

SR
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
Service de la Recherche des Études
et du Traitement de l'Information
sur l'Environnement
Comité « Sols et déchets solides »

BUREAU DE RECHERCHES
GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
Service Géologique National

p. 150
2

CONTRIBUTION AU SUIVI SUR TERRAINS EXPÉRIMENTAUX DE LA MIGRATION D'HYDROCARBURES DANS LA ZONE NON-SATURÉE TRANSFERTS VERS LA NAPPE

(Contrat n° 83.013)



SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Département EAU

Rapport du B.R.G.M.

85 SGN 093 EAU

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
Service de la Recherche des Études
et du Traitement de l'Information
sur l'Environnement
Comité « Sols et déchets solides »
14, Boulevard du Maréchal Leclerc
92524 NEUILLY-SUR-SEINE CEDEX

BUREAU DE RECHERCHES
GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
Service Géologique National
B.P. 6009
45060 ORLÉANS CEDEX
Tél.: (16-38) 64.34.34

CONTRIBUTION AU SUIVI SUR TERRAINS EXPÉRIMENTAUX

DE LA MIGRATION D'HYDROCARBURES

DANS LA ZONE NON-SATURÉE

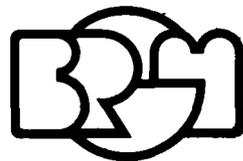
TRANSFERTS VERS LA NAPPE

(Contrat n° 83.013)

par

M. BARRÈS et M. SAUTER

avec la collaboration de G. BROSSIER



SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Département EAU

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (16-38) 64.34.34

Rapport du B.R.G.M.

85 SGN 093 EAU

Septembre 1984

R É S U M É

Dans le but de contribuer à l'étude de la migration d'hydrocarbures dans la zone non-saturée, le BRGM a réalisé, avec le concours du Ministère de l'Environnement (Comité Sol-Déchet), un épandage de gazole (PW3D) sur une parcelle expérimentale de 9 m².

La migration de l'hydrocarbure a été suivie par des prélèvements d'eau et de terrain et les transferts d'eau ont été étudiés par les moyens d'investigations habituels du milieu non saturé (tensiomètres, sonde d'humidité neutronique).

La rétention dans les premiers centimètres du sol d'une partie de l'hydrocarbure épandu protège le sol de l'évaporation, augmente sa capacité de rétention en eau et favorise l'infiltration de l'eau en profondeur.

S O M M A I R E

| | page |
|---|------|
| 1. <u>INTRODUCTION</u> | 1 |
| 2. <u>LE SITE EXPERIMENTAL</u> | 2 |
| 2.1. Emplacement et configuration | 2 |
| 2.2. Géologie et hydrogéologie | 2 |
| 3. <u>LES TRAVAUX REALISES</u> | 5 |
| 3.1. Equipement complémentaire du site | 5 |
| 3.2. Réalisation de l'épandage | 7 |
| 3.3. Mesures et prélèvements | 7 |
| 4. <u>VARIATIONS PIEZOMETRIQUES ET SENS D'ECOULEMENT</u> | 8 |
| 5. <u>SUIVI DES TRANSFERTS D'EAU DANS LA ZONE NON SATUREE</u> | 11 |
| 5.1. Pluviométrie | 11 |
| 5.2. Humidité neutronique | 12 |
| 5.3. Mesures tensiométriques | 17 |
| 6. <u>SUIVI DE LA MIGRATION DES HYDROCARBURES</u> | 19 |
| 6.1. Prélèvements de terrain | 19 |
| 6.2. Prélèvements d'eau dans les bougies poreuses | 22 |
| 6.3. Prélèvements d'eau dans les piézomètres | 23 |
| 6.4. Remarques sur le suivi de la migration des hydrocarbures | 25 |
| 7. <u>CONCLUSION GENERALE</u> | 27 |

1. INTRODUCTION

Dans le domaine des effluents et déchets pétroliers qu'il s'agisse de projets d'épandage (land farming) ou d'opérations de nettoyage suite à des accidents, deux facteurs semblent particulièrement importants :

- *la capacité de fixation d'un sol,*
- *le transfert, la vitesse du polluant en fonction des types de sol, de la coupe d'hydrocarbures et de la charge du polluant.*

La maîtrise de ces facteurs peut être considérée comme indispensable car :

- a) dans le land farming, la biodégradation étant un phénomène se développant en aérobiose, donc en surface, il est primordial de pouvoir calculer les limites de charge en polluant compatibles avec une optimisation du procédé,
- b) dans le cas de pollution, elle permet de déterminer les opérations à réaliser.

(Récupération des produits non infiltrés, enlèvement ou non des sols non imprégnés, traitement favorisant la biodégradation in situ...).

Pour répondre aux préoccupations du Ministère de l'Environnement et plus précisément à un des objectifs principaux du programme de recherche (quantification précise des termes des bilans) le BRGM s'est associé aux expérimentations en plein champ et a apporté son concours pour l'étude et le suivi de la migration des hydrocarbures dans le milieu non saturé.

2. LE SITE EXPERIMENTAL

Pour cette étude, le BRGM disposait d'un site déjà partiellement équipé, à Balloy (77) près de Montereau.

2.1. Emplacement et configuration

Le terrain appartenant au BRGM se compose de deux parcelles séparées par un chemin rural, l'une d'une superficie d'environ 2 hectares, l'autre d'environ 65 ares (voir figure 1).

Mis à part les quelques mètres carrés nécessaires aux expérimentations, l'ensemble de ces parcelles est mis en culture.

Un certain nombre d'équipements avait été implanté sur ce terrain en 1965 lors d'une prospection des ressources en eaux souterraines de la région parisienne.

L'équipement initial comprenait :

- un puits profond de 15 mètres en 850 mm de diamètre,
- en amont hydraulique une batterie de 3 lignes de 10 piézomètres au total, de diamètre 100 mm et de profondeur variant entre 3 et 4 mètres.

2.2. Géologie et hydrogéologie

Le site expérimental se trouve sur les alluvions de la Seine composées à cet endroit de sables et de graviers sur une épaisseur d'environ 6 mètres. Ces alluvions reposent directement sur la craie. Le niveau piézométrique se situe à environ 2 m sous la surface du sol et il y a continuité entre la nappe des alluvions et celle de la craie.

Des essais de pompage ont permis de déterminer une perméabilité des alluvions d'environ $1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Les analyses d'eau réalisées sur les piézomètres et le puits en février 1983 indiquent une eau bicarbonatée calcique avec les fourchettes de concentration suivantes (en mg/l) :

