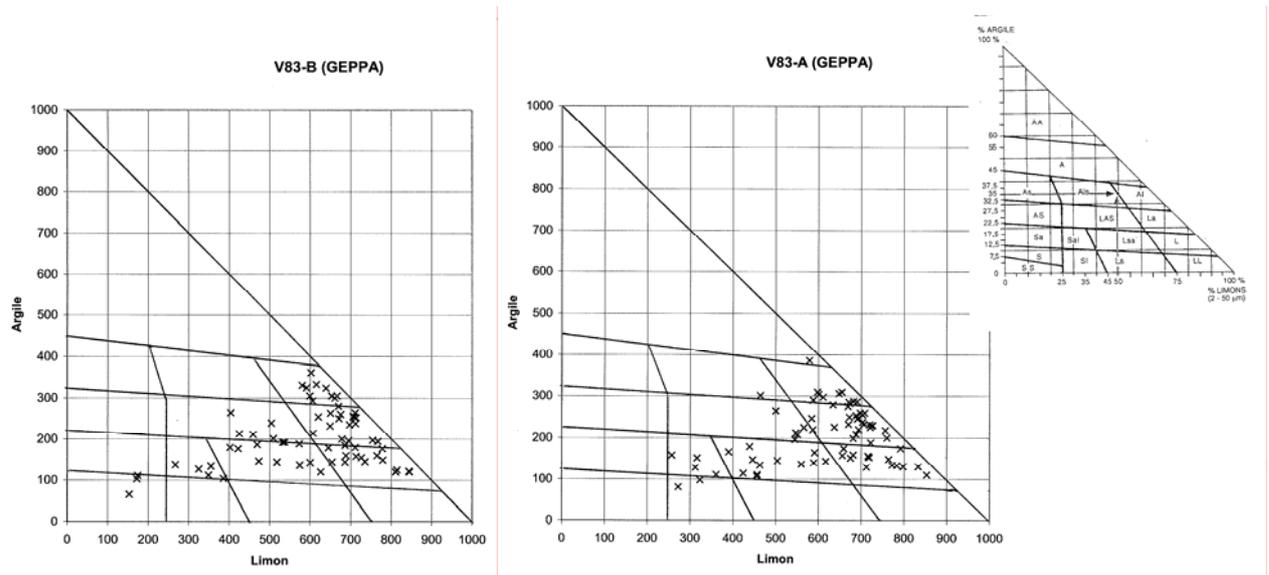


Illustration 25 : Répartition de l'ensemble des échantillons de sol de V83 A et B selon le triangle de texture GEPPA (en haut à droite)

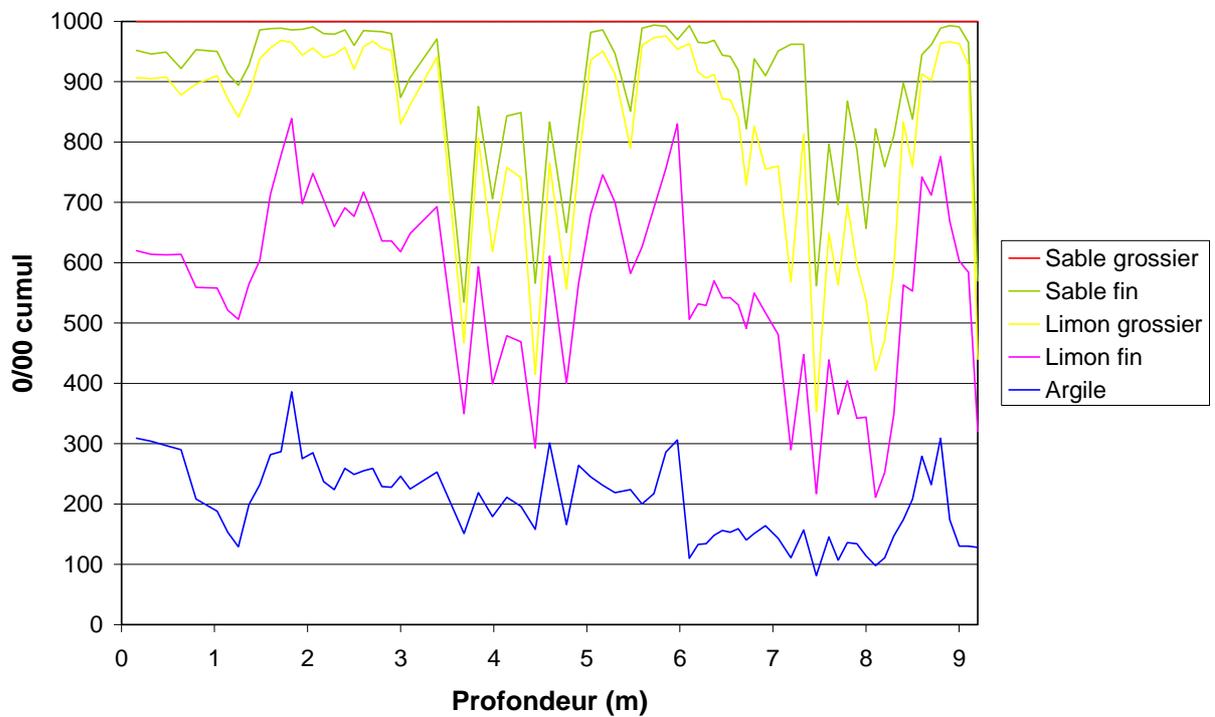


Illustration 26 : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage V83-A (cumul des 5 fractions en 0/00 en fonction de la profondeur des échantillons)

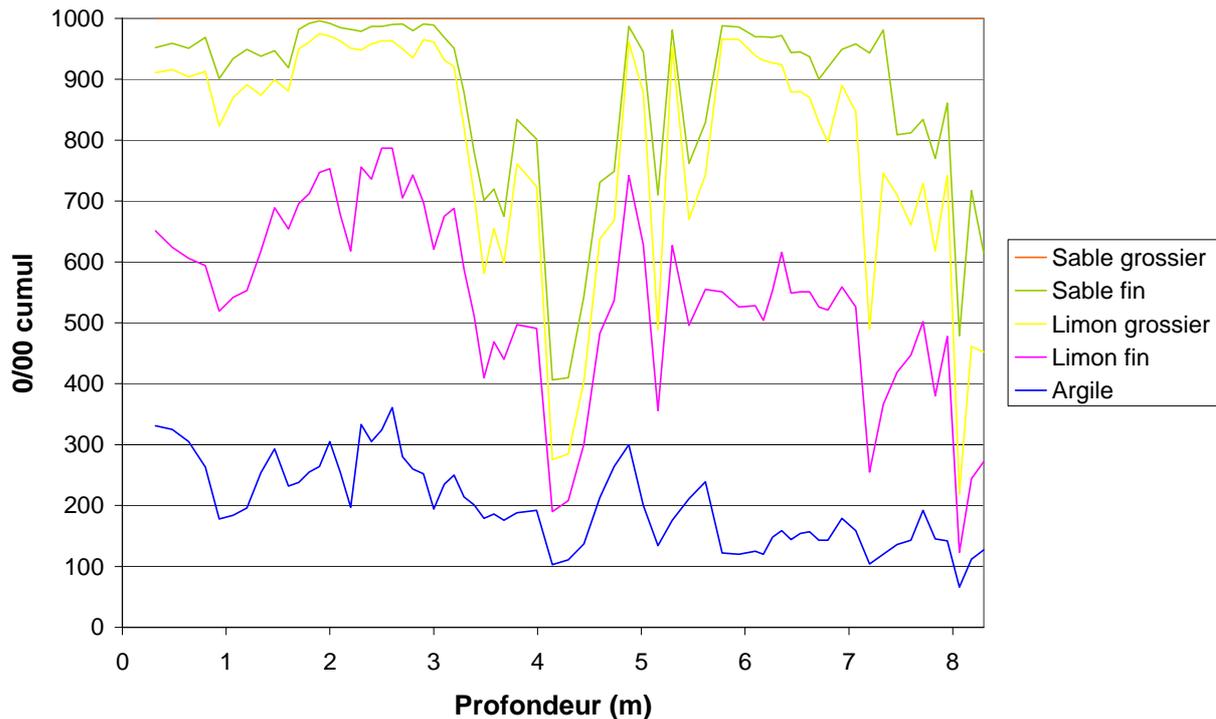


Illustration 27 : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage V83-B (cumul des 5 fractions en $\frac{0}{00}$ en fonction de la profondeur des échantillons)

2) Modalité V95

L'illustration 28 montre que la répartition des textures (présentée ici selon le diagramme de texture GEPPA) présente la même allure entre V95-A et V95-B. Les échantillons de sol sont essentiellement classés dans les textures limon argileux (La) et d'argile limoneuse (Al). A partir de l'étude détaillée des profils V95-A et V95-B (**Illustrations 29 et 30**) on constate que jusqu'à une profondeur voisine de 5 mètres, les horizons traversés sont relativement homogènes, de texture limono argileuse (La). Une lentille sableuse (S) est décrite à 2 mètres de profondeur dans la répétition V95-A, mais presque absente dans V95-B. Au delà de 5,20 mètres, les horizons traversés sont plus hétérogènes et présentent une poche sableuse (S) à 5,50 mètres. Sur V95-A, plus profond, après 50 cm limono argileux entre 5,70 et 6 mètres on observe une nouvelle poche sableuse (S). Les carottages ont été arrêtés après le franchissement d'un ou deux horizons sableux (S), à 7,60 mètres pour V95-A et à 6,80 mètres pour V95-B.

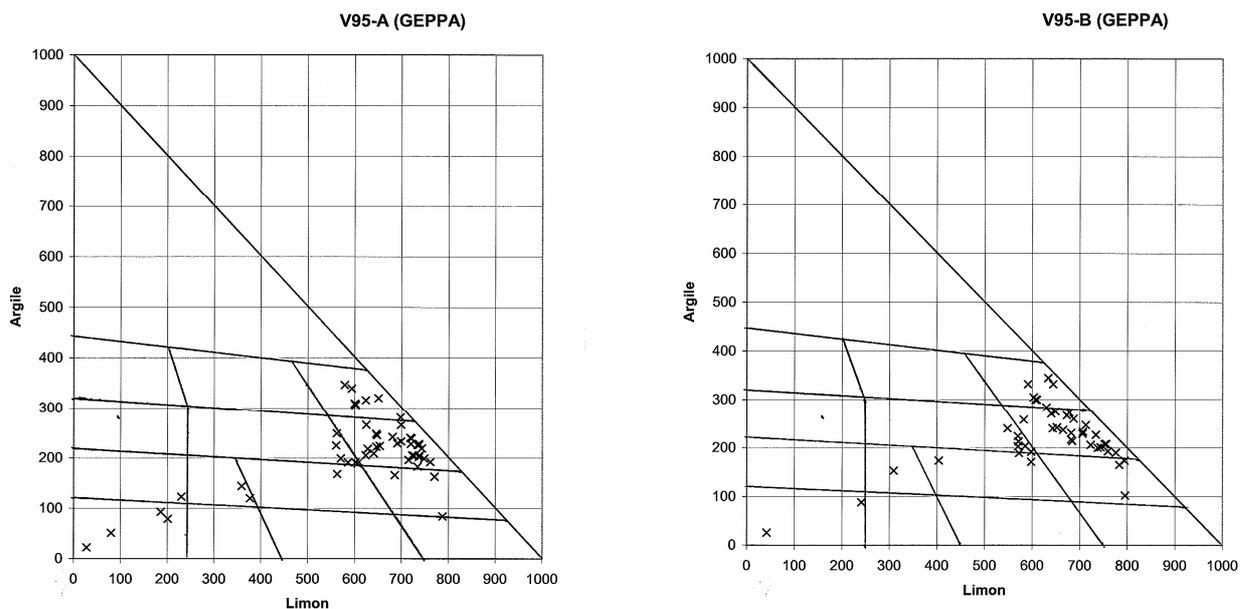


Illustration 28 : Répartition de l'ensemble des échantillons de sol de V95 A et B selon le triangle de texture GEPPA (*voir illustration 25*)

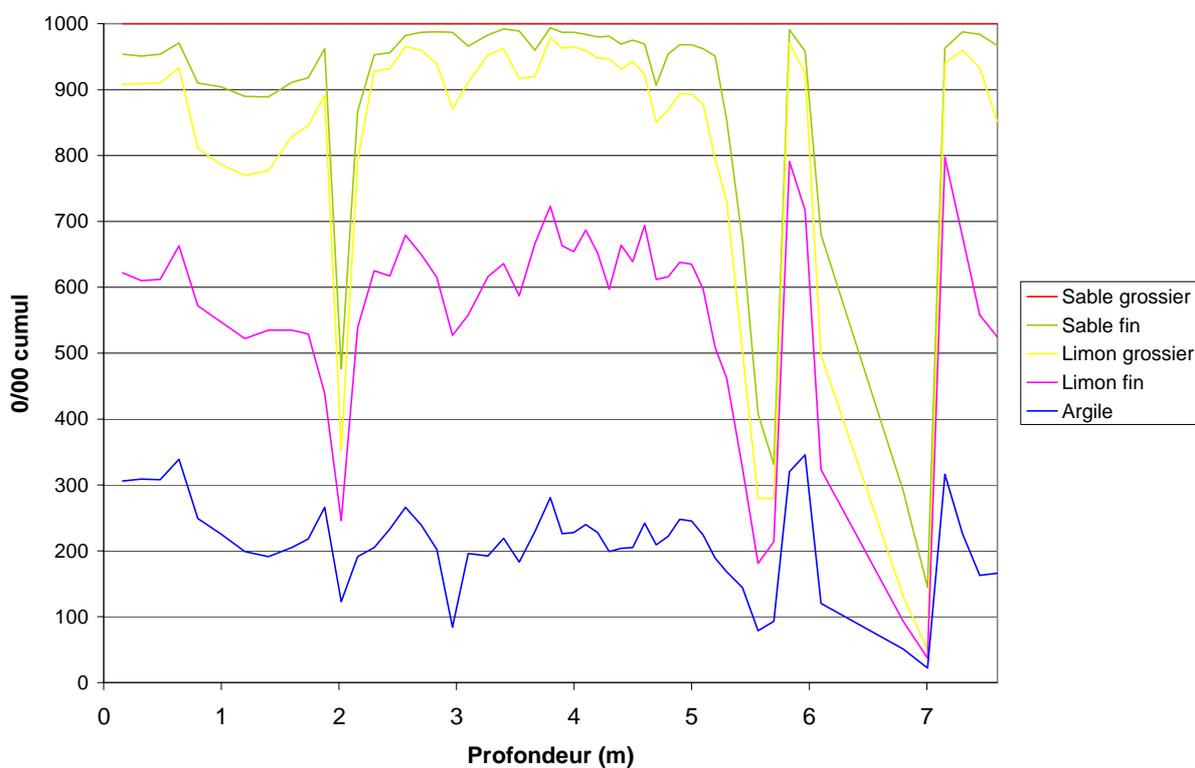


Illustration 29 : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage V95-A (cumul des 5 fractions en $\frac{0}{100}$ en fonction de la profondeur des échantillons)

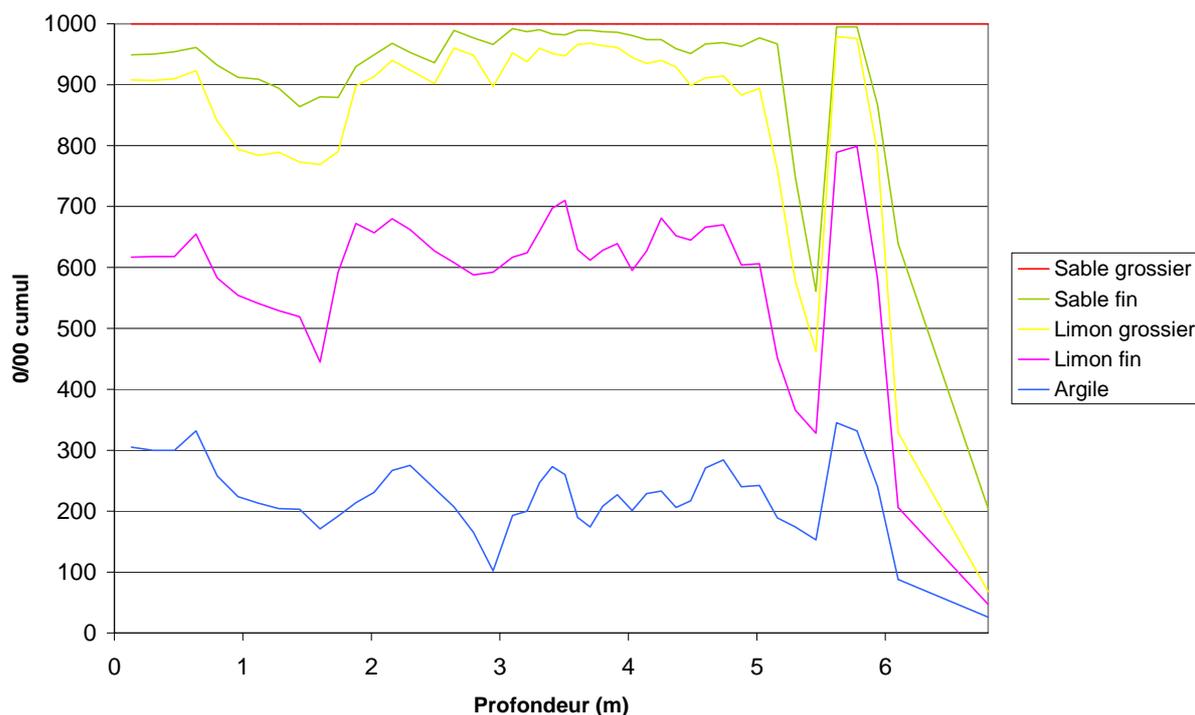


Illustration 30 : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage V95-B (cumul des 5 fractions en ‰ en fonction de la profondeur des échantillons)

3) Modalité LA

L'illustration 31 montre que la répartition des textures (présentée ici selon le diagramme de texture GEPPA) est tout à fait similaire entre LA-A et LA-B. Les échantillons de sol sont presque tous classés dans les textures argilo limoneuses (Al), limono argileuses (La) et limoneuses (L). A partir de l'étude détaillée des profils LA-A et LA-B (**Illustrations 32 et 33**) on constate que jusqu'à une profondeur voisine de 10 mètres, les horizons traversés sont très homogènes, de texture limono argileuse (La) à limoneuse (L), et quasiment identiques entre les deux répétitions. Les horizons traversés deviennent ensuite progressivement plus sableux, limon argilo sableux (LAS) à limon sablo argileux (lsa) entre 10 et 13 mètres, en présentant quelques discontinuités ponctuelles plus sableuses, notamment entre 11 et 12 mètres. Les carottages ont été arrêtés lorsque les échantillons présentaient une hausse importante des teneurs en eaux, indiquant la proximité de la zone de battement, à 13,90 mètres pour LA-A et à 13,20 mètres pour LA-B.

Il est à noter que de nombreuses concrétions calcaires ("poupées de lœss") de 4 à 6 cm de diamètre ont été repérées vers 7 mètres de profondeur, puis vers 12 mètres.

