

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE

HAUT COMITÉ DE L'ENVIRONNEMENT

Comité scientifique "EAU"

14, boulevard du Général Leclerc - 92521 Neuilly-sur-Seine Cédex

Tél.: (1) 758.12.12

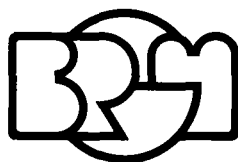
MÉCANISMES D'ACQUISITION DE LA QUALITÉ CHIMIQUE D'UNE EAU SOUTERRAINE

Etude expérimentale in situ

par

M. BONNET et A. LANDREAU

Texte



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département hydrogéologie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

79 SGN 661 HYD

Novembre 1979

Ce rapport présente les résultats obtenus dans le cadre de l'action concertée Comité EAU "Mécanismes d'acquisition de la qualité chimique d'une eau" qui s'est déroulée de juillet 1977 à juin 1979. (Contrat n° 76-0-1131-77-74).

La compréhension de ce document nécessite au préalable la lecture du rapport B.R.G.M. 77 SGN 607 HYD qui présente cette étude.

Cette étude s'est déroulée avec la collaboration de trois unités du Service géologique national : les départements "Hydrogéologie", "Minéralogie-Géochimie-Analyses" et le "Service géologique régional Nord-Pas de Calais". Ce dernier a réalisé les études préalables de reconnaissance pour le choix de l'emplacement du site et a également assuré le suivi des travaux de mise en place de la station ainsi que l'entretien de celle-ci et le relevé des mesures.



R É S U M É

L'étude a pour objet l'observation et la compréhension des différents phénomènes qui interviennent dans l'acquisition du chimisme de l'eau au cours de sa percolation vers une nappe superficielle alimentée exclusivement par les précipitations.

Elle s'est appuyée sur des observations réalisées en milieu naturel et dans un contexte hydrogéologique représentatif d'un aquifère libre d'importance économique notable. Ce site expérimental est situé dans le Nord de la France, à une dizaine de kilomètres au Sud-Est de Lille (Sainghin-en-Mélantois), sur la nappe de la craie.

La zone de "recharge", selon un schéma classique pour l'ensemble de la nappe, est constituée de trois horizons successifs : limons (3 m), limons et craie avec forte proportion d'argiles (1 m), craie (4 m). Ces trois horizons ont été observés tant du point de vue hydrodynamique (transferts d'eau) que du point de vue chimique.

Après un rappel des résultats hydrodynamiques indispensables à la compréhension des phénomènes chimiques, ce rapport présente les observations sur l'évolution de la qualité des eaux le long du profil vertical analysé et tente une première interprétation des phénomènes les plus caractéristiques.

En conclusion générale, ce rapport insiste et discute sur :

- La nécessité d'une distinction entre eau mobile et eau de porosité qui semble extrêmement importante pour les études du chimisme des eaux dans la zone non-saturée.
- Le rôle extrêmement important joué par les argiles non seulement du point de vue échange de base et fixation de cations (ce qui a déjà été mis en évidence de nombreuses fois) mais également vis-à-vis des anions notamment les nitrates.

SOMMAIRE

	page
INTRODUCTION	1
<u>A - TRANSFERTS D'EAU</u>	3
1. ACQUISITION DES DONNEES	4
1.1. Dispositif utilisé	4
1.2. Reconnaissance des paramètres hydrodynamiques du sol	5
2. COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DU MILIEU	6
2.1. Teneurs en eau du sol	6
2.2. Succion - charges hydrauliques	8
2.3. Perméabilités	9
3. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME	11
4. CONCLUSIONS	13
<u>B - ÉVOLUTION DU CHIMISME DE L'EAU</u>	14
1. PROGRAMME CHIMIQUE REALISE	15
1.1. Coupe géochimique et minéralogique	15
1.2. Composition chimique des eaux de pluie	15
1.3. Chimie des eaux dans le non-saturé et la nappe	15
2. DESCRIPTION DES RESULTATS CHIMIQUES OBTENUS	17
2.1. Lithologie, géochimie, minéralogie du terrain	17
2.2. Analyses chimiques d'eau de pluie	19
2.3. Chimisme de l'eau de la nappe et évolution à travers la zone non-saturée	21
3. DISCUSSION DES RESULTATS	27
3.1. Evolution du faciès hydrochimique des eaux	27
3.2. Stabilité du profil chimique dans le temps	29
3.3. Interaction eau-roche, phénomènes mis en jeu pour certains éléments	31
<u>C - CONCLUSIONS</u>	36
BIBLIOGRAPHIE	39
ANNEXES	

I N T R O D U C T I O N

Un certain nombre d'études ont essayé d'aborder l'évolution du chimisme d'une eau percolant à travers le sol. Ces études peuvent être classées en deux catégories disproportionnées quant au volume des travaux, ceci tenant essentiellement à la plus ou moins grande facilité de mise en oeuvre des expérimentations :

- *Etudes de laboratoire* qui consistent à travailler sur colonne et faire percoler de l'eau sur un échantillon de terrain plus ou moins remanié. Les publications sont extrêmement nombreuses sur ce sujet. Ce type d'étude est particulièrement utilisé pour déterminer notamment les éventuelles adsorptions d'éléments minéraux sur les argiles (surtout les cations), ou quantifier les phénomènes d'échange de base. Nous citerons principalement les travaux auxquels nous ferons référence lors de l'interprétation de nos résultats et qui concernent l'adsorption d'anions (principalement sulfates) : BOWDEN, BOLLAND, POSNER, QUIRK, 1974 - S.S.S. RAJAN, 1978 - Warren W. WOOD, 1978.
- *Etudes "in situ"* (beaucoup moins importantes en volume) qui consistent à suivre dans les premiers mètres du sol, l'évolution de la chimie de l'eau de percolation sous conditions naturelles (sans épandage de produits en surface) ; dans cette catégorie, il faut citer principalement en France les travaux de l'équipe de P. DUTIL de l'I.N.R.A. de Châlons-sur-Marne (R. DURAND, 1978). Ces travaux ont consisté à observer dans la craie sur cases lysimétriques, la chimie de l'eau après environ trois mètres de percolation. Les résultats essentiels mis en évidence sont que l'eau de percolation acquiert très rapidement ses caractères chimiques principaux. Le potassium est soumis à des variations rapides qui seraient fonction du régime hydrique du sol. Au niveau de la nappe, il peut y avoir une légère baisse des teneurs en calcium qui seraient dues à des précipitations de carbonate de calcium.

Comme autre étude "in situ", il faut citer celle réalisée par Warren W. WOOD and D.C. SIGNOR (1975) et qui se rapproche de nos travaux à la fois par sa conception et de par les résultats obtenus. Il s'est agit d'observer dans la zone non-saturée au moyen de cellules poreuses, les modifications de la chimie des eaux lors d'une recharge artificielle de la nappe sur un site expérimental. Dans ce cas, la coupe géologique des terrains ne présente pas le caractère d'homogénéité qui était

propre à la précédente étude. Bien qu'essentiellement composée de sable, elle fait apparaître différents faciès, notamment argileux ou calcaires. Les principaux phénomènes observés sont des échanges anioniques et cationiques ainsi que des adsorptions et désorptions d'ions.

Nos travaux se rattachent à la deuxième catégorie énoncée ci-dessus et se caractérisent par le fait que toute la zone du sol jusqu'à la nappe est observée sous des conditions naturelles au moyen de cellules poreuses et qu'il ne s'agit pas d'un milieu homogène mais d'un "tri-couche".

L'énoncé de ces caractéristiques permet de situer l'objectif général qui est l'explication des phénomènes chimiques qui se produisent en relation avec la recharge naturelle des nappes libres.

Plus en détail, les objectifs généraux de notre recherche sont :

- observer l'évolution de la composition chimique de l'eau météorique au cours de son transfert dans la zone non-saturée, ce qui nécessite évidemment que l'aspect hydrodynamique du transfert soit également étudié,
- essayer d'expliquer les phénomènes observés et examiner si les principaux modèles hydrochimiques existants (HELGESON et al., 1970 - DUTT et al., 1972 ...) rendent suffisamment compte des phénomènes. Dans la négative, cette recherche doit permettre de jeter les bases d'un modèle conceptuel sur l'évolution du chimisme de l'eau à travers le non-saturé et de préciser les différents phénomènes qu'il serait nécessaire d'aborder.

L'étude s'est déroulée de juillet 1977 à juin 1979. Compte tenu de la période de mise en place des équipements et d'interprétation des données en fin d'études, les résultats recueillis concernent une période qui s'étend d'octobre 1977 à janvier 1979.

Le rapport comprend deux parties : l'étude des transferts d'eau et l'évolution du chimisme.

A - TRANSFERTS D'EAU

F. BARRES, G. BROSSIER, A. LANDREAU

L'étude des transferts d'eau était nécessaire afin de définir les caractéristiques du milieu et aider à une meilleure compréhension des phénomènes chimiques observés. L'évaluation d'un facteur tel que la vitesse de percolation nous semblait particulièrement intéressant afin de pouvoir estimer les temps de contact eau-roche et relier ceux-ci aux variations de minéralisation.

L'étude hydrodynamique a permis principalement :

- de préciser la structure du milieu et de "quantifier" en quelque sorte la description géologique. L'interprétation des variations de teneurs en eau et de tensiométrie ont aidé à la compréhension des résultats chimiques observés,
- de se représenter le fonctionnement du système.

Dans ce chapitre sur les transferts, seuls les résultats et conclusions qui sont d'un intérêt pour la chimie des eaux sont présentés. Une étude plus détaillée est fournie dans un rapport concernant plus spécialement l'aspect "recharge des nappes" (Action concertée Comité EAU** - contrat de recherche n° 76.108).

°°

1. ACQUISITION DES DONNEES

1.1. Dispositif utilisé

Le rapport de présentation du site expérimental (77 SGN 607 HYD) décrit les moyens mis en oeuvre pour les transferts d'eau : pluviographe, station de mesures tensiométriques, suivi des humidités du terrain par la sonde à neutrons.

Quelques modifications ont été apportées par rapport à la description qui est faite dans ce rapport :

*a) Enregistrement en **continu** de la succion du sol*

Dix capteurs de pression étaient reliés à un enregistreur qui stockait les données sur bandes magnétiques, celles-ci étant ensuite décodées par informatique. La fréquence minimale d'enregistrement des succions était de 5 mn.

Les premiers résultats recueillis nous ont montré que les temps de transferts d'eaux étaient extrêmement lents et qu'une fréquence d'enregistrement hebdomadaire suffisait amplement. Pour cette raison, ce système a été abandonné au profit de la technique classique à savoir des tensiomètres reliés à des manomètres à mercure.

** rapport BRGM 79 SGN 787 HYD

Cet équipement est fiable à condition toutefois de prendre quelques précautions. Les tensiomètres se désamorcent facilement ce qui, si l'on n'y prend garde, fausse considérablement les mesures. L'expérience nous a montré qu'il était nécessaire de purger le système environ 24 h avant le relevé des mesures. Ce laps de temps d'une journée permet au tensiomètre de se rééquilibrer convenablement avec le terrain.

b) Implantation de tensiomètres

Des tensiomètres supplémentaires à ceux indiqués sur la figure n° 2 du rapport sus-cité ont été implantés notamment dans la zone intermédiaire entre les limons et la craie.

L'équipement tensiométrique est le suivant :

tensiomètre	cote par rapport au sol
1	10 cm
2	50 cm
3	75 cm
4	1 m
5	1,5 m
6	2 m
7	2,5 m
8	3 m
9	3,5 m
10	4 m
11	4,25 m
12	5 m
13	7 m

1.2. Reconnaissance des paramètres hydrodynamiques du sol

Afin de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du sol, notamment la conductivité hydraulique, il a été réalisé (en sus des observations sous conditions naturelles) en juin 1978, un essai d'infiltration selon la méthode décrite par D. HILLEL et al. (1972).

A partir des données recueillies sous conditions naturelles, il a été dressé pour différentes dates des profils d'humidité, de succion et de potentiel.

2. COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DU MILIEU

2.1. Teneurs en eau du sol

- Etalonnage de la sonde à neutrons

L'étalonnage de la sonde à neutrons a été réalisé de deux manières différentes :

- détermination tous les 20 cm de la réponse de la sonde et prise à ce même niveau d'un échantillon de terrain sur lequel a été fait en laboratoire des mesures de densité et de teneur en eau (méthode gravimétrique).

Pour chacune des couches de terrain, il a été dressé une courbe (rapport BRGM 77 SGN 607 HYD - annexe 5).

- étalonnage neutronique des échantillons du sol :

Trois échantillons de terrain, représentatifs des différentes couches rencontrées ont été prélevés et envoyés au C.E.N. de Cadarache* pour étalonnage. Le principe de la méthode ainsi que les résultats sont fournis en annexe A.1.

Une étude comparative des teneurs en eau obtenues par chacune des deux méthodes a été faite. Les valeurs sont similaires, le plus grand écart étant observé pour la couche intermédiaire où l'on observe des écarts de l'ordre de 10 %.

Les profils obtenus par les courbes "méthode gravimétrique" (figure A.1) et ceux obtenus par les courbes "C.E.A. Cadarache" sont très voisins pour la partie limons et pour la partie craie. Un déficit de teneur en eau apparaît en ce qui concerne la zone craie altérée pour les profils tracés par la méthode gravimétrique. Ceci est peut-être dû en partie au fait de la récupération délicate des échantillons dans cette zone très humide.

Les teneurs en eau présentées dans ce rapport sont calculées à partir de l'étalonnage du C.E.N. Cadarache.

Les équations d'étalonnage sont les suivantes :

- limons $N = (0,90 \rho_s + 9,56) \theta + 66,25 \rho_s - 106,37$
- craie altérée $N = (0,91 \rho_s + 9,64) \theta + 71,13 \rho_s - 109,01$
- craie $N = (2,03 \rho_s + 0,80) \theta + 69,43 \rho_s - 108,42$

N = comptage pour une source qui donne 1000 dans l'eau

ρ_s = densité sèche moyenne pour chaque couche obtenue sur les échantillons du sondage

θ = teneur en eau volumique de l'échantillon

* Service de Radioagronomie.

- Analyse des résultats obtenus

Les profils de teneurs en eau volumique font ressortir les trois couches de terrain :

- 0 m à 3,25 m

Les teneurs en eau varient de 30 % à 40 % avec une diminution à 1,75 m qui correspond à un passage plus sableux de la zone des limons (cf. figures A.2 à A.7) et une seconde à 3,25 m (zone de transition).

Les teneurs en eau sont maximales en hiver et au printemps. On observe une légère baisse des teneurs en été jusqu'à fin novembre qui correspond à une période moins pluvieuse puis une augmentation à nouveau à partir de janvier. L'amplitude des variations restant cependant très faible.

- 3,25 m à 4 m

La teneur en eau se situe entre 40 % et 50 %. Cette partie du profil correspond à la zone de craie altérée avec silex. Les variations de teneurs en eau avec le temps sont négligeables tout au long de la période d'observation. Nous avons d'ailleurs constaté dans cette zone, lors de visites, des écoulements d'eau à la transition des terrains là où des éboulements de la paroi du puits se produisent. Ceci confirme que le terrain dans cette zone est saturé.

- 4 m à 7,30 m

La teneur en eau est de l'ordre de 35 % à 37 % sur toute la couche de craie. Il n'y a pratiquement aucune variation durant toute l'année.

Malgré les fortes pluies enregistrées les variations de teneurs en eau sont faibles sur la première tranche et pratiquement nulles dans les deux niveaux sous-jacents : craie altérée puis craie.

La teneur en eau importante sur tout le profil indique un état proche de la saturation dans les limons, et saturé sous 4 m.

L'étude des profils d'humidité montre, qu'au cours du temps les teneurs en eau varient extrêmement peu. De ce fait, il n'a guère été possible d'établir une loi de variation de la conductivité hydraulique avec la teneur en eau.

La nature et la composition chimique du terrain sont telles que l'eau mobile ne représente qu'une très faible fraction par rapport à l'eau de porosité et de constitution des argiles. Ces deux derniers types d'eaux ont des teneurs pratiquement constantes dans le temps et de fait, les variations de teneurs en eau enregistrées à la sonde ne peuvent être que faibles et entrent presque toujours dans la plage des erreurs de mesures inhérentes à l'instrument (précision d'environ 5 %).

2.2. Succion - Charges hydrauliques

Les graphiques (A.8 à A.15) donnent la variation des profils de charge pendant la période d'observation :

$$\text{charge } H = - \psi - Z$$

ψ = succion

Z = cote de prise de pression

- Analyse des résultats

L'analyse des profils de succion et de charge nous apporte une meilleure connaissance à la fois en ce qui concerne "l'anatomie" du terrain et les mécanismes de recharge.

Les profils de charge confirment les observations faites à partir des profils hydriques. On notera la meilleure sensibilité des tensiomètres par rapport à la sonde à neutrons.

- 0 m à 3,25 m

La charge indique un état quasiment saturé en janvier, période pendant laquelle la teneur en eau était maximale. Passé cette période, la couche tend à se désaturer et les variations de charges apparaissent alors comme très corrélées aux variations pluviométriques.

La figure A.10 représente l'évolution des charges des 29 décembre 1977, 3-5-9 et 26 janvier 1978. Nous constatons une désaturation jusqu'au 5 janvier puis suite aux premières pluies une recharge jusqu'à 1,5 m. Le 26 janvier la couche située entre 1,5 et 2,5 m n'est pas encore atteinte. A 2 m entre le 29 décembre et le 5 janvier, la charge hydraulique chute, ce qui s'explique par une arrivée d'eau de la couche supérieure qui sèche : il y a infiltration : le 26 nous sommes en état de saturation permanent à 1 m de profondeur et cet état se prolonge jusqu'à début février. Le faible niveau des précipitations du mois de février se traduit par une montée des charges sensibles jusqu'à 1,5 m.

- 3,25 m à 4 m

La succion varie peu dans le temps et indique le plus souvent un état proche de la saturation, voire saturé.

- 4 m à 7 m

De même la charge hydraulique varie linéairement (succion constante et nulle), ce qui indique un écoulement gravitaire permanent (charge unitaire).

2.3. Perméabilités

L'essai de drainage interne a été réalisé au mois de juin 1978 sur une parcelle de terrain décapée (figure A.16) située à quelques mètres du puits expérimental.

Dix tensiomètres ont été implantés, ainsi qu'un tube de sonde à neutrons (profondeur 2,20 m). Les cotes respectives des tensiomètres sont 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 120, 150 et 190 cm.

Un profil hydrique et un relevé tensiométrique ont été réalisés juste avant la mise en eau. Le 14 juin 1978 une lame d'eau de 5 cm maintenue à niveau constant était établie dans un anneau d'infiltration et à l'intérieur du cadre. Le 15 juin 1978 à 9 h 25 celle-ci était complètement infiltrée et 200 mm d'eau avaient percolés à travers la surface pendant 24 h. L'aire d'infiltration fut recouverte d'un film plastique et de sable afin d'éviter l'évaporation.

Les figures A.17 à A.20 représentent l'évolution des profils hydriques et les figures A.21 et A.22 celle des charges.

Les différentes valeurs de la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau ont été calculées comme indiqué par G. VACHAUD, C. DANCETTE, S. SONKO et J.L. THONY (1978).

Les variations de stocks sont reportées sur la figure A.23 et les valeurs de tous les paramètres permettant de calculer $K(\theta)$ dans les tableaux A.1 et A.2. La figure A.24 représente la courbe $K(\theta)$.

On constate que les perméabilités au voisinage de la saturation sont extrêmement faibles et augmentent en profondeur. Seulement pour les cotes 120 et 150 cm il a été possible de déterminer une fonction de variation de perméabilité (K) en fonction de la teneur en eau. Pour ces cotes l'on a enregistré des variations "relativement" importantes de cette dernière.

A saturation (θ de l'ordre de 40 %) la perméabilité est de l'ordre de 0,7 cm par jour. Dans la plage de variation de θ qui correspond aux conditions naturelles (30 à 32 %), K varie d'un facteur (de 0,2 à 0,4 cm/j).

Dans l'étude relative à l'aspect "recharge des nappes", les courbes représentant les variations de la succion ψ en fonction de la teneur en eau ont été déterminées. L'allure de ces courbes pour les trois couches est reportée sur la figure A.25.

On constate une allure identique caractérisée par une partie proche de l'horizontale qui indique qu'une très faible variation de teneur en eau entraîne une variation beaucoup plus importante de la succion. L'allure de ces courbes appuie la remarque faite au § 2.1 concernant les profils d'humidité. On serait en présence de deux types d'eaux (eau de porosité et eau mobile) en proportion très différente. La teneur en eau de porosité peut être considérée comme à peu près constante, seule celle en eau mobile varie et engendre des variations de succion qui sont enregistrées par les tensiomètres alors que la sonde à neutrons n'est pas assez sensible pour détecter les faibles teneurs correspondantes.

3. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME

Le couplage des données tensiométriques à la pluviométrie et aux variations piézométriques de la nappe nous ont apporté des renseignements sur les mécanismes de transferts d'eau dans la zone non-saturée.