SITE EXPERIMENTAL DE BALLOY - Extrait du plan cadastral à 1/2000e

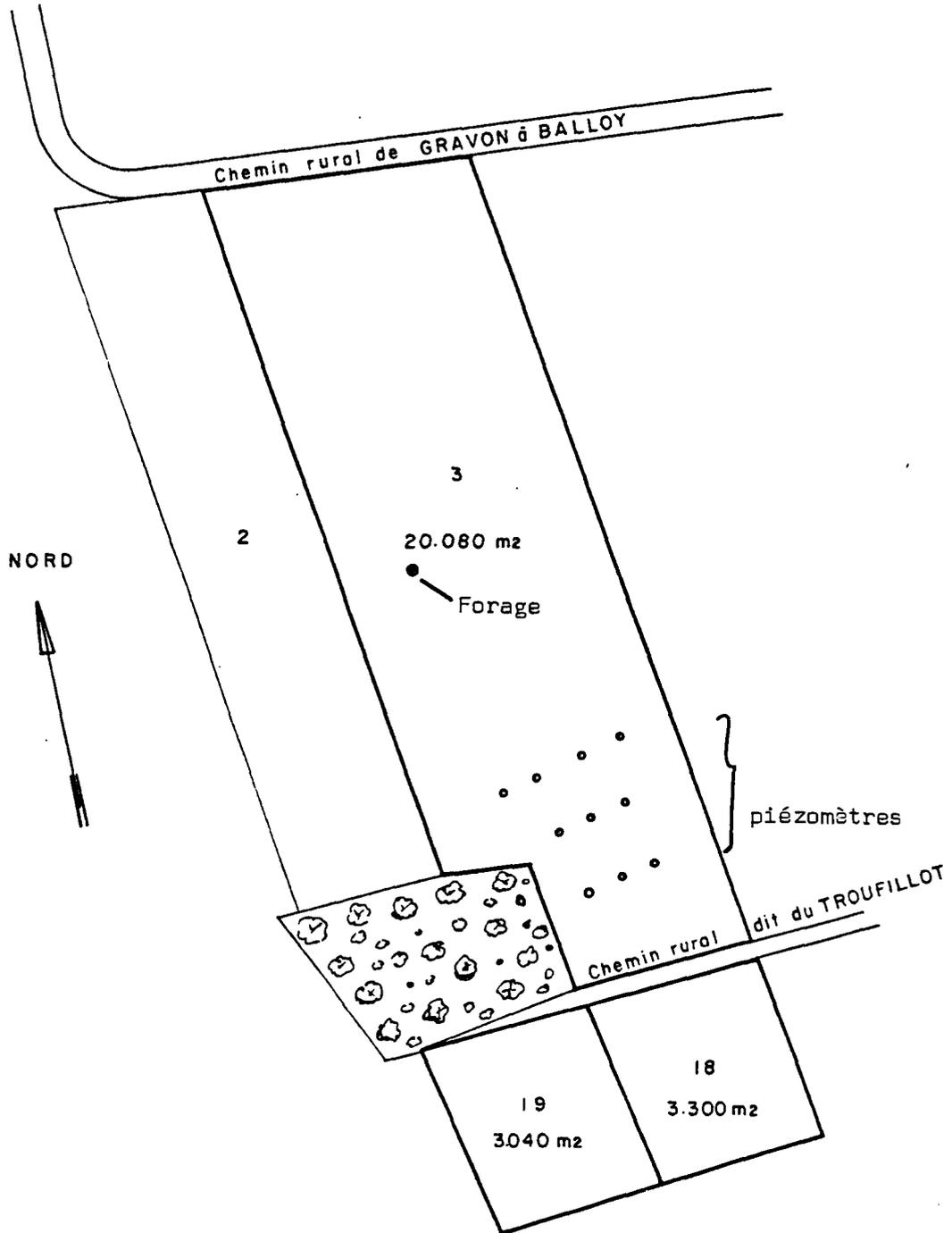


Figure 1

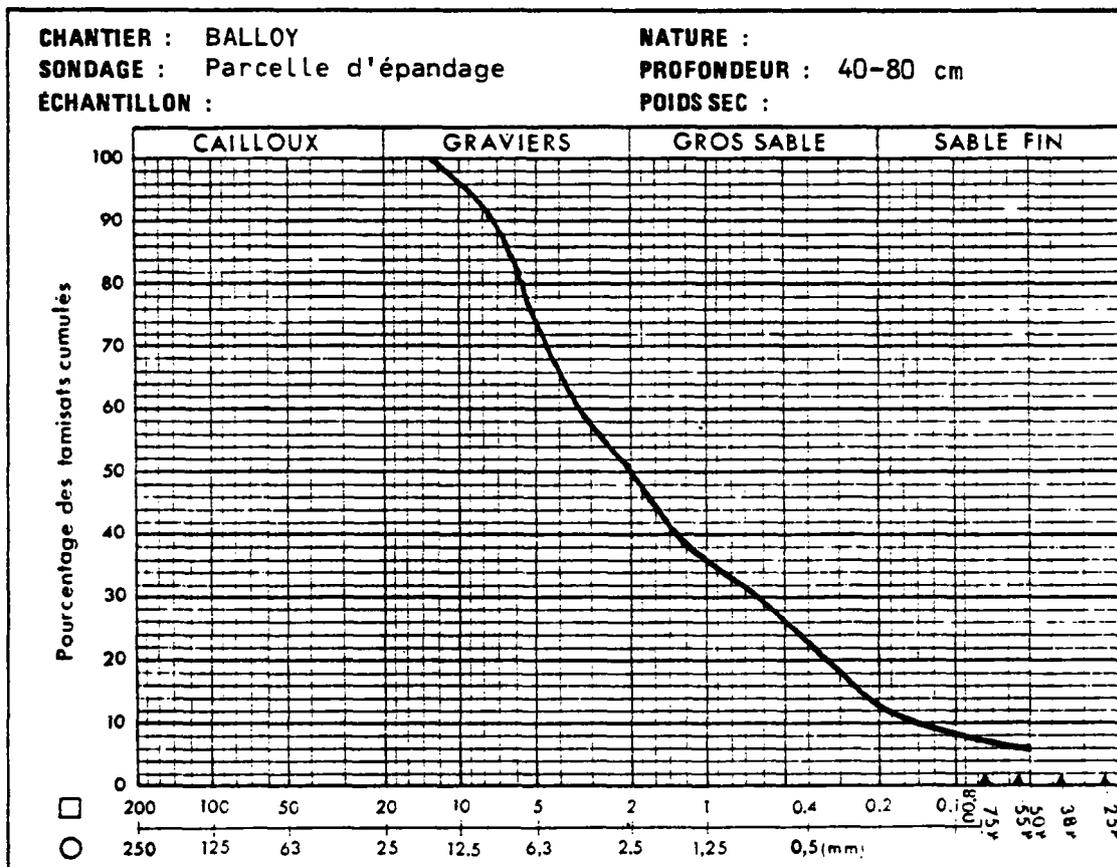
| | |
|---|----------------|
| HCO ₃ ⁻ : 228 - 247 | Ca : 96 - 110 |
| Cl ⁻ : 14,4 - 18,6 | Mg : 1,7 - 1,9 |
| SO ₄ ⁼ : 9 - 13 | Na : 4,7 - 5,2 |
| NO ₃ ⁻ : 48 - 79 | K : 0,3 - 0,9 |

Tableau 1 - Concentrations de l'eau de la nappe

Une analyse granulométrique a été réalisée sur un échantillon prélevé à l'emplacement de la parcelle d'épandage entre 40 et 80 cm de profondeur (voir figure 2). La courbe obtenue montre que le terrain est constitué de sables grossiers et de graviers avec 50 % des grains de diamètre supérieur à 2 mm et 6 % inférieur à 50 µm.

L'épaisseur du sol végétal est de 20 cm.

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE



3. LES TRAVAUX REALISES

3.1. Equipement complémentaire du site

Le site a été équipé au cours du 1er semestre 1983 de deux parcelles situées à l'amont des piézomètres, une parcelle d'épandage et une parcelle témoin, chacune de 3 m x 3 m (voir figure 3).

Les moyens d'investigation suivants ont été mis en place sur chacune des deux parcelles :

- une série de tensiomètres à 20, 40, 60, 80 et 120 cm de profondeur,
- un tube d'accès pour une sonde d'humidité neutronique

La mesure du potentiel de l'eau et de l'humidité volumique permet de suivre les transferts de l'eau dans la zone non saturée et de mettre en évidence les modifications introduites par l'épandage d'huile.

- des bougies poreuses pour prélever l'eau interstitielle.

Les profondeurs d'implantations dans le terrain sont 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125 et 150 cm pour la parcelle d'épandage et 10, 20, 30, 50, 100 cm pour la parcelle témoin.

Toutefois, il n'était pas certain que les bougies poreuses habituellement utilisées pour l'étude de la migration des eaux dans la zone non saturée soient bien adaptées au suivi de l'infiltration d'hydrocarbures, c'est pourquoi il a été prévu en outre des prélèvements de terrain.

La situation précise des parcelles expérimentales et des piézomètres est donnée sur la figure 3.

Sur cette figure, sont reportées les cotes approchées du sol, cotes qui varient légèrement dans le temps en raison des labours successifs.