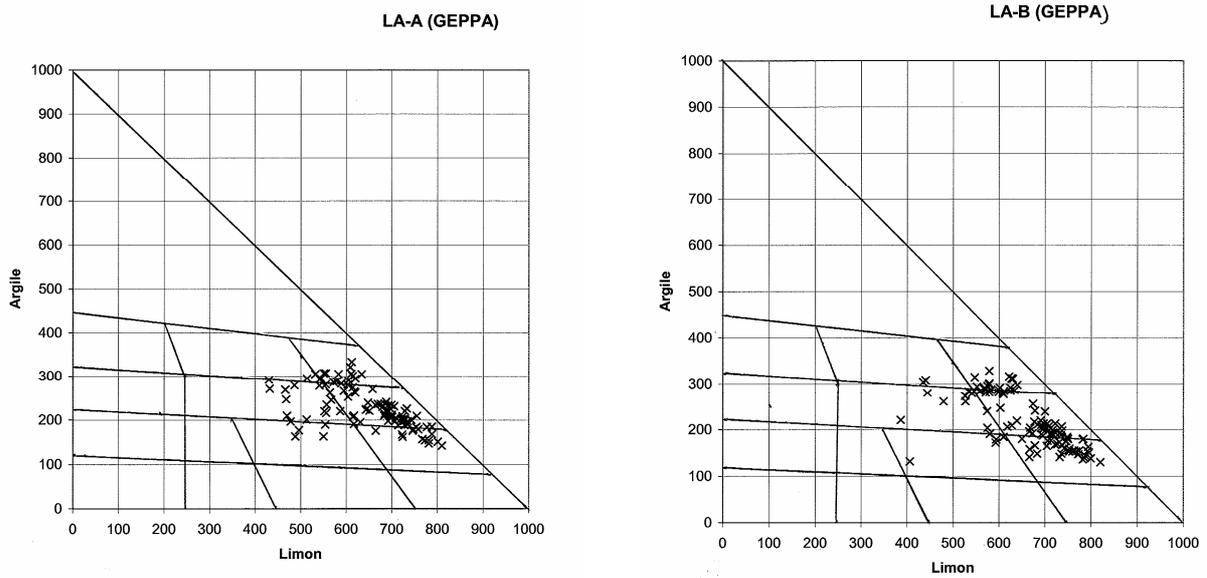


Illustration 31 : Répartition de l'ensemble des échantillons de sol de LA-A et LA-B selon le triangle de texture GEPPA (*voir illustration 25*)

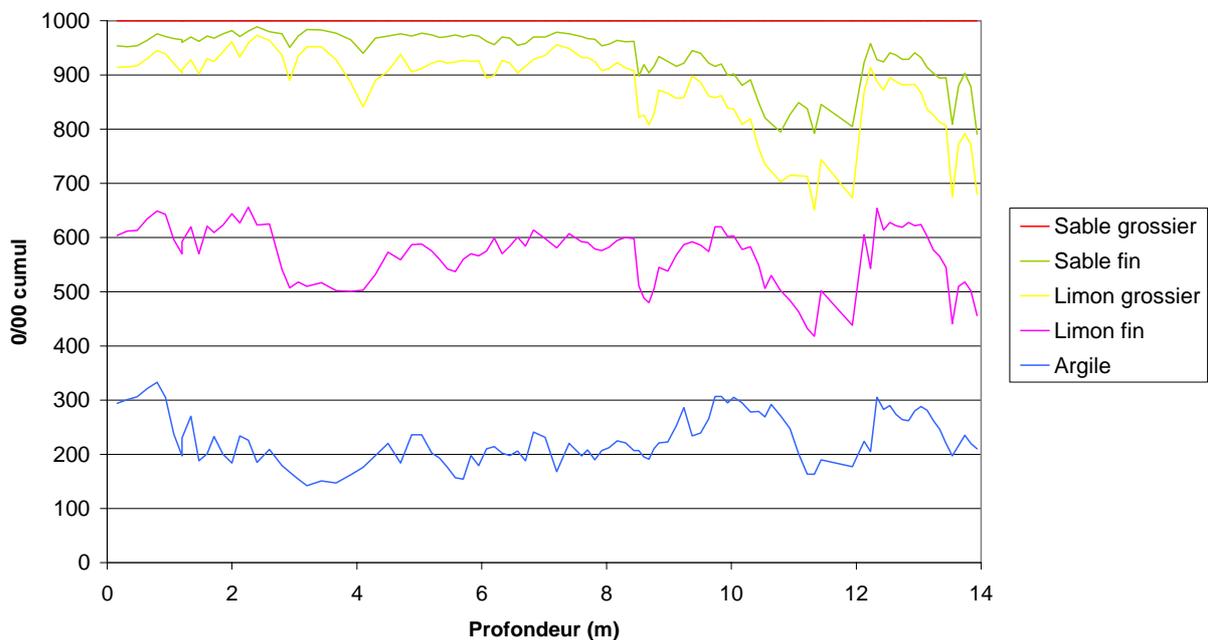


Illustration 32 : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage LA-A (cumul des 5 fractions en $\frac{0}{00}$ en fonction de la profondeur des échantillons)

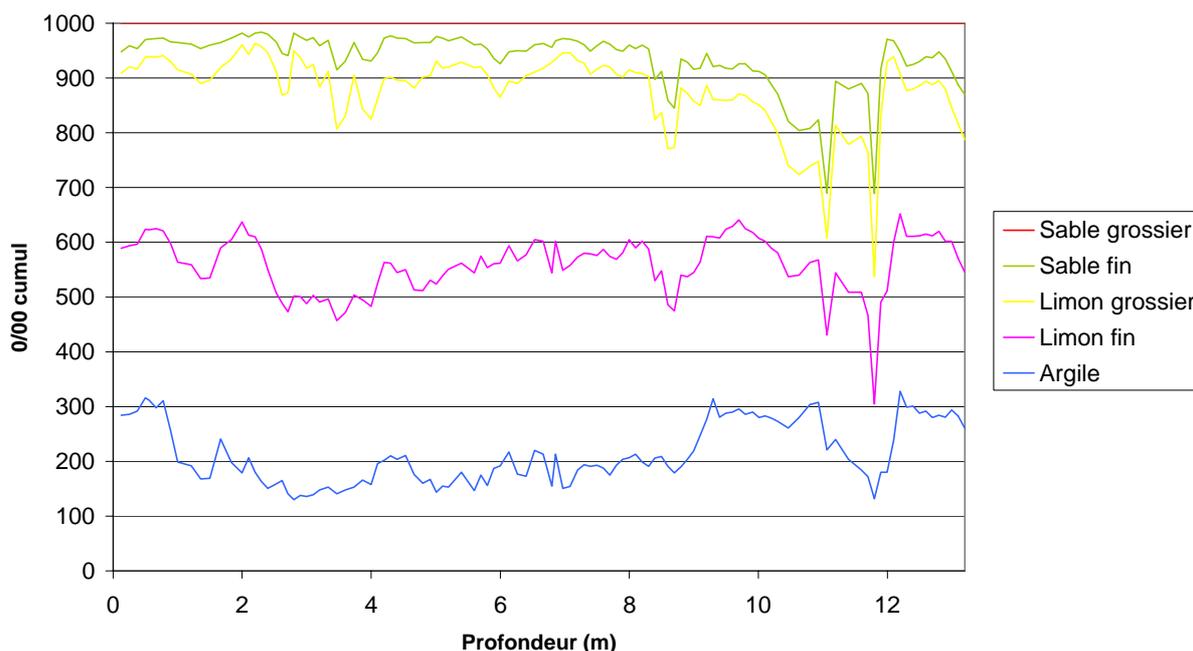


Illustration 33 : Granulométrie de la colonne de sol extraite du carottage LA-B (cumul des 5 fractions en ‰ en fonction de la profondeur des échantillons)

E) Résultats des analyses du pH eau

Les lœss du secteur d'Obernai sont des limons carbonatés, ils présentent donc en général des pH compris entre 7,5 et 8,5. Dans un premier temps, il a été convenu d'analyser (laboratoire SADEF 68700 Aspach le bas) uniquement les échantillons issus des répétitions A et B de chaque modalité. Ces résultats se sont révélés quasiment identiques, à la fois entre les deux répétitions analysées d'une même modalité, mais également entre les trois modalités V83, V95 et LA. Il a donc été décidé de ne pas analyser les répétitions C.

Les illustrations 34 et 35 montrent que pour deux modalités V83 et V95 situées sur le verger VEREXAL, le pH des horizons de surface est égal à 8, puis augmente jusqu'à 1 mètre de profondeur pour atteindre la valeur de 8,6 et rester stable (entre 8,4 et 8,6). Sur les deux répétitions de la modalité V95, on constate une augmentation du pH jusqu'à la valeur de 8,9 ou 9, localisée au niveau de la poche de sable (profondeur comprise entre 6,10 et 6,80 mètres). Un phénomène identique est observable sur la répétition V83-B où une légère augmentation du pH (entre 8,7 et 8,8) aux horizons compris entre 8,10 et 8,30 mètres de profondeur, correspond à une lentille sableuse.

Dans le cas de LA, parcelle cultivée en grande culture, le pH de l'horizon de surface est voisin de 7,6 et il augmente progressivement jusqu'à 1,10 mètre pour atteindre une valeur de 8,6 puis rester constant (entre 8,4 et 8,6) jusqu'aux horizons les plus profonds (*Illustration 36*).

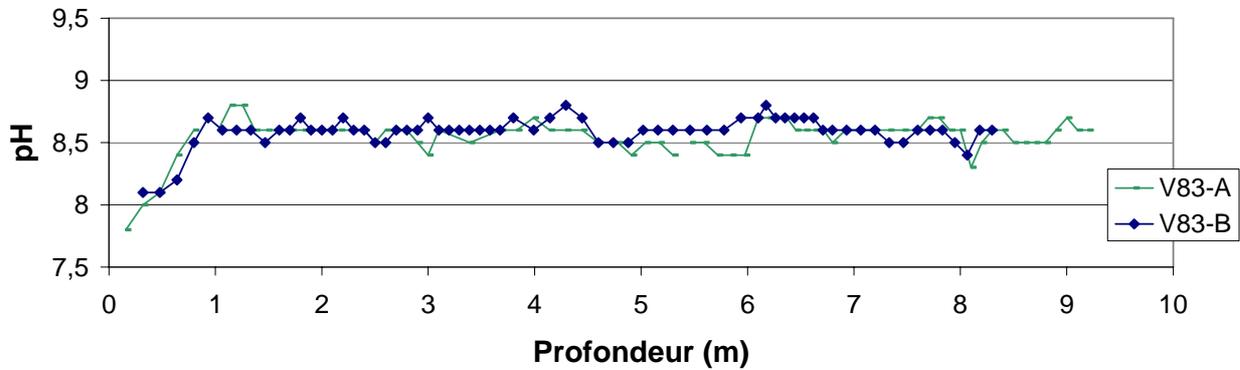


Illustration 34 : pH eau des échantillons de sol extraits des carottages V83-A et V83-B en fonction de la profondeur

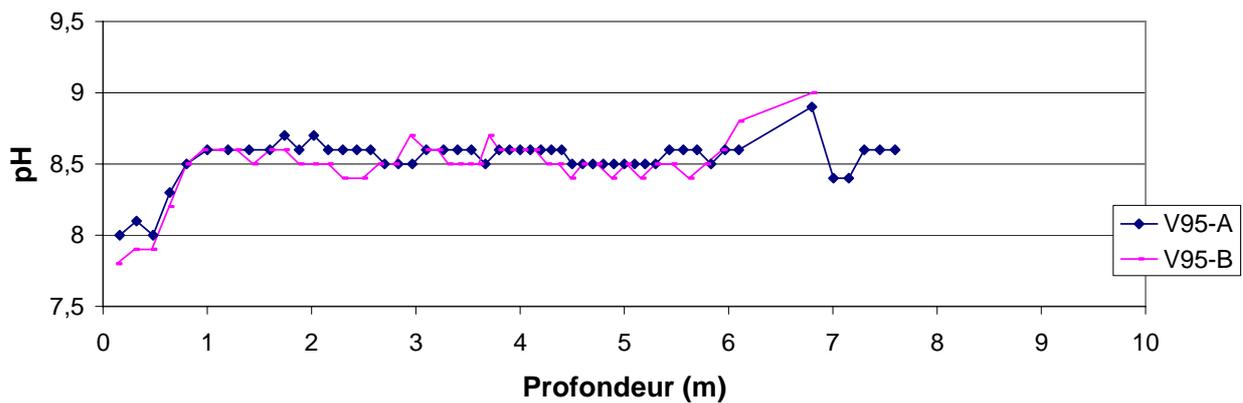


Illustration 35 : pH eau des échantillons de sol extraits des carottages V95-A et V95-B en fonction de la profondeur

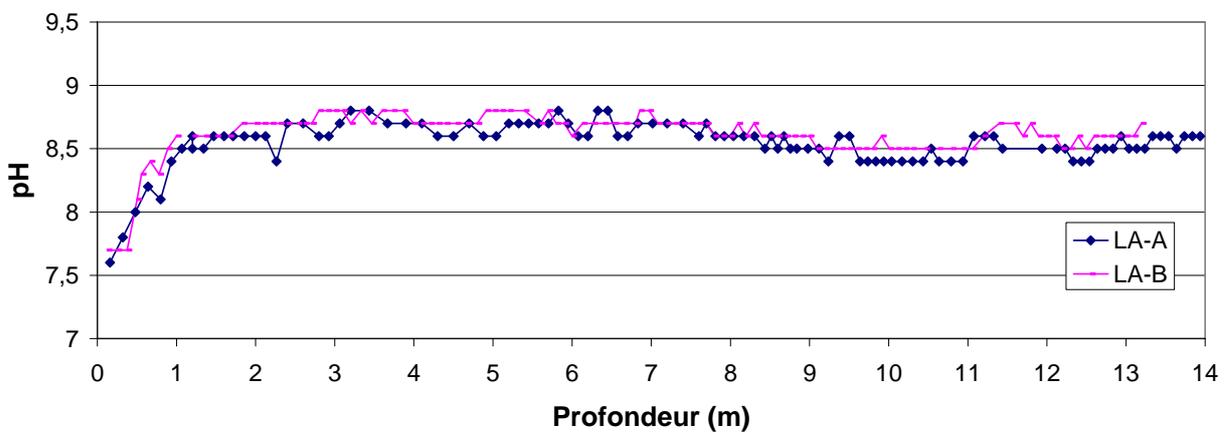


Illustration 36 : pH eau des échantillons de sol extraits des carottages LA-A et LA-B en fonction de la profondeur

F) Résultats des teneurs en eau du sol

Les illustrations 37 à 39 indiquent, que pour toutes les modalités, les résultats observés se situent globalement dans la frange comprise entre 10 et 20 % de teneur en eau massique et que pour chacune des modalités, les allures respectives des trois répétitions sont tout à fait superposables. Les profils de V83 et de V95 (Illustrations 37 et 38) sont plus irréguliers que celui observé pour LA (Illustration 39), relativement homogène. Sur le profil V83-A, un échantillon (à 2,70 mètres) présente une teneur en eau anormalement élevée, ne correspondant à aucune variation des autres paramètres du sol.

Les illustrations 37 et 38 montrent également la correspondance entre les prélèvements réalisés dans des zones de texture sableuse et les secteurs où la teneur en eau mesurée est la plus faible : entre 4,10 et 4,30 mètres pour V83-B (moins visible pour V83-A où la poche sableuse, moins dense, est située 50 cm plus bas dans le profil), aux alentours de 2 mètres, au niveau de la lentille sableuse observée sur V95-A (absente sur V95-B, pas d'information granulométrique sur V95-C), à 5,70 mètres pour V95-A (lentille sableuse) et entre 6,10 et 7 mètres dans le cas de V95-A et V95-B.

Dans le cas de la modalité LA, les valeurs des teneurs en eau entre chacune des répétitions sont parfaitement superposables, à l'image de l'homogénéité granulométrique du profil. Dès les horizons inférieurs à la zone d'emprise des racines (en dessous de 1,80 mètres), la teneur en eau se stabilise entre 13 et 14 %, puis augmente lentement, progressivement, pour atteindre 20 % à partir de 12 mètres

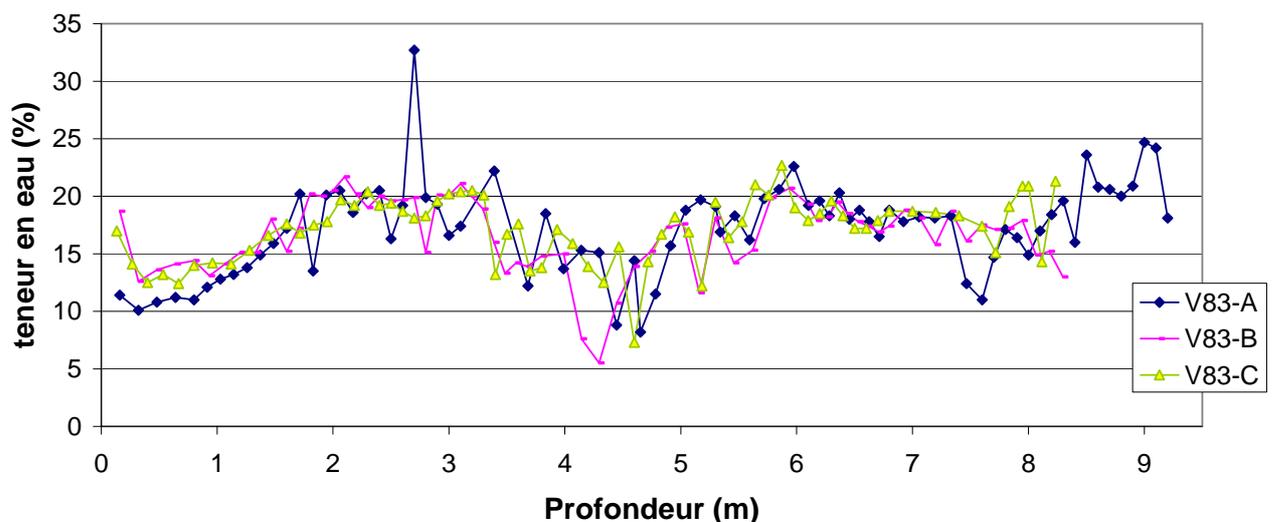


Illustration 37 : Teneurs en eau massique dans les échantillons de sol issus des trois carottages de la modalité V83

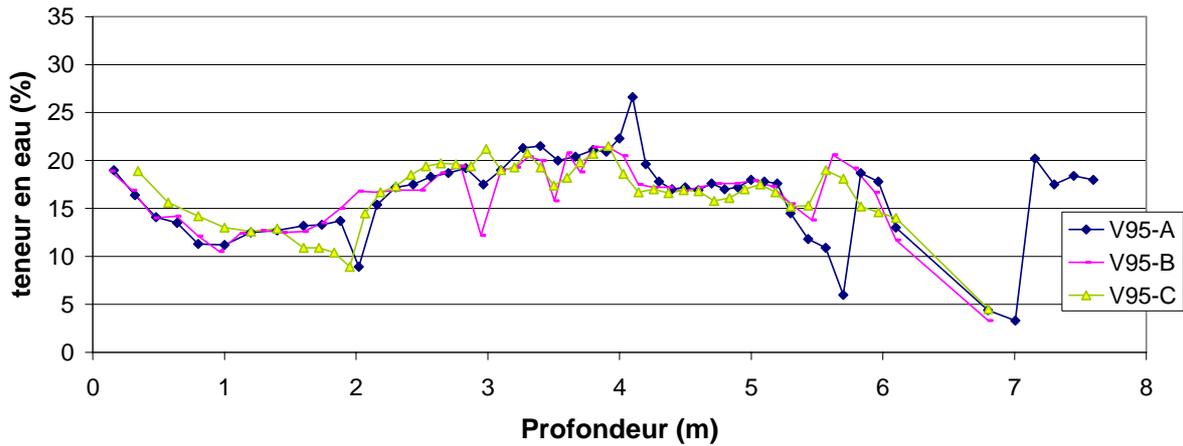


Illustration 38 : Teneurs en eau massique dans les échantillons de sol issus des trois carottages de la modalité V95

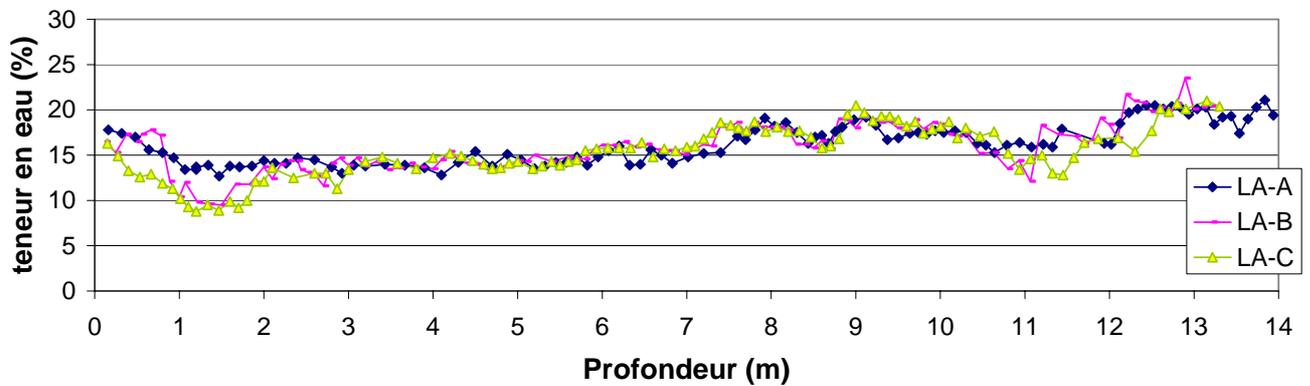


Illustration 39 : Teneurs en eau massique dans les échantillons de sol issus des trois carottages de la modalité LA

G) Résultats des analyses des formes de l'azote (NH₄⁺, nitrates)

Les analyses et les dosages des formes de l'azote ont été réalisés par le laboratoire SADEF (68700 Aspach le bas) sur la totalité des 681 échantillons prélevés lors de l'étude. Deux formes de l'azote ont été dosées : la fraction ammoniacale (NH₄⁺) et la forme nitrate (NO₃⁻).