Les figures A.26 et A.27 présentent à titre d'exemple les variations :

- pluviométriques d'octobre 1977 à décembre 1977
- tensiométriques d'octobre 1977 à avril 1978

Quatre tensiomètres particulièrement représentatifs pour l'étude du système ont été sélectionnés (première couche à 1,50 m, deuxième couche à 4 m, troisième couche à 4,25 m et 7 m).

- piézométriques de la nappe d'octobre 1977 à juin 1978.

Vers le 20 novembre, on note dans la première couche une chute rapide de la succion qui passe d'environ 250 cm d'eau à 30 cm dans la première quinzaine de décembre pour se stabiliser ensuite autour de cette valeur jusque vers la mi-février. L'amorce de la chute ne peut être attribuée qu'aux pluies de la première quinzaine de novembre.

Les variations des autres tensiomètres dans cette couche montrent des évolutions tout à fait similaires (figures A.28, A.29 et A.30).

L'évolution de la succion dans la couche intermédiaire montre que le comportement de cette couche est différent de celle située au-dessus :

- à partir du début novembre, cette couche est à saturation, ce qui est en parfaite concordance avec les teneurs en eau volumique extrêmement élevées, notées à ce niveau (environ 50 %).

On est ainsi en présence d'une petite nappe perchée qui, même lorsqu'elle se désature, resterait de toute façon très proche de la saturation.

- la chute de succion se situe 10 à 15 jours avant celle enregistrée dans la couche au-dessus, ce qui tendrait à montrer la relative "indépendance" de cette zone intermédiaire vis-à-vis de la couche limoneuse.

Immédiatement au sortir de l'interface limons-craie (4,25 m), on observe une succion pratiquement constante pendant la période considérée et qui se maintient aux alentours de 30 cm d'eau. A 7 m, la succion est un peu plus élevée, mais on observe toujours une certaine constance au cours du temps, cette succion étant de l'ordre de 80 cm d'eau.

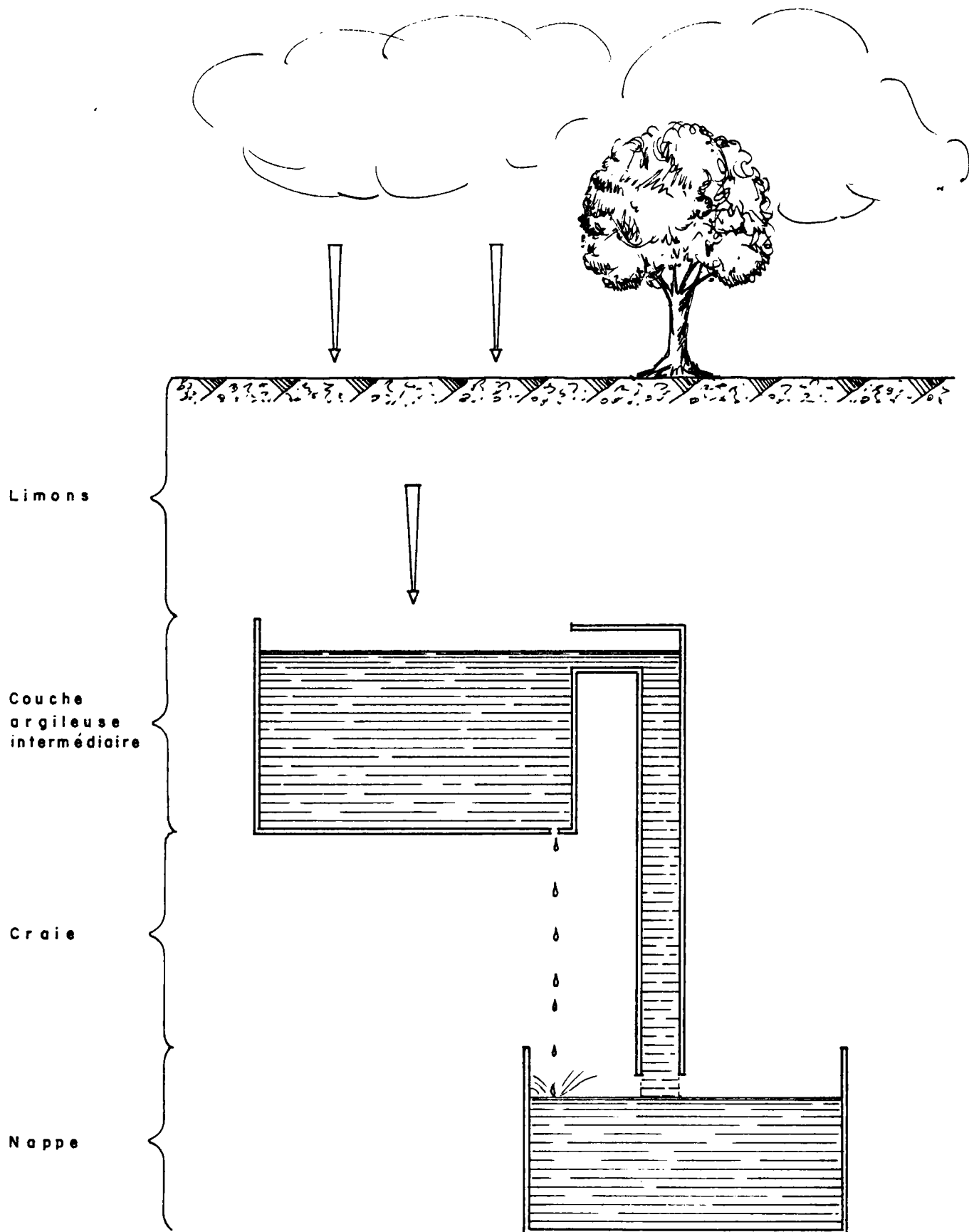


fig.A - 31_ Schématisation du fonctionnement du système

Si l'on examine les variations des niveaux piézométriques, on constate que ce sont celles de la succion enregistrées à 4 m qui sont le mieux corrélées.

Le premier "pulse" de la recharge se situe entre le 17 et le 30 novembre. C'est approximativement à cette même période (du 10 au 5 décembre) qu'on enregistre les plus faibles valeurs de succion (entre environ 25 et 40 cm d'eau). Ensuite cette succion remonte pour se stabiliser à environ 15 cm d'eau à partir du 20 décembre et jusqu'à la fin de février. Pendant cette période, la nappe continue à se recharger mais avec une pente de remontée beaucoup plus faible que lors du premier "pulse". A partir de fin février, la couche interface est légèrement désaturée, ce qui se traduit pour la nappe par la fin de recharge et une baisse du niveau piézométrique.

Il nous semble que la couche qui conditionne la recharge de la nappe est la zone argileuse intermédiaire entre les limons et la craie. Cette couche d'une épaisseur inférieure à 1 m a des teneurs en eau qui oscillent autour de la saturation qui font, qu'à certaines époques de l'année, on est en présence d'une nappe perchée.

Le système non-saturé peut être schématisé de la façon suivante (fig. A.31):

- l'eau météorique percole à travers les limons et sature la couche intermédiaire qui joue le rôle de réservoir. Lorsque ce réservoir est rempli (saturation) il se déverse dans la nappe à travers la couche de craie.

4. CONCLUSIONS

L'interprétation quantitative du milieu a fait l'objet du rapport ayant trait à l'aspect "recharge des nappes". En ce qui nous concerne, l'interprétation qualitative nous a fourni suffisamment de renseignements tant sur les caractéristiques hydrauliques que le comportement du milieu pour nous aider à une meilleure compréhension de l'évolution de la chimie des eaux.

La zone non-saturée peut être découpée en trois couches de caractéristiques hydrauliques bien définies. Les perméabilités sont extrêmement faibles. Pour la couche 1, ces perméabilités indiquent des déplacements variant approximativement entre 0,5 et 2 m par an, ceci dans la plage de variation des teneurs en eau correspondant aux conditions naturelles.

L'étude du comportement du milieu a permis de situer le rôle respectif de chacune des couches et plus particulièrement l'importance de la couche argileuse 2 dans la recharge de la nappe. Au moment de la première remontée, la recharge s'effectue brusquement, ce qui peut paraître en contradiction avec les faibles valeurs de perméabilités. On a considéré dans notre étude la zone non-saturée comme un milieu continu, d'ailleurs les techniques de mesures employées ne sont utilisables que pour ce type de milieu. Il est fort possible que cette représentation soit trop simple et que le milieu comporte également des micro-fissures par où s'écoulerait l'eau en direction de la nappe. Cette hypothèse expliquerait les phénomènes observés à savoir la relative indépendance des couches (micro-fissures faisant court-circuit) et la brusque remontée de la nappe au moment de la recharge.

B - ÉVOLUTION DU CHIMISME DE L'EAU

A. LANDREAU^{**}, B. BOSCH^{**}, P. DESGRANGES^{**}, C. JOUHANY^{***},
M. LELEU^{**}, A. MARCÉ^{'**}, C. SARCIA^{**}

× B.R.G.M.

×× Laboratoire de Pédologie, Faculté des Sciences, Université de Toulouse.

1. PROGRAMME CHIMIQUE REALISE

1.1. Préalablement, il a été fait une coupe géochimique et minéralogique de la zone non-saturée. Cette coupe géochimique comporte le dosage des éléments majeurs ainsi qu'un certain nombre d'éléments traces. Ce dernier dosage avait pour but, en fonction des teneurs trouvées, d'indiquer les éléments qu'il était *a priori* intéressant de rechercher dans les eaux.

1.2. Composition chimique des eaux de pluie

Quelques échantillons d'eau de pluie ont été recueillis dans le secteur de notre étude pour la détermination des éléments majeurs et traces (travaux de J.P. KLESCH - non publié).

1.3. Chimie des eaux dans le non-saturé et la nappe

- *Fréquence*

Cinq séries de prélèvements ont été réalisées pendant la durée de l'étude (décembre 1977, février, mai et octobre 1978 - janvier 1979), chaque série correspond à un prélèvement d'eau dans les cellules (eau du non-saturé) ainsi que dans les piézomètres situés autour du puits expérimental (eau de la nappe).

- *Conditions de prélèvement*

Les cellules étaient mises en dépression (de l'ordre de 0,7 bar) environ 15 jours avant la période projetée pour le prélèvement. Compte tenu des conditions naturelles, ce délai est apparu nécessaire afin de recueillir un volume suffisant d'eau pour l'analyse (au minimum 250 cm³)*. Il est certain que ce laps de temps a pu modifier la qualité chimique de l'eau. Cependant, on peut penser que cette évolution est minimisée par le fait que l'eau est stockée dans des conditions proches de celles du terrain tout au moins pour ce qui est de la température.

En ce qui concerne les prélèvements d'eau de la nappe à partir des piézomètres, ces derniers étaient au préalable vidés à la soupape et c'est seulement sur la nouvelle venue d'eau que la prise d'échantillon était effectuée.

* un minimum de 250 cm³ était nécessaire pour effectuer une analyse complète des majeurs.

- Analyses

En raison de l'évolution possible de certains paramètres physiques et chimiques dans le temps, certaines mesures ont été faites sur place aussitôt après le prélèvement :

- température
- pH, résistivité
- oxygène dissous par mesure à l'électrode. En sus, sur la série de février 1978, des prélèvements d'eau ont été réalisés directement des cellules dans des ampoules de volume connu, lesquelles étaient sous vide. Par chromatographie en phase gazeuse, les concentrations dans l'eau en oxygène, gaz carbonique et azote ont ensuite été déterminées
- HCO_3^- . En fait, il s'est agit d'une mesure par titrimétrie de l'alcalinité totale. Les calculs ont montré que la presque totalité de l'alcalinité était due aux ions bicarbonates.

Les échantillons d'eaux étaient ensuite filtrés sur membrane ($0,45\mu$ de porosité) afin d'éliminer les particules éventuellement en suspension, de façon à ce que les concentrations mesurées correspondent à celles des éléments dissous.

Sur le filtrat, ont été analysés les éléments suivants :

- silice
- éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-)
- azote nitreux et ammoniacal
- fluorures
- fer et manganèse
- zinc
- strontium.

Sur certaines séries de prélèvements, il n'a pas été possible de doser la totalité des éléments ci-dessus en raison de l'insuffisance de volume d'eau recueilli.

Des analyses isotopiques (^3_1H , $^{18}_{16}\text{O}$) ont été réalisées sur chaque échantillon lorsque le volume recueilli le permettait. Un profil de tritium a également été dressé à partir de l'eau extraite des carottes provenant de la réalisation du piézomètre P_1 . De plus, il a été mesuré un certain nombre de teneurs moyennes mensuelles en tritium sur les eaux de pluie.

2. DESCRIPTION DES RESULTATS CHIMIQUES OBTENUS

2.1. Lithologie, géochimie, minéralogie du terrain

- Lithologie

La coupe géologique (interprétation faite par J. LEPLAT) donne les résultats suivants (figure B.1) :

- de 0 à 3,5 m : formations superficielles constituées de limons (silt) avec des passes plus ou moins argileuses,
- de 3,5 m à la nappe : Turonien moyen constitué de marnes crayeuses ou de craie marneuse,
- entre les formations superficielles et le Turonien moyen, il se présente une zone intermédiaire d'environ 1 m d'épaisseur située approximativement entre 2,8 et 3,8 m constituée d'un mélange de limons, craie et silex. En tête de cette zone, se présente une couche de limons argileux d'environ 25 cm d'épaisseur. De même au sortir de cette zone (d'environ 3,5 à 3,8 m) il est noté la présence d'une passe marneuse.

- Profil géochimique de la zone non-saturée

Les résultats analytiques sont présentés dans le tableau B.1.

Deux éléments prédominant : la silice, le calcium (et par corrélation les bicarbonates). Le graphique B.1 indique les variations du profil pour ces éléments. Les évolutions enregistrées dans les teneurs suivent les caractéristiques géologiques du terrain :

- de 0 à environ 3 m : les teneurs en silice sont constantes, de l'ordre de 75 %. Celles en calcium (exprimées en CaO) et en carbonates (exprimées en CO₂) sont extrêmement faibles (respectivement de l'ordre de 0,8 et 0,2 %),
- zone intermédiaire entre limons et craie d'environ 3 à 4 m : la teneur en silice est moindre (de 20 à 50 %) alors que commence à apparaître des teneurs notables en calcium et carbonates (19,5 % et 15 %),
- craie à partir de 4 m : la présence de silice est faible (environ 6 %) alors que les teneurs en calcium et carbonates sont pratiquement constantes et se situent aux alentours de 50 et 40 %.

En ce qui concerne les métaux lourds, deux éléments (fortement corrélés entre eux, cf. figure B.1) prédominant : l'aluminium et le fer, ce dernier étant sous forme ferrique. Le maximum de concentration se trouve vers 3,5 m (15,4 % de Al₂O₃ et 10 % de Fe₂O₃).

Six éléments-traces ont été recherchés. Les teneurs trouvées sont reportées dans le tableau B.2. Ces éléments ont été recherchés dans les eaux. Les teneurs sont toutes inférieures au seuil de détection analytique (le plus souvent de l'ordre de 10 µg/l).

- Minéralogie

Le tableau B.3 indique les caractéristiques minéralogiques des terrains. Le matériau est composé essentiellement de quartz, feldspath, calcite et argiles, ces minéraux étant en proportion variable suivant les horizons. Le quartz prédomine largement sur les feldspaths. Ce quartz est abondant jusque vers 3 m. La calcite n'apparaît en teneurs notables qu'à partir de 5,50 m. Il faut toutefois corriger ce résultat en notant qu'on ne dispose pas d'analyse minéralogique entre 4 et 5,5 m.

Les smectites et les illites composent l'essentiel des minéraux argileux, avec une prépondérance nettement marquée pour les premières. La présence de ces smectites est notée en abondance aux niveaux 0,75 m, 2 m et entre 3 et 4 m. L'estimation quantitative du rapport smectite-illite montre que jusque vers 3 m on est en présence des deux types de minéraux et en proportion équivalente alors qu'en-dessous (notamment dans la craie) l'on assiste à une nette prédominance des smectites.

Toutes ces descriptions concordent entre-elles et montrent bien que la zone non-saturée peut être décomposée en trois couches (cf. chapitre A sur les transferts d'eaux) :

- couche 1 : de 0 à 2,8 m : zone constituée de formations superficielles composée de limons avec des passes argileuses notamment vers 0,75 et 2 m.

Ces limons sont composés essentiellement de silice (quartz) et d'oxydes d'aluminium et de fer.

Une composition moyenne peut être donnée :

- SiO₂ entre 75 et 78 %
- Al₂O₃ entre 7 et 9 %
- Fe₂O₃ entre 3 et 4 %.

- couche 2 : de 2,8 à 4 m. Cette couche correspond à l'interface entre les limons et la craie proprement dite.

Les teneurs en silice sont encore notables (entre 20 et 50 % environ), mais nettement inférieures à celles des limons. Il est à noter également un accroissement des teneurs en aluminium, fer et manganèse. C'est dans cette zone qu'on assiste au maximum de concentration pour les composés de ces trois éléments.

La teneur en calcium est nettement plus élevée que dans les limons puisqu'elle atteint 32 % (en CaO) en restant toutefois inférieure aux teneurs rencontrées dans la craie.

Cette couche (nous le verrons par la suite) joue un rôle très important quant à la chimie des eaux et constitue l'interface entre les limons et la craie. De ce fait sa géochimie est intermédiaire entre les deux en ce qui concerne les teneurs en silice, calcium et carbonates.

La description lithologique ainsi que l'analyse minéralogique indiquent des teneurs importantes en argiles. Rappelons que c'est dans ce niveau que l'on rencontre les teneurs en eau les plus élevées (plus de 50 % de teneur en eau volumique à 4 m). Les teneurs en magnésium peuvent être expliquées par le fait que cet élément est lié à la phase argileuse.

En ce qui concerne l'origine de ces argiles, il semble que celles-ci proviennent de l'altération de la craie. Il s'agit essentiellement de montmorillonites, ce qui correspondrait au résidu formé après attaque de la craie par l'acide chlorydrique (MILLOT et al., 1957). Ceci est également appuyé par le fait que la proportion smectite-illite est pratiquement identique à celle des argiles de la craie. La concordance n'est plus vérifiée pour les argiles contenues dans les limons.

Cette couche argileuse est susceptible de jouer un rôle extrêmement important d'accumulation des éléments, mais ceux-ci peuvent également se fixer sur des minéraux autres que les argiles notamment les oxydes Al_2O_3 et Fe_2O_3 relativement abondants à ce niveau (A. BONTE et P. DEBRABANT, 1973).

- couche_3 : en-dessous de 4 m. Il s'agit de craie marneuse ou de marne crayeuse, relativement homogène du point de vue chimique et composée d'environ 90 % de carbonate de calcium.

2.2. Analyses chimiques d'eau de pluie

Nous avons utilisé les résultats des analyses chimiques d'eau de pluie faites par J.P. KLESZCZ (travaux non publiés). Les prélèvements ont été réalisés soit ponctuellement (prélèvement correspondant à une journée de pluie), soit mensuellement. Dans ce dernier cas, le prélèvement correspond à la totalité des précipitations du mois donné.

Le tableau B.4 présente les résultats obtenus en 1977 pour des saisons différentes. En avril 1977, il n'a été réalisé que des prélèvements ponctuels. L'analyse présentée est représentative de l'ensemble des prélèvements effectués pendant ce mois.

TABLEAU B.4 : ANALYSES DES EAUX DE PLUIE

	12 avril 77	juillet 77	sept+oct.77	décembre 77
pH	6.05	4.25	5.50	4.40
conductivité ($\mu\text{mho/cm}$ à 20°C)		65	59	60
Ca^{2+} (mg/l)	4.4	1.8	-	-
Mg^{2+} "	0.96	0.16	-	-
Na^+ "	5.01	0.9	1.4	3.45
K^+ "	0.5	0.4	0.5	0.4
HCO_3^- "			5	1.2
Cl^- "	9	1.5	2.9	5
SO_4^{2-} "	19	13	13.9	13
NO_3^- "	3.7	7.4	5.6	< 0.5
NH_4^+ "	2.16	3.6	4.9	1.6
NO_2^- "	< 0.05	< 0.05	0.09	0.09
F^- "	0.09	< 0.05	0.11	0.15
Zn^{2+} "	1.9			
azote minéral total (exprimé en NO_3)	~ 11	~ 16	~ 22.5	~ 5.6

Il semble qu'il y ait une certaine stabilité saisonnière du chimisme. Les plus fortes teneurs se rencontrent pour les sulfates qui peuvent atteindre 20 mg/l et l'azote qui atteint en septembre + octobre 22,5 mg/l (teneur exprimée en NO_3). Dans le terrain, compte tenu des conditions oxydantes et des zones aérobies, la majeure partie de l'azote se trouve sous forme de nitrates. C'est la raison pour laquelle les trois azote (NO_3^- , NO_3^- , NH_4^+) ont été additionnés et exprimés en NO_3^- .