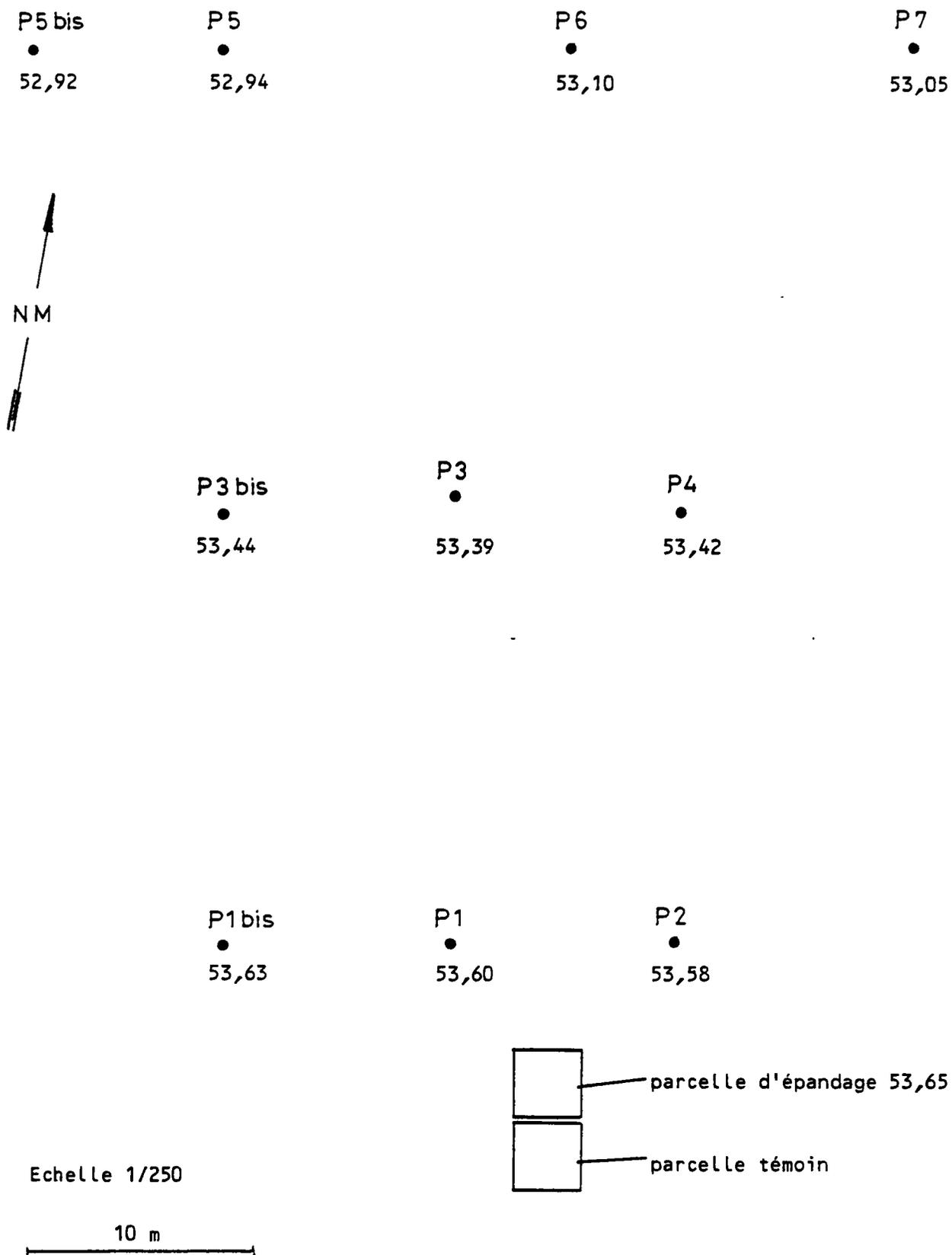


Figure 3 - Site expérimental de Balloy - Localisation des équipements et cotes NGF au sol

3.2. Réalisation de l'épandage

La dénomination de l'hydrocarbure épandu est Hydrosol PW3D. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

| | | |
|----------------------------|---|--------|
| - masse volumique 15°C | : | 0,865 |
| - distillation ASTM PI | : | 260 |
| PF | : | 325 |
| - Alcanes % vol | : | 57 |
| - Cycloalcanes % vol | : | 25 |
| - aromatiques totaux % vol | : | 18 |
| - teneur en soufre mg/kg | : | 15 000 |
| - viscosité à 20°C cst | : | 5,5 |
| - point de congélation °C | : | -9 |

Ces caractéristiques le placent dans la catégorie des gazoles.

Un essai d'évaporation en laboratoire à température ambiante et à l'air libre a donné une quantité évaporée des 33 mg sur 4,948 g en 18 jours.

La quantité d'hydrocarbure épandue a été de 2,77 kg/m². L'épandage a été réalisé le 25 août 1983 par arrosage sur une parcelle quadrillée de 9 m² à raison de 800 ml/0,25 m².

Les deux parcelles ont été désherbées et on a pu constater qu'aucune végétation ne s'est développée sur la parcelle d'épandage après 18 mois.

Le centre de la parcelle témoin a été désherbé régulièrement afin de rendre comparables les mesures du bilan de l'eau.

3.3. Mesures et prélèvements

Trois types d'investigations ont été menés :

- les variations de niveau de la nappe à l'aide des mesures piézométriques,
- l'étude des transferts d'eau dans la zone non saturée au moyen des tensiomètres et de la sonde d'humidité neutronique,
- le suivi de la migration des hydrocarbures par prélèvement d'eau dans les bougies poreuses et dans les piézomètres et prélèvement de terrain au droit de la parcelle d'épandage.

4. VARIATIONS PIEZOMETRIQUES ET SENS D'ECOULEMENT

Lorsqu'il existe une lentille d'huile à la surface de l'eau de la nappe, les variations de niveau de cette dernière mettent en contact l'huile avec des zones de sol qui ne l'étaient pas et diminuent le volume libre d'huile par rétention dans la zone de battement.

Sur la figure 4 sont reportées les variations piézométriques observées au piézomètre P1. Le niveau piézométrique maximum a été atteint en avril 1983 d'après les témoignages oraux recueillis. En effet, en raison de pluies très importantes, la nappe a dépassé à cette date la cote du sol au niveau d'une petite dépression située vers le centre du terrain expérimental.

Au droit du piézomètre P₁ la profondeur de la nappe a varié sur deux ans entre 1 m et 2,60 m.

Une autre donnée importante est le sens d'écoulement de la nappe. Un nivellement des piézomètres entre eux a permis de déterminer que l'écoulement est dirigé vers le N-NW.

A titre d'exemple, les courbes piézométriques sont données sur la figure 5 pour les cotes extrêmes observées.

Le gradient de la nappe est variable. Il est de 3,5 ‰ en période de hautes eaux et de 1,3 ‰ en période de basses eaux.

Si on retient comme hypothèse pour les alluvions, une perméabilité de $1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s et une porosité cinématique de 0,20 cela correspond respectivement à des vitesses d'écoulement moyennes pour l'eau de 2,3 m/j et de 0,9 m/j.