1) Dosage de la fraction d'azote ammoniacal

Les formes ammoniacales de l'azote ont été recherchées, comme source d'information complémentaire pour mieux appréhender les conditions physico chimiques du sol, en particulier pour les horizons profonds. La présence de NH₄⁺ en profondeur serait un indicateur

de conditions réductrices du milieu, qui influeraient sur la balance entre les formes de l'azote, et donc le bilan spécifique de la forme nitrique ($\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{NO}_3^-$).

Les illustrations 40 à 42 montrent que, quelle que soit la modalité, la présence de NH_4^+ dans le sol se cantonne aux horizons de surface. Dès une profondeur de 1 mètre, les teneurs chutent systématiquement au dessous de 0,38 mg/kg et sont souvent inférieures aux limites de quantification (0,06 mg/kg). Il semblerait également que les concentrations moyennes soient légèrement supérieures dans le cas de V83 et V95 (comprises entre 0,41 et 0,52 mg NH_4^+ /kg) que dans le cas de LA (comprises entre 0,19 et 0,33 mg NH_4^+ /kg avec la présence de très nombreuses valeurs inférieures au seuil de quantification). Dans le cas de concentrations aussi faibles, les interprétations sont délicates.

Au niveau des horizons de surface (entre la surface et la cote 0,50 mètre), les concentrations en NH_4^+ sont nettement plus élevées pour V83 (de 2,6 à 8,7 mg NH_4^+ /kg) respectivement par rapport à V95 (de 1,8 à 5,6 mg NH_4^+ /kg) et par rapport à LA (de 0,3 à 1,8 mg NH_4^+ /kg). Ce constat est à mettre en relation avec les dynamiques liées à la matière organique, elle-même liée au travail du sol et à l'enherbement des parcelles. L'arrêt du travail du sol puis l'enherbement de ces parcelles lors de la mise en place du verger en 1983 ou en 1995, contribuent à augmenter l'enrichissement en matière organique des horizons de surface, et donc la minéralisation de cette matière organique, générant ainsi à l'issue des processus microbiologiques d'ammonification la production de NH_4^+ . *A contrario*, la parcelle du lycée agricole, où est située la modalité LA, n'est pas enherbée, mais labourée chaque année. Dans ce cas, il n'y a pas de stockage de matière organique dans les horizons de surface. Ce constat est confirmé par les dosages du carbone organique dans les horizons de surface, réalisés sur deux répétitions de chaque modalité et décrit par Portal *et al.* (2004). Les teneurs respectives en carbone organique entre les trois modalités ont une répartition similaire à ce qui est observé avec le paramètre NH_4^+ .

Le carottage V83-B présente un échantillon (coté à 4,90 mètres) dont la teneur en NH_4^+ (3,2 mg/ NH_4^+) se distingue très nettement du reste du profil. Ce pic coïncide également avec un pic de nitrate présent dans ce profil (Illustration 40). Cette coïncidence n'étant pas constatée par ailleurs, aucune explication n'a pu être apportée.

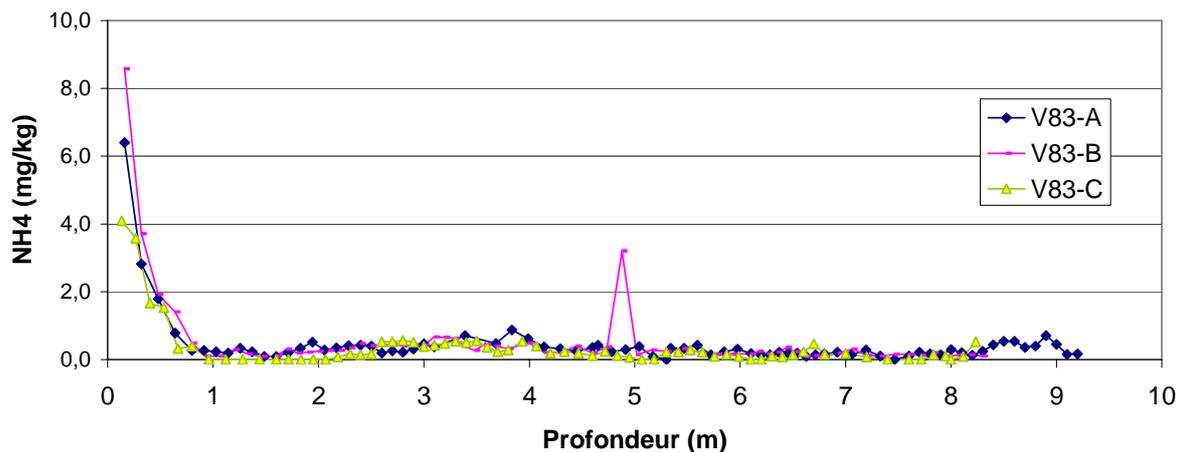


Illustration 40 : Teneurs en NH_4^+ des échantillons de sol issus des carottages V83-A, V83-B et V83-C (en mg/kg de sol sec)

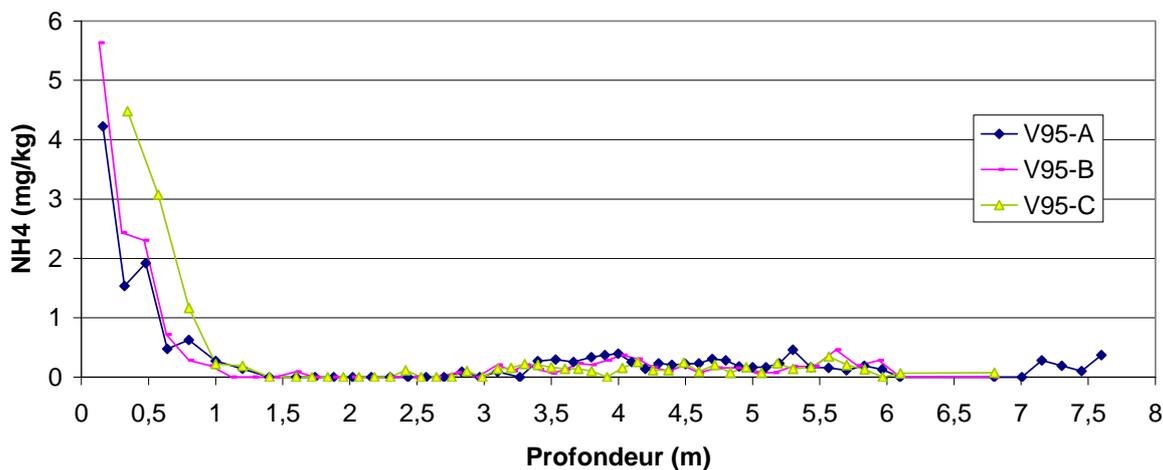


Illustration 41 : Teneurs en NH_4^+ des échantillons de sol issus des carottages V95-A, V95-B et V95-C (en mg/kg de sol sec)

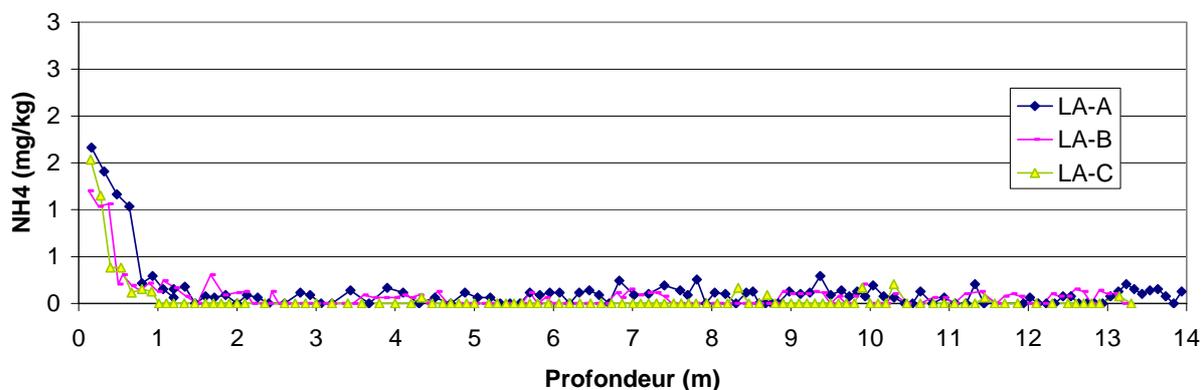


Illustration 42 : Teneurs en NH_4^+ des échantillons de sol issus des carottages LA-A, LA-B et LA-C (en mg/kg de sol sec)

2) Dosage des nitrates

a) Modalité V83

Les **illustrations 43 à 45** présentent les profils des concentrations en nitrate des carottages V83-A, V83-B et V83-C exprimées en mg NO₃⁻/l ou en mg NO₃⁻/kg. Un très important pic de concentration apparaît clairement dans le carottage V83-A. Il atteint une concentration de 407 mg NO₃⁻/l (89 mg NO₃⁻/kg), entre les profondeurs 3,50 et 5,80 mètres. Un pic très symétrique, mais d'une intensité 4 à 5 fois inférieure (concentration maximale à 84 mg NO₃⁻/l ou 17 mg NO₃⁻/kg) est observable sur V83-B. Dans le cas de V83-C, aucun pic n'est visible à ces profondeurs.

Hormis la portion située entre les profondeurs 3,50 et 5,80 mètres, les allures des trois répétitions sont semblables. Depuis la surface jusqu'à la profondeur de 3 mètres, les concentrations observées sur les trois répétitions sont relativement faibles, comprises entre 4 et 27 mg NO₃⁻/l (entre 0,2 et 3,5 mg NO₃⁻/kg). De même, au delà de 6,50 mètres, les profils redeviennent proches, voire superposables, et présentent une augmentation régulière de la concentration jusqu'à 124 mg NO₃⁻/l (25 mg NO₃⁻/kg) à 8,10 mètres. Sur V83-A, ouvrage le plus profond, une décroissance semble suivre ce pic (pas ou peu visible sur V83-B et V83-C).

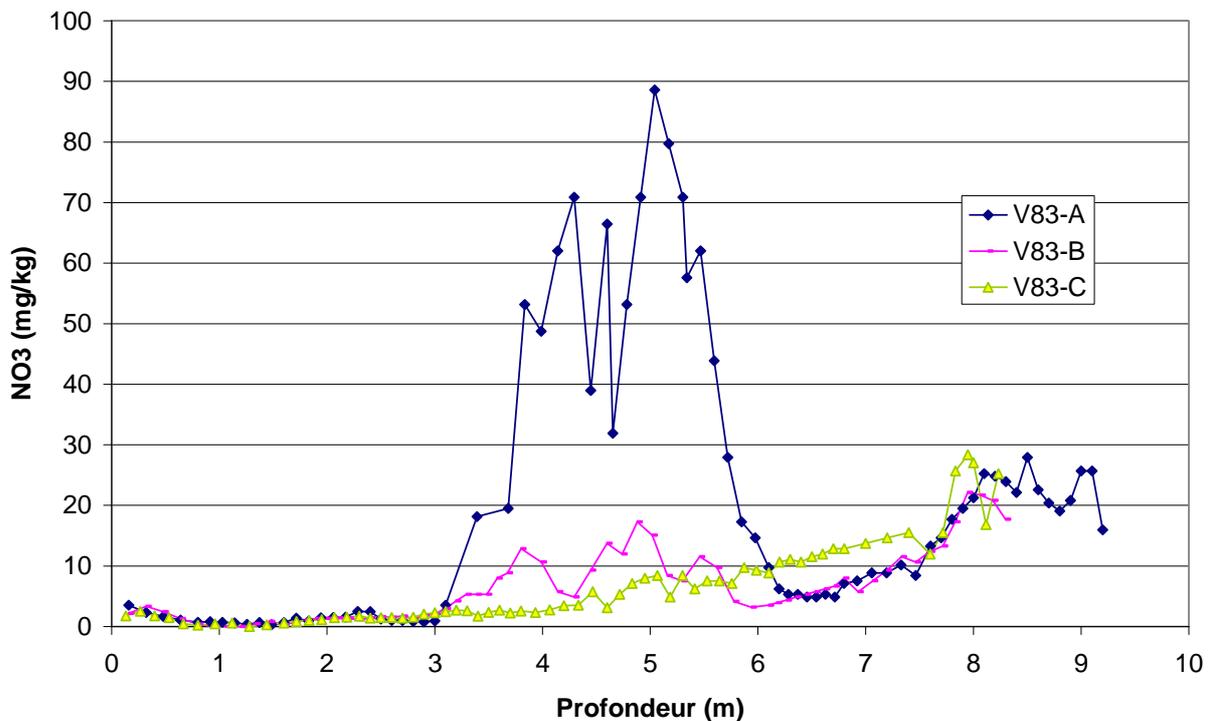


Illustration 43 : Teneurs en nitrate (NO₃⁻) dans les échantillons de sol issus des carottages V83-A, V83-B et V83-C (en mg NO₃⁻/kg de sol sec)

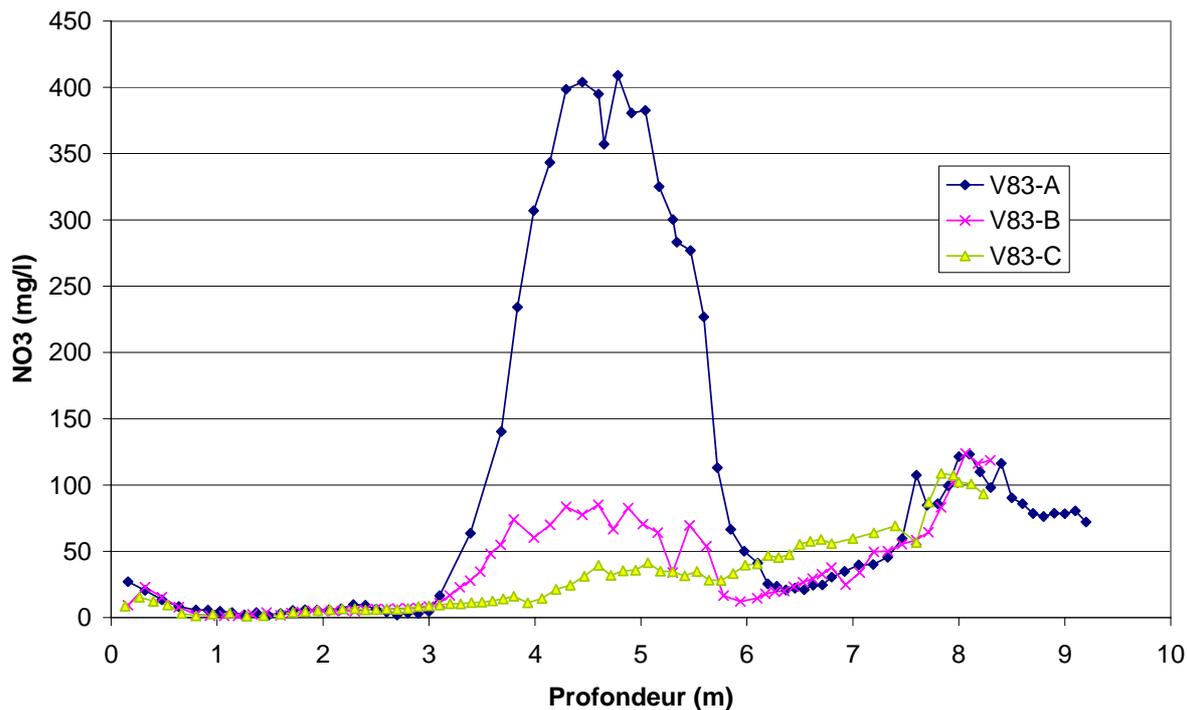


Illustration 44 : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans la solution du sol des échantillons issus des carottes V83-A, V83-B et V83-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$)

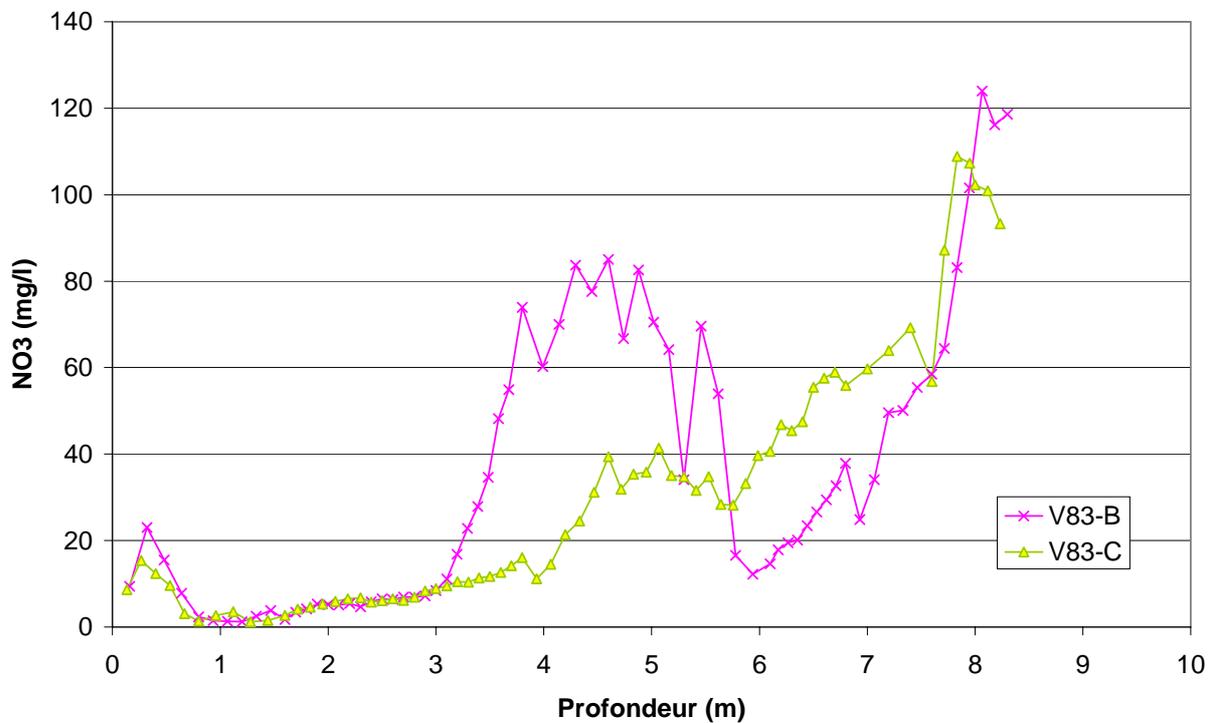


Illustration 45 : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans la solution du sol des échantillons issus des carottes V83-B et V83-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$) (échelle adaptée aux détails de V83-B et V83-C)

b) Modalité V95

Les **illustrations 46 et 47** présentent les profils de concentration en nitrate dans les carottages V95-A, V95-B et V95-C exprimées en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$ ou en $\text{mg NO}_3^-/\text{kg}$. Les trois répétitions possèdent des allures très similaires. Sur une première partie, depuis la surface jusqu'à une profondeur de 3 mètres environ, les concentrations en nitrates sont faibles, comprises entre 4,4 et 21,7 $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$ (0,2 et 5,8 $\text{mg NO}_3^-/\text{kg}$). Un pic de concentration très similaire entre les trois répétitions apparaît ensuite entre 3 et 5,50 mètres. Les concentrations maximales observées atteignent entre 97 et 111 $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$ (22,6 à 27,5 $\text{mg NO}_3^-/\text{kg}$) selon les carottages considérés.