2.3. Chimisme de l'eau de la nappe et évolution à travers la zone non-saturée

2.3.1. Chimisme de l'eau de la nappe

Dans le cadre de l'autre étude axée sur les mécanismes de recharge des nappes, quatre piézomètres et un forage ont été implantés autour du site. Ces ouvrages ont été utilisés pour faire des prélèvements. Un schéma sommaire (figure B.2) indique la position respective de chacun de ces points d'eau par rapport au site expérimental.

Le chimisme des eaux de la nappe est consigné dans les tableaux B.5.1 à B.5.4. A noter que pour le piézomètre PZ₁, un développement à l'acide chlorhydrique avait été fait et qu'il n'a pas été possible par la suite de le nettoyer convenablement. De ce fait, les teneurs en chlorures et en calcium sont élevées et les caractéristiques chimiques trouvées ne peuvent être considérées comme représentatives du chimisme de la nappe.

Les prélèvements effectués en août et en décembre 1977 ont été faits à la soupape sans avoir au préalable renouvelé l'eau dans les piézomètres. Pour tous les autres prélèvements, les ouvrages ont été vidés et le prélèvement effectué à la soupape sur la nouvelle venue d'eau.

La minéralisation est de l'ordre de 800 mg/l. Le faciès est bicarbonaté et sulfaté calcique. Les fourchettes de variations sont les suivantes :

- pH	~ 6.9 - 7.1
- résistivité	1100 à 1200 Ωcm à 20°C
- calcium	170 - 190 mg/l
- bicarbonates	265 - 345 mg/l
- sulfates	130 - 180 mg/l
- chlorures	45 - 100 mg/l
- nitrates	30 - 80 mg/l

On note également des teneurs en azote ammoniacal oscillant entre 0,2 et 0,4 mg/l. L'eau de la nappe comporte des teneurs en fluorures comparables à celles trouvées dans l'eau de pluie (0,10 à 0,15 mg/l). Le zinc est également détecté à des teneurs de l'ordre de 0,1 mg/l. Le strontium (élément aux propriétés chimiques proches de celles du calcium) est présent à des teneurs variant entre 0,3 et 0,4 mg/l.

2.3.2. Evolution du chimisme à travers la zone non-saturée

Tous les résultats chimiques sont présentés dans les tableaux B.6.1 à B.6.13.

Deux remarques générales s'imposent concernant l'évolution du chimisme :

- Le premier prélèvement est effectué à 25 cm ; suivant les périodes, la minéralisation de l'eau à ce niveau varie entre 400 et 500 mg/l. Si l'on se réfère à la minéralisation de la nappe (de l'ordre de 800 mg/l), l'on constate que dans les premiers 25 cm l'eau a acquis 50 à 60 % de sa minéralisation finale.
- La plupart des éléments majeurs suivent la même évolution quant à leur teneur au fur et à mesure de la percolation.

* Pour chacun d'eux, le profil fait apparaître un certain nombre de pics de concentrations. Sur une année d'observation (cinq séries de mesures) il n'a pas été observé de manière significative de transferts de ces pics en direction de la nappe. Ceux-ci ont toujours été localisés aux mêmes niveaux.

* Le profil d'évolution de la minéralisation totale (figure B.3) est représentatif de celui des ions majeurs.

Le chimisme des eaux est extrêmement corrélé à la lithologie et par voie de conséquence la géochimie et la minéralogie des terrains traversés :

- couche_1 (de 0 à 2,8 m) : on observe un accroissement régulier de la minéralisation qui varie à 0,25 m entre 420 et 500 mg/l suivant les saisons pour se situer à 2,8 m entre 650 et 800 mg/l. On observe toutefois une cassure dans l'évolution, qui se situe vers 0,75 m et correspond à une passe argileuse dans les limons.
- couche_2 (de 2,8 à 4 m) : on assiste à une brusque chute de la minéralisation à l'entrée de cette couche. La perte se situe entre 10 et 20 %, puis la minéralisation croît à nouveau. Au niveau inférieur de cette deuxième couche, on observe de

fortes minéralisations qui sont de 20 à 30 % supérieures à celles rencontrées dans la nappe. Les teneurs avoisinent les 900 mg/l et sont extrêmement stables dans le temps.

- couche_3 (de 4 m à la nappe) : le passage couche 2 - couche 3 se caractérise tout comme le premier passage (couche 1 - couche 2) par une brusque chute de la minéralisation (de l'ordre de 30 à 40 %).

La minéralisation croît ensuite à nouveau pour arriver à 7 m à des teneurs variant suivant les époques de prélèvements entre 650 et 730 mg/l.

La minéralisation de la nappe dont le niveau varie entre 8 et 13 m se situe entre 770 et 880 mg/l, ce qui peut laisser supposer qu'entre 7 m* et la nappe l'eau de percolation s'enrichit encore en sels dissous. Toutefois, en-dessous de 7 m, l'interprétation du chimisme des eaux est délicate. En bas du profil d'infiltration, la condition aval n'est pas fixe et de ce fait on est en présence d'une zone qui fluctue selon la piézométrie et où l'on a à la fois un transfert d'eau vertical (percolation) et horizontal (nappe).

La silice (figure B.4)

Le calcium (figure B.5)

Le profil est extrêmement semblable à celui de la minéralisation totale, ce qui s'explique par le fait que les eaux sont calciques et qu'ainsi cet élément contribue en grande partie à la minéralisation des eaux.

Cependant, les amplitudes des variations du calcium suivant les dates de prélèvements sont beaucoup moins importantes que celles de la minéralisation.

Le magnésium (figure B.6)

Le sodium (figure B.7)

Pour une date donnée, le maximum d'amplitude de variation ne se situe pas entre l'entrée et la sortie de la couche 2, mais entre 0,75 et 1 m. Pour le prélèvement de mai 1978, la teneur dans ce niveau est d'environ 10 mg/l.

Le potassium (figure B.8)

* cote de la dernière cellule de prélèvement.

Les bicarbonates (figure B.9)

Les sulfates (figure B.10)

Le profil type ne s'observe que pour les couches 2 et 3. L'allure en est différente dans la couche 1. On observe un pic supplémentaire.

- pic_1 : au contraire des cas précédents où le maximum est situé vers 0,75 m, ce pic s'observe vers 0,5 m. La chute de concentration entre 0,5 et 0,75 m est d'environ 25 mg/l.
- pic_2 : il se situe vers 1 m et son intensité est du même ordre que pour le pic 1 (environ 170 mg/l). A 1,5 m la teneur a diminué d'environ 50 mg/l.
- pic_3 : on le retrouve comme pour les autres éléments à la fin de la couche 1.

Les chlorures (figure B.11)

Les phénomènes observés lors du passage des différentes couches sont également observés, mais dans la première couche on observe plus la stabilité des pics quant à leur position dans le profil. De plus, l'intensité de ces pics dans le temps est très variable. Ainsi en mai 1978, la teneur maximale détectée est d'environ 50 mg/l (à 2,4 m). A ce même niveau en février 1978, la teneur était de 120 mg/l.

En janvier 1979, le maximum d'intensité se situe à 1 m, la teneur étant de 181 mg/l.

Les nitrates (figure B.12)

Le profil d'octobre 1978, principalement pour la couche 1, semble être une anomalie par rapport au quatre autres profils. En effet, dans cette couche, les teneurs varient peu quel que soit le niveau et sont le plus souvent de l'ordre de 10 à 20 mg/l.

Dans la couche 2, on observe une très forte concentration à 3,5 m. Les teneurs avoisinent les 160 mg/l (mai, juin et septembre 1978) voire 280 mg/l (?) en octobre 1978.

En janvier 1979, il n'a pas été possible de tirer l'eau dans la cellule de prélèvement. La teneur trouvée nous aurait permis d'infirmer ou de confirmer l'accroissement de concentration au cours du temps des nitrates à ce niveau :

février 1978	:	42 mg/l
mai 1978	:	160 mg/l
juin 1978	:	164 mg/l
septembre 1978	:	168 mg/l
octobre 1978	:	277 mg/l

La différence de teneur entre le prélèvement de septembre et d'octobre confirme qu'il faut émettre quelques réserves quant aux valeurs trouvées.

Les valeurs très proches trouvées en mai, juin et septembre peuvent s'expliquer par le fait que ces trois prélèvements ont été effectués pendant une période ou pratiquement les transferts d'eau à ce niveau de 3,5 m sont extrêmement faibles. De ce fait, l'eau prélevée a la même origine dans le temps. Une autre hypothèse peut également être avancée, à savoir qu'à ce niveau il y aurait une "saturation" en nitrates qui serait d'environ 160 mg/l.

Dans la craie, on note des teneurs à peu près constante similaires à celles mesurées dans la nappe (de l'ordre de 50 mg/l).

Le fer

Les teneurs trouvées dans la zone non-saturée sont très faibles (entre 0 et 0,05 mg/l). Le maximum mesuré dans la nappe est de 0,085 mg/l.

Le manganèse (élément associé au fer) se situe à des teneurs inférieures au seuil de détection analytique (seuil : 1 µg/l).

Le strontium

De par ses propriétés chimiques, cet élément a un comportement très proche de celui du calcium. Les teneurs mesurées comparées à celles du calcium mettent en évidence une forte corrélation (figure B.13). Les concentrations se situent entre 0,24 et 0,42 mg/l.

Le zinc

Jusque vers 2 m, les teneurs oscillent entre 0,030 et 0,050 mg/l. De 2 à 5 m les concentrations se situent entre 0,05 et 0,07 mg/l. A partir de 5 m, les concentrations tendent vers celles mesurées dans la nappe et qui sont de l'ordre de 0,1 mg/l.

Les fluorures

Les teneurs les plus élevées sont détectées dans les horizons de surface : à 25 cm on trouve 0,64 mg/l en mai 1978 et 0,44 mg/l en janvier 1979.

A 50 cm, la teneur est de l'ordre de 0,1 mg/l. Ensuite, on ne détecte à nouveau des fluorures que dans les couches 2 et 3. Ces teneurs (évoluant entre 0,1 et 0,2 mg/l) sont comparables à celles de la nappe.

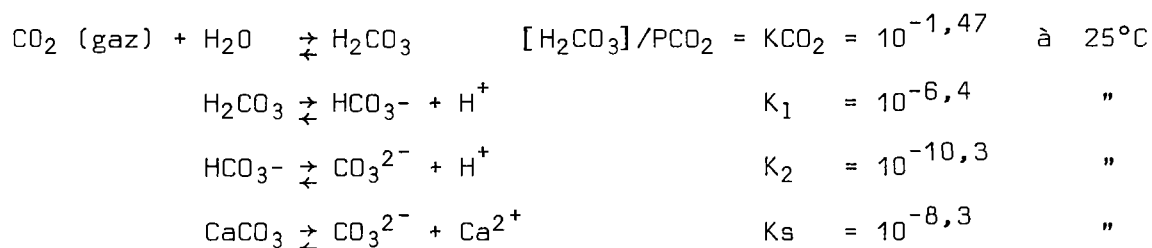
Le tritium (tableau B.7 et figure B.14)

L'idée était de suivre le transfert du tritium dans le terrain par traçage naturel. En général, les pluies d'hiver et d'été sont suffisamment différenciées en teneur en tritium pour pouvoir suivre la percolation des pics dans le non-saturé. Or il s'avère que la différenciation pluie d'hiver - pluie d'été est de moins en moins marquée, ceci étant sans doute dû en grande partie à la mise en service de centrales nucléaires. Ceci nous a gêné notablement pour l'interprétation des résultats. Il est certain qu'un traçage artificiel au tritium nous aurait apporté beaucoup plus, malgré l'extrême lenteur des vitesses de transfert.

Sur la figure B.14 sont reportées les valeurs du tableau B.7. La comparaison des différents profils tritium semblerait indiquer (si l'on se réfère aux pics marqués d'une flèche) un transfert de l'eau avec une vitesse moyenne d'infiltration de l'ordre de 8 à 9 cm par mois dans les formations superficielles du terrain (0-4 m). Ce profil indique également que vers 4 m il existe un resserement des profils ^3H , ce qui semble indiquer un rôle tampon de cette zone très humide.

3. DISCUSSION DES RESULTATS

La plupart des analyses chimiques ont été traitées par le programme WATEQ (TRUEDELL et JONES, 1973). Ce programme calcule à partir des concentrations déterminées par l'analyse, la répartition des différentes espèces en solution. Par exemple, l'ion calcium se trouve en majeure partie à l'état dissous Ca^{2+} , mais peut également se trouver engagé dans des composés chimiques de type $[\text{Ca}(\text{OH})]^+$, $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)]^+$. Ce programme calcule également à partir de la valeur du pH (mesurée "in situ") et celle de l'alcalinité totale, la pression partielle de CO_2 en équilibre avec les ions bicarbonates et carbonates de la solution (PCO_2).



Outre ces différents calculs, il est également testé les équilibres chimiques de l'eau avec 82 minéraux afin de déterminer si l'eau est sursaturée ou sous-saturée vis-à-vis de ces composés. En annexe est fournie une description de ce programme de traitement ainsi qu'un exemple de sortie ordinateur concernant l'échantillon d'eau prélevé sur la cellule 10 en février 1978 (annexes B.1 et B.2).

En marge de l'objet de cette étude, un certain nombre de constatations ont été faites, que nous avons jugé intéressant de présenter en annexe :

- corrélation résistivité-minéralisation totale (annexe B.3),
- comparaison entre HCO_3^- mesures sur le terrain et en laboratoire (annexe B.4),
- essai d'adsorption des ions dans les cellules de prélèvement (annexe B.5).

3.1. Evolution du faciès hydrochimique des eaux

Concernant les ions majeurs, il faut faire une distinction entre (Ca, Mg, Na, K, HCO_3), (Cl, NO_3) et (SO_4^{2-}).

L'origine des éléments du premier groupe dans les eaux peut, a priori, être attribuée en majeure partie à la constitution chimique et minéralogique des terrains traversés. Les éléments du second groupe ont par contre une origine anthropique. Les ions sulfates peuvent eux provenir soit de la dissolution des ions SO_4^{2-} du terrain, soit des engrais ou de la pluie. Les teneurs en sulfates dans le terrain sont faibles.

Elles varient approximativement entre 0,035 et 0,1 %, ce qui ne permet pas d'expliquer en totalité les concentrations élevées trouvées dans les eaux.

Le faciès hydrochimique des eaux est carbonaté et sulfaté calcique. En octobre, sur le piézomètre PZ₄, la nappe avait une teneur en ions dissous d'environ 23 meq/l. La minéralisation se répartissait comme suit :

- Ca²⁺ : 38 %
- HCO₃⁻ : 26 %
- SO₄²⁻ : 13 %

Les trois ions représentent à eux seuls près de 80 % de la minéralisation totale.

Nous avons constaté que les teneurs en calcium variait au cours de la percolation. Par contre, si l'on se réfère aux teneurs en %, on constate que l'importance du calcium reste à peu près constante. En se référant aux mesures d'octobre 1978, les minimas et les maximas sont de 44 % et 47 %.

Le pourcentage d'ions HCO₃⁻ n'est comparable à celui de la nappe qu'à partir de 1,5 m (25 %) et reste stable le long du profil sauf à 3,5 m (maxima de minéralisation) où la proportion chute à 9 %. A 4 m (au sortir de la couche 2), cette valeur est remontée à 23 %.

Le pourcentage de sulfates fluctue le long du profil. Il varie entre 23 % (25 cm) et 8 % (5 m).

Le tableau B.8 permet de comparer le faciès chimique de la nappe et celui de l'eau en fin de percolation (7 m) - prélèvements de février 1978*.

TABLEAU B.8

Février 1978	Ca	HCO ₃	SO ₄	Minéralisation totale (en meq/l)
PZ ₄	43,15	23,96	16,06	21,78
Forage	43,28	24,31	16,82	22,29
Cellule 13	43,83	19,76	20,53	19,48

* En octobre 1978, le profil du non-saturé était complet, par contre il n'avait été effectué aucun prélèvement de nappe. C'est pourquoi pour cette comparaison, eau de nappe - eau en fin de percolation il est pris comme référence février 1978.

On constate que le faciès dans le non-saturé et la nappe est le même. A 7 m, les ions Ca^{2+} , HCO_3^- et SO_4^{2-} représentent 84,12 % de la minéralisation et dans la nappe 83,17 % (PZ₄) et 84,41 % (forage). Par contre, comme on l'avait déjà remarqué auparavant, la nappe est légèrement plus minéralisée que l'eau du non-saturé qui arrive à la nappe. Le dernier prélèvement est pris à 7 m. Si l'on considère que l'eau qui percole continue à s'enrichir en sels dissous jusque vers 8 m, on peut considérer que le gain serait de l'ordre de 50 mg/l (en se référant à la figure B.3 - variation de la minéralisation totale en fonction de la profondeur). Ceci donnerait au sortir du non-saturé une minéralisation d'environ 760 mg/l contre 845 mg/l (forage) et 812 mg/l (PZ₄). Il semblerait donc que dans la nappe, l'eau continuerait à acquérir 5 à 10 % de sa minéralisation.

La proportion de calcium est la même dans le non-saturé et la nappe, par contre cette dernière est plus riche (en %) en HCO_3^- et appauvrie en sulfates.

Il a été constaté qu'à 3,5 m les ions HCO_3^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} ne représentent plus que 65 % de la minéralisation totale, ceci étant dû en grande partie à la chute des ions HCO_3^- (9 %) qui sont contrebalancés par les chlorures (103 mg/l - 11,7 %) et surtout les nitrates (277 mg/l - 18,1 %).

3.2. Stabilité du profil chimique dans le temps

C'est un des faits les plus marquants de cette étude. On pouvait a priori s'attendre à observer sur une année un transfert de pics de concentrations en direction de la nappe. Cela n'a jamais été le cas ; il a été toujours observé une stabilité des profils. Les pics (ou les retraits) se trouvent à des niveaux bien définis, seule varie au cours du temps leur intensité. Quelle explication donner à ce phénomène ?

Dans le chapitre A concernant les transferts d'eau, nous avons signalé la faible importance de l'eau mobile (quelques %) par rapport à l'eau de porosité et de constitution du terrain. A partir de là, plusieurs hypothèses ayant même effet peuvent être émises concernant la stabilité dans le temps des profils chimiques :

- La technique d'extraction d'eau du terrain employée permet de prélever en sus de l'eau gravitaire, une partie de l'eau de porosité. Les proportions volumiques entre ces deux types d'eaux étant extrêmement différentes, l'eau de porosité prélevée que l'on peut supposer avoir un chimisme très stable, s'impose. Les transferts de pics de concentration par le biais de l'eau mobile sont ainsi peu marqués.
- L'eau qui a été prélevée est uniquement l'eau de porosité. Ceci semble cependant fort peu probable.

- La méthode des bougies poreuses est bien sélective de l'eau mobile compte tenu de la dépression mise en jeu (0,7 bar environ), mais du fait de la minéralisation très supérieure de l'eau de porosité, une partie de cette dernière diffuse dans l'eau mobile et impose son chimisme. D'où la stabilité observée. Ce phénomène de diffusion d'éléments chimiques a déjà été évoqué par certains auteurs, précisément dans la craie comportant certains horizons argileux et marneux (FOSTER, 1975).
- On peut aussi reprendre l'hypothèse émise dans la conclusion du chapitre A concernant la présence de micro-fissures. Le transfert des sels s'effectuerait essentiellement par celles-ci et échapperait en partie à l'observation du fait que la méthode d'extraction d'eau employée concerne principalement le milieu continu.

Ces hypothèses qui mettent en avant une différence notable du chimisme entre les deux types d'eaux ont sur un plan général des conséquences extrêmement importantes quant à l'interprétation des transferts de sels à travers la zone non-saturée à partir d'observations "in situ" et les répercussions possibles sur la qualité de la nappe sous-jacente. Ce problème a également été mis en évidence dans une récente étude (LANDREAU, 1979) concernant l'épandage d'effluents sur terrain agricole et les effets sur la zone non-saturée (craie de Champagne). La méthode d'extraction d'eau est différente de celle employée dans la présente étude : carottage suivi en laboratoire d'une extraction d'eau par lixiviation. Les pics de concentrations trouvés à certains niveaux avoisinent le gramme par litre. Mais quelle va être la contribution de ces eaux chargées au chimisme de la nappe ?

Pour avancer dans ce domaine, nous pensons que dans un premier temps, il serait nécessaire de mettre en oeuvre des expérimentations "in situ" et en laboratoire afin de :

- Tester les différentes techniques d'extraction d'eau entre elles (bougies poreuses, carottage suivi soit d'une centrifugation, d'un pressage ou d'une lixiviation) et comparer leurs effets sur la qualité de l'eau collectée.
- Essayer de séparer (tout au moins en partie) l'eau mobile de l'eau de porosité et pouvoir estimer les contributions respectives de chacun de ces deux types d'eau à la minéralisation de la nappe.

Quant aux discontinuités observées mettant en évidence trois couches indépendantes, elles peuvent également être interprétées, outre par l'existence de micro-fissures faisant court-circuit, en supposant une différence de minéralisation beaucoup plus importante qu'on ne le soupçonne entre les deux eaux et que l'échantillon prélevé comporte une part d'eau de porosité qui impose sa minéralisation.