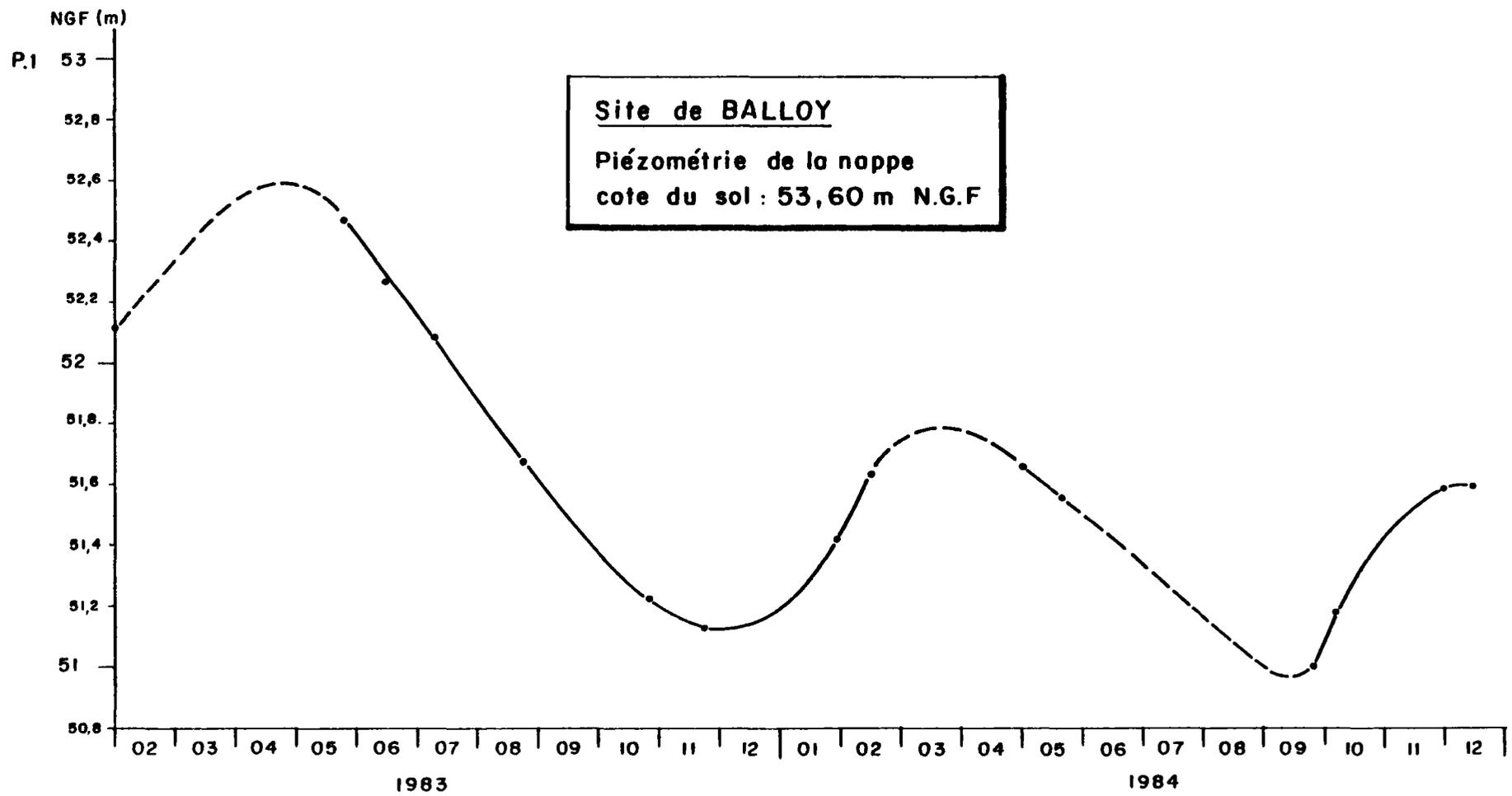


Figure 4

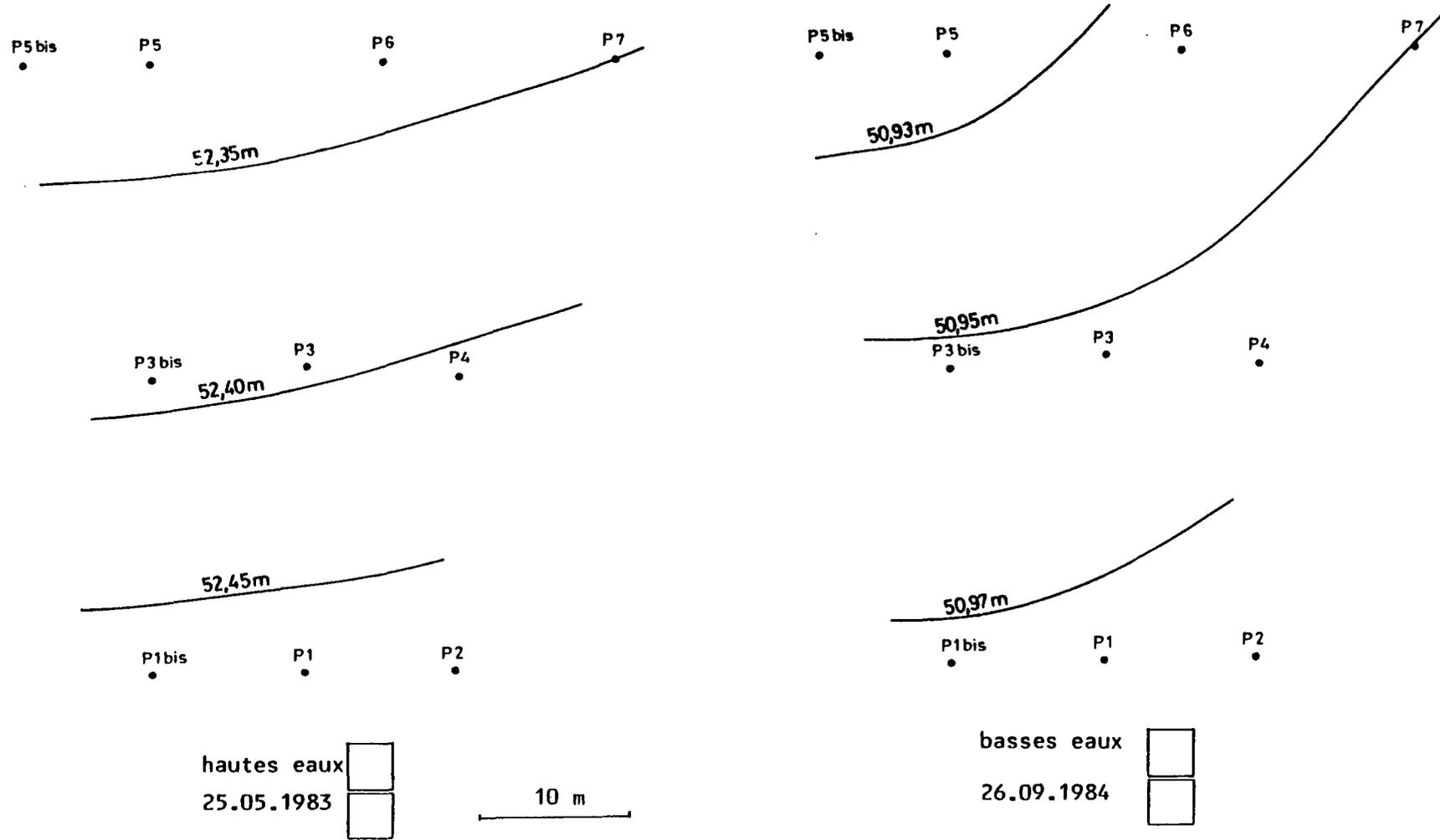


Figure 5 - Site expérimental de Balloy
 Courbes piézométriques

5. SUIVI DES TRANSFERTS D'EAU DANS LA ZONE NON SATURÉE

5.1. Pluviométrie

Les données pluviométriques disponibles sont celles mesurées sur les stations météorologiques les plus proches, respectivement Sergines (89) à 10 km au S-E et St. Loup de Naud (77) à 16 km au N-NE.

Les relevés pour 1983 et 1984 sont présentés dans le tableau 2 ainsi que les données décadaires de la station de Melun située à 42 km au N-W, afin de donner un aperçu de la répartition des pluies dans le mois.

| PERIODE | SERGINES (89) | ST. LOUP DE NAUD (77) | MONTEREAU SOUS LE JARD-MELUN (77) | | | |
|--------------|---------------|-----------------------|-----------------------------------|---------|---------|-------|
| | 10 km au S.E. | 16 km au N-NE | 42 km au N-W - alt. 91 m | | | |
| | alt. 115 m | alt. 104 m | 1er déc. | 2è déc. | 3è déc. | Total |
| Janvier 1983 | 68 | 68 | 17,1 | 11,8 | 21,6 | 51 |
| Février | 49 | 66 | 23,5 | 0 | 40,5 | 64 |
| Mars | 49 | 56 | 0,8 | 7,9 | 30,2 | 39 |
| Avril | 130 | 151 | 60,8 | 29,4 | 32,3 | 123 |
| Mai | 83 | 84 | 27,9 | 36,6 | 11,5 | 76 |
| Juin | 54 | 59 | 6,0 | 0,7 | 24,3 | 33 |
| Juillet | 57 | 85 | 10,3 | 31,7 | 40,7 | 83 |
| Août | 17 | 44 | 17,9 | 7,9 | 5,5 | 31 |
| Septembre | 63 | 62 | 40,6 | 33,9 | 1,5 | 76 |
| Octobre | 23 | 28 | 4,1 | 17,6 | 0,7 | 22 |
| Novembre | 30 | 41 | 0,3 | 0 | 30,1 | 30 |
| Décembre | 31 | 44 | 11,0 | 9,8 | 10,5 | 31 |
| Janvier 1984 | 105 | 141 | 16,0 | 38,0 | 58,5 | 113 |
| Février | 48 | 62 | 27,9 | 2,5 | 9,9 | 40 |
| Mars | 32 | 51 | 2,5 | 2,9 | 32,4 | 38 |
| Avril | 27 | 23 | 21,7 | 2,6 | 0 | 24 |
| Mai | 118 | 109 | 34,9 | 32,6 | 43,8 | 111 |
| Juin | 73 | 50 | 28,3 | 25,8 | 4,0 | 58 |
| Juillet | 65 | 65 | 4,7 | 23,8 | 10,1 | 36 |
| Août | 27 | 28 | 36,5 | 0 | 4,5 | 41 |
| Septembre | 142 | 152 | 28,6 | 44,2 | 53,8 | 127 |
| Octobre | 94 | 105 | 37,0 | 25,3 | 16,9 | 79 |
| Novembre | 73 | 93 | 5,2 | 30,1 | 27,5 | 63 |
| Décembre | | | 2,8 | 34,8 | 6,8 | 44 |

Tableau 2 - Pluviométrie 1983-1984 (mm)

5.2. Humidimétrie neutronique

La sonde d'humidité neutronique permet de mesurer l'humidité volumique (θ) du terrain à diverses profondeurs.

La mesure se fait en introduisant la sonde dans un tube d'accès (\varnothing 45 mm) laissé en place dans le terrain.