La portion du profil située au delà de 5,50 mètres de profondeur est plus hétérogène. D'après **l'illustration 46**, présentant les teneurs en nitrate par rapport à la quantité de sol, il semblerait que les concentrations décroissent ensuite fortement jusque vers 6,80 mètres. Le profil de V95-A, plus profond, indique ensuite une remontée des teneurs en nitrates jusqu'au fond de l'ouvrage (7,60 mètres). Ces observations sont difficiles à confirmer ou à infirmer à l'examen de **l'illustration 47**, présentant les teneurs en nitrates dans la solution du sol. Ces éléments sont peut-être en relation avec la granulométrie locale des colonnes de sol, et notamment avec la présence de poches sableuses sur V95-A et V95-B à partir de 5,50 mètres.

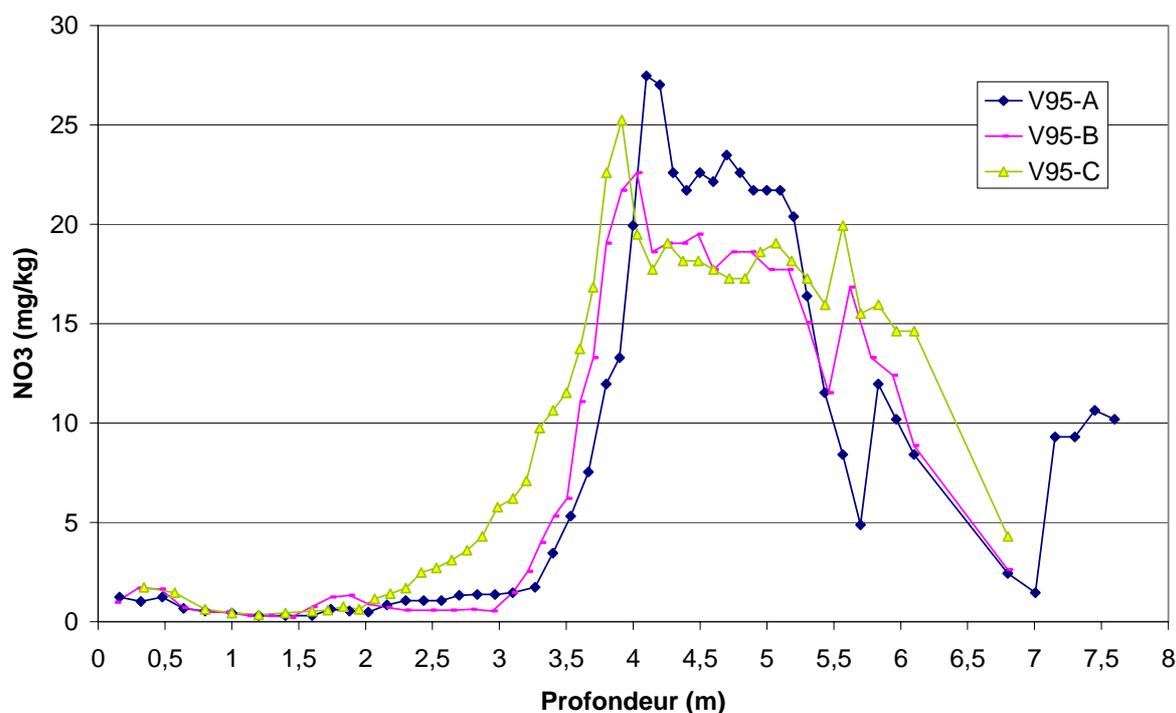


Illustration 46 : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans les échantillons de sol issus des carottages V95-A, V95-B et V95-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{kg}$ de sol sec)

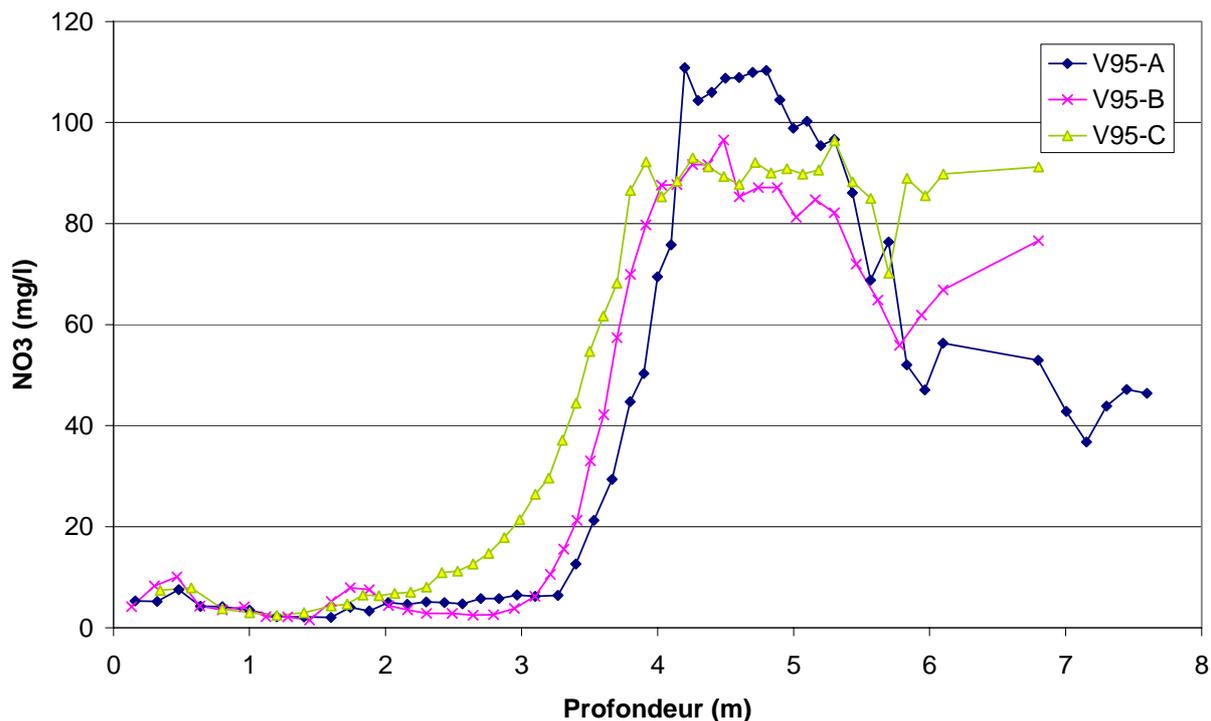


Illustration 47 : Teneurs en nitrate (NO_3^-) dans la solution du sol des échantillons issus des carottages V95-A, V95-B et V95-C (en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$)

c) Modalité LA

Les **illustrations 48 et 49** présentent les concentrations en nitrates mesurées dans les échantillons des carottages LA-A, LA-B et LA-C exprimées en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$ ou en $\text{mg NO}_3^-/\text{kg}$. Les profils des trois répétitions paraissent avoir des allures relativement superposables et peuvent se segmenter en 4 zones identifiées :

- au niveau des horizons de surface (jusqu'à 1,60 mètre), les teneurs en nitrates sont inférieures à $31 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ ($6,6 \text{ mg NO}_3^-/\text{kg}$) pour les trois répétitions.

- aux profondeurs comprises entre 1,60 et 3,50 mètres, un pic de nitrate apparaît et culmine à $164 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ ($27,5 \text{ mg NO}_3^-/\text{kg}$) entre 2,10 et 2,60 mètres, puis redescend rapidement à des teneurs situées entre 22 et $53 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ ($4,4$ à $8,8 \text{ mg NO}_3^-/\text{kg}$) à 3,50 mètres. Les profils des trois répétitions sont à peu près superposables.

- de 4 à 6,10 mètres, un second pic est observé, atteignant des concentrations comprises entre 151 et $190 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ ($29,2$ à $31,4 \text{ mg NO}_3^-/\text{kg}$) aux alentours de 5 mètres de profondeur. Les profils des trois répétitions sont à peu près superposables, même si le pic mesuré sur LA-B paraît atteindre des concentrations plus élevées de 10 à 15 %.

- au delà de 7 mètres, les trois profils se rejoignent puis restent stables à des niveaux inférieurs à 40 mg NO₃⁻/l (8,8 mg NO₃⁻/kg). Il est à noter que LA-C présente une hausse de concentration en nitrate marquée au fond du carottage, exprimée en mg NO₃⁻/kg, (**Illustration 48**) qui ne s'observe ni dans LA-A et LA-B, ni dans l'eau (**Illustration 49**).

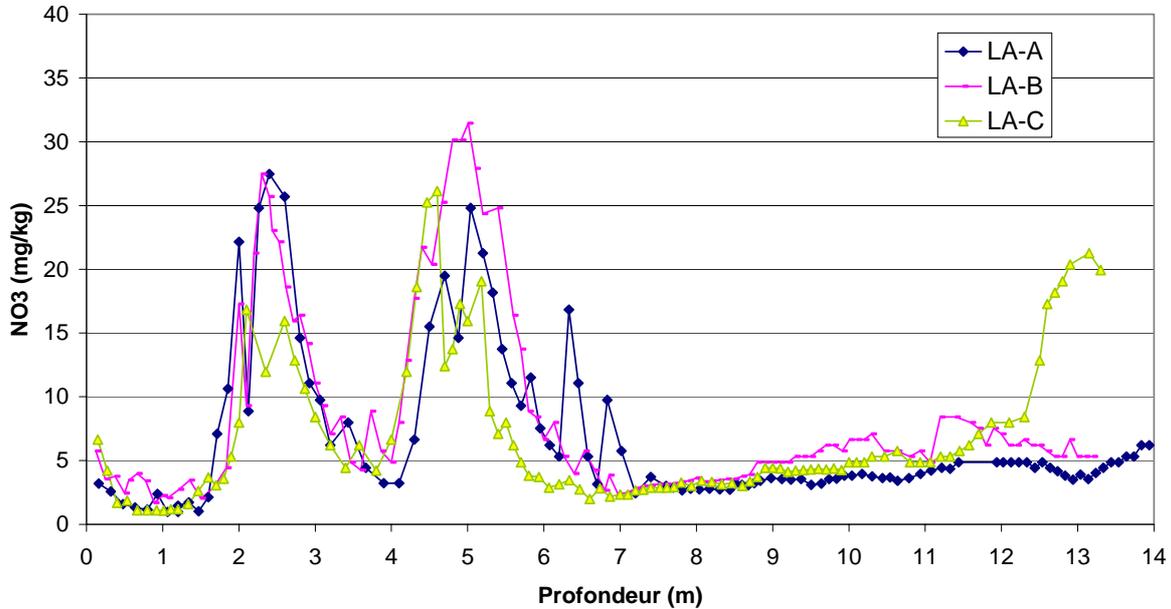


Illustration 48 : Teneurs en nitrate (NO₃⁻) dans les échantillons de sol issus des carottages LA-A, LA-B et LA-C (en mg NO₃⁻/kg de sol sec)

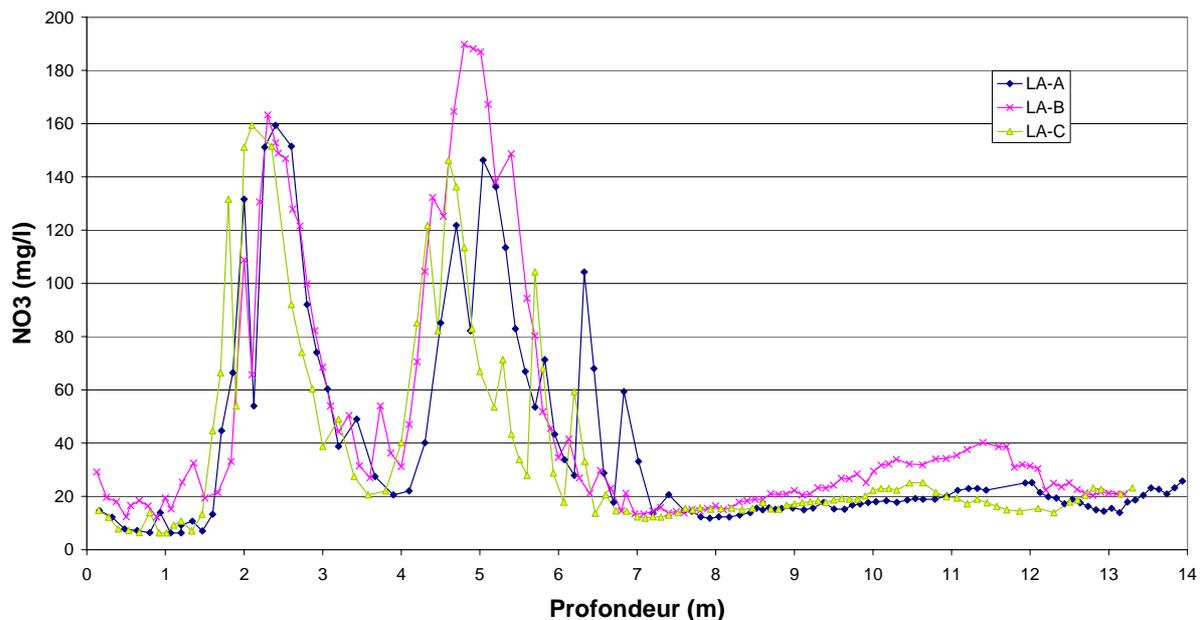


Illustration 49 : Teneurs en nitrate (NO₃⁻) dans la solution du sol des échantillons issus des carottages LA-A, LA-B et LA-C (en mg NO₃⁻/l)

H) Résultats des analyses de dosage du traceur inerte (KBr)

Une solution de KBr a été épandue le 26/03/2002, correspondant à une migration de 5 mois, à la dose de 80 kg/ha sur une surface d'environ 400 m² dans la parcelle d'étude du lycée agricole. Les dosages des bromures ont été réalisés sous la responsabilité du laboratoire SADEF (68700 Aspach le bas) sur les 69 échantillons concernés. Les 60 résultats concernant les trois carottages de la modalité LA sont présentés sur l'illustration 50. Un total de 9 dosages supplémentaires sont des contrôles négatifs menés à différentes profondeurs du profil V95 et destinés à déterminer un éventuel "bruit de fond bromure". Ces résultats figurent dans le tableau présenté dans l'illustration 51.

L'illustration 50 montre que les profils de migration des bromures sont relativement similaires entre les trois répétitions. Il apparaît que les bromures appliqués comme traceur de migration de l'eau dans le sol sont restés concentrés dans les 50 premiers centimètres du sol. Les teneurs décroissent très rapidement et seules quelques traces demeurent ponctuellement, sans dépasser 1,1 mg Br/kg, jusqu'à une profondeur de 1,40 mètres, et sans dépasser 0,40 mg Br/kg jusqu'à 2,80 mètres de profondeur (horizon analysé le plus profond).

Les mesures effectuées sur la parcelle V95 (non traitée par l'application d'une solution de KBr) indiquent une valeur moyenne maximale du bruit de fond de 0,089 mg (Illustration 51). Ceci confirme la validité du choix des bromures comme traceur et confirme que les teneurs mesurées sur LA proviennent bien de l'apport de KBr réalisé préalablement dans le cadre de la présente étude.