- Couche 1

On assiste tout à fait logiquement à un accroissement de la minéralisation au fur et à mesure de la percolation.

- Couche 2

Du fait du changement de faciès chimique du terrain, l'eau de porosité a une composition différente de celle de la couche précédente ce qui expliquerait (en supposant une minéralisation plus faible dans la couche 2) la rupture observée dans le profil. On noterait ensuite à nouveau un accroissement rapide de la minéralisation dû à la percolation, les temps élevés de percolation dus à la très faible porosité du milieu compensant le peu d'épaisseur de la couche.

- Couche 3

Le même phénomène que celui observé à l'interface couche 1/couche 2 se produirait.

Une autre hypothèse peut également être avancée pour expliquer ces discontinuités dans le chimisme des eaux. Il s'agit au niveau de chaque couche d'imaginer la venue d'eaux latérales qui aurait pour effet de diluer l'eau de la couche précédente ou de supposer chaque couche comme un système indépendant avec de faibles transferts verticaux. Compte tenu des conditions hydrogéologiques, cette hypothèse est peu envisageable, mais n'est pas à rejeter a priori. Par contre, les eaux passant par des micro-fissures pourraient jouer ce rôle de dilution.

3.3. Interaction eau-roche, phénomènes mis en jeu pour certains éléments

Tous les éléments mesurés ne seront pas examinés du fait de la similitude de comportement de certains d'entre eux.

/ les ions alcalins /

La caractéristique des profils des ions Na^+ et K^+ est la brusque chute de concentration entre 0,75 m et 1 m, surtout sensible pour le sodium.

- Na^+ : perte de 9,9 mg/l soit 0,43 meq/l (février 78)
- K^+ : perte de 0,1 mg/l soit $2,5 \cdot 10^{-3}$ meq/l (février 78).

Cette variation peut s'expliquer par le fait que ce niveau comporte une teneur en argile assez importante (présence abondante de smectites, laissant présumer un échange de base).

/ les ions alcalino-terreux / (principalement Ca^{2+})

- Le profil

Dès 25 cm, la teneur en calcium avoisine les 100 mg/l. Si on tient pour négligeable l'apport météorique (de l'ordre de 5 mg/l), il faut admettre que ce calcium provient pour la très grande majeure partie de la constitution chimique du terrain, malgré la faible proportion de calcaire qu'il contient (de l'ordre de 8 % en surface - teneur exprimée en CaO).

L'étude de la variation de PCO_2 le long du profil aide à l'interprétation des teneurs en calcium.

Si l'on suppose l'eau en équilibre avec l'atmosphère, PCO_2 est de l'ordre de $10^{-3.5}$. Quels que soient les prélèvements effectués, cette PCO_2 varie entre 10^{-3} et 10^{-2} , ce qui signifie que le CO_2 n'est pas exclusivement d'origine atmosphérique et situe l'importance de l'activité microbienne productrice de CO_2 .

L'étude des variations de la PCO_2 dans le temps indique que le maximum de l'activité se situerait entre les mois de février et de juin.

Le tableau ci-dessous indique les variations de la PCO_2 en fonction de la profondeur (prélèvements de février 1978).

profondeur (en m)	n° de cellule	PCO_2
2,25	1	6×10^{-3}
0,5	2	$8,04 \times 10^{-3}$
0,75	3	1.80×10^{-2}
1	4	1.91×10^{-2}
1,5	5	2.76×10^{-2}
2	6	?
2,5	7	2.55×10^{-2}
3	8	2.27×10^{-2}
3,25	9	4.73×10^{-2}
3,75	10	2.69×10^{-2}
4	11	3.02×10^{-2}
5	12	1.90×10^{-2}
7	13	1.45×10^{-2}

La figure B.15 visualise l'évolution du profil.

La PCO_2 augmente à peu près régulièrement jusqu'à 1,5 m et diminue ensuite légèrement jusque vers 7 m excepté à 3 m où l'on note une brusque augmentation.

Que signifient ces variations ?

Jusque vers 1,5 m, on peut supposer l'existence d'une activité bactérienne intense qui, ensuite s'estompe excepté au niveau 3 m où l'on a à nouveau un regain d'activité. Ces Observations concordent pleinement avec la teneur en carbone organique du terrain qui comporte deux horizons plus chargés, l'un se situant dans les deux premiers mètres, l'autre entre 3 et 3,5 m (cf. tableau B.1). Le fait que ce dernier horizon soit riche en matières organiques est très certainement à mettre en relation avec la présence d'un horizon argileux largement favorable aux adsorptions de ces matières.

Le CO₂ produit abaisse le pH et favorise la dissolution de la calcite du terrain. Les fortes teneurs en calcium trouvées à ce niveau pourraient être expliquées en grande partie par l'activité bactérienne qui minéraliserait la matière organique.

Les variations des teneurs en ions HCO₃⁻ sont extrêmement corrélées aux teneurs en Ca²⁺ (du fait des relations chimiques liant ces deux éléments) excepté vers 4 m ce qui tend à indiquer qu'à ce niveau intervient un autre phénomène qui sera abordé lors de l'étude des nitrates.

- Equilibre calcium dissous - calcite

Les équilibres calculés à partir du programme WATEQ montrent que les différentes périodes d'analyses de l'eau sont très différentes :

- décembre 1977 : toutes les eaux prélevées sont sous-saturées par rapport à la calcite sauf celles des bougies 11 et 13.
- février 1978 : toutes les eaux sont à sous-saturation.
- mai 1978 : cinq eaux sont à sursaturation (bougies 3, 5, 7, 8 et 10).
- octobre 1978 : toutes les eaux sont sursaturées.
- janvier 1979 : bien qu'on ne dispose pas d'analyses pour tous les niveaux, sept eaux sont à sursaturation (bougies 4, 6, 7, 8, 9, 11 et 12).

La saturation ou la non-saturation des eaux en calcium semble être liées au temps de contact eau-roche.

En février 1978, la nappe était en période de recharge avec circulation d'eau gravitaire dans la zone non-saturée. D'après les variations piézométriques enregistrées, cette circulation se serait terminée vers la fin février, ce qui expliquerait qu'à certains niveaux apparaissent des sursaturations en calcite dans les prélèvements de mai 1978. De mai à octobre, les conditions climatiques sont telles qu'on enregistre aucune circulation d'eau, d'où un long temps de contact eau-roche qui permet à ces eaux d'atteindre la saturation. Janvier 79 correspond seulement au début de la recharge, celle-ci ayant débuté très tardivement en raison des très faibles précipitations au dernier trimestre 1978.

Ceci aurait tendance à mettre en évidence que les transferts lents seraient à remettre en cause et qu'on serait en présence d'un système de micro-fissures dans lequel les vitesses de transferts ne permettraient pas de négliger l'aspect cinétique.

Quelques travaux récents sur les cinétiques de dissolution des minéraux en milieu non-saturé ont été réalisés, mais sont relatifs surtout au gypse qui nécessite néanmoins de faire intervenir les ions CO_3^{2-} par le biais des ions Ca^{2+} . Citons essentiellement les travaux de KEMPER et al. (1975) et KEISLING et al. (1978). Les études faites sur colonne concernent le minéral à l'état "pur".

La vitesse de dissolution est décrite par la formule classique :

$$\frac{dc}{dt} = K (C_s - C)$$

où dc : est la quantité de sel dissous pendant le temps dt

et K : la constante de réaction dépendant principalement de la vitesse de transfert de l'eau et de la surface spécifique du minéral

C_s : concentration en sel dissous lorsque l'équilibre est atteint

C : concentration en sel dissous au temps t

/ les sulfates /

Si l'on prend une période de référence de 20 ans (août 1946 à septembre 1976), la moyenne des précipitations annuelles est d'environ 640 mm pour une moyenne de pluie efficace de 116 mm. Le facteur de concentration serait d'environ 5.5. Si l'on considère que la teneur moyenne dans les eaux de pluie oscille entre 15 et 20 mg/l (référence au tableau B.4), le calcul indique une teneur en sulfates pour l'eau infiltrée se situant entre 80 et 110. A 25 cm les teneurs des échantillons d'eau sont de l'ordre de 150 mg/l, ce qui tendrait à prouver que cet élément provient en grande partie des précipitations. Ceci serait en concordance avec le peu de sulfates contenu dans les limons (de l'ordre de 0,04 %). Les teneurs dans la craie sont un peu plus élevées (de l'ordre de 0,1 %).

Les nombreuses discontinuités observées dans le profil sont très certainement à mettre en relation avec les variations de teneur en argiles des deux premières couches, ces argiles favorisant les adsorptions. Ces phénomènes peuvent être très importants si l'on considère que dans le cas des montmorillonites, les surfaces spécifiques sont de l'ordre de 700 à 800 m^2/g . Les travaux de Warren W. WOOD (1975 et 1978) mettent en évidence ces phénomènes. Signalons également ceux de BOWDEN et al. (1974) et S.S.S. RAJAN (1978) qui décrivent et précisent l'importance des phénomènes d'adsorption des sulfates sur les oxydes d'aluminium et de fer.

Il est à noter, en ce qui nous concerne que le niveau 3-3,5 m est particulièrement riche en ces oxydes (de l'ordre de 15 % d' Al_2O_3 à 3,5 m).

/ Nitrates - Chlorures /

La principale caractéristique de ce profil est l'intensité du pic localisé à 3,5 m (de l'ordre de 160 mg/l en mai, juin et septembre 1978). Les argiles semblent jouer un rôle de barrière extrêmement important vis-à-vis de cet anion. Cet effet a été noté dans de nombreux travaux de recherche, mais principalement pour les cations.

Il est fort possible que cet effet de fixation des nitrates ne soit en réalité qu'un phénomène "secondaire" dû en fait aux ions ammoniums qui se trouveraient liés aux argiles soit sous forme échangeable, ou (et) fixées, ou (et) sous forme de complexes organiques. Concernant le calcium nous avons fait remarquer qu'à ce niveau argileux on décèle une activité bactérienne notable ; celle-ci pourrait être essentiellement due aux bactéries nitrifiantes qui auraient pour effet de transformer l'ammonium en nitrates.

Il nous semble cependant que le rôle de "barrière" ou de "piège" joué par les argiles ne puisse être expliqué en totalité par les phénomènes de nitrification étant donné que pour les chlorures l'on fait également les mêmes observations, et que dans ce cas des phénomènes bactériens sont peu probables.

Si l'on étudie l'évolution des teneurs dans le temps à 3,5 m, on observe une teneur nettement moindre en février 1978 (environ 45 mg/l) qu'en mai, juin et septembre 1978. Cela peut être lié à la différenciation eau libre - eau de porosité : en février la nappe se recharge alors qu'à partir de mai, on n'observe plus de transferts d'eau. A partir de mai, l'eau retirée serait exclusivement constituée d'eau de porosité.

C - CONCLUSIONS

Cette étude doit être considérée comme la phase préliminaire d'une recherche sur les mécanismes d'acquisition de la qualité des eaux souterraines.

Un début d'interprétation des observations recueillies *in situ* indique les axes vers lesquels doit être poursuivie cette recherche.

1. Transferts d'eaux

Rappelons que pour notre étude, nous avons découpé la zone non-saturée en trois horizons successifs : limons (3 m), limons et craie avec forte proportion d'argiles (1 m) et craie (4 m).

L'étude du comportement du milieu, qui a été développée dans le cadre d'une étude parallèle concernant la recharge des nappes à travers la zone non-saturée (mesures et modélisations), a permis de situer l'importance de chacune des couches et plus particulièrement celle de la couche argileuse 2 dans la recharge de la nappe. Au moment de la première remontée, la recharge s'effectue brusquement, ce qui peut paraître en contradiction avec les faibles valeurs de perméabilités. On a considéré dans notre étude la zone non-saturée comme un milieu continu, d'ailleurs les techniques de mesures employées ne sont utilisables que pour ce type de milieu. Il est fort possible que cette représentation soit trop simple et que le milieu comporte également des micro-fissures par où s'écoulerait l'eau en direction de la nappe. Cette hypothèse expliquerait les phénomènes observés à savoir la relative indépendance des couches (micro-fissures faisant court-circuit) et la brusque remontée de la nappe au moment de la recharge.

Un traçage s'imposerait dans un premier temps afin de mieux préciser ceci.

2. Evolution du chimisme des eaux

Principalement trois points marquants ressortent de cette étude :

- Discontinuités dans le profil chimique et stabilité dans le temps

A l'intérieur de chaque couche, on observe une progression régulière de la minéralisation au fur et à mesure de la percolation, puis au contact de chaque couche, une discontinuité due à une brusque chute de la minéralisation. Ces phénomènes sont répétitifs dans le temps.

Un certain nombre d'explications possibles ont été avancées lors de la discussion des résultats. Les chutes de minéralisation pourraient être expliquées par des phénomènes de dilution entre des eaux de porosité (eau matricielle) et des eaux mobiles qui, elles, circuleraient en certains endroits dans des micro-fissures, dans la mesure où évidemment cette hypothèse peut être retenue. L'expérience de traçage proposée aiderait très certainement à l'interprétation des résultats obtenus.

En tous les cas, il apparaît qu'une distinction est à faire dans ce type de terrain en ce qui concerne le chimisme des eaux matricielles et celui des eaux de circulation. Les résultats obtenus laissent supposer que ces deux types d'eaux sont extrêmement différents. Dans un premier temps, il serait utile de comparer entre elles les différentes techniques d'échantillonnage *in situ* afin de déterminer laquelle est la plus appropriée au type d'eau recherchée. Il serait également intéressant de pouvoir comparer le chimisme de l'eau extraite par cellule poreuse à celui de l'eau restant dans le terrain après cette extraction.

- *Phénomènes de concentration dans la couche intermédiaire argileuse*

Il est généralement attribué aux argiles un rôle de fixateur de cations. Les observations faites montrent également une accumulation d'anions dans le milieu argileux, principalement en ce qui concerne les nitrates. Quelle en est la raison : chimi-sorption, phénomènes purement physiques ou d'origine bactérienne...? Cette couche mérite à notre sens une attention toute particulière afin de pouvoir préciser d'éventuels phénomènes de barrières joués vis-à-vis de polluants notamment les nitrates.

Les observations mettent en évidence une pression partielle de CO_2 particulièrement importante. Quelle en est la raison ? Peut-il exister dans cette couche un niveau bactérien qui serait responsable de l'augmentation de la teneur en CO_2 . Rappelons que ce niveau contient des teneurs en carbone organique qui correspondent à celles contenues à la surface du terrain. Des prélèvements d'échantillons dans cette couche suivis d'analyses bactériologiques permettraient d'approfondir ce point. Il serait également intéressant de suivre dans le temps l'évolution de la pression partielle de CO_2 dans ce niveau.

- *Cinétique de dissolution*

L'étude des équilibres calcium dissous-calcite nous ont montré que malgré les temps de transferts extrêmement lents, l'équilibre sel dissous-minéral n'est pas toujours atteint. Il apparaît nécessaire, même dans un système comme celui-ci, de prendre en compte les cinétiques de dissolution si l'on veut simuler correctement les phénomènes du milieu. Un des objectifs de cette étude était justement de déterminer s'il était nécessaire pour les réactions eau-roche de faire intervenir l'aspect cinétique ou si au contraire, les équilibres étaient atteints rapidement. Même dans un milieu de ce type, des modèles d'évolution du chimisme de l'eau dans la zone non-saturée basés uniquement sur des équilibres thermodynamiques semblent insuffisants dans notre cas pour rendre compte de la réalité des phénomènes mis en jeu.

BIBLIOGRAPHIE

- AUSSEUR (J.Y.), BONNET (M.), SAUTY (J.P.) et VANDENBEUSCH (M.) 1979 .- Recharge des nappes à travers la zone non-saturée .- *Rapport B.R.G.M. 79 SGN 787 HYD.*
- BELL (J.P.), Mac CULLOCH (S.S.G.) 1966 .- Soil moisture estimation by neutron scattering method in Britain .- *J. Hydrology*, vol. 4, p. 254-263.
- BONTE (A.), DEBRABANT (P.) 1973 .- Etude géochimique de l'argile résiduelle de la craie .- *Ann. Soc. Géol. Nord*, 1973, XCIII, 2, p. 95-115.
- BOWDEN et al., 1974 .- A generalized model for anion and cation adsorption at oxide surfaces .- *Nature (London), Phys. Sci.* 245 : 81-82.
- DAIAN (J.F.), VACHAUD (G.) 1971 .- Méthode d'évaluation du bilan hydrique in situ à partir de la mesure des teneurs en eau et des suctions .- *Symposium on isotopes and radiation in soil plant relationship*, I.A.E.A., Vienna, 1971, p. 649-668.
- DAUDET (F.A.), VACHAUD (G.) 1977 .- La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique .- *Annales d'Agronomie*.
- DAVIDSON (J.M.), STONE (L.R.), NIELSEN (D.R.), LARUE (M.E.) 1969 .- Field measurement and use of soil water properties .- *Water Resour. Res.* 5, p. 1312-1321.
- DURAND (R.) 1978 .- La pédogénèse en pays de craie dans le Nord-Est de la France .- *Thèse Sci. Nat. Strasbourg*.
- DUTT (G.R.), SHAFFER (M.J.), MOORE (W.J.) 1972 .- Computer simulation model of dynamic bio-physicochemical processes in soils. Department of soils, Water and engineering agricultural experiment station University of Arizona, Tucson .- *Technical Bulletin* 1976.
- FOSTER (S.S.D.) 1975 .- The chalk groundwater tritium anomaly - a possible explanation .- *Journal of Hydrology*, vol. 25 n° 1/2, p. 159-165.
- FRITZ (B.) 1976 .- Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions .- *Thèse de doct.-ing., Univ. Louis Pasteur de Strasbourg*.
- HELGESON (M.C.), BROWN (T.H.), NIGRINI (A.), SONES (T.A.) 1970 .- Calculation of mass transfer in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions .- *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, p. 455-481.

- HILLEL (D.), KRENTOS (V.D.), STILIANOU (Y.) 1972 .- Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in-situ .- *Soil Sciences*, vol. 114, p. 395-400.
- KEISLING et al., 1978 .- Pertinent criteria for describing the dissolution of gypsum beds in flowing water .- *Soil Science Society of Am. J.*, vol.42, n° 2.
- KEMPER et al., 1975 .- Dissolution rate of gypsum in flowing water .- *Soil Science Society of Am. J.*, vol. 39, n° 3.
- LANDREAU (A.), MORFAUX (P.), KERBAUL (A.) 1979 .- L'épandage d'effluents sur terrain agricole, effets sur la zone non-saturée de la craie en Champagne .- *Rapport B.R.G.M. 79 SGN 229 HYD/CHA*.
- MILLOT (D.) et al., 1975 .- Sur la montmorillonite dans les craies .- *Bull. Ser. Carte Geol. Als.-Lorr.*, 10, 2, p. 25-26.
- RAJAN (S.S.S.) 1978 .- Sulfate adsorbed on hydrous alumina ligands displaced and charges in surface charge .- *Soil Science Soc. of Am. J.*, vol.42, n° 1.
- SAINT-MARTIN (1973) .- Etude journalière "in situ" du bilan hydrique, au-dessus d'une nappe phréatique .- *Thèse de doct.-ing., Univ. de Bordeaux*.
- TRUEDELL (A.H.) et JONES (B.F.) 1974 .- WATEQ, a computer programm for calculating chemical equilibria of natural waters .- *J. Res. U.S. Geol. Serv.*, 2, 2, p. 233-248.
- VACHAUD (G.), DANCETTE (C.), SONKO (S.), THONY (J.L.) 1978 .- Méthodes de caractérisation hydrodynamique in-situ d'un sol non-saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique .- *Annales agronomiques*, 29 (1), p. 1-36.
- WOOD (W.W.), SIGNOR (D.C.) 1975 .- Geochemical factors affecting artificial groundwater recharge in the unsaturated zone .- *Transactions of the ASAE*, 1975.
- WOOD (W.W.) 1978 .- Use of laboratory data to predict sulfate sorption during artificial groundwater recharge .- *Groundwater*, vol. 16, n° 1, january-february 1978.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE

HAUT COMITÉ DE L'ENVIRONNEMENT

Comité scientifique "EAU"

14, boulevard du Général Leclerc - 92521 Neuilly-sur-Seine Cédex

Tél.: (1) 758.12.12

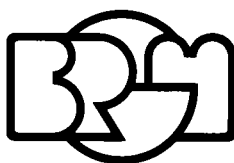
MÉCANISMES D'ACQUISITION DE LA QUALITÉ CHIMIQUE D'UNE EAU SOUTERRAINE

Etude expérimentale in situ

par

M. BONNET et A. LANDREAU

Figures



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département hydrogéologie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

79 SGN 661 HYD

Novembre 1979

Figure A.1: Evolution des profils hydriques dans la zone non saturée.
(étalonnage "gravimétrique" de la sonde à neutrons)