5.2.1. Étalonnage de la sonde

L'étalonnage a été réalisé de façon classique, c'est-à-dire en calculant la droite de corrélation entre les comptages et les teneurs en eau lors de la mise en place des tubes d'accès.

La mise en place des tubes a eu lieu le 15 juin 1983 à une période où la nappe était très proche du sol. La partie inférieure du tube de mesure était dans la nappe et on a ainsi bénéficié d'une large gamme de teneur en eau.

La densité sèche du terrain est de 2,0 et les teneurs en eau volumique à saturation de l'ordre de 25 % en volume.

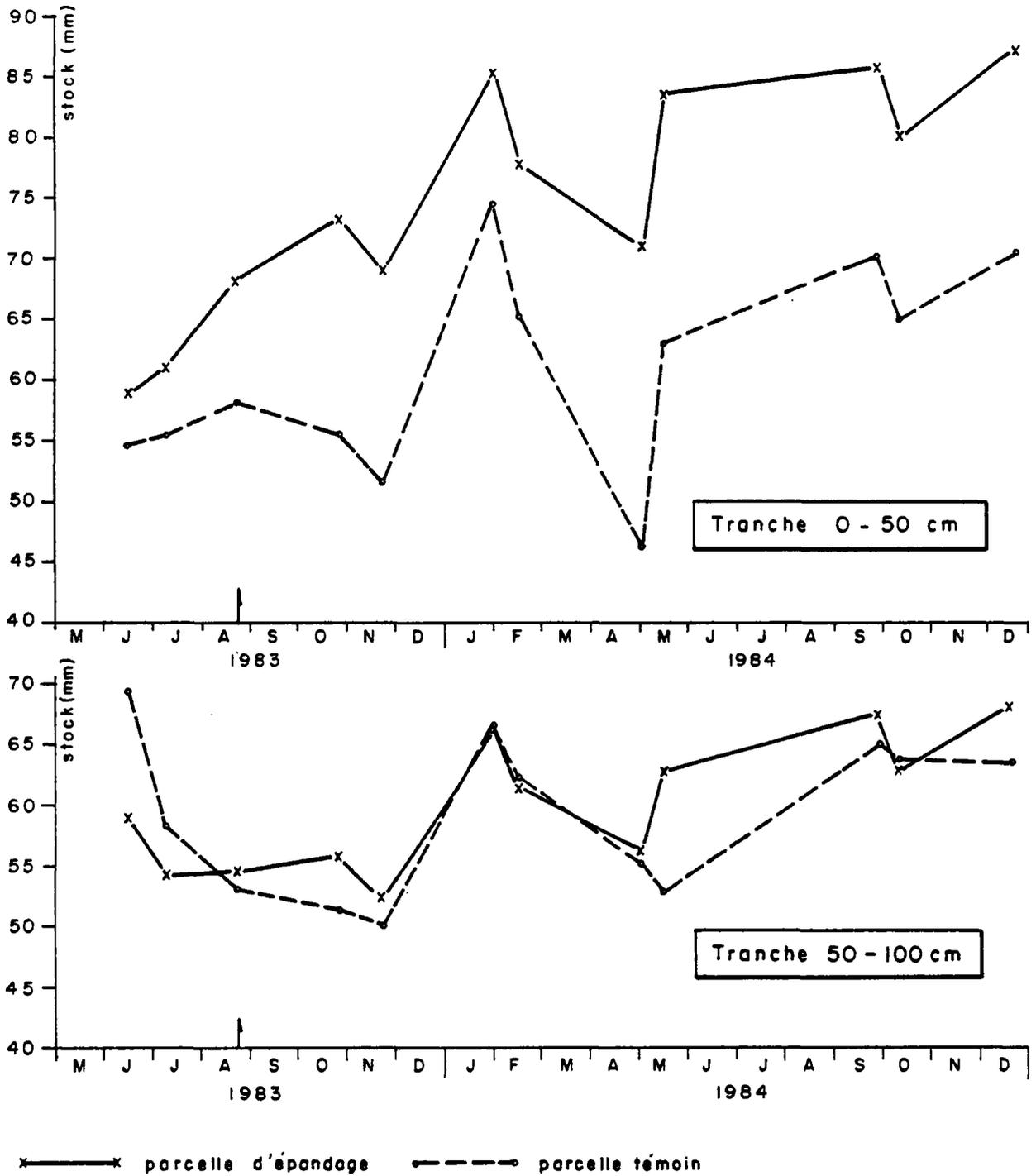
Avec une sonde donnant un comptage $N = 1000$ cps/s dans l'eau, l'équation de la droite d'étalonnage est :

$$\theta = 0,05503 N + 1,07$$

5.2.2. Résultats obtenus

La comparaison des mesures de teneur en eau réalisées sur la parcelle d'épandage et la parcelle témoin permet de mettre en évidence l'influence de l'épandage d'hydrocarbure sur les caractéristiques hydrodynamiques du terrain et sur les transferts d'eau dans la zone non saturée.

La figure 6 montre l'évolution des stocks d'eau dans les tranches 0-50 cm et 50-100 cm sous les deux parcelles expérimentales.



Evolution des stocks d'eau de la zone non saturée

Figure 6

- Tranche 0-50 cm

Jusqu'en août 1983 les stocks d'eau sont voisins. Après l'épandage (25 août 1983) l'écart entre les stocks se creuse, le stock sous la parcelle d'épandage devenant plus élevé que sous la parcelle témoin.

On peut quantifier cette influence en comparant les stocks moyens et les teneurs en eau moyenne avant et après épandage sous les deux parcelles. Les chiffres sont reportés dans le tableau 3 suivant.

| | Avant épandage | Après épandage |
|---------------------|------------------|------------------|
| Parcelle d'épandage | 62,7 mm - 12,5 % | 79,4 mm - 15,9 % |
| Parcelle témoin | 56,1 mm - 11,2 % | 62,5 mm - 12,5 % |

Tableau 3 - Stocks d'eau moyens et teneurs en eau moyenne dans l'horizon 0-50 cm.

Ces chiffres traduisent un "surplus" moyen de stock de 10,3 mm ou 2,1 % de teneur en eau après l'épandage.

Une petite partie de cette augmentation de stock provient de l'hydrocarbure lui-même qui est détecté par la sonde neutronique de même manière que l'eau. (La sonde neutronique comptabilise en fait les atomes d'hydrogène). Compte tenu des quantités épandues, cette influence est faible et ne dépasse pas 2 à 3 mm en début d'épandage, lorsque tout l'hydrocarbure réside dans la tranche 0-50 cm.

L'observation de la figure 6 montre que l'écart entre les stocks s'amoindrit lorsque le stock augmente et se creuse lorsque le stock diminue. Le phénomène est particulièrement net entre janvier et mai 1984, période de pluviométrie déficitaire.

- Tranche 50-100 cm

A l'inverse de l'horizon superficiel, l'épandage d'hydrocarbure ne modifie pas l'évolution des stocks respectifs dans l'horizon 50 à 100 cm. La valeur des stocks et leurs variations sont tout à fait similaires dans le temps mis à part une exception en mai 1984.

Il peut être intéressant d'étudier en détail cette différence de comportement au moyen des profils de teneur en eau dans le terrain.

La figure 7 montre les profils de teneurs en eau sous les deux parcelles respectivement au 02.05.1984 et au 18.05.1984. Cette période correspond à une forte pluviométrie, et fait suite à une période déficitaire d'environ 2 mois.

a) Parcelle témoin

Entre le 02 et le 18.05, on observe une augmentation des teneurs en eau en surface jusqu'à environ 45 cm de profondeur. Il y a recharge de cet horizon sous l'effet de la pluie. On peut noter la teneur en eau faible le 02.05 à 10 cm de profondeur. L'augmentation de stock entre 0 et 45 cm est de 17,05 mm.