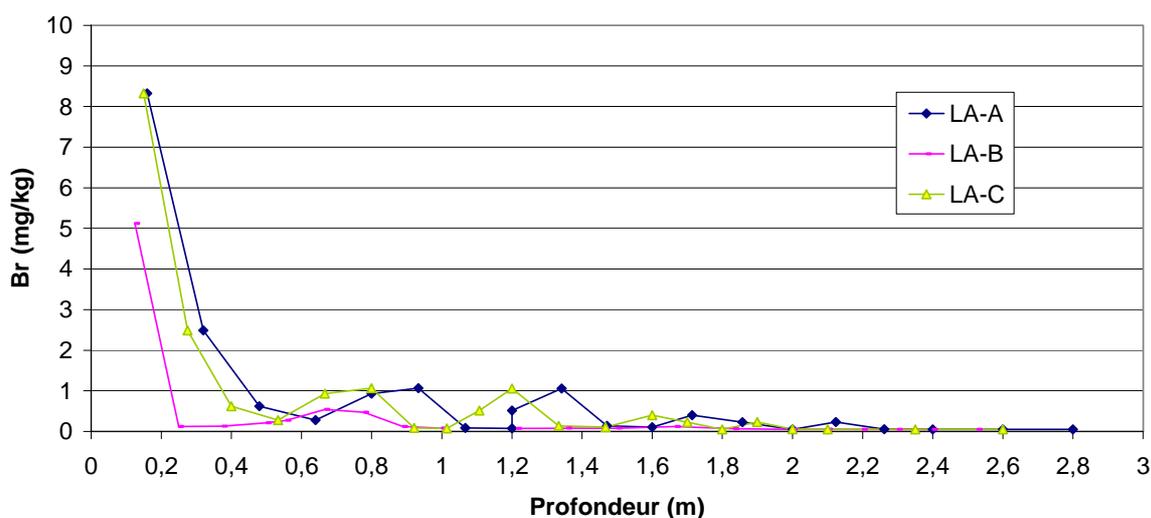


Illustration 50 : Teneurs en bromures totaux des échantillons de sol issus des trois premiers mètres des carottages LA-A, LA-B et LA-C (en mg Br/kg de sol sec)

Référence de l'échantillon	Profondeur de prélèvement (m)	Teneur en Br (mg/kg sol sec)
V95-A-1	0.2	0.159
V95-A-9	1.6	0.102
V95-A-17	2.7	0.061
V95-B-1	0.1	< 0.050
V95-B-8	1.3	0.130
V95-B-19	2.9	<0.050
V95-C-1	0.3	0.086
V95-C-6	1.4	0.115
V95-C-16	2.6	<0.050
Moyenne		< 0.089

Illustration 51 : Teneurs en bromures totaux dans les témoins négatifs, échantillons de sol issus de la modalité V95 (en mg Br/kg de sol sec - limite de quantification : 0,050 mg Br/kg)

I) Résultats des analyses du carbone total et de l'azote et du carbone organiques ainsi que de la détermination des C/N

Les extractions et les dosages qui ont conduit à ces résultats ont été réalisés conjointement par le laboratoire "sols et environnement" de l'ENSAIA-INPL/INRA et le CRPG du CNRS, situés à Nancy. Ces informations ont été rassemblées et commentées plus en détail par Portal *et al.* (2004) dans le cadre de la présente étude.

1) Modalité V83

Les illustrations 52 et 53 montrent que la présence de carbone et d'azote organique est presque exclusivement localisée dans les horizons supérieurs. Ces teneurs décroissent ensuite très rapidement, et au delà de 1,50 mètre de profondeur, les concentrations deviennent très faibles, inférieures ou très inférieures à 10 % de la valeur de concentration mesurée en surface.

L'illustration 54, relative au carbone total présent dans les échantillons, montre que ceux-ci sont carbonatés sur la totalité du profil. Les baisses du niveau de carbone total mesuré aux alentours de 4 et 5 mètres de profondeur, et de 6,80 à 8 mètres sont à mettre en parallèle

avec les courbes de granulométrie (*Illustrations 26 et 27*) relatives à cette modalité, où elles correspondent aux secteurs de texture sableuse ou sablo argileuse.

Les courbes des C/N relatifs à cette modalité ne sont pas présentées ici. Ce paramètre n'est réellement utilisable que dans les horizons de surface. Situé entre des valeurs de 7 et 10 dans les premiers 0,80 mètre du sol, il traduit un bon fonctionnement microbiologique du sol (Portal *et al.*, 2004).

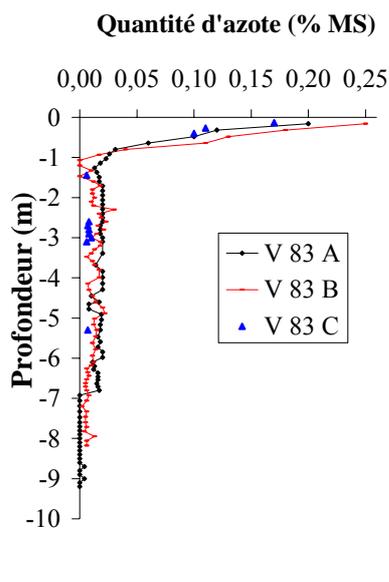


Illustration 52 : Quantité d'azote organique dans les échantillons issus des carottages V83

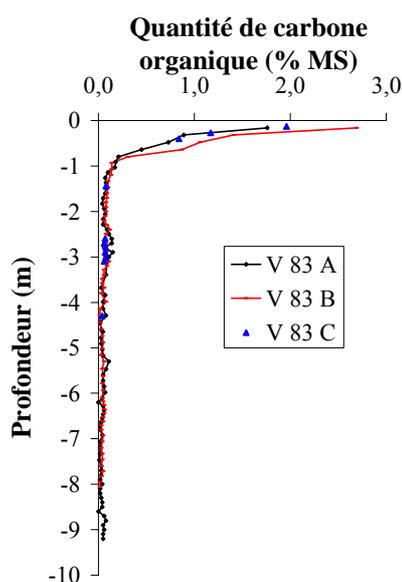


Illustration 53 : Quantité de carbone organique dans les échantillons issus des carottages V83

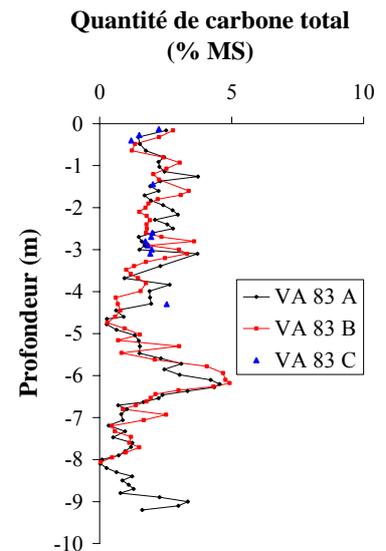


Illustration 54 : Quantité de carbone total dans les échantillons issus des carottages V83

2) Modalité V95

Comme dans le cas de la modalité V83, *les illustrations 55 et 56* montrent que la présence de carbone et d'azote organique est principalement localisée dans les horizons supérieurs. Ces teneurs décroissent ensuite très rapidement, et au delà de 1,20 mètre de profondeur, les concentrations deviennent très faibles, inférieures ou très inférieures à 10 % de la valeur de concentration mesurée en surface. Globalement, au niveau des horizons de surface, les teneurs en azote et carbone organique mesurées sur V95 se situent légèrement au dessous de celles de V83.

L'illustration 57, relative au carbone total présent dans les échantillons, montre également que ceux ci sont carbonatés sur la totalité du profil. Les profils de carbone total peuvent être rapprochés des courbes de granulométrie (**Illustrations 29 et 30**) relatives à cette modalité, en particulier pour la fin du profil, au delà de 5 mètres de profondeur, où elles correspondent aux secteurs de texture sableuse.

Les courbes des C/N relatifs à cette modalité ne sont pas présentées ici. Ce paramètre n'est réellement utilisable que dans les horizons de surface (jusqu'à 1,50 mètre) où il se situe aux alentours de 8, indiquant un bon fonctionnement microbologique du sol (Portal *et al.*, 2004).

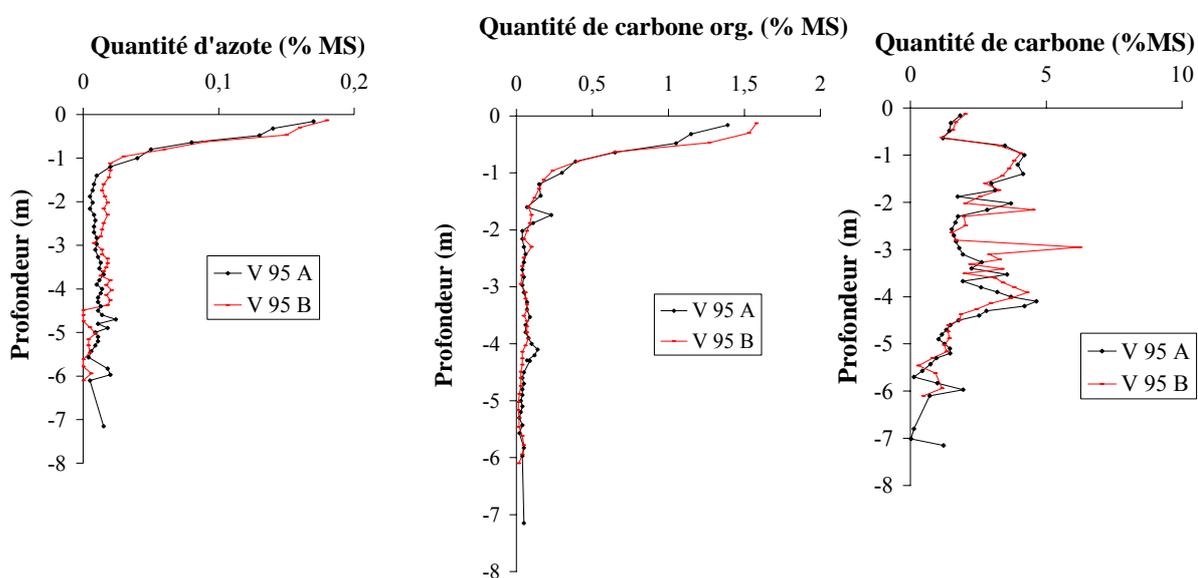


Illustration 55 : Quantité d'azote organique dans les échantillons issus des carottages V95

Illustration 56 : Quantité de carbone organique dans les échantillons issus des carottages V95

Illustration 57 : Quantité de carbone total dans les échantillons issus des carottages V95

3) Modalité LA

Comme dans le cas des modalités V83 et V95, **les illustrations 58 et 59** montrent que la présence de carbone et d'azote organique est principalement localisée dans les horizons supérieurs. Ces teneurs décroissent ensuite très rapidement, et au delà de 2 mètres de profondeur, les concentrations deviennent très faibles, inférieures à 10 % de la valeur de concentration mesurée en surface. Globalement, au niveau des horizons de surface, les teneurs

en azote et carbone organique mesurées sur LA se situent légèrement au dessous de celles de V95 et de V83.

L'illustration 60, relative au carbone total présent dans les échantillons, montre également que ceux ci sont carbonatés sur la totalité du profil. Les profils de carbone total peuvent être rapprochés des courbes de granulométrie et du pH (**Illustrations 32, 33 et 36**) relatives à cette modalité. Les horizons de surface, jusqu'à 0,70 mètre sont moins carbonatés, correspondant aux zones où le pH est le moins élevé dans le profil.

La partie du profil où les teneurs en carbone total sont les plus élevées (entre 1 et environ 11 mètres de profondeur environ) correspond aux zones de granulométrie très limoneuses et s'arrête dès que la granulométrie se modifie.

Les courbes des C/N relatifs à cette modalité ne sont pas présentées ici. Même si la distribution de ce paramètre semble différente de ce qui est observé pour V83 et V95, ce paramètre n'a une signification que dans les horizons de surface (jusqu'à 1,50 mètre) où il se situe entre 9 et 10, indiquant un bon fonctionnement microbologique du sol (Portal *et al.*, 2004).

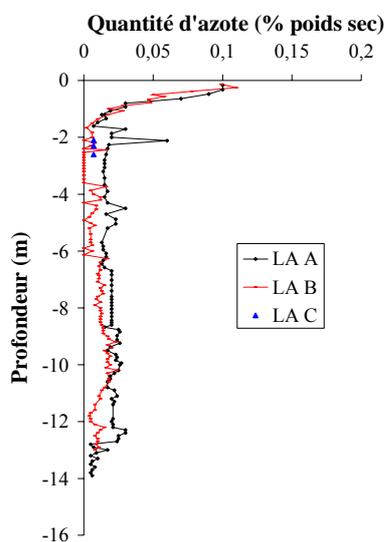


Illustration 58 : Quantité d'azote organique dans les échantillons issus des carottages LA

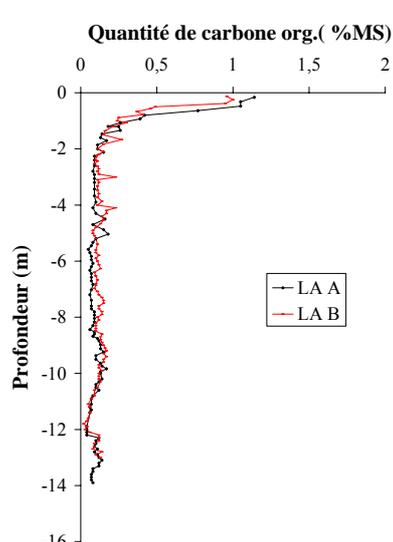


Illustration 59 : Quantité de carbone organique dans les échantillons issus des carottages LA

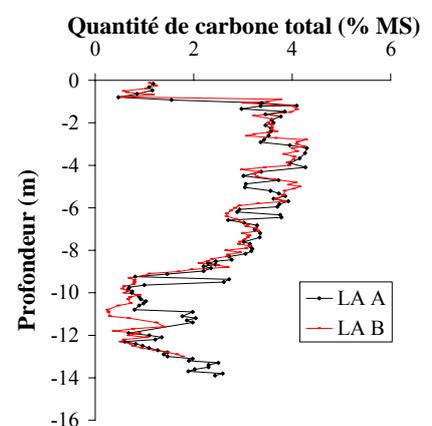


Illustration 60 : Quantité de carbone total dans les échantillons issus des carottages LA

J) Résultats des extractions et dosages de résidus phytosanitaires

Les extractions et les dosages des résidus phytosanitaires ont été réalisés conjointement par le laboratoire "sols et environnement" de l'ENSAIA-INPL/INRA et le CRPG du CNRS, situés à Nancy. Les molécules recherchées ont été le lindane (γ HCH), l'atrazine et la dé-éthylatrazine. Les résultats complets de ces travaux ont été rassemblés et commentés par Portal *et al.* (2004) dans le cadre de la présente étude.

1) Cas du lindane

Portal *et al.* (2004) ont montré qu'aucune trace de lindane n'est détectée dans les échantillons analysés. Les analyses en chromatographie montrent bien la présence d'une espèce moléculaire dont l'élution de la colonne se produit au même temps de rétention que le lindane, mais le spectre de masse de ce composé ne correspond pas à celui du lindane.

2) Cas de l'atrazine et de la dé-éthylatrazine (DEA)

Le seuil de quantification de l'atrazine et de la DEA de la méthode d'extraction et de dosage mise au point par Portal *et al.* (2004) dans le cadre de cette étude se situe à 0,08 ng/g de sol sec. Le ratio entre la quantité d'atrazine, ou de DEA, dissoute dans la solution du sol et celle adsorbée au complexe argilo humique du sol est très variable selon le type de sol. En outre, les résidus liés de l'atrazine n'ont probablement pas été totalement extraits et dosés par la méthode de Portal *et al.* (2004). En prenant l'hypothèse que dans les loess, 50 % de l'atrazine mesurée dans un échantillon soit présente sous forme dissoute dans la solution du sol, cela signifie que la concentration dans la solution du sol au seuil de quantification se situerait aux alentours de 0,16 μ g/l (humidité du sol à 20 %).

a) Modalités V83 et V95

Les carottages V83-A, V83-B, V95-A et V95-B ont été analysés intégralement. Globalement, moins de 4 % des échantillons (9 échantillons) ont présenté des traces d'atrazine ou de DEA au seuil de 0,08 ng/g (limite de quantification). Dans le cas de la répétition V83-B, aucune trace d'atrazine ou de DEA n'a été détectée. En ce qui concerne V83-A,

Illustration 61 montre que des teneurs élevées d'atrazine et de DEA ont été détectées dans 2 échantillons des 30 premiers centimètres du sol (7 à 8 ng/g) et dans un échantillon prélevé à la profondeur de 2,60 mètres (5,85 ng/g atrazine - 18 ng/g DEA). Des résidus ont également été détectés à 5,30 mètres et aux environs de 8,10 mètres.

Le cas de la modalité V95, exposé par **Illustration 62** est différent de V83 dans la mesure où ici, aucun résidu n'a été détecté au delà des horizons de surface (0,50 mètre). Les teneurs en atrazine ou en DEA atteignent des valeurs élevées (de 0,3 à 1,75 ng/g), mais très nettement inférieures à celle mesurées dans les horizons de surface de V83.

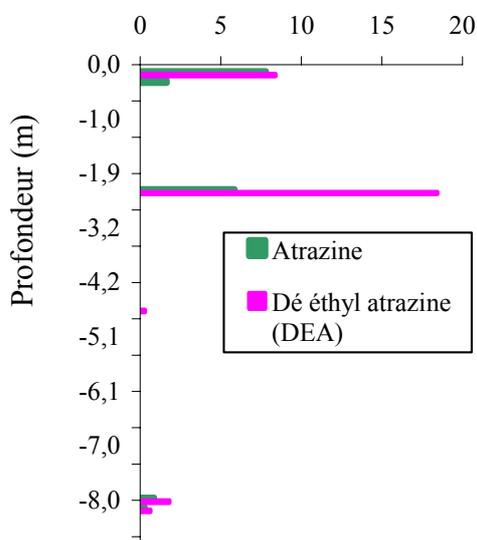


Illustration 61 : Concentrations en atrazine et DEA dans les échantillons issus du carottage V83A (en ng/g de sol sec)

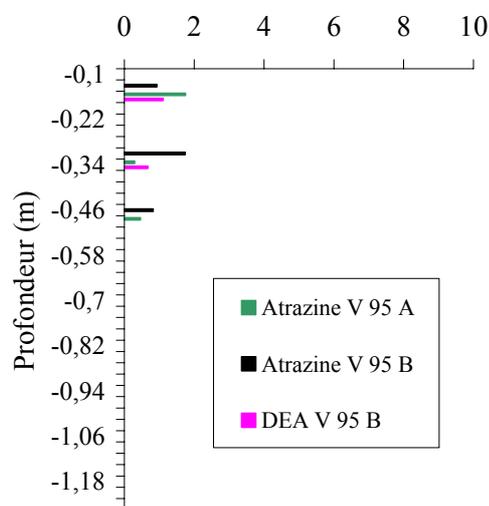


Illustration 62 : Concentrations en atrazine et DEA dans les échantillons issus des carottages V95-A et V95-B (en ng/g de sol sec)

b) Modalité LA

Dans le cas de la modalité LA, 9 échantillons ont présenté des concentrations supérieures au seuil de quantification, correspondant à environ 4 % du nombre total d'échantillons.

Dans le cas de LA-A, **Illustration 63** montre que les 4 échantillons où des résidus ont été détectés appartiennent aux horizons supérieurs (jusqu'à 0,60 mètre de profondeur). Les

valeurs des concentrations, de 0,6 à 2,2 ng/g, semblent du même ordre de grandeur que celles mesurées dans les horizons de surface de V95.

Dans le cas de LA-B, l'illustration 63 montre que dans 3 échantillons issus des horizons supérieurs à 0,70 mètre, des résidus ont été détectés, à des concentrations similaires à LA-A. Contrairement à ce qui a été observé sur LA-A, deux échantillons de LA-B situés vers 2,40 mètres de profondeur présentent des teneurs en résidus comprises entre 0,3 et 2,3 ng/g.