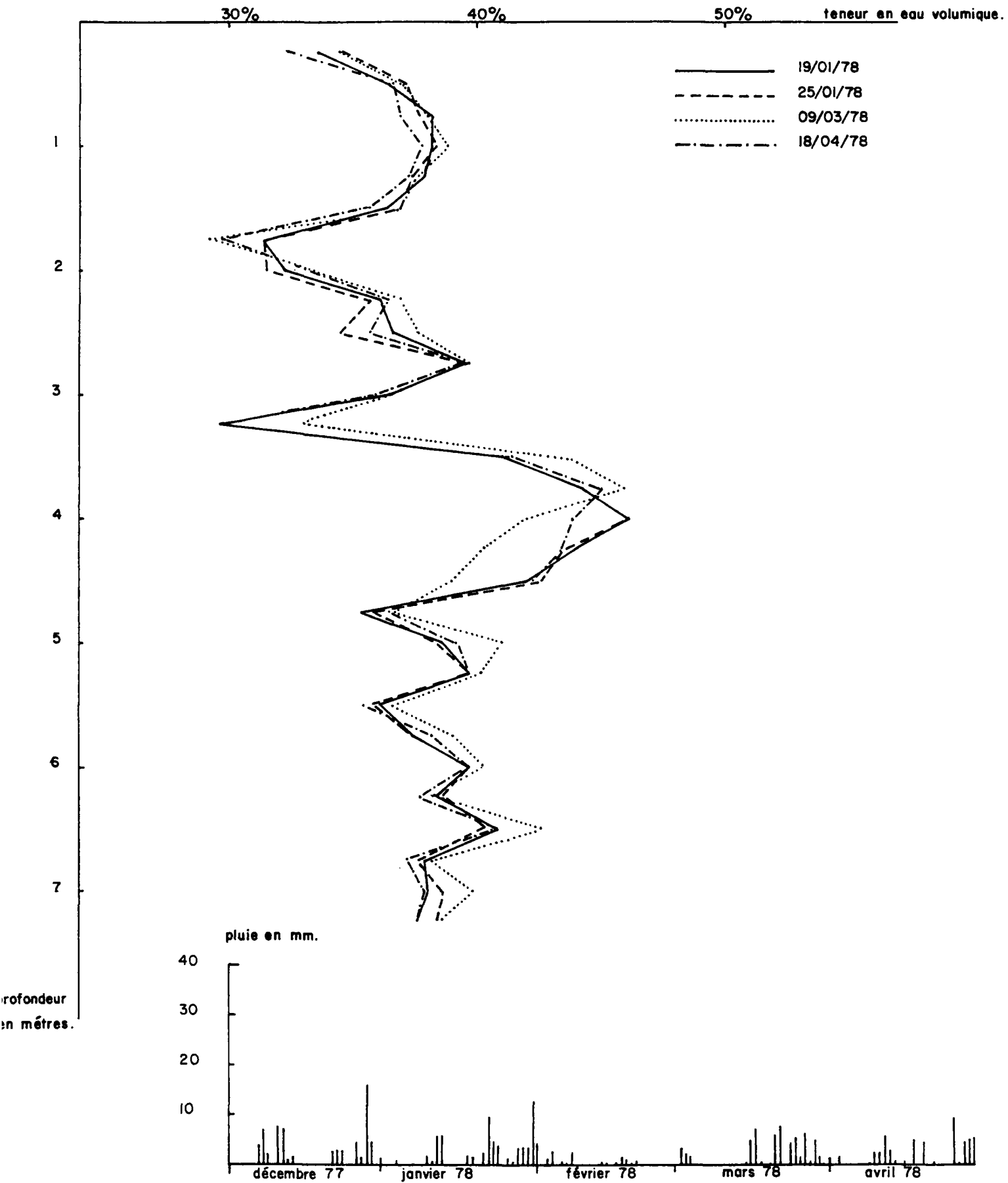


Figure A.2 : Profil hydrique de la zone non saturée.

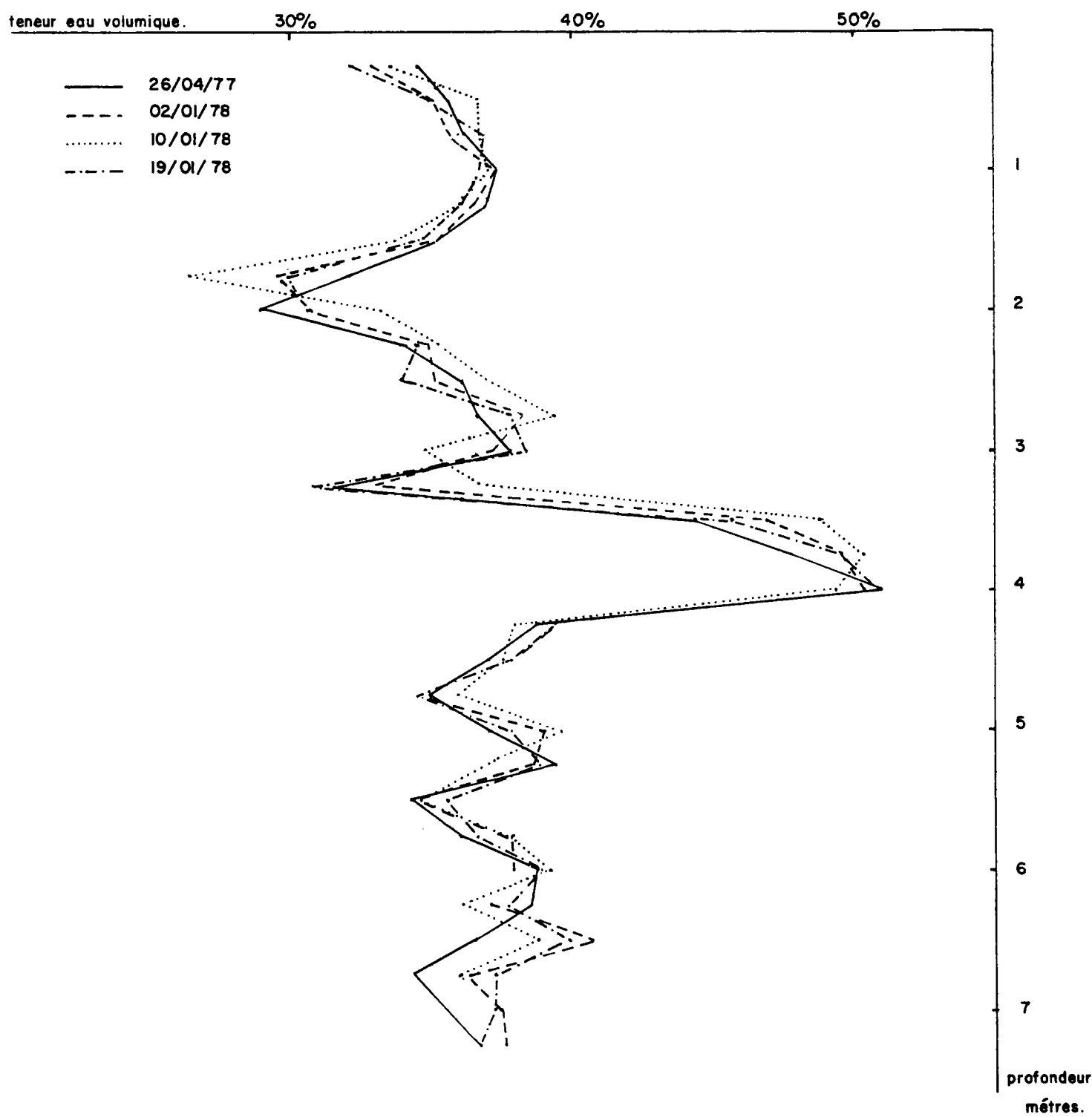


Figure A.3: Profil hydrique de la zone non saturée.

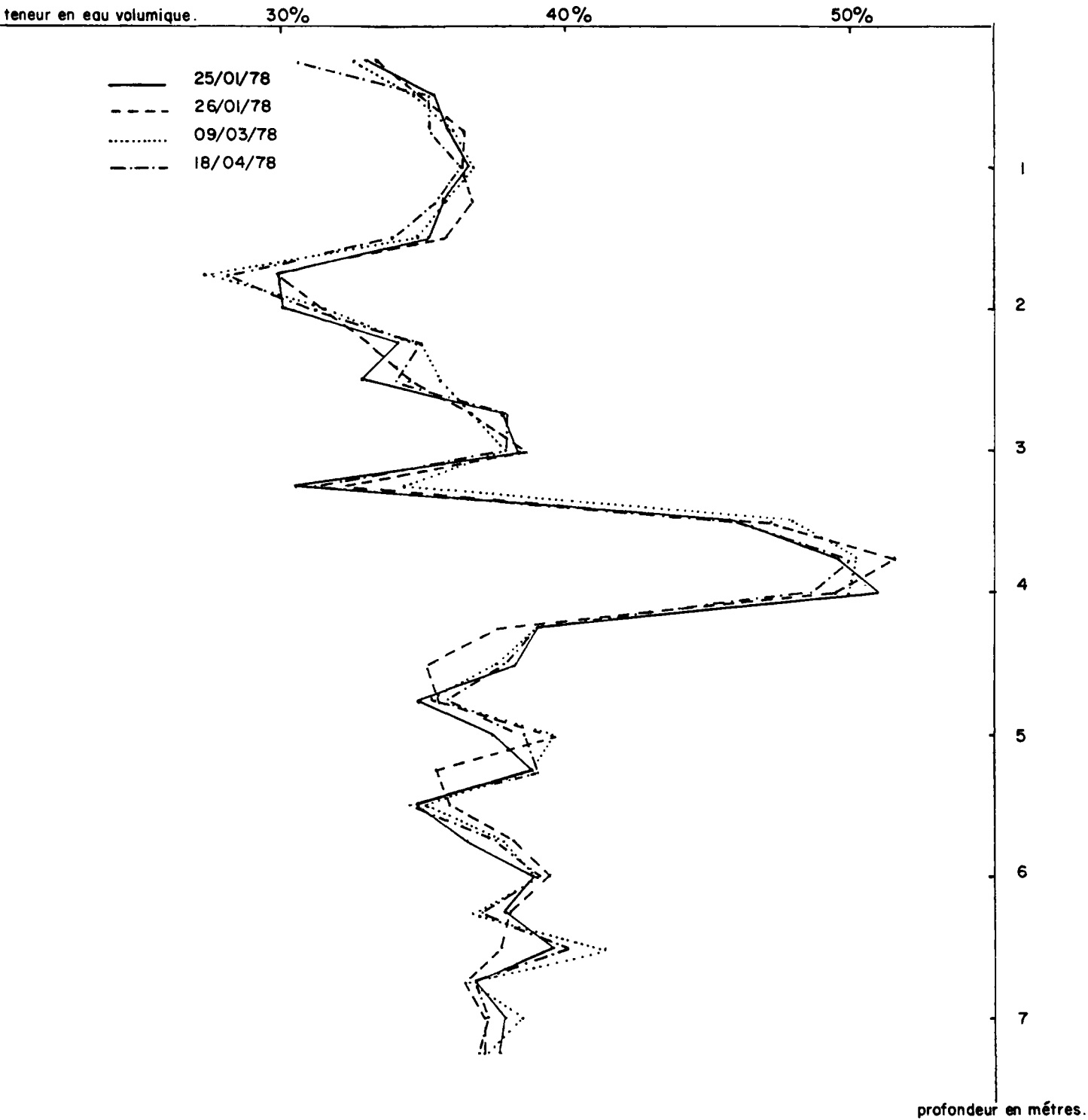


Figure A. 4: Profil hydrique de la zone non saturée.

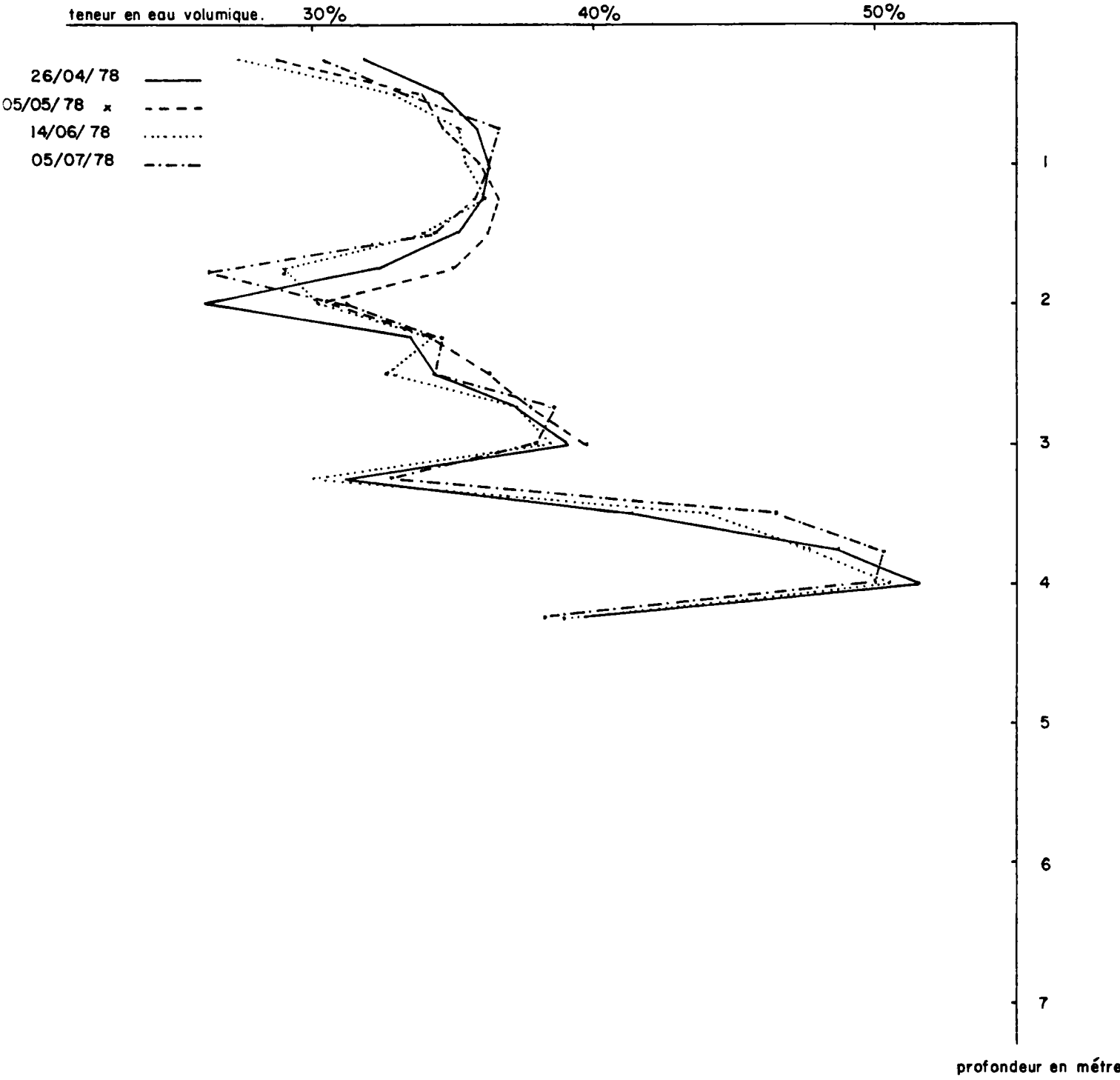


Figure A.5 : Profil hydrique de la zone non saturée.

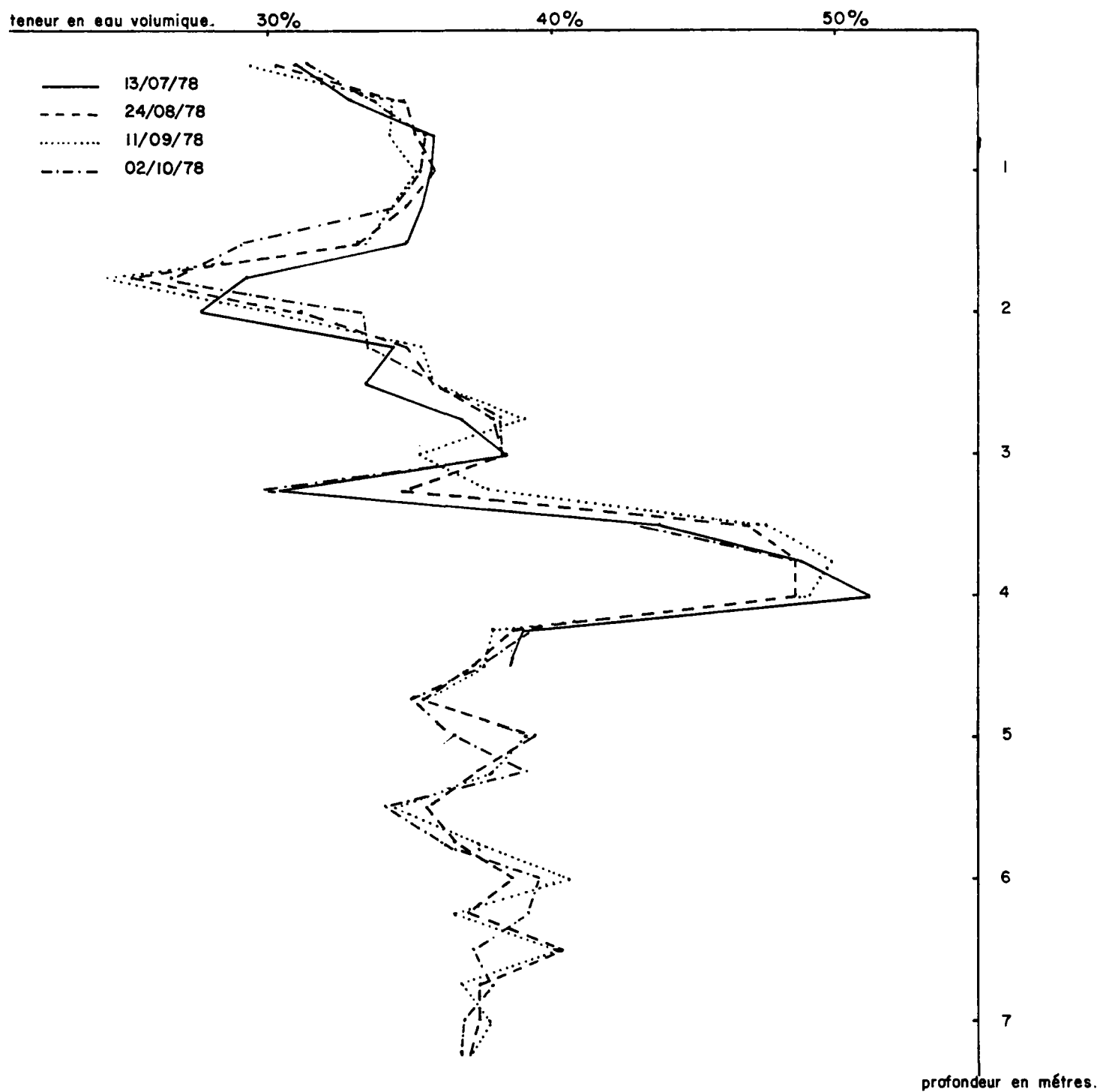


Figure A.6 : Profil hydrique de la zone non saturée.

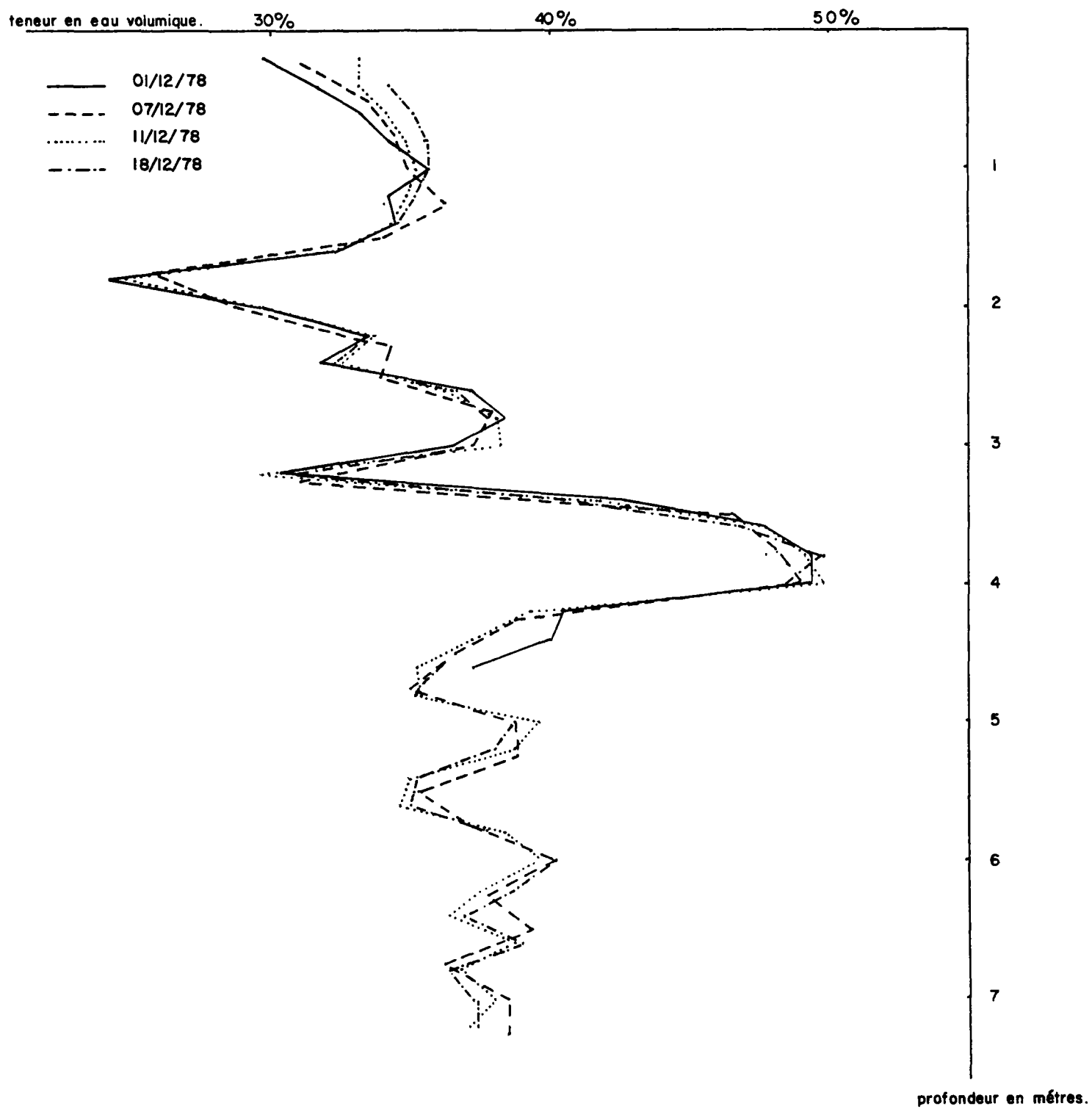


Figure A.7: Profil hydrique de la zone non saturée.