En-dessous de 45 cm, les teneurs en eau continuent à décroître ce qui indique la poursuite du ressuyage.

b) Parcelle d'épandage

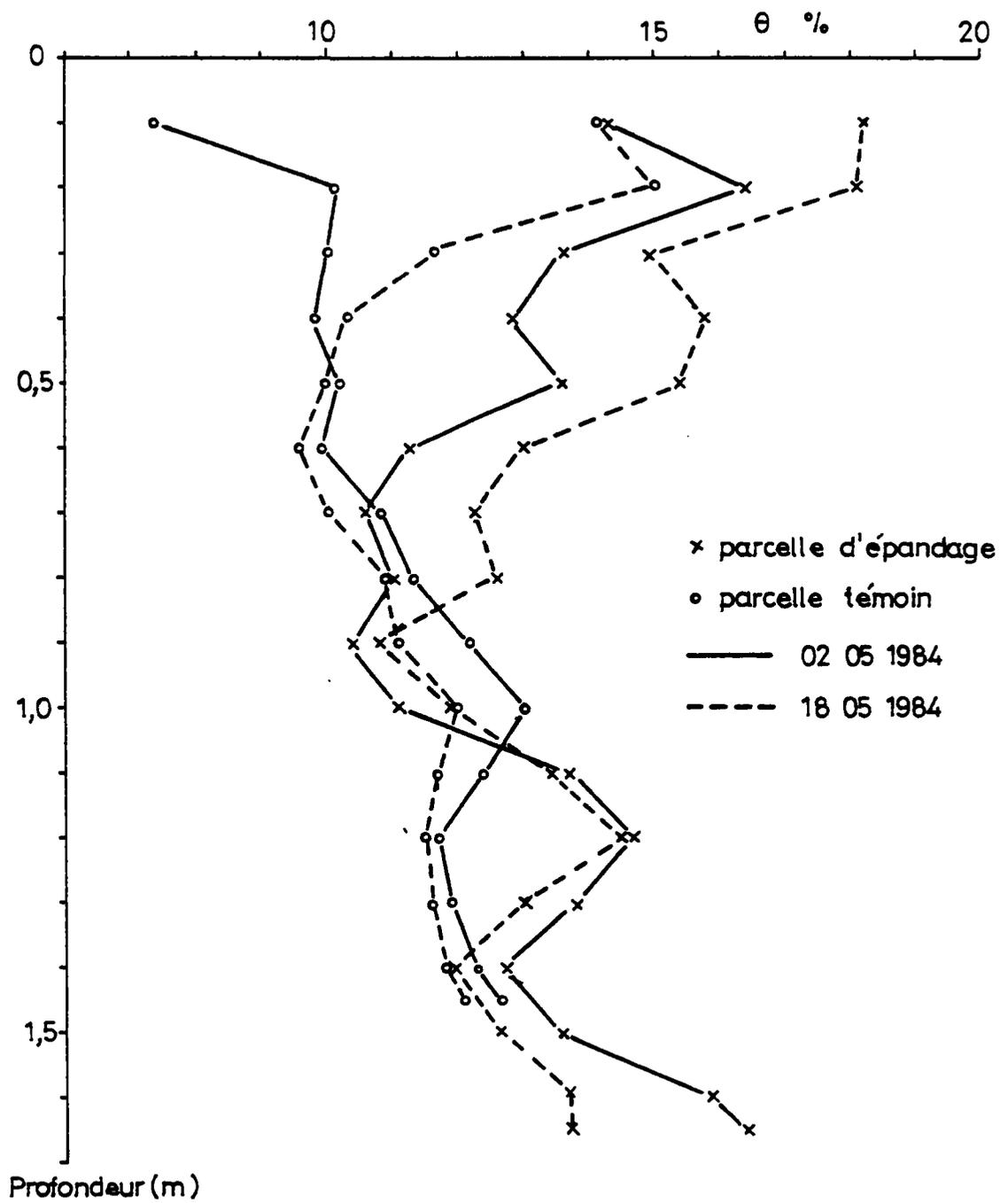
Sous cette parcelle, la recharge se produit jusqu'à 1 m de profondeur. Les teneurs en eau le 02.05 en surface sont plus fortes que dans le cas de la parcelle témoin.

L'augmentation de stock jusqu'à 1 m est de 19,35 mm dont 12,65 mm pour l'horizon 0-50 cm.

On constate donc dans le cas de la parcelle d'épandage, une infiltration plus rapide de l'eau lors d'épisodes pluvieux (deux fois plus rapide dans ce cas).

Cette recharge plus rapide est liée à une teneur en eau en surface plus importante.

On peut en déduire que l'épandage d'hydrocarbure ne diminue pas la perméabilité de la couche superficielle, qu'il augmente la capacité de rétention et qu'il protège de l'influence de l'évaporation.



EVOLUTION DES TENEURS EN EAU SOUS LES PARCELLES EXPERIMENTALES

Figure 7

5.3. Mesures tensiométriques

La mesure des potentiels de l'eau dans la zone non saturée permet également d'observer l'influence de l'épandage d'hydrocarbure sur les transferts d'eau.

Trois séries de profils sont représentés sur la figure 8. Sur cette figure la droite potentiel = - profondeur représente la séparation entre la zone saturée et la zone non saturée (lieu des points de succion nulle).

- Le 15.06.83 (avant épandage)

Les profils de potentiels sont semblables sous les deux parcelles. Le potentiel est pratiquement constant avec la profondeur ce qui traduit une absence d'écoulement dans le milieu (gradient nul). On remarque que les tensiomètres à 120 cm de profondeur sont en milieu saturé ce qui est en accord avec les observations piézométriques.

- Le 27.10.1983 (après épandage)

On se situe en fin de période estivale, avant la recharge par les pluies d'automne, le mois d'octobre 1983 ayant été particulièrement sec.

Les profils de potentiels sous les deux parcelles sont très différents en surface.

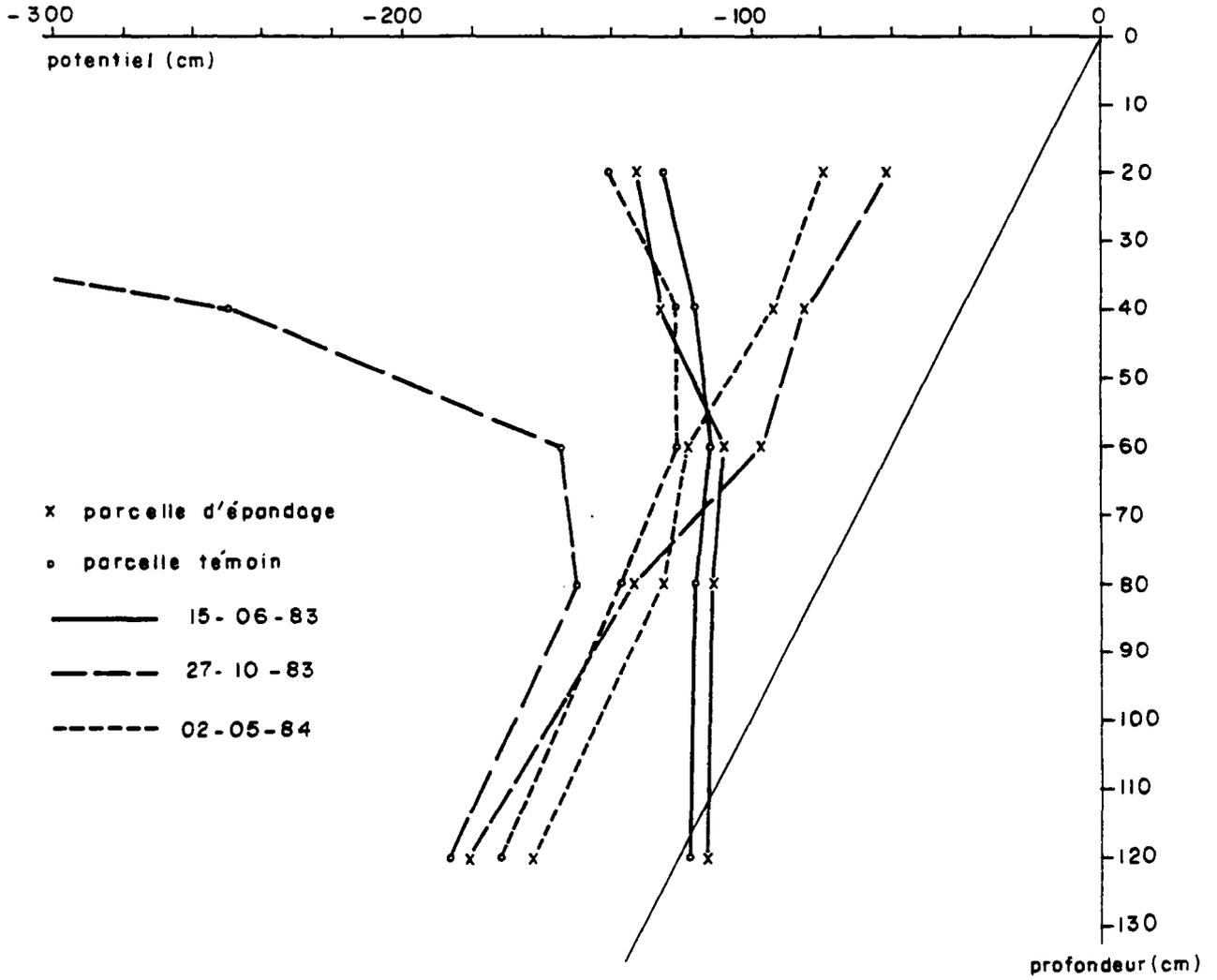
La parcelle témoin montre un profil dit "d'évaporation" avec un plan de flux nul vers 80 cm. L'évaporation se fait sentir jusqu'à 80 cm de profondeur. La succion à 20 cm est très élevée (570 cm).