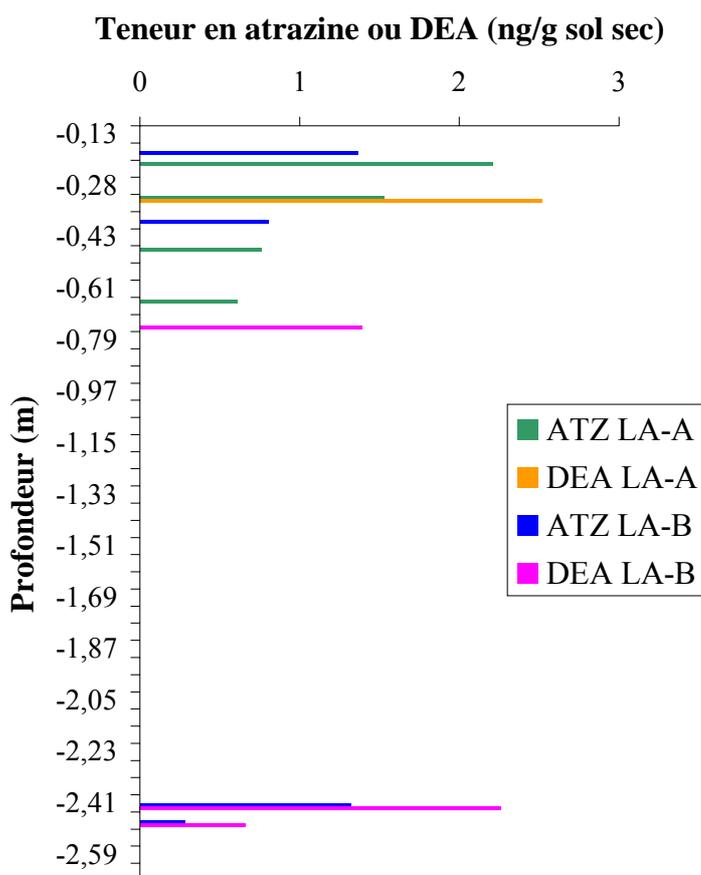


Illustration 63 : Concentrations en atrazine et DEA dans les échantillons issus des carottages LA-A et LA-B (en ng/g de sol sec)

K) Résultats des mesures de l'activité tritium

Les extractions de l'eau interstitielles et les dosages de l'activité tritium ont été mis au point puis réalisés par le laboratoire du BRGM (Orléans) sur environ 250 échantillons. Les résultats ont été décrits par Baran *et al.* (2005) dans le cadre de la présente étude.

Les illustrations 64 à 68 représentent les activités tritium enregistrées en fonction de la profondeur pour chaque carottage étudié. La limite de quantification de la méthode développée est 10 unités tritium (UT), pouvant éventuellement être abaissée à 1 UT en procédant à une étape supplémentaire d'enrichissement électrolytique. Les activités inférieures à 10 UT pour lesquelles un complément de mesure n'a pas été fait, sont représentées par un symbole différent et leurs valeurs ont été arbitrairement fixées à 10 UT. Les barres d'erreur correspondent aux incertitudes analytiques.

Afin de prendre en compte la décroissance naturelle de l'activité du tritium, isotope instable de l'hydrogène d'une demi vie de 12,43 année, toutes les mesures ont été corrigées de manière à présenter les résultats comme si les mesures avaient été synchrones à une date de référence, fixée au 1^{er} août 2002 (proche de la date des chantiers de carottage).

1) Modalité LA

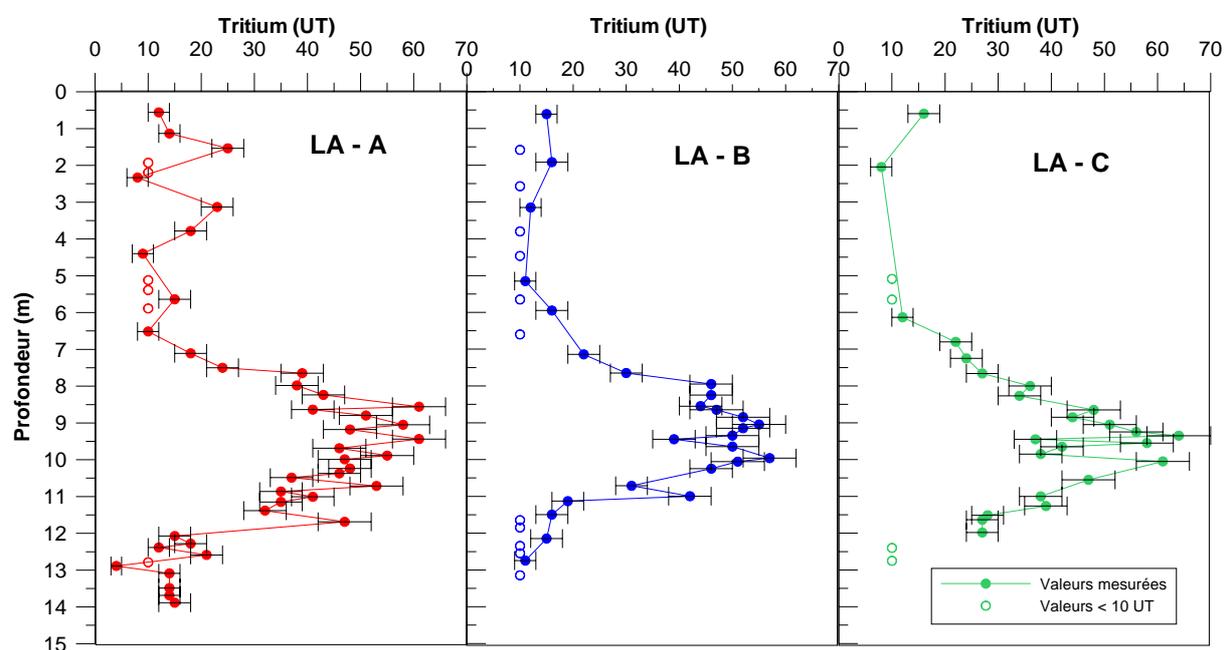


Illustration 64 : Teneurs en tritium observées dans la zone non saturée des 3 carottages effectués dans la modalité LA.

Pour chacune des trois répétitions de LA (**Illustration 64**), un signal très marqué, supérieur ou égal à 50 UT, est détecté. Ces fortes valeurs correspondent très probablement

aux émissions des essais nucléaires atmosphériques de 1963 (Baran *et al.*, 2004). Ces pics principaux, relativement symétriques sont présents sur chacun des trois carottages et sont très semblables tant dans leur position que dans leur intensité. Cette très forte similitude dans les répétitions peut être interprétée comme la résultante d'une infiltration très homogène sur l'ensemble de la parcelle.

LA-A (*Illustration 64*) présente dans la partie supérieure du profil, deux signaux ayant des intensités de l'ordre de 25 UT. Ces pics peuvent soit provenir d'apports de tritium postérieurs à 1963, résultant par exemple de l'activité des centrales nucléaires, soit découler de remontées capillaires liées à l'évaporation. Ces pics situés à des profondeurs moindres que le pic principal ne sont pas perceptibles sur les carottages LA-B et LA-C. Toutefois, ils existent peut-être également, mais la plus faible densité de mesures à ces profondeurs pour ces carottages pourrait expliquer qu'ils ne soient pas mis en évidence. Ces pics n'intervenant pas en terme d'interprétation de vitesse moyenne de transfert, ils n'ont pas fait l'objet d'une description détaillée.

Pour chaque carottage, la position de l'échantillon ayant la teneur en tritium la plus forte, la position du centre de masse en considérant l'ensemble des mesures et la position du centre de masse en ne considérant que les valeurs mesurées supérieures à 10 UT sont répertoriées dans *l'illustration 65*. Cette dernière approche permet de minimiser l'impact des apports de tritium postérieurs à 1963 sur la détermination de la position du centre de masse. La différence entre les deux approches est surtout sensible pour les carottages LA-B et LA-C et peut se traduire par une variation de plus d'un mètre sur la position du centre de masse (cas de LA-C).

	LA-A	LA-B	LA-C
Valeur maximale enregistrée (UT)/position (m)	61 UT / 8,56 m	57 UT / 9,96 m	64 UT / 9,35 m
Position du centre de masse (m) – tout le signal	8,20 m	7,98 m	8,33 m
Position du centre de masse (m) – valeurs supérieures à 10 UT uniquement	8,88 m	8,94 m	9,61 m

Illustration 65 : Position de l'échantillon ayant la plus forte teneur en tritium et du centre de masse pour les trois répétitions de la modalité LA

2) Modalité V83

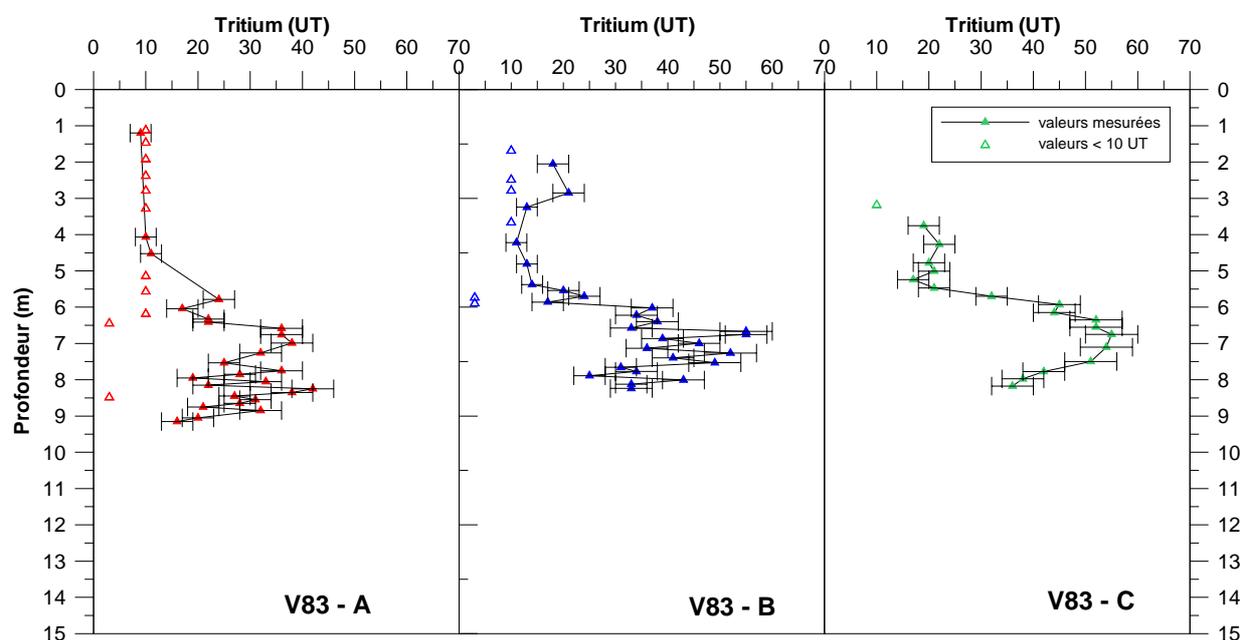


Illustration 66 : Teneurs en tritium observées dans la zone non saturée des 3 carottages effectués de la modalité V83

Les mesures effectuées sur les 3 répétitions de la modalité V83 (**Illustration 66**) ont mis en évidence l'existence d'un pic relativement marqué mais dont la position et l'étalement semblent légèrement différents selon les carottages. Ainsi, V83-A montre les teneurs en tritium plus élevées entre 6 et 9 mètres de profondeur. Pour V83-C en revanche, un pic principal semble mieux se dessiner. Toutefois, compte tenu de la précision et de la répartition des mesures, on peut considérer que les trois répétitions présentent un pic principal.

L'illustration 67 récapitule les teneurs maximales et les centres de masses mesurés.

	V83-A	V83-B	V83-C
Valeur maximale enregistrée (UT)/position (m)	42 UT / 8,25 m	55 UT / 6,66 et 6,75 m	55 UT / 6,75 m
Position du centre de masse (m) – tout le signal	6,13 m	5,77 m	6,37 m
Position du centre de masse (m) – valeurs supérieures à 10 UT uniquement	7,42 m	6,39 m	6,52 m

Illustration 67 : Position de l'échantillon ayant la plus forte teneur en tritium et du centre de masse pour les trois répétitions de V83

3) Modalité V95

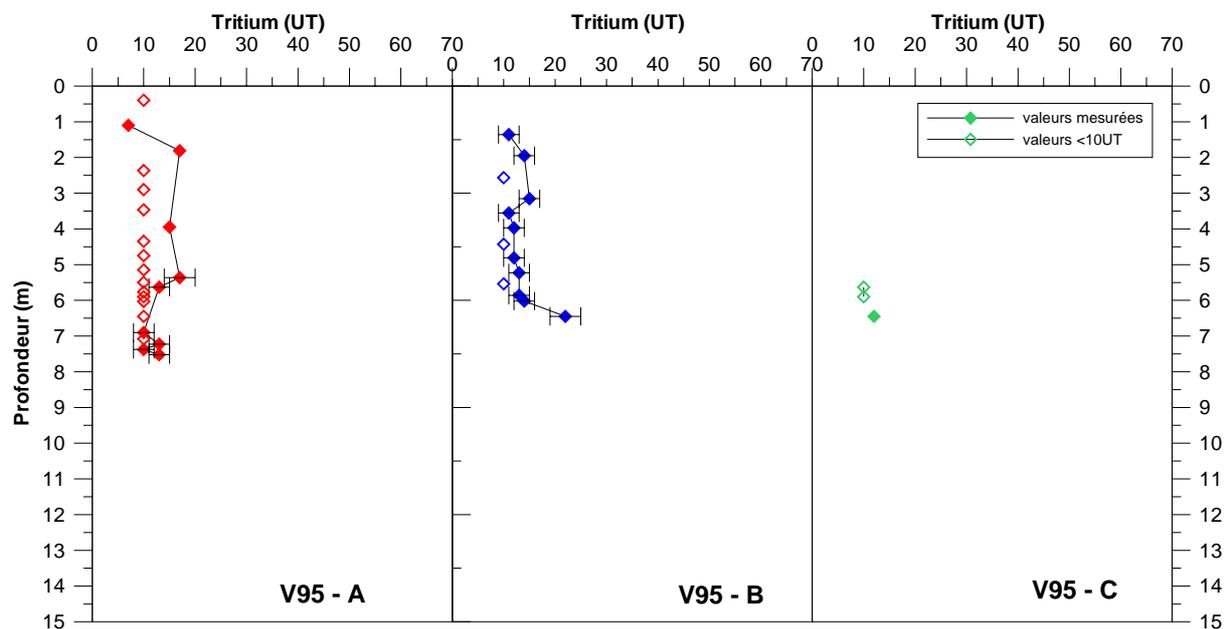


Illustration 68 : Teneurs en tritium observées dans la zone non saturée des 3 carottages effectués dans V95

Sur la base des données observées dans la parcelle LA, il est très probable que les forages de la modalité V95 n'aient pas été suffisamment profonds (limités à 6,8 ou 7,6 mètres) pour que le pic de tritium soit observable (**Illustration 68**). Les premières analyses effectuées sur V95A et V95B vont dans ce sens, puisqu'aucune forte valeur de tritium n'y a été mesurée. Au vu de ces résultats, très peu d'analyses ont porté sur V95C car il semble peu probable que le pic de tritium y soit observable.

IV.- DISCUSSION

La présente étude de détermination des vitesses de transfert des solutés dans des lœss profonds a consisté en une démarche scientifique intégrée, visant à la fois à la mise au point de méthodes d'extraction et de détection analytique, à une compréhension de phénomènes de transfert interdépendants complexes et au calage d'outils de modélisation de ces transferts. Le principe général de cette étude ainsi que plusieurs résultats scientifiques, restent originaux et sans équivalent à ce jour. Les travaux présentés ont généré la production d'environ 9000 données analytiques unitaires, compilées et exploitées dans le cadre de l'étude.

A) Description du contexte pédo-géologique de l'étude

Le secteur d'étude avait notamment été choisi du fait de la grande homogénéité de ses sols et de leur représentativité à l'échelle de la plaine rhénane. Les descriptions lithologiques des forages d'irrigation du verger VEREXAL et de l'exploitation du lycée agricole indiquent une couverture lœssique homogène sur plusieurs mètres, suivie d'alternances de sable, de gravier ou d'argile pour les horizons sous jacents, sièges d'aquifères. La présente étude se focalise sur les formations de la zone non saturée, les horizons quaternaires lœssiques.

Les résultats des analyses granulométriques réalisées sur deux répétitions de chaque modalité ont montré que, à l'échelle d'investigation de l'étude, les profils ne sont pas aussi similaires entre eux et homogènes qu'il n'y paraissait *a priori*. Deux situations se distinguent :

- la zone non saturée de la parcelle du lycée agricole (modalité LA) présente une grande homogénéité et la variabilité granulométrique est faible entre les échantillons du même carottage et entre les deux carottages. Dans cette situation, la couverture lœssique peut être considérée comme un substrat homogène où la vitesse moyenne de transfert des solutés dans le profil sera proche des vitesses de transfert instantanées dans chaque horizon respectivement (pour une même quantité d'eau qui s'infiltré).

- les profils de la zone non saturée des parcelles de VEREXAL sont beaucoup moins homogènes et ils présentent de fortes variations granulométriques, avec la présence de lentilles argileuses ou de poches sableuses. A cette hétérogénéité verticale se rajoute souvent

une variabilité géographique : les mêmes séquences granulométriques ne se retrouvent pas systématiquement entre deux carottages de la même modalité, distants pourtant de moins de 2 mètres. Dans ce contexte, la relative hétérogénéité granulométrique du substrat laisse présager des vitesses de transfert instantanées relativement différentes selon les horizons de la zone non saturée (pour une même quantité d'eau qui s'infiltré).

En ce qui concerne les conditions physico-chimiques du milieu, pour l'ensemble des 3 modalités et de leurs répétitions, les courbes de distribution du pH, de NH_4^+ , du carbone et l'azote organique ont montré des allures très similaires : aux conditions particulières des premiers horizons, explorés par les racines (pH moins élevés, horizons plus organiques), succèdent des profils identiques entre les carottages et constant sur tout le reste des sondages respectifs. Ces résultats laissent à penser que, si la nature du substrat est parfois légèrement variable, les conditions physico-chimiques semblent constantes sur les profils, et ne présentent pas de zones réductrices, qui auraient été mises en évidence par la présence de NH_4^+ , ni d'horizons d'accumulation de matières organiques.

B) Validation de la méthodologie employée

1) Transport par convection dispersion

Le déplacement d'une particule dans un aquifère se fait avec le déplacement moyen de la masse d'eau. L'eau est le vecteur de déplacement, et le transport dominant de la particule se fait par convection. Lorsque la particule n'interagit pas avec le milieu solide, la vitesse de transport du soluté est la même que celle de l'eau. Le transport convectif, ou convection, est équivalent à une translation, encore appelé "effet piston", phénomène de base du transfert de solutés.

La diffusion moléculaire est par contre un phénomène physico-chimique dû à l'agitation moléculaire.

Un fluide s'écoulant à travers un milieu poreux subit le processus de dispersion mécanique qui résulte d'une distribution non homogène de la vitesse de l'eau, notamment

parce que toutes les trajectoires au travers de la matrice n'ont pas la même longueur. Cette dispersion a une composante longitudinale et une composante transversale.

Le transport d'un soluté conservatif (qui ne se dégrade pas) et non réactif (qui n'est pas retenu par une matrice) est régi par les phénomènes de convection, de diffusion moléculaire et de dispersion cinématique. Le modèle de convection-dispersion est largement utilisé pour décrire le transport de soluté. Il intègre un terme décrivant le transport passif convectif et un terme décrivant le mélange aléatoire du soluté par diffusion et dispersion. Lorsqu'on considère une injection instantanée d'un soluté dans un milieu poreux, sous l'effet des phénomènes de convection-dispersion, ce soluté se trouve distribué de manière aléatoire dans l'espace suivant une loi gaussienne. ***L'illustration 69*** permet de visualiser les réponses théoriques à une injection ponctuelle (dite aussi impulsion de Dirac) dans un milieu poreux si seule la convection est considérée ou si les processus de convection-dispersion sont considérés dans leur ensemble.