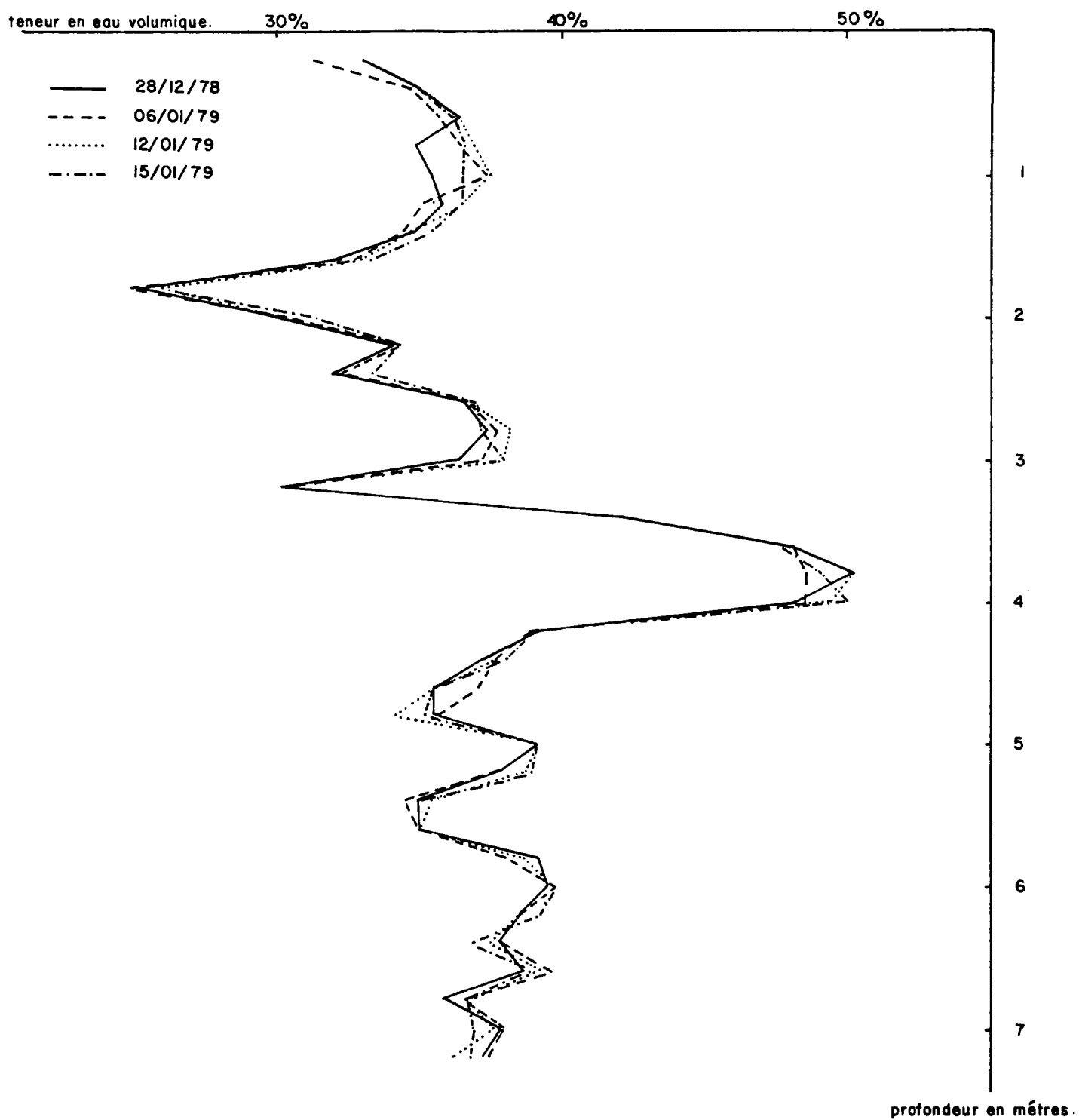


Figure A.8: Profil de potentiel.

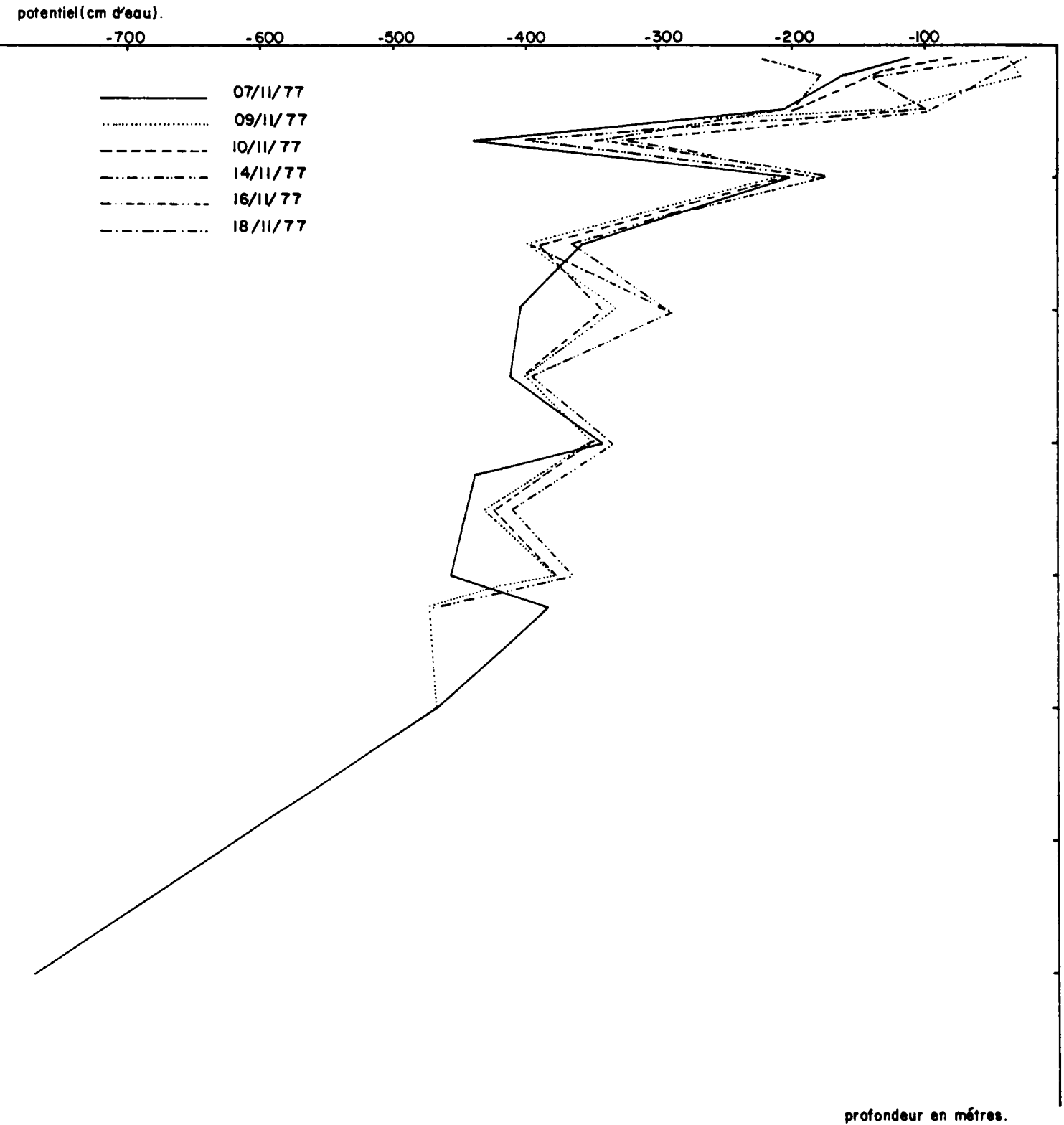


Figure A.9: Profil de potentiel.

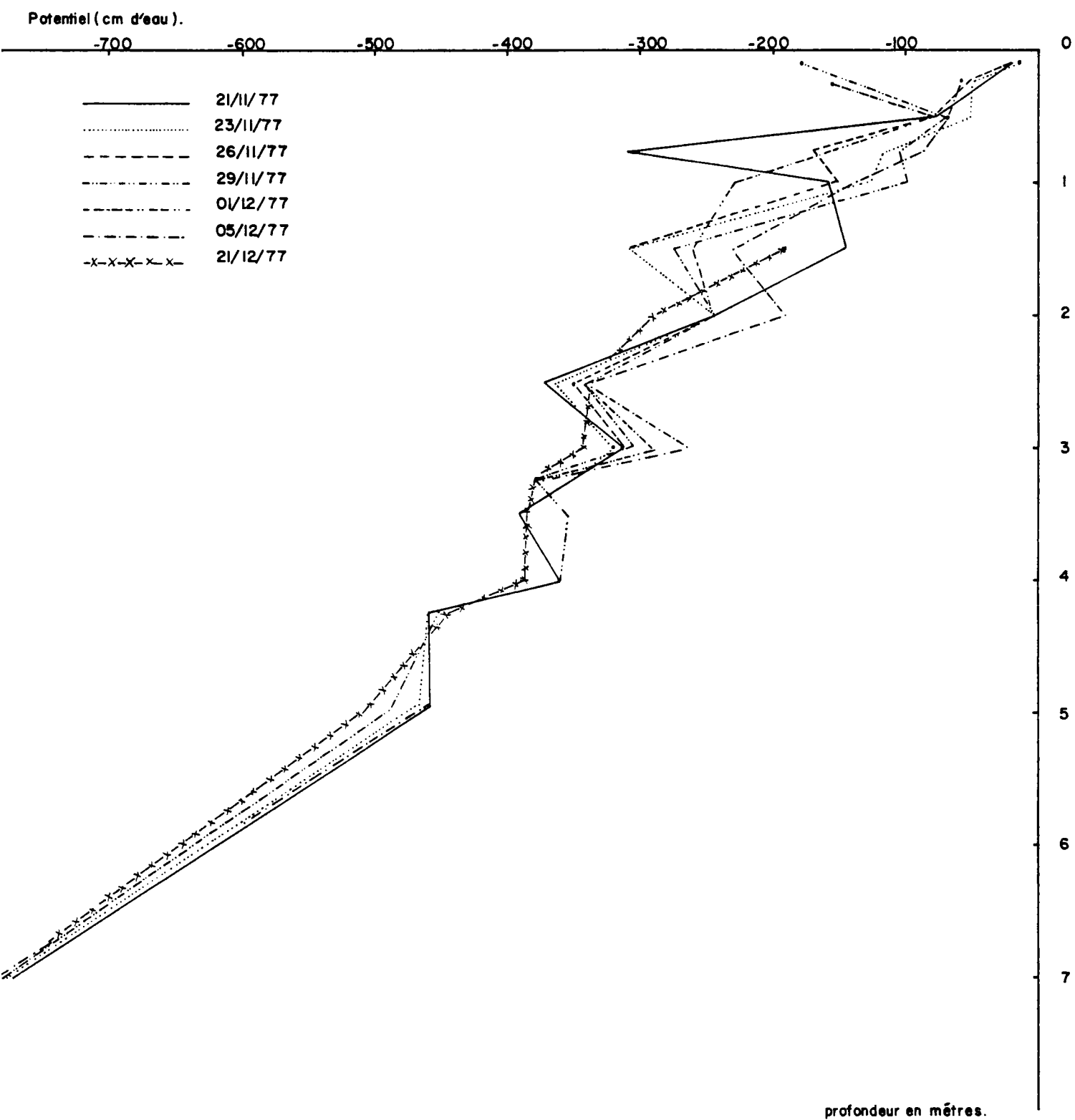


Figure A.10 : Profil de potentiel.

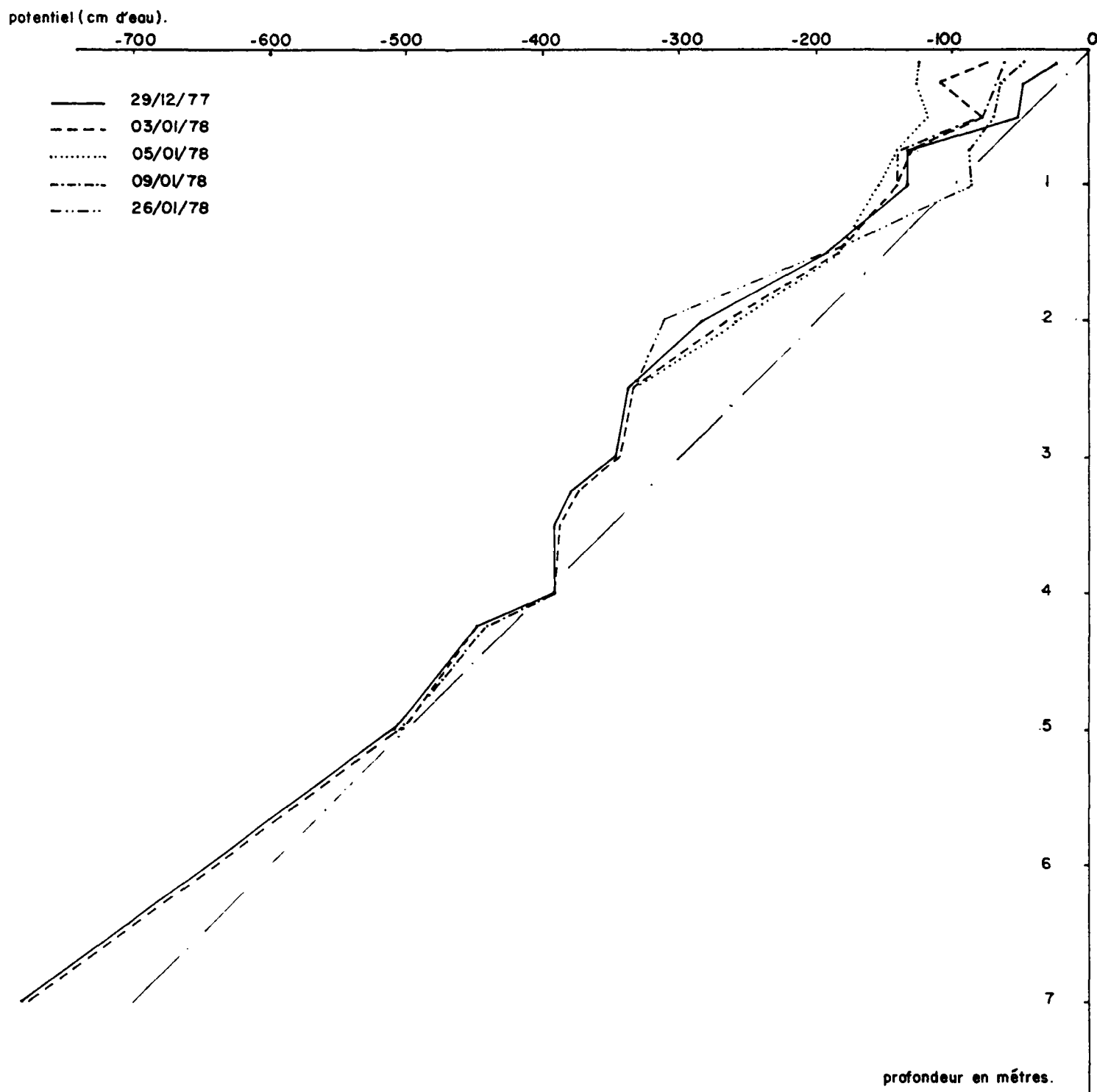


Figure A.II : Profil de potentiel.

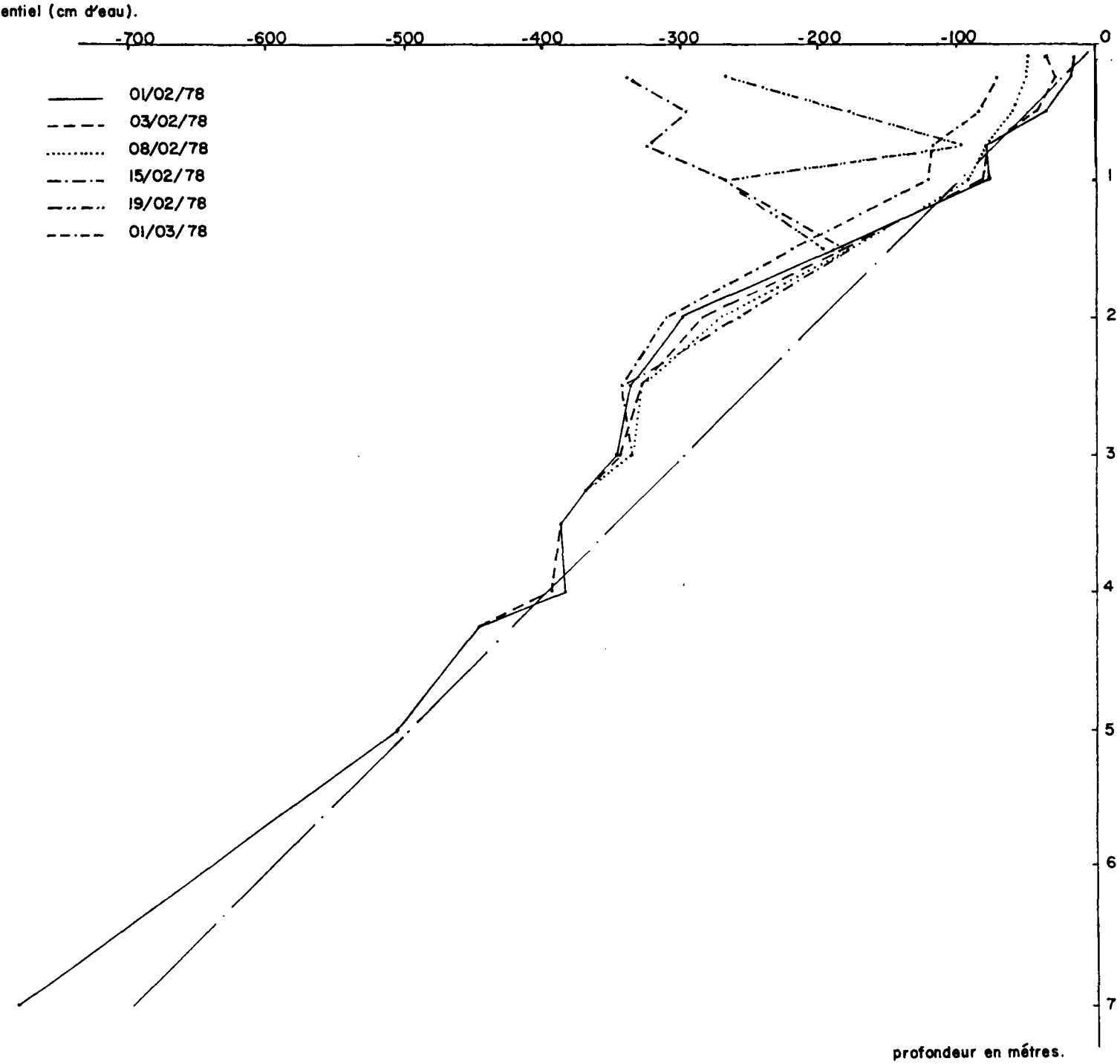


Figure A.12 : Profil de potentiel.