La parcelle d'épandage montre au contraire un profil d'infiltration avec une succion constante d'environ 20 à 30 cm quelle que soit la profondeur. L'évaporation ne fait pas sentir son influence à 20 cm de profondeur.

- Le 02.05.1984

Après une période relativement sèche la parcelle témoin a un profil d'évaporation avec un plan de flux nul (gradient nul) vers 50 cm. L'évaporation se fait sentir jusqu'à cette profondeur. La parcelle d'épandage a un profil d'infiltration avec une succion constante de 20 à 30 cm.

Quelle que soit la période, les potentiels sont restés semblables pour les deux parcelles à partir de 80 cm de profondeur. Les potentiels mesurés à 20 cm de profondeur sous la parcelle d'épandage ont confirmé que l'hydrocarbure épandu protège le terrain de l'influence de l'évaporation.



Profils de potentiel dans la zone non saturée

Figure 8

6. SUIVI DE LA MIGRATION DES HYDROCARBURES

Tous les échantillons ont été analysés par extraction au CCl_4 et dosage au spectromètre infra-rouge après passage sur florisil (norme NF T 90-203), mais confiés pour des raisons techniques à trois laboratoires différents.

6.1. Prélèvements de terrain

Les prélèvements de terrain ont été réalisés à la tarière à main sous la parcelle d'épandage (à raison d'un sondage par prélèvement).

La technique suivante a été utilisée pour minimiser les risques de contamination des échantillons entre eux : chaque échantillon de 10 ou 20 cm est prélevé avec une tarière de \varnothing 60 mm puis le sondage est élargi avec une tarière de \varnothing 80 mm avant prélèvement de l'échantillon suivant.

La figure 9 reprend sous forme de tableau les concentrations mesurées à différentes profondeurs, avant épandage et de 3 à 16 mois après l'épandage (épandage réalisé le 25 août 1983).

En considérant une densité sèche de 2,0 pour le terrain, les concentrations permettent de calculer la quantité d'hydrocarbure présente dans le terrain entre la surface et 60 à 120 cm suivant le cas. La quantité totale épandue étant de 2770 g/m^2 , on peut également calculer la proportion d'hydrocarbure restant dans cette tranche (voir tableau 4).

| | 1er prélèvement 23.11.83 (0 à 0,60m) | 2ème prélèvement 16.02.84 (0 à 1 m) | 3ème prélèvement 18.05.84 (0 à 1,20m) | 4ème prélèvement 10.10.84 (0 à 1,20m) | 5ème prélèvement 20.12.84 (0 à 1,20m) |
|---|---|--|--|--|--|
| Stock d'hydrocarbure (g/m^2) | 1 690 | 1 881 | 784 | 18,6 | 344 |
| % de la masse épandue | 61 | 68 | 29 | 0,67 | 12,4 |

Tableau 4 - Stocks d'hydrocarbures dans le terrain
(entre 0 et 0,60 ou 1,20 m suivant les prélèvements)

Concentration en hydrocarbures totaux sous la parcelle d'épandage (p.p.m)

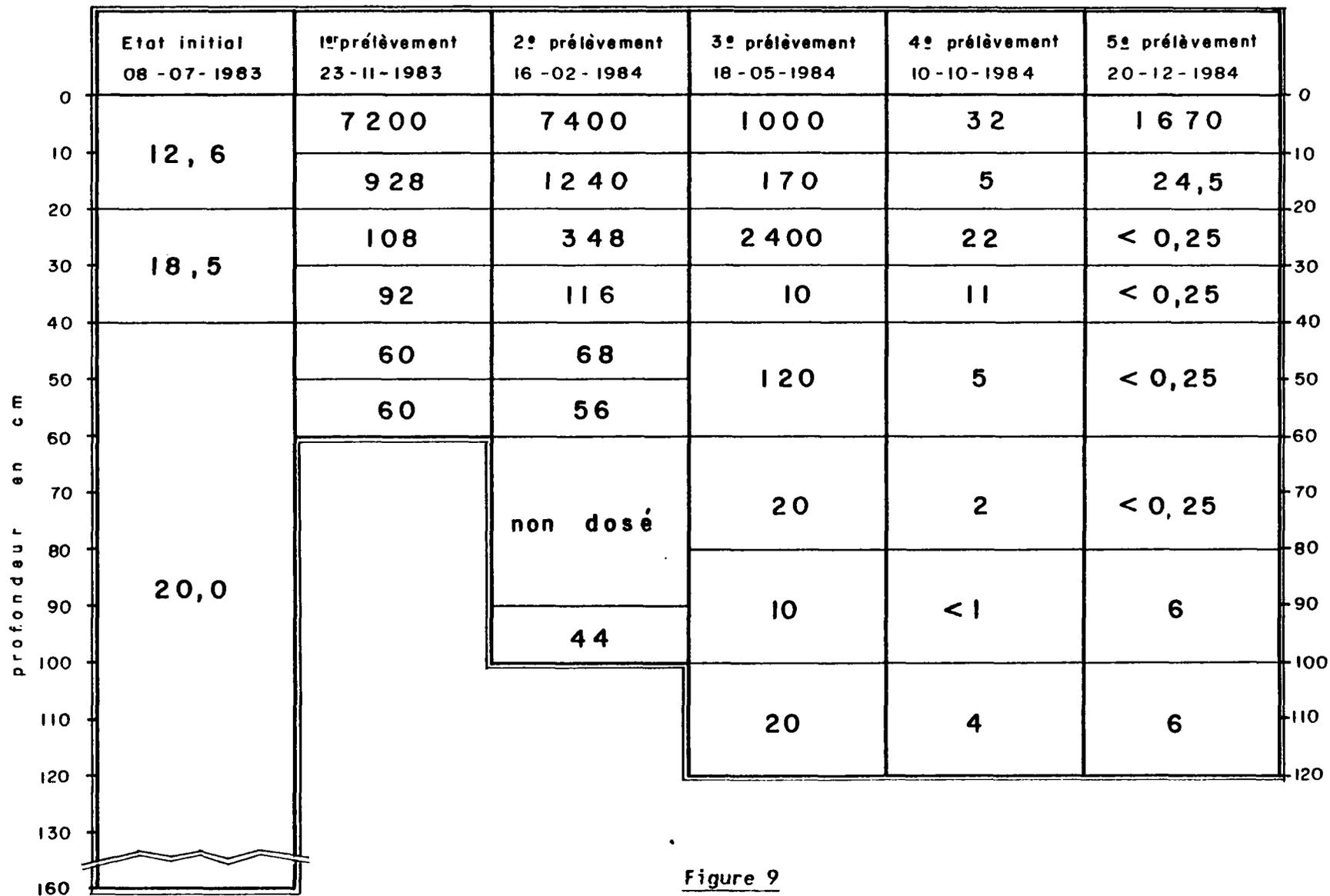


Figure 9

L'interprétation des résultats pose un certain nombre de problème. Il est difficile notamment d'expliquer la chute brutale des concentrations lors du 4ème prélèvement, ou les concentrations très inférieures à celles de l'état initial pour les 4ème et 5ème prélèvements.

Le changement de laboratoire d'analyse est peut-être une explication. Il faut signaler qu'un premier laboratoire d'analyse a analysé les échantillons de l'état initial et des trois premiers prélèvements. Les échantillons du 4ème prélèvement ont été confiés à un autre laboratoire.

Au vu des résultats, un 5ème prélèvement a été décidé et les échantillons ont été envoyés à un 3ème laboratoire. Dans ce dernier cas, un échantillon synthétique contenant 1000 ppm d'huile PW3D a été joint dont l'analyse a fourni 535 ppm.

Malgré les réserves émises précédemment, on peut dégager certaines constatations :

- l'horizon superficiel (0 à 10 cm) retient une partie non négligeable de l'hydrocarbure épandu. Cela est confirmé par l'aspect et l'odeur lors des prélèvements,
- le pourcentage d'hydrocarbure dans la zone non saturée diminue globalement dans le temps.