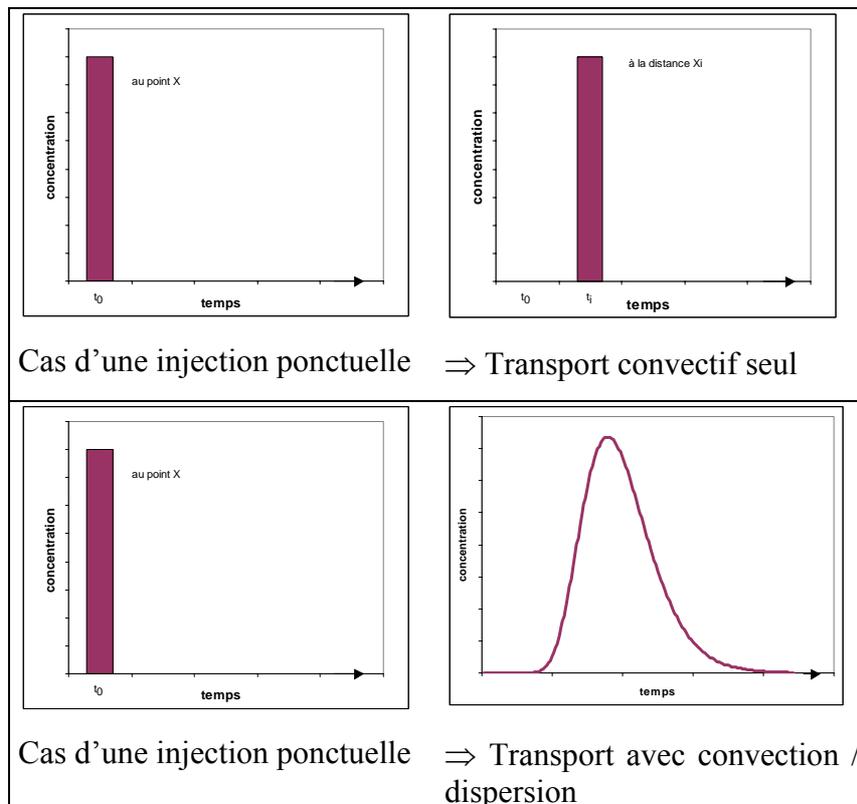


Illustration 69 : Réponses théoriques à une injection ponctuelle dans un milieu poreux

Le milieu naturel n'est jamais homogène et le transport des solutés peut généralement être décomposé en deux composantes liées à la taille des pores (microporosité et macroporosité). Généralement, on considère que la diffusion domine dans la microporosité alors que la convection domine dans la macroporosité. En réalité, ces processus se produisent simultanément et la réponse à l'injection ponctuelle d'un soluté variera suivant la prédominance de l'un ou l'autre des processus. Dans certains cas, une fraction de solutés peut « court-circuiter » la matrice via les macropores ; on parle d'écoulements ou de flux préférentiels. Dans ce cas, les processus de sorption ou de dégradation sont réduits car le contact avec la matrice solide est faible et la vitesse de transfert relativement importante. Lorsque les flux préférentiels sont peu marqués et que le transport s'effectue essentiellement via la microporosité, on parle d'écoulements ou flux matriciels. Dans les faits, il est difficile d'attribuer une taille à ces différentes porosités et donc de fixer une limite entre macroporosité et microporosité. Ce sont surtout les processus hydrodynamiques qui sont à prendre en compte lors de l'interprétation des données observées.

Dans le cadre de l'étude, les efforts analytiques concernant le tritium ont particulièrement porté sur les 3 forages de LA, dans la mesure où il s'agissait des forages les plus profonds. Au sein de cette modalité, la présence d'un pic de tritium bien dessiné et symétrique laisse supposer que le transfert s'effectue essentiellement suivant les processus de convection dispersion au sein d'un milieu pouvant être considéré comme poreux et relativement homogène. On peut admettre que l'injection du maximum d'activité tritium puisse être considérée comme ponctuelle, hypothèse acceptable au vu des durées respectives de l'injection d'une part (environ 12 mois) et du temps écoulé depuis l'injection (presque 40 ans). Les trois répétitions de la modalité LA offrent des résultats très similaires et suggèrent que l'infiltration est très homogène au sein de cette parcelle.

Dans le cas de la modalité V83, un pic principal est plus ou moins bien décrit suivant la répétition : V83-A correspond plus à une succession de plusieurs pics alors que V83-C correspond mieux à un pic unique. L'infiltration pourrait donc être un peu plus hétérogène dans la parcelle V83 que dans la parcelle LA. Cela pourrait être le résultat de la plus grande hétérogénéité de la texture des sols sur une verticale donnée, mais aussi au sein de cette parcelle comparativement à LA. En ce qui concerne V95, les données tritium montrent uniquement que la vitesse de transfert n'est pas inférieure à celle constatée sur V83. Néanmoins, comme les séquences granulométriques sont similaires entre V83 et V95, il semble probable que leurs comportements hydrodynamiques soient très proches.

2) Cas des phénomènes de transfert latéral

Au niveau de la zone non saturée du sol des différentes modalités testées, les données du tritium montrent que les conditions sont remplies pour permettre l'application de la loi de convection dispersion des solutés entre la surface et le toit de l'aquifère. Ceci n'exclue néanmoins pas le cas d'apports par transfert latéraux depuis des horizons situés sous des parcelles adjacentes, qui auraient subi un autre historique ou qui seraient le siège de processus ou de transferts très différents.

Il a été fait l'hypothèse que dans la matrice de lœss, ces transferts étaient négligeables par rapport aux transports verticaux. Pour cette raison, chaque carottage a été arrêté dès que les horizons atteints pouvaient laisser penser que ces transferts latéraux n'étaient plus négligeables : poche sableuse, horizons plus humides,...

Aucun dispositif expérimental n'avait été mis en place pour vérifier cette hypothèse. Néanmoins, les résultats observés dans le cas de la modalité V83, sur le carottage V83-A ont confirmé cette hypothèse. Un pic important de nitrates a été détecté entre 3 et 6 mètres de profondeur (*Illustrations 43 et 44* et section correspondante). Un signal à peu près symétrique, aux mêmes profondeurs, mais d'une intensité entre 4 et 5 fois moindre, a été détecté au niveau du carottage V83-B, distant d'environ 1,50 mètre de V83-A. Aucun signal n'est clairement visible au niveau de V83-C, situé à 3 mètres de V83-A, dans l'alignement avec V83-B. Un phénomène intense, dont l'origine probable sera évoquée plus loin, sans doute centré sur les horizons de surface de V83-A, n'a pas de répercussion visible sur le carottage V83-C situé à une distance horizontale de 3 mètres. Ce constat confirme donc que les transferts latéraux sont possibles, mais que leur amplitude est très faible par rapport aux phénomènes verticaux, voire même négligeable au delà d'une distance de 3 mètres.

3) Choix du paramètre représentatif des teneurs en nitrates

L'expression des résultats des mesures de concentrations en nitrates a été présentée en faisant appel à deux références différentes. D'un point de vue analytique, la teneur en NO_3^- a été exprimée en fonction de la terre fine sèche (mg NO_3^- /kg de terre fine sèche) : il s'agit d'un mode d'expression des résultats non dépendant des conditions d'humectation des sols. Celui-ci est très pertinent pour les horizons de surface d'un sol, où, pour des raisons climatiques ou par

la présence des racines, les conditions d'humectation sont très variables. Dès lors que l'humidité du sol reste presque constante au cours de l'année (Delphin et Schenk, 1996, on montré que c'était le cas au delà de 1,70 mètre, dans un contexte semblable) et que NO_3^- devient un soluté conservatif et non réactif (ces dernières conditions sont remplies au delà de la zone racinaire) ces limites d'utilisation ne se justifient plus. Dans cette situation l'expression de la teneur en NO_3^- par rapport à l'humidité du sol (en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$ d'eau du sol) semble plus pertinente, car intégrant la variabilité de l'humidité des horizons successifs. En outre, c'est bien par rapport à l'eau, vecteur du soluté, que la quantité de NO_3^- est à considérer.

La méthode analytique utilisée pour mesurer l'humidité massique du sol (séchage à 105°C - NF ISO 11465) dans le cadre de l'étude ne quantifie pas la fraction d'eau minéralogique (incluse dans les structures minéralogiques) mais uniquement l'eau de la porosité.

L'eau présente dans un sol est répartie en plusieurs compartiments, selon sa capacité à pouvoir circuler dans la matrice : depuis l'eau minéralogique, c'est-à-dire imbriquée dans les structures moléculaires mêmes des minéraux, jusqu'à l'eau circulante (eau gravitaire libre). Néanmoins, au sein de la matrice, seule une porosité dite "porosité efficace" contribue directement aux écoulements. Cette porosité efficace est inférieure à la porosité totale de la matrice. Tomer et Burkart (2003), cités par Baran *et al.* (2005), ont travaillé sur des loess de l'Iowa (USA) où ils ont considéré que la porosité efficace était inférieure environ de moitié à la porosité totale ($0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ contre $0,42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). En considérant à 1,5 la densité apparente moyenne des loess d'Obernai, le "remplissage" de la moitié de porosité totale correspond à une humidité massique voisine de 17 %. Or, ***l'illustration 70*** montre que l'humidité massique moyenne mesurée de tous les carottages est inférieure ou égale à 17 % (sauf V83-C : 17,1 %).

modalité	V83			V95			LA		
répétition	A	B	C	A	B	C	A	B	C
humidité massique (% moyen)	17	16,7	17,1	16,2	16,4	16,4	16,3	16,0	15,5

Illustration 70 : Pourcentage moyen d'humidité massique mesurée dans les échantillons de sol des carottages de V83, V95 et LA

Ces résultats permettent de conclure que le sol n'est pas à saturation et que l'eau présente dans les échantillons permet à peine de remplir la porosité du sol la moins contributive aux écoulements. La circulation de l'eau semble donc animée presque exclusivement par les différences de potentiel de succion existant entre la surface et le toit de l'aquifère. Il n'y a donc sans doute pas lieu de différencier une qualité d'eau liée à la porosité efficace et une autre, liée à la microporosité. En outre, les vitesses de transfert dans la matrice étant relativement lentes (cf. section suivante), les phénomènes de diffusion moléculaire des solutés (NO_3^- en l'occurrence) ont très probablement le temps d'équilibrer les concentrations entre les différents compartiments d'eau.

Pour la suite de l'étude, dès lors que l'on s'intéressera aux horizons inférieurs à la zone racinaire, le paramètre descriptif de la présence de nitrates sera la concentration exprimée en $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$ par rapport à l'humidité massique du sol.

C) Vitesses de transfert de l'eau et des solutés

Le principe d'une triple datation (tritium, nitrate, bromure) avait été retenu pour couvrir une très large gamme de temps de transfert *a priori*. Les résultats des transferts de bromure, traceur conservatif et non réactif, n'ont pas pu être exploités dans la mesure où le temps de migration du soluté (5 mois) a été insuffisant. En effet, le bilan, montre que la quasi totalité du traceur apportée est, au moment des carottages, encore située dans les 50 premiers centimètres du sol où les modalités de circulation des solutés subissent trop d'interférences avec d'autres phénomènes pour pouvoir être interprétées facilement.

Les deux autres référentiels de datation utilisés ont permis de déterminer des vitesses moyennes de transfert. La détermination des vitesses de l'eau en utilisant le traceur tritium est basée sur une injection considérée ici comme ponctuelle en 1963 alors que le cas des nitrates correspond à un changement de pratiques agricoles à une date connue (mise en place du verger et arrêt de la fertilisation azotée ou, à l'inverse retournement de prairie puis mise en culture et apport de fertilisants).

1) Référentiel de datation par rapport aux apports de tritium

L'illustration 71 récapitule les résultats obtenus sur V83 et LA. Dans le cas de V83, la position du centre de masse du signal tritium varie de 5,77 à 6,37 mètres de profondeur selon la répétition. Elle apparaît dans tous les cas plus superficielle que celle qui a été estimée pour la modalité LA (de 7,98 à 8,33 mètres). Outre les différences de texture observées entre les deux modalités qui peuvent induire des perméabilités différentes, le type d'occupation du sol a pu modifier la quantité d'eau infiltrée. L'eau correspondant à la recharge de 1963 a donc pu atteindre une profondeur moins importante dans le cas de V83. Si on considère que la profondeur atteinte par le pic tritium est moindre dans le cas de V83, cela signifie que l'infiltration totale entre 1963 et 2002 est moindre que dans le cas de LA. La mise en place d'un verger enherbé dans V83 depuis 1983 aurait conduit à une limitation de l'infiltration par rapport à LA, cultivé en grandes cultures.

Les profils obtenus pour V95 ne montrent pas de pics de tritium nets, sans doute parce qu'ils sont moins profonds que pour V83. Si on considère que la mise en place d'un verger contribue à limiter l'infiltration par rapport à l'occupation du sol en grandes cultures et que les différences de texture de sols observées entre V83 et V95 n'influent que peu sur le transfert de l'eau (hypothèse qui ne peut pas être validée avec les travaux réalisés dans le cadre de cette étude), on peut imaginer que le pic de tritium de la parcelle V95 devrait se trouver à une position intermédiaire entre celles observées pour LA et V83, le verger y ayant été mis en place plus précocement que dans V95.

Pour les modalités LA et V83 dans lesquelles le pic tritium est observable, les processus de convection dispersion semblent dominants et l'infiltration relativement homogène pour une parcelle donnée. Par contre, la vitesse d'infiltration moyenne semble plus lente dans V83 (entre 0,15 et 0,19 m.an⁻¹) par rapport à LA (entre 0,20 et 0,25 m.an⁻¹) ce qui pourrait résulter d'un effet texture ou d'une occupation du sol différente. Les vitesses de transfert moyennes présentées ont été calculées à partir des deux hypothèses de positionnement des centres de masse des courbes de distribution du tritium et pour un temps de migration de 39 années.

	V83-A	V83-B	V83-C	LA-A	LA-B	LA-C
Valeur maximale enregistrée	42 UT	55 UT	55 UT	61 UT	57 UT	64 UT
UT/position (m)	/	/ 6,66 -	/	/	/	/
Position du centre de masse (m) – tout le signal	8,25 m	6,75 m	6,75 m	8,56 m	9,96 m	9,35 m
Position du centre de masse (m) – valeurs supérieures à 10 UT uniquement	6,13 m	5,77 m	6,37 m	8,20 m	7,98 m	8,33 m
Estimation de la vitesse moyenne de transfert du tritium / centre de masse (m.an ⁻¹)	7,42 m	6,39 m	6,52m	8,88 m	8,94 m	9,61 m
	0,16 - 0,19	0,15 - 0,16	0,16 - 0,17	0,21 - 0,23	0,20 - 0,23	0,21 - 0,25

Illustration 71 : Comparaison des données tritium pour les parcelles LA et V83

L'apport de la modélisation (utilisation du modèle Agriflux pour estimer les flux d'eau et de solutés au-delà d'une profondeur de 1 mètre, couplé à un modèle simple de convection, Baran *et al.*, 2005) appliquée au cas de LA a permis, après calage hydrodynamique, d'affiner les estimations des vitesses de transfert, notamment sur des périodes de temps spécifiques. **L'illustration 72** montre les vitesses moyennes d'infiltration calculées par le modèle sur différentes périodes de temps et en considérant les hypothèses de deux valeurs plausibles de porosité efficace (Baran *et al.*, 2005). Pour une valeur de porosité efficace donnée, par exemple 0,20 cm³.cm⁻³, la vitesse moyenne varie presque d'un facteur 3 de 0,16 à 0,42 m/an, suivant les années considérées. Cette variabilité reflète la variabilité de la recharge en eau au cours des années, influencée essentiellement par les types de culture en place et leurs besoins en eau (le modèle tel qu'il a été utilisé dans le cas présent n'intègre pas la variabilité inter annuelle pluviométrique). Les valeurs moyennes déterminées à partir des positions des pics de tritium (détail au paragraphe précédent - **Illustration 71**) doivent être comparées à celles, calculées par les modèles, qui figurent dans la ligne concernant la période 1963 - 2002 et sont tout à fait similaires.

période	vitesse moyenne (m.an ⁻¹) Porosité cinématique : 0,20cm ³ .cm ⁻³		vitesse moyenne (m.an ⁻¹) Porosité cinématique : 0,17 cm ³ .cm ⁻³	
	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
1951-2002	0,27	0,15	0,31	0,17
1951-1972	0,42	0,06	0,50	0,07
1963-2002	0,22	0,13	0,26	0,16
1972-2002	0,16	0,07	0,19	0,08
1990-2002	0,16	0,06	0,19	0,07

Illustration 72 : Estimation à l'aide de la modélisation de la vitesse de transfert moyenne annuelle sur différentes périodes de temps et en fonction de 2 valeurs de porosité cinématique dans le cas de la modalité LA

L'observation détaillée des profils atmosphériques de tritium (données non montrées, IAEA citée par Baran *et al.* 2005) révèle un pic secondaire de tritium en 1975. Ce dernier est extrêmement bref (moins d'un mois) et présente une intensité 3 à 4 fois inférieure à celle du pic de 1963. Les deux hypothèses concernant l'origine du pic observé dans les carottages de l'étude pourraient être mentionnées. Néanmoins, en l'absence de connaissance du signal d'entrée exact à Obernai, l'hypothèse retenue de 1963 offre une très bonne concordance entre les vitesses de transfert des nitrates et du tritium, voisines de 20 cm / an.

2) Référentiel de datation par rapport aux nitrates

Le référentiel de datation lié aux nitrates correspond à l'arrêt de la fertilisation des parcelles lors de l'installation du verger VEREXAL et la mise en culture de la parcelle LA. Pour les modalités situées sur le verger, l'allure théorique attendue de la courbe de distribution a une forme de plateau, dont le point d'inflexion a été considéré comme correspondant à la date du dernier apport de fertilisant.

a) Cas de la modalité V95

Le dernier apport de fertilisant sur la modalité V95 a été fixé à juin 1994, correspondant à une durée de migration de 8 années. **L'illustration 73** présente la profondeur des points d'inflexion des courbes de concentration en nitrates et les vitesses apparentes de migration. Ces résultats ne semblent pas confirmer l'hypothèse de vitesses d'infiltration moins élevées dans les modalités V83 et V95, liées à la mise en place du verger, que dans le cas de

LA. La vitesse est ici estimée à partir d'un temps de migration de 8 années, soit une période 5 fois plus courte que celle du tritium.

	Position du point d'inflexion (profondeur en m)	Vitesse de migration moyenne (m.an^{-1})
V95-A	3,30	0,41
V95-B	3,00	0,38
V95-C	2,80	0,35

Illustration 73 : Estimation de la vitesse moyenne de migration des nitrates - cas de V95

b) Cas de la modalité V83

Les profils des trois répétitions de la modalité V83 ne sont pas superposables. V83 a manifestement été le siège d'un phénomène de forte intensité ayant entraîné une quantité importante d'azote au droit ou à proximité immédiate de V83. Le fait qu'un pic symétrique à celui observé sur V83-A soit présent, mais de façon très atténuée sur V83-B, puis absent sur V83-C a démontré d'une part que les transferts latéraux sont négligeables et d'autre part que le phénomène à la source du pic sur V83-A a dû être très localisé.