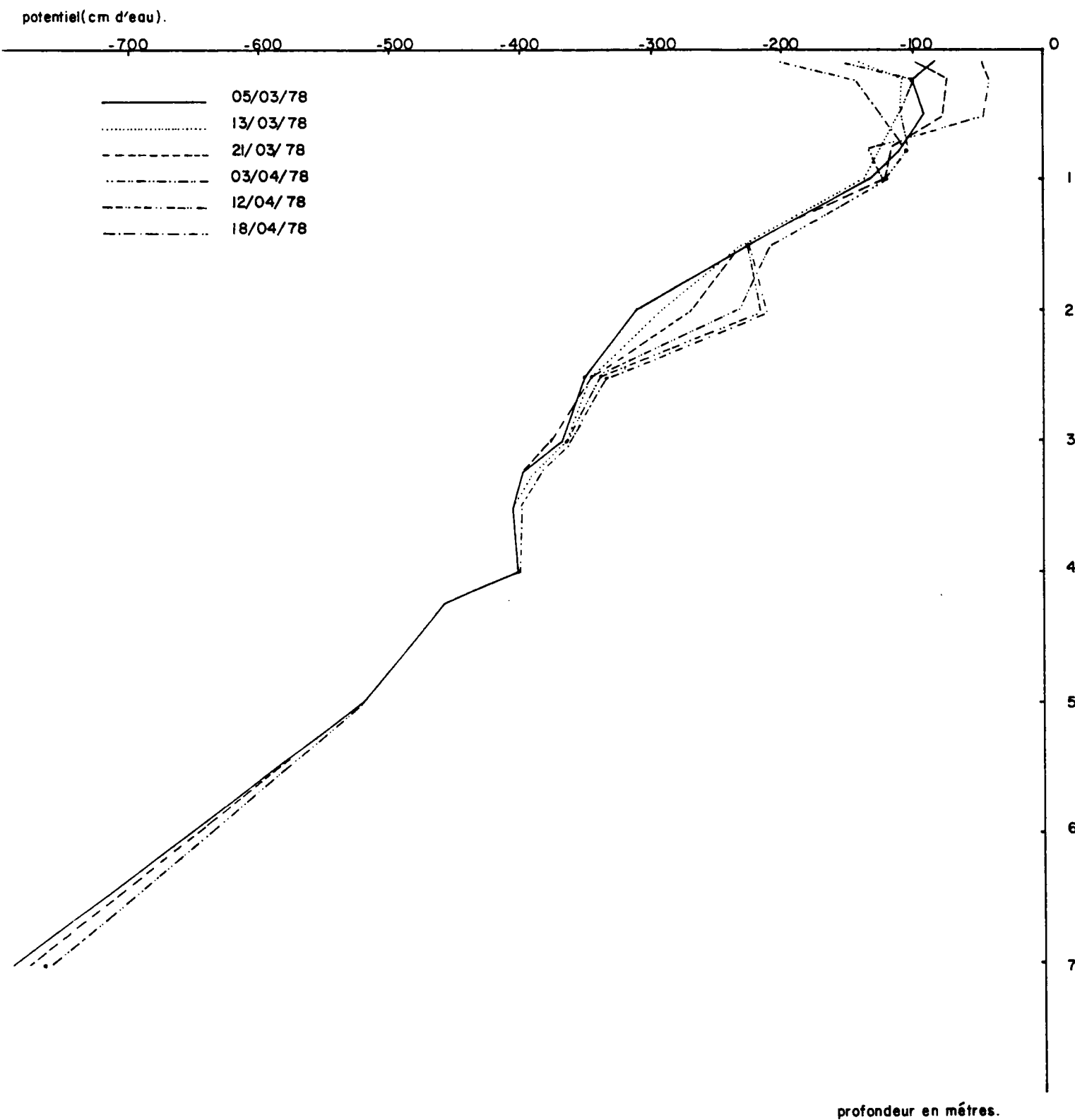


Figure A.13 : Profil de potentiel.

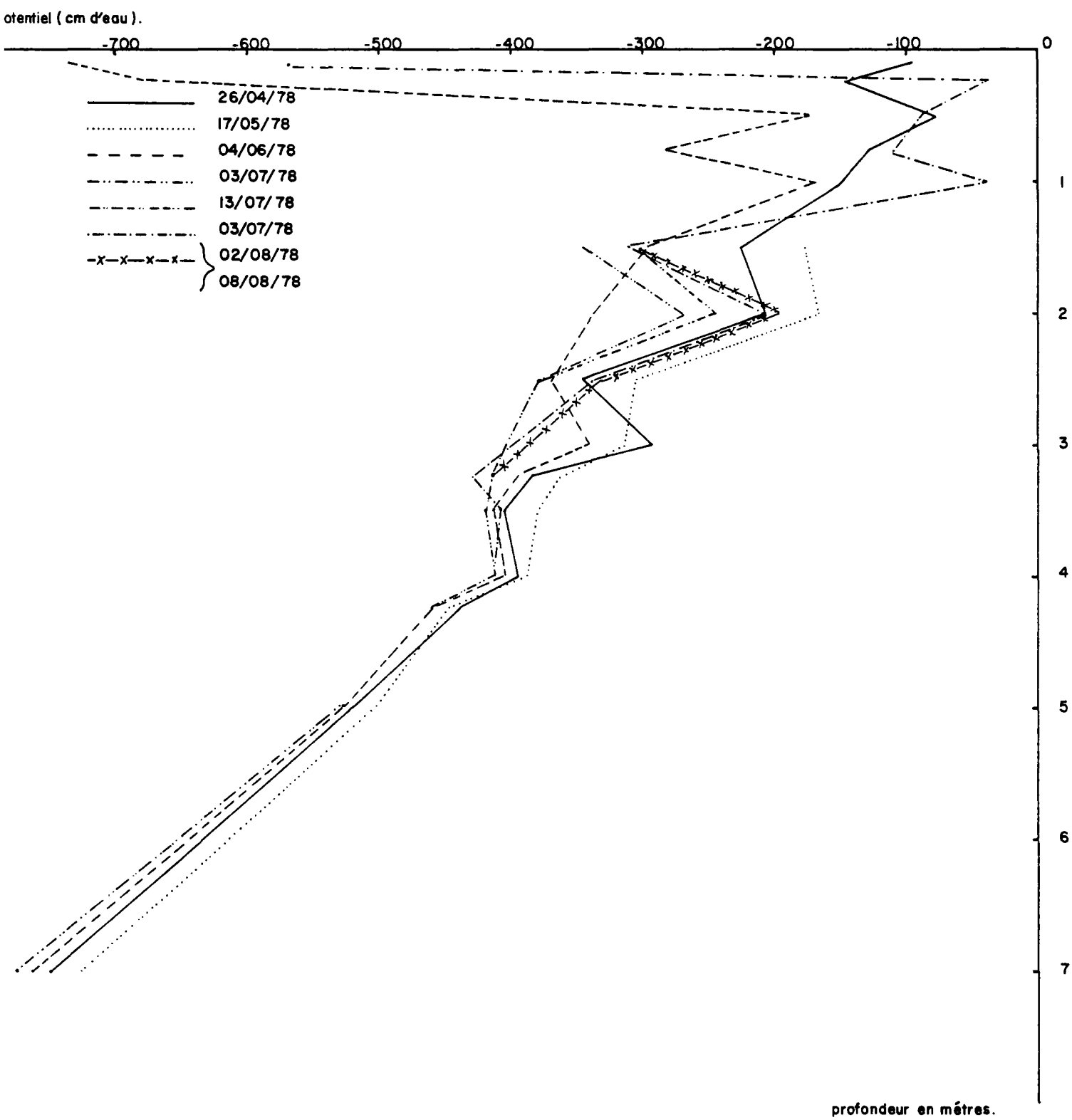


Figure A.14 : Profil de potentiel.

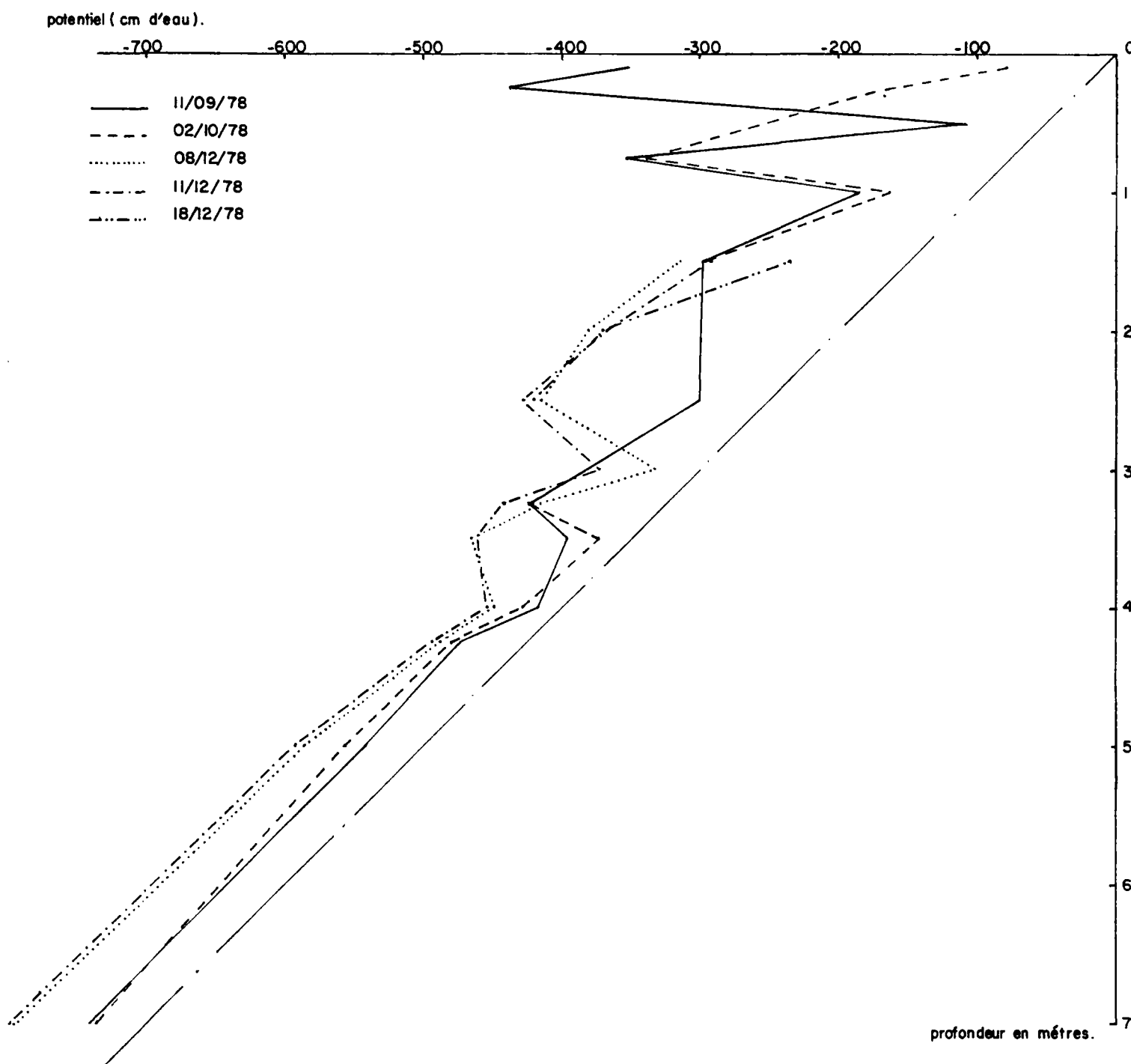


Figure A.15 : Profil de potentiel.

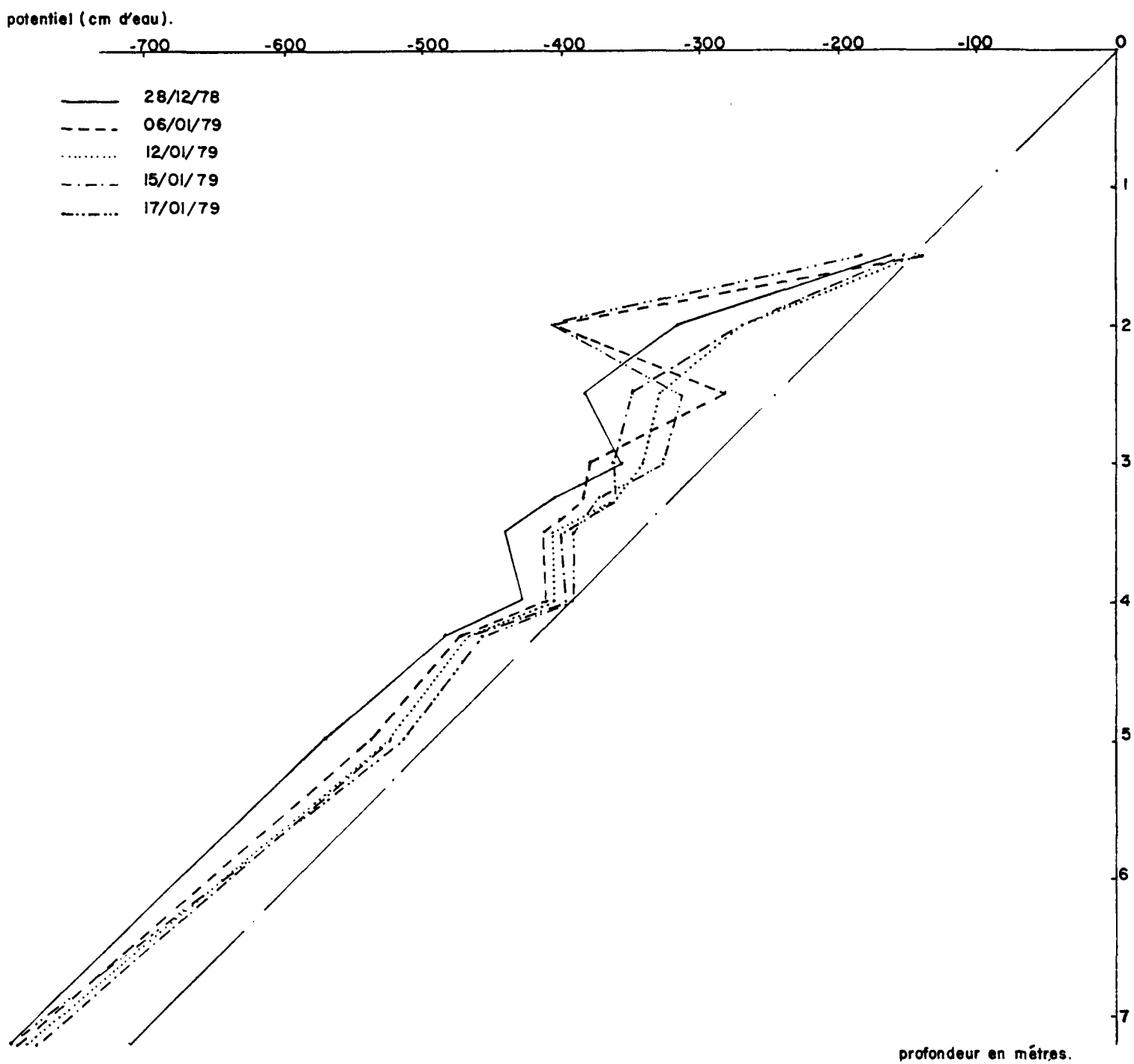
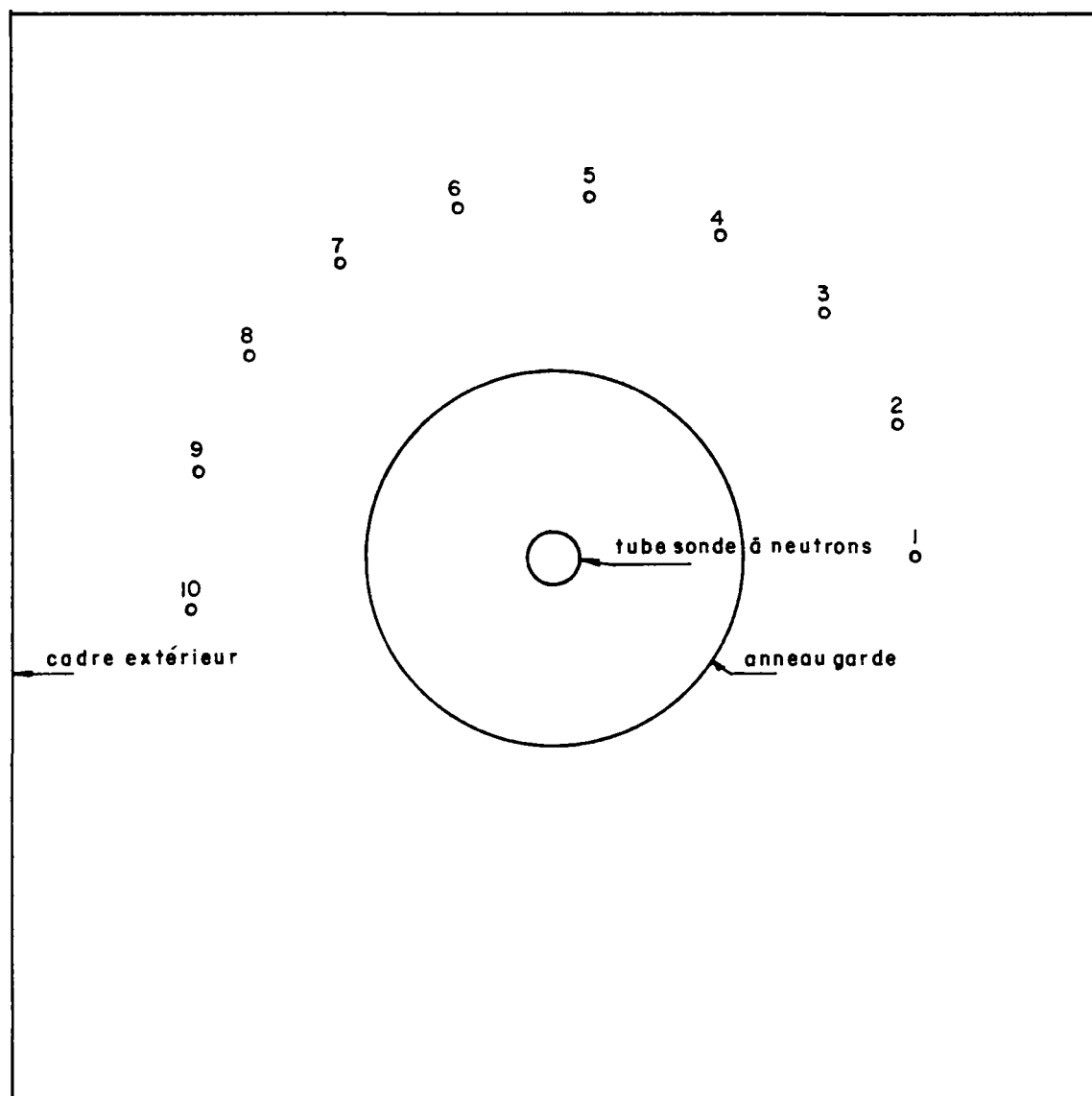


fig.A.16 - Plan d'implantation des tensiomètres et du tube de sonde



échelle 1/10e

fig. A.17. - Evolution de la teneur en eau au cours du temps

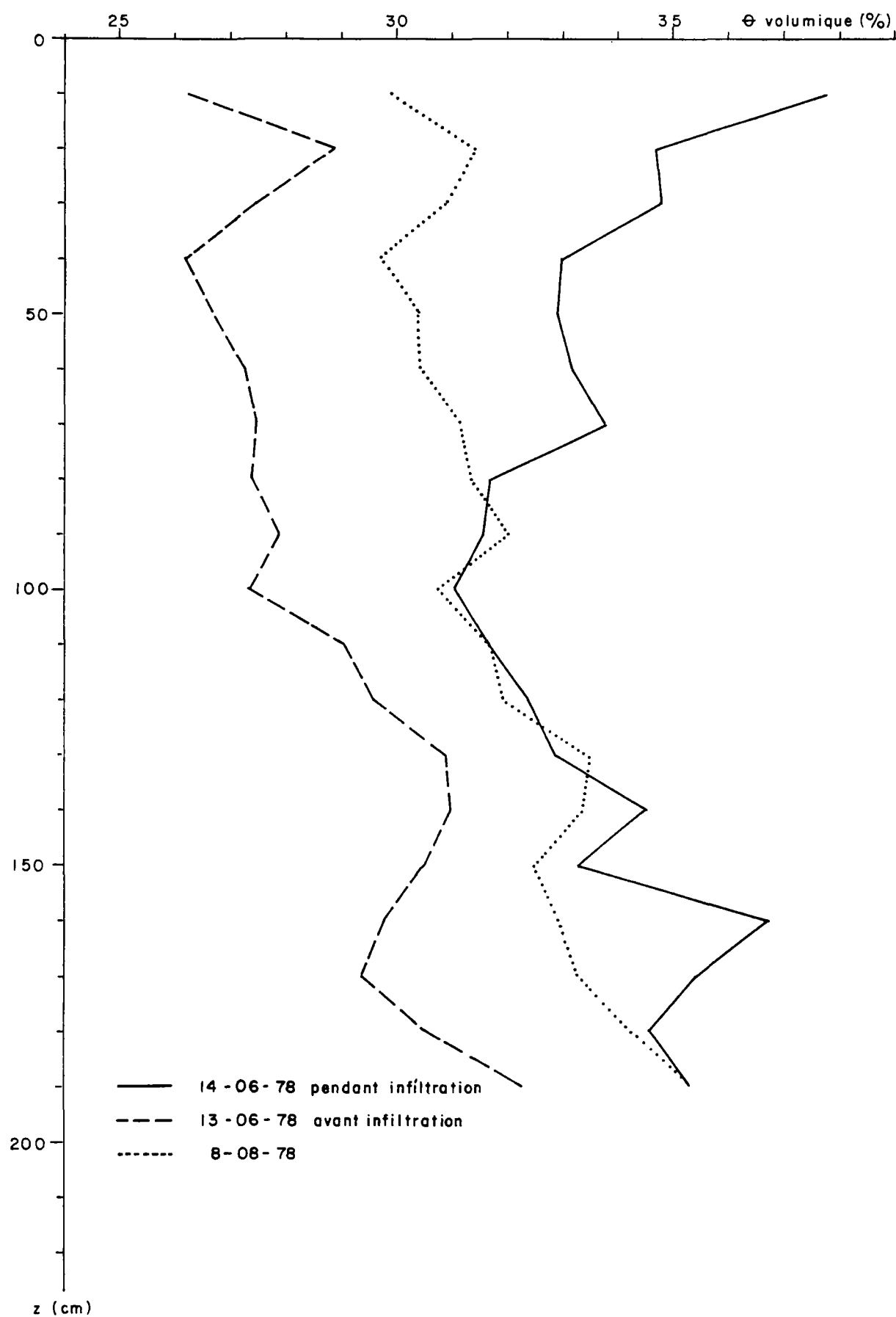


fig.A.I8 - Evolution de la teneur en eau en fonction du temps

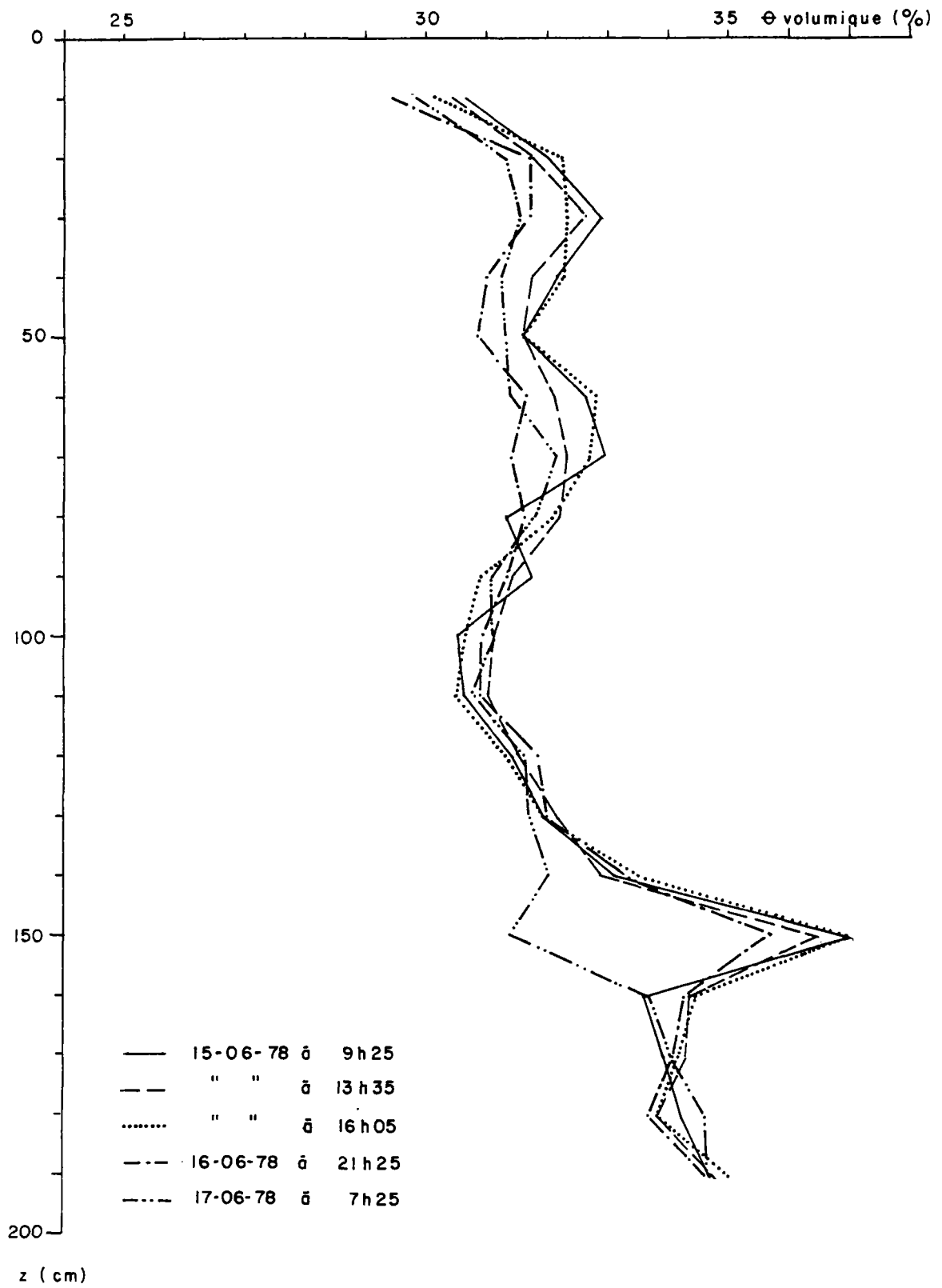


fig. A.19 - Evolution de la teneur en eau au cours du temps

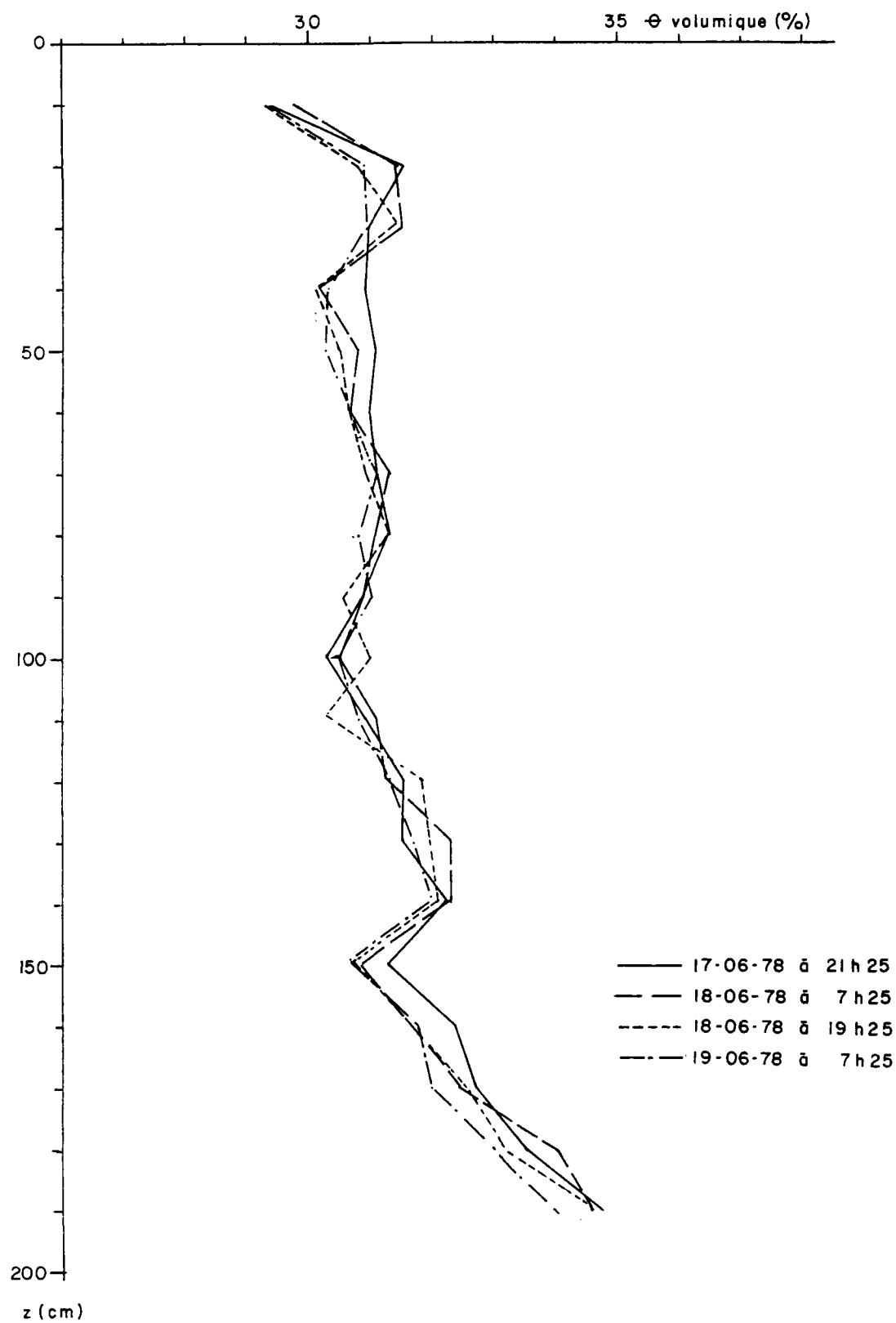


fig. A20 - Evolution de la teneur en eau volumique au cours du temps



figA.21 - Evolution de la charge hydraulique en fonction de la cote
(à différents temps sélectionnés)

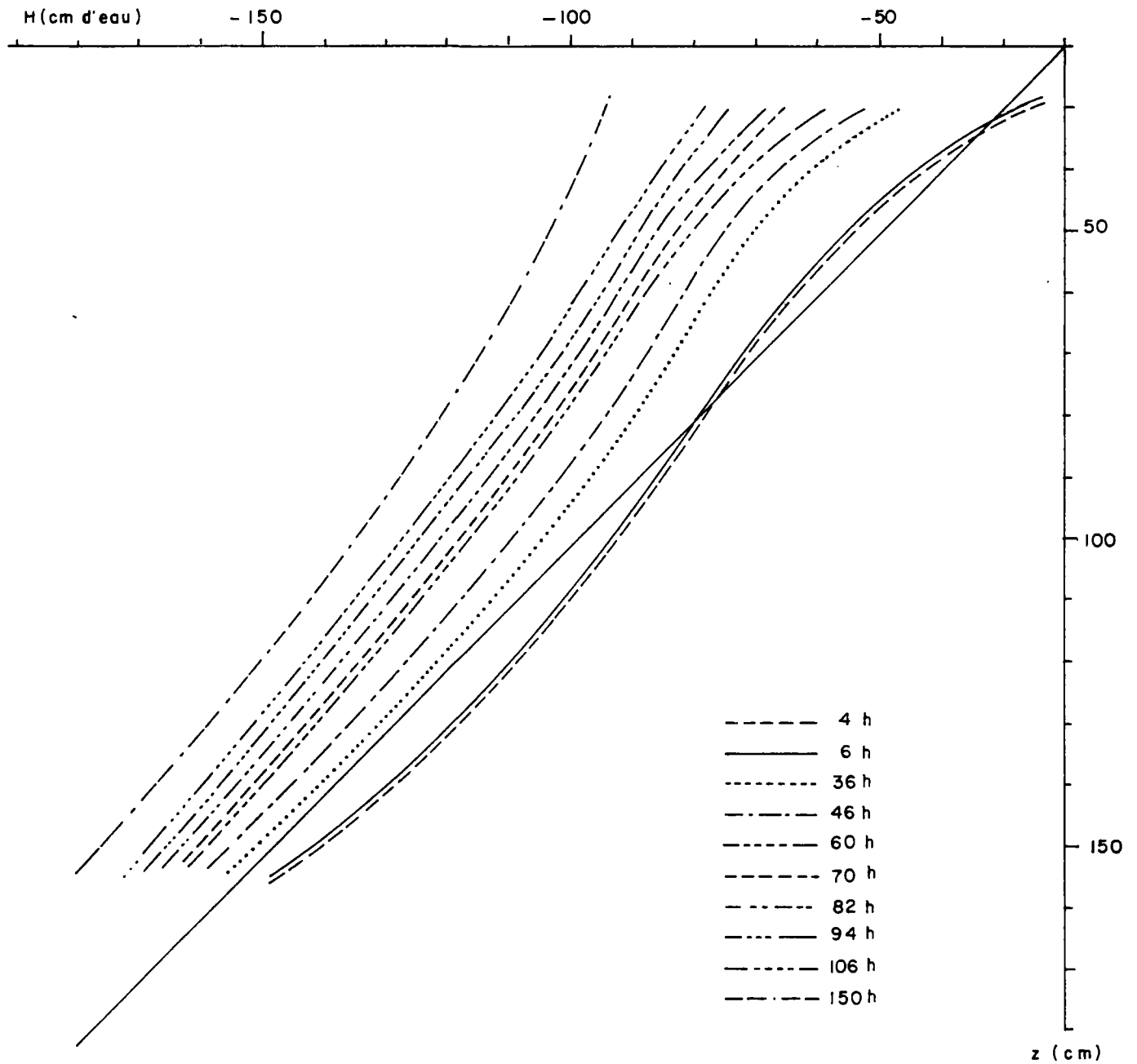


fig.A 22- Evolution des potentiels après infiltration

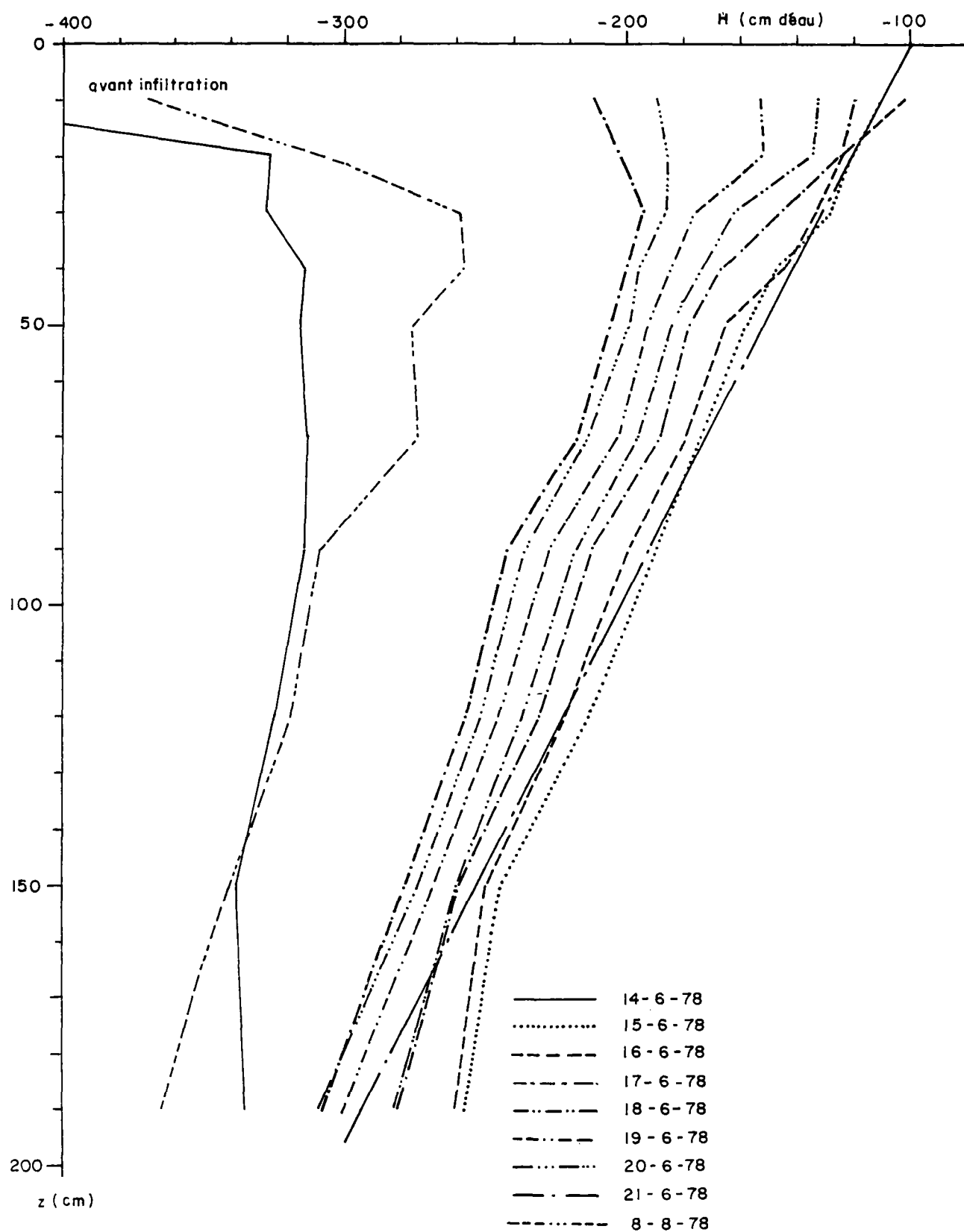


fig. A 23. Evolution du stock d'eau en fonction du temps

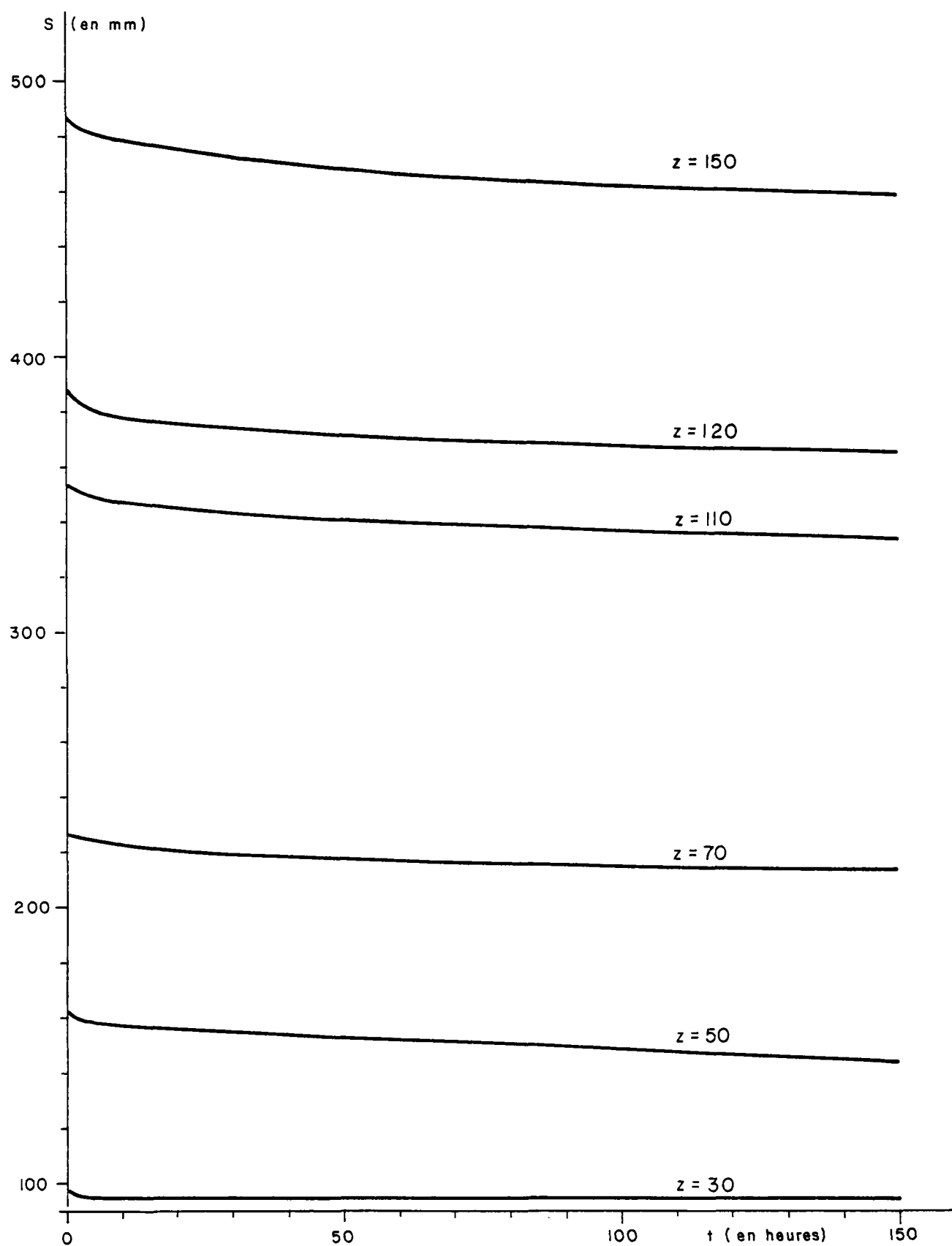