Il existe une formule pour estimer la profondeur maximale de pénétration d'un hydrocarbure (CONCAWE, rapport 7/81) :

$$D = \frac{1000 V}{A \times R \times k}$$

dans laquelle :

D = profondeur de pénétration maximum (m)

V = volume des hydrocarbures infiltrés (m³)

A = superficie de la zone d'infiltration (m²)

R = capacité de rétention du sol (l/m²)

k = facteur de correction approximatif pour diverses viscosités d'hydrocarbures

k = 0,5 pour les produits pétroliers à faible viscosité, par exemple les carburants

k = 1,0 pour le pétrole lampant, le gas-oil et les produits de viscosité similaire

k = 2 pour les hydrocarbures plus visqueux tels qu'un fuel-oil léger.

Les valeurs-types de la capacité de rétention de certains sols poreux sont les suivantes :

| Types de sols | Capacité de rétention R (l/m ³) |
|-----------------------------|---|
| Cailloux à gravier grossier | 5 |
| Gravier à sable grossier | 8 |
| Sable grossier à moyen | 15 |
| Sable moyen à fin | 25 |
| Sable fin à limon ou boue | 40 |

Dans le cas présent, $R = 8 \text{ l/m}^3$ et pour $K = 1,0$ on obtient :

$$D = \frac{1000 \times 0,0288}{9 \times 8 \times 1} = 0,4 \text{ m}$$

Si on prend $K = 2,0$ $D = 0,2 \text{ m}$.

Dans tous les cas, cette formule prévoyait que l'hydrocarbure serait retenu dans les premiers décimètres du terrain.

6.2. Prélèvements d'eau dans les bougies poreuses

Les prélèvements dans les bougies poreuses ont été réalisés après mise en dépression pendant environ deux semaines.

L'analyse de l'eau prélevée dans les bougies fournit la concentration en hydrocarbures totaux en solution dans l'eau.

Les résultats sont les suivants pour la parcelle d'épandage :

| Profondeur (cm) | Etat initial 08.07.83 | 1er prélèvement 23.11.83 | 2ème prélèvement 16.02.83 | 3ème prélèvement 18.05.84 | 4ème prélèvement 10.10.84 |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 10 | 0,2 | 2,95 | 4,59 | 6,3 | < 0,05 |
| 20 | 0,1 | 0,70 | - | 6,1 | < 0,05 |
| 30 | 0,07 | 0,39 | 3,13 | 3,2 | < 0,05 |
| 50 | | 0,30 | 2,73 | 4,2 | < 0,05 |
| 75 | | 0,30 | 1,83 | 2,4 | < 0,05 |
| 100 | | 0,69 | 0,37 | 2,8 | < 0,05 |
| 125 | | | 0,27 | 1,4 | < 0,05 |
| 150 | | | 0,24 | 0,7 | < 0,05 |

Tableau 5 - Concentration en hydrocarbures dans l'eau des bougies poreuses (ppm)

Les bougies de la parcelle témoin ont été prélevées le 16.02.1983 et un seul échantillon a été constitué. Le dosage des hydrocarbures totaux a donné une concentration dans l'eau $\leq 0,01$ ppm.

Les mêmes réserves que précédemment peuvent être émises au sujet de la chute brutale des concentrations pour le 4ème prélèvement.

Les concentrations maximales mesurées sont de l'ordre de 6 mg/l, traduisant probablement la solubilité de l'hydrocarbure.

Aucune corrélation nette n'apparaît entre les concentrations dans le terrain et dans les bougies ce qui exclut l'utilisation des seules bougies poreuses pour le suivi de la migration d'hydrocarbures dans le sol.

6.3. Prélèvements d'eau dans les piézomètres

Les prélèvements ont été réalisés avec une pompe de surface après un temps de pompage d'environ 1 heure avec un débit de quelques m³/h.

• - Etat initial

Un premier état initial a été réalisé les 1 et 2 février 1983 pour tous les piézomètres.

Les concentrations mesurées en hydrocarbures totaux ont été $\leq 0,05$ ppm sauf pour P_1 : 0,3 ppm et P_3 : 0,1 ppm.

Un deuxième état initial a été réalisé le 08 juillet 1983 et a donné les valeurs suivantes :

P_1 : 0,02 ppm P_3 : 0,05 ppm

- Après épandage

Compte tenu du sens d'écoulement de la nappe, les piézomètres les plus susceptibles d'être contaminés sont P_1 et P_3 .

- Aucun dosage n'a été fait lors de la première série de prélèvement le 23.11.1983.
- 2ème prélèvement du 16.02.1984
 P_1 : $\leq 0,01$ mg/l
- 3ème prélèvement du 18.05.1984
 P_1 : 0,2 mg/l
- 4ème prélèvement du 10.10.1984
 P_1 : résultat non fourni
 P_3 : $\leq 0,01$ mg/l

Les résultats ne permettent pas de mettre en évidence une contamination de la nappe.

Les prélèvements dans les piézomètres concernaient par ailleurs l'ensemble de la nappe des alluvions et non pas seulement la partie superficielle.

Un calcul rapide permet d'estimer l'ordre de grandeur des concentrations en hydrocarbures.

Si on prend un gradient moyen de 2 ‰ et 4 m d'alluvions avec $1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s de perméabilité, on obtient un débit de $36 \cdot 10^{-3}$ l/s d'eau sous la parcelle de 3 m de large.

Environ 25 kg d'hydrocarbures ont été épandus. Si on fait l'hypothèse d'une arrivée de 12 kg à la nappe en un an, cela conduit à 0,38 mg/s. Avec un débit de 36.10^{-3} l/s cela donne une concentration de l'ordre de 10 mg/l sur l'ensemble de la hauteur d'eau dans les alluvions.

Une concentration de cet ordre n'ayant pas été mesurée, on peut supposer que l'hydrocarbure a été retenu.

6.4. Remarques sur le suivi de la migration des hydrocarbures

Il aurait été nécessaire de disposer de moyens financiers plus importants pour cette étude afin de multiplier les prélèvements et les analyses pour d'une part suivre la migration à plus grande profondeur, en particulier dans la zone de battement de la nappe et d'autre part caractériser les hydrocarbures, subsistant dans le terrain pour déceler une éventuelle dégradation ou une migration sélective.

Par ailleurs, on peut regretter le manque de fiabilité des déterminations analytiques qui n'a pas permis d'évaluer précisément l'évolution des concentrations.

Cette étude a permis cependant de tester les possibilités des moyens d'investigations du milieu non saturé pour l'étude des migrations d'hydrocarbures.

La sonde d'humidité neutronique avait permis dans le cadre d'une autre étude* de détecter et de suivre la migration d'un front d'hydrocarbure dans le terrain avec des concentrations égales ou supérieures à 1 %.

Dans le cas présent, la quantité épandue était trop faible pour être détectée par la sonde neutronique.

Les tensiomètres, de part leur principe, sont insensibles à la présence d'hydrocarbures.

* M. BARRÉS, M. SAUTER (1985) .- Etude sur site expérimental de la migration en terrain semi-perméable d'effluents issus de boues industrielles. Rapport final. - Rapport BRGM 85 SGN 015 EAU.

Cependant, l'utilisation des tensiomètres et de la sonde neutronique a permis d'étudier les modifications du bilan de l'eau provoquées par l'épandage.

Les bougies poreuses prélèvent l'eau interstitielle et les hydrocarbures en solution et dans une certaine mesure peuvent prélever les hydrocarbures si ils sont en phase non aqueuse. Cette technique ne permet cependant pas de mesurer les concentrations dans le terrain.

Leur utilisation se limite au suivi d'hydrocarbures solubles dans l'eau.

7. CONCLUSION GENERALE

La rétention d'une partie de l'hydrocarbure épandu, dans les premiers centimètres du sol, a modifié de façon sensible le bilan de l'eau dans la zone non saturée. Bien qu'utilisé à des doses modérées (2,77 kg/m²), l'apport d'hydrocarbure protège le sol de l'évaporation, augmente sa capacité de rétention en eau et favorise l'infiltration de l'eau en profondeur lors des épisodes pluvieux.

Aucune contamination importante n'a été décelée dans l'eau à une dizaine de mètres en aval hydraulique du point d'épandage.

La poursuite de cette étude est souhaitable pour préciser le devenir de l'hydrocarbure épandu.

Il serait intéressant en particulier de prélever le terrain dans la zone de battement de la nappe, sous la parcelle d'épandage et à l'aval immédiat.

*
* * *