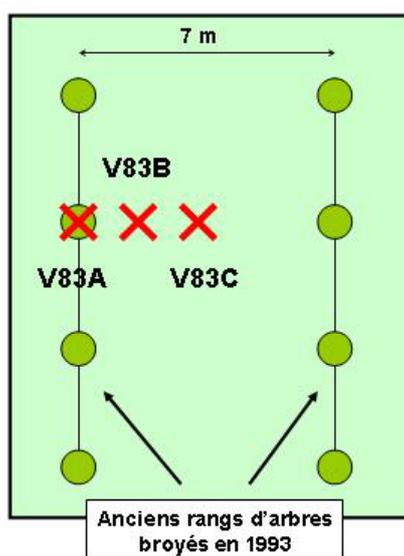


Illustration 74 : Situation des carottages V83-A, V83-B et V83-C par rapport aux emplacements d'anciens cerisiers arrachés en 1993.

Un examen approfondi de l'histoire de la parcelle V83 a été entrepris. La placette expérimentale V83, enherbée au moment des opérations de carottage, a été plantée de

cerisiers en 1983. En 1993, ces arbres ont atteint des gabarits importants (\varnothing 15-25 cm), et ils ont été arrachés et la parcelle a été dessouchée. Une grande partie du gros bois a été exportée à cette occasion tandis que les petits bois, les souches et le reste de gros bois ont été broyés et enfouis sur place. Aux points de dessouchage, les horizons supérieurs (jusqu'à 60-80 cm) ont été perturbés. A partir de quelques cerisiers reliques de ces plantations, l'implantation de ces anciens cerisiers a pu être établie avec une précision proche de 0,3 mètre. Il s'est avéré, comme cela est représenté sur ***l'illustration 74***, que V83-A est situé exactement à l'emplacement d'un ancien cerisier, arraché et broyé sur place. Ceci a également été confirmé à partir de photographies aériennes (résultats non présentés).

L'emplacement de V83-A a donc été perturbé par le dessouchage d'un cerisier adulte. Le trou de dessouchage ainsi généré, aurait atteint près de 0,80 mètre de profondeur et il aurait été comblé avec de grosses quantités de broyat des petits bois et feuillages et avec de la terre de surface. Les activités microbiennes de ces types de sols étant très élevées, la minéralisation de ces substrats a produit une grande quantité d'azote minéral disponible pour la lixiviation et qui aurait été détecté lors de l'analyse des échantillons de V83-A. Il est à noter que le fait qu'aucun résidu ligneux n'ait été détecté lors de la manipulation et du conditionnement des échantillons de sol concernés confirme l'intensité et l'efficacité de l'activité biologique. Lors de la recherche de résidus phytosanitaires dans les échantillons de V83-A, Portal *et al.*, (2004) ont signalé la présence notable de vanilline dans ces extraits organiques. Cette substance est notamment décrite pour être issue d'une voie de biodégradation de la lignine.

L'examen détaillé des trois répétitions des profils de V83 montre la présence presque symétrique, de ce qui pourrait être un pic de la même intensité que celui détecté sous V95 (environ 88 à 98 mg NO₃⁻/l), à une profondeur comprise entre 7,80 et 8,10 mètres. Ceci est vraisemblablement la trace des derniers apports de fertilisant sur la modalité V83.

	Position du point d'inflexion (profondeur en m)	Vitesse de migration moyenne (m.an ⁻¹)
V83-A	7,40	0,37
V83-B	7,20	0,36
V83-C	7,60	0,38

Illustration 75 : Estimation de la vitesse moyenne de migration des nitrates - cas de V83

Le dernier apport de fertilisant sur la modalité V83 a été fixé à juin 1982, correspondant à une durée de migration de 20 années. *L'illustration 75* présente la profondeur des points d'inflexion des courbes de concentration en nitrates et les vitesses apparentes de migration. Ces résultats ne semblent pas confirmer l'hypothèse de vitesses d'infiltration moins élevées dans les modalités V83 et V95, liées à la mise en place du verger, que dans le cas de LA. La vitesse est ici estimée à partir d'un temps de migration de 20 années, soit 2 fois plus court que celui du tritium.

Les cas de V83 et V95 doivent être affinés au regard des résultats nitrates. En effet, on peut imaginer que leurs premiers horizons aient une plus forte perméabilité que LA, donnant l'impression que la vitesse de transfert est plus rapide. Mais si les horizons sous jacents présentent une perméabilité plus faible que LA, la vitesse y sera également plus faible. Donc comme les signaux comparés (tritium, nitrates) n'ont pas été appliqués au même moment, les temps de migration sont différents et la comparaison de vitesses moyennes pourrait expliquer ce paradoxe apparent.

c) Cas de la modalité LA

Outre son année de mise en culture, il n'y a pas d'événement marquant qui puisse servir de repère de datation dans l'historique de LA. Les profils observés ont été examinés par Baran *et al.* (2005) dans le cadre de l'application à l'historique des pratiques culturales d'un modèle de migration des nitrates. Le calage hydrodynamique du modèle a été basé sur les données tritium observées sur LA. Différentes simulations ont été réalisées de manière à s'ajuster aux profils des nitrates : en effet, certains paramètres n'étaient pas parfaitement connus, comme les dates ou doses d'application des fertilisants certaines années, laissant ainsi une certaine latitude au modélisateur. Le pic de nitrate le plus profond semble lié à la mise en culture de la parcelle (en 1972), auparavant exploitée en pâture pendant au moins une vingtaine d'années (1950 à 1972) et à la succession culturale pratiquée durant les années 1972 à 1988. Le pic le plus superficiel pourrait être lié à la fertilisation et la succession culturale rencontrée dans les années 90.

Les apports supplémentaires d'azote de 1972 et 1973 introduits dans le modèle par rapport aux données fournies par le lycée agricole sont attribués à la mise en culture (effet

"retournement de prairie" de pâtures et apport d'azote). Ils conduisent à l'infiltration d'une eau relativement chargée en nitrate entre 1973 et 1978 par rapport à la période 1978-1988 pour laquelle la même succession culturale (betteraves/blé) avec les mêmes apports d'azote liés à la culture sont considérés. L'effet d'un apport « massif » d'azote a donc des répercussions sur plusieurs années. De la même façon, les pratiques culturales et les fertilisations plus importantes que la moyenne en 1991 et 1993, semblent conduire à la création du deuxième pic de nitrate.

En considérant la position du pic le plus profond comme coïncidant au retournement des pâtures en 1972, on peut estimer les vitesses moyennes de transfert des nitrates dans ce contexte (*Illustration 76*). Ces valeurs semblent tout à fait comparables à celles déterminées pour les transferts de tritium (*Illustration 71*) ainsi qu'aux résultats de la modélisation (*Illustration 72*).

	Position du pic de nitrate le plus ancien (en m)	Vitesse de migration moyenne (m.an ⁻¹)
LA-A	5,00	0,17
LA-B	4,80	0,16
LA-C	4,60	0,15

Illustration 76 : Estimation de la vitesse moyenne de migration des nitrates dans le cas de LA

D) Qualité de l'eau infiltrée

1) Le cas des concentrations en nitrates

Le cas de la répétition V83-A étant vraisemblablement lié à un événement ponctuel local n'ayant pas de signification à une échelle géographique, il ne sera pas intégré.

Dans le cas des modalités situées sur le verger VEREXAL, les teneurs en nitrates dans les sols sous jacents culminent ponctuellement entre 110 mg NO₃⁻/l (V95) et 124 mg NO₃⁻/l (V83). Les trois premiers mètres du sol de V95 ou de V83 présentent des teneurs en nitrates inférieures à 18 mg NO₃⁻/l. L'impact des pratiques culturales antérieures à la mise en place du

verger, semble visible dans la partie plus profonde du profil, et se situe aux alentours de 88 à 110 mg NO₃⁻/l.

Dans le cas de la modalité LA située sur une parcelle agricole exploitée, le pic de nitrates le plus profond (entre 150 et 190 mg NO₃⁻/l) est attribué à la mise en culture de la parcelle, dans les années 70, et à l'effet "retournement de prairie" qui a vraisemblablement engendré à l'époque "déstockage" important d'azote. Le pic le plus récent, aux alentours de 155 mg NO₃⁻/l, serait dû essentiellement aux pratiques agricoles entre 1989 et 1992 (type de cultures, fertilisation).

2) Les résidus phytosanitaires

Le lindane n'a pas été détecté dans les échantillons analysés. Il est vraisemblable que ce produit, très peu mobile car très fortement adsorbé au complexe argilo humique, soit resté bloqué dans les horizons supérieurs. De plus, les applications de ce produit sur les parcelles d'étude ont probablement été trop épisodiques pour permettre une détection dans le sol. En outre, ce produit présente des difficultés analytiques importantes (volatilité et rendement d'extraction faible).

Les résultats des analyses des autres résidus phytosanitaires considérés (atrazine, DEA) indiquent que leur accumulation se produit surtout au niveau des horizons supérieurs, plus riches en matière organique. Ces résultats sont en adéquation avec la littérature scientifique sur ce sujet. La présence de certains résidus à des horizons plus profonds est par contre plus difficile à interpréter, notamment quand ils ne sont mis en évidence que dans une seule répétition sur trois (cas de LA-B ou de V83-A).

A la différence des nitrates, le comportement des résidus phytosanitaires est très lié au complexe argilo humique des sols, générant donc en fonction des micro conditions du sol des dynamiques d'adsorption / désorption vers l'eau interstitielle. C'est pourquoi, dans ce cas, la conversion des concentrations par rapport aux masses de sol sec en concentration par rapport à la solution du sol n'est pas envisageable car elle ne refléterait pas la réalité du comportement de ces produits.

De même, en l'absence de connaissance des pratiques d'utilisation de l'atrazine avant la mise en verger de V83 et de V95, aucune vitesse de transfert ne peut être proposée.

V.- CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La plaine d'Obernai est un secteur où la présence d'une couverture de loess profond confère une grande qualité et de bons potentiels aux terres agricoles. La Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin a initié ce projet destiné à apprécier la vitesse de transfert de l'eau et des solutés (nitrates, résidus phytosanitaires) dans la zone non saturée représentée par ces loess épais. En considération des épaisseurs de loess étudiées ici, entre 7 et 13 mètres, l'approximation a été faite de ne pas différencier les vitesses de transfert dans les 20 à 50 premiers centimètres du sol, ou les transferts sont vraisemblablement plus rapides du fait de la nature décompactée de ces horizons, de celles observées dans le reste de la zone non saturée. Trois modalités ayant des historiques cultureux contrastés (grandes cultures, grandes cultures puis mise en verger en 1983 et 1995) ont servi de support au dispositif d'étude. Les différentes modalités, distantes de moins d'un kilomètre entre elles, ont chacune fait l'objet de trois carottages (distants respectivement de 1,5 mètre). Les échantillons de sol ont été recueillis environ tous les 10 cm et ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques (granulométrie, carbone et azote organique, nitrate, teneurs en atrazine et DEA, teneur en eau...). Parallèlement des dosages de l'activité tritium ont été effectués pour environ 250 échantillons. Un pic de tritium, symétrique, attribué à une injection en 1963, a été détecté dans les trois répétitions de la modalité LA entre 8 et 9 mètres de profondeur, témoignant d'une infiltration lente et homogène dans cette parcelle. Le transfert vertical semble dominant et les transports latéraux négligeables dans ce type de matériau.

De la même façon, les trois répétitions de la modalité V83 montrent un pic de tritium symétrique entre 6 et 8 mètres. Comme pour la parcelle LA, une infiltration lente, suivant les lois de convection-dispersion semble être le processus dominant bien que d'éventuels flux préférentiels ne puissent être totalement écartés.

La position plus superficielle de ce pic de tritium pour V83 par rapport à LA pourrait être liée à une différence de texture entre les deux parcelles, influençant les vitesses de transfert, ou à un effet occupation du sol. En effet, il est possible que la mise en place du verger à partir de 1983 ait contribué à diminuer l'infiltration dans la parcelle V83 par rapport à LA, alors que les conditions climatiques sont identiques. Concernant les résultats des analyses nitrates, la position sur la courbe de distribution du point correspondant à l'arrêt de la

fertilisation lors de la mise en place du verger en 1983 permet d'estimer une vitesse apparente de migration des nitrates située aux alentours de 0,40 à 0,50 m.an⁻¹. Il est à noter que le cas de V83-A est lié à des circonstances particulières et qu'il ne peut donc pas être interprété de la même façon.

Les mesures effectuées sur la parcelle V95, n'ont pas permis de mettre en évidence de manière claire un pic tritium. La profondeur des carottages, plus courts, a limité le champ des observations. La position, sur la courbe de distribution des nitrates, du point correspondant à l'arrêt de la fertilisation lors de la mise en place du verger en 1995 permet d'estimer une vitesse apparente de migration des nitrates voisine de 0,50 m.an⁻¹.

La modalité LA correspond aux carottages les plus profonds, dans lequel le pic de tritium est parfaitement décrit. De plus, pour cette parcelle, deux pics de nitrate (voisins de 170 mg NO₃/l) sont bien distincts et identifiés. Enfin, la succession culturale est bien connue et dans une moindre mesure les pratiques culturales depuis 1972. Ces trois raisons ont conduit à retenir cette parcelle pour l'exercice de modélisation. LA a donc fait l'objet d'essais de modélisation concernant essentiellement le transfert du tritium (et donc de l'eau), des nitrates, et, dans une moindre mesure, des phytosanitaires. Le calage hydrodynamique effectué via la modélisation du transfert du tritium conduit à supposer que seule une fraction de la porosité participe à l'écoulement. Une porosité efficace de 0,20 cm³.cm⁻³ (pour une porosité totale considérée de 0,43 cm³.cm⁻³) permet d'obtenir des résultats comparables aux données observées. Cette valeur de porosité efficace est conforme aux données de la littérature pour ce type de matériau. Les simulations réalisées pour les nitrates donnent des positions de pic très proches des données observées (Baran *et al.*, 2005) en admettant que la mise en culture de la parcelle du lycée agricole ait conduit à un apport important d'azote (effet "retournement de prairie").

La vitesse annuelle d'infiltration fluctue fortement au cours du temps (moyennes de 0,42 et 0,16 m.an⁻¹ pour les périodes 1951-1972 et 1972-2002 respectivement), traduisant vraisemblablement un effet important des cultures en place, d'autant mieux mis en évidence que le modèle a été utilisé avec des précipitations moyennes et non pas mesurées.

Le double calage des données tritium et nitrates lors de la modélisation permet de valider la démarche retenue pour la modélisation du transfert de l'eau et des solutés et les valeurs attribuées à chaque paramètre. Une vitesse annuelle de transfert a ainsi été calculée,

dont la forte variabilité est à rattacher à la culture en place (période de développement, enracinement). Cette vitesse reste toutefois faible et de l'ordre de quelques décimètres par an.

Le cas de la modalité LA, sur la parcelle du lycée agricole, a montré que les flux de nitrate simulés fluctuent au cours du temps en fonction des cultures en place et de leur fertilisation (dates et doses d'apport des fertilisants notamment) ainsi que des cultures suivantes. Les concentrations en nitrate calculées ou constatées dans le profil LA marquent de fortes variations, oscillant entre 5 et 190 mg NO₃⁻/l : deux importants pics consécutifs sont présents à environ 2 et 5 mètres de profondeurs respectivement. Ces pics de concentrations sont en transit vers la nappe. En admettant, dans le cas de LA, que la nappe se trouve à 15 m de profondeur, si on considère que les teneurs en nitrate observées dans la zone non saturée augmentent, en partant du bas du profil, vers 9 mètres (pic le plus profond) et que la vitesse moyenne de transfert est de 0,20 mètre par an, cela signifie que les nitrates migrant verticalement dans ce matériau suivant le processus de convection-dispersion atteindront la nappe en 45 ans. Les temps de réponse de l'aquifère, consécutivement à des modifications de pratique en surface, sont, dans le cas étudié, particulièrement longs.

L'**illustration 77** récapitule les principaux résultats concernant les vitesses de transfert obtenus lors de cette étude en fonction des différentes méthodes de datation utilisées.

modalité	vitesse de transfert du tritium mesurée (m.an ⁻¹)	vitesse de transfert des nitrates mesurée (m.an ⁻¹)	vitesse de transfert modélisées entre 1972-2002 (m.an ⁻¹) *
LA	0,20 - 0,25	0,15 - 0,17	0,16 - 0,19
V83	0,15 - 0,19	0,36 - 0,38	-
V95	-	0,35 - 0,41	-

Illustration 77 : Récapitulatif des vitesses moyennes de transfert obtenues selon les méthodes de datation choisies. Pluviométrie annuelle moyenne : 620 mm ; somme des ETP mensuelles moyennes : 722 mm. * : *valeurs calculées à partir de pluies théoriques*

Les travaux présentés ici se sont intéressés à un secteur d'étude bien déterminé, mais d'autres sources d'apport pourraient aussi être envisagées localement. Bien que le transport semble majoritairement vertical et matriciel dans ces loëss, une fraction de l'eau d'infiltration pourrait circuler à la faveur d'écoulements préférentiels et atteindre plus rapidement la nappe. Des apports latéraux proches, via la zone saturée ou les parties sableuses de la zone non saturée non étudiées ici, ou plus lointains pourraient également avoir un rôle dans le secteur.

VI.- BIBLIOGRAPHIE

BARAN N., BOURGEOIS M., FLEHOC C. and NORMAND B., 2005. Détermination de la vitesse de transfert de l'eau, des nitrates et autres solutés en zone non saturée dans un substrat de loess profond. Rap. BRGM/RP-53440-FR, 85p, 46 ill.

DELPHIN J.E. and SCHENK C., 1996. Observation de longue durée, *in situ*, des principaux paramètres intervenant dans le transfert de l'eau et des nitrates dans les sols cultivés en Alsace. Rap. INRA - Laboratoire Agronomie Colmar, 28p

GVRITZMAN H., RONEN D. and MARGARITZ M., 1986. Anion exclusion during transport through the unsaturated zone, J. of Hydrology 87:267-283

JOSHI B., MAULE C. and DE JONG E., 1997. Subsurface hydrologic regime and estimation of diffuse soil water flux in a semi arid region, EJGE vol 2

LEBRETON A., SAUTER J., BURTIN M.L. and KOLLER R., 1999. Guide des sols d'Alsace : petite région naturelle Piémont Bas-Rhinois. Région Alsace Ed. 147p

MENILLET F., 1995. Les formations superficielles des Vosges et de l'Alsace. Identification, potentialités, contraintes. Rap. BRGM R-38640

NORMAND B., CZERNICHOWSKI-LAURIOL I. and MOUVET C., 1999. Programme régional expérimental de suivi de la qualité des eaux sur trois bassins versants de Picardie faisant l'objet de MAE réductions d'intrant. Suivi de la nappe et de la zone non saturée dans le bassin de l'Hallue (Somme). Rap. BRGM R40616, 321p, 112 ill.

PORTAL J.M., PERRIN-GANIER C., CARIGNAN J. and SCHIAVON M., 2004. Variation des paramètres chimiques carbone, azote et pesticides, de la surface à la nappe, dans un loess profond d'Alsace. Rapport d'étude ENSAIA-INPL/INRA et CRPG/CNRS. 22p

ROSS P. and BUARD C., 1987. Compte rendu de fin de travaux de forage et des pompages d'essai sur le site de VEREXAL. Rap. SGRA/BRGM 12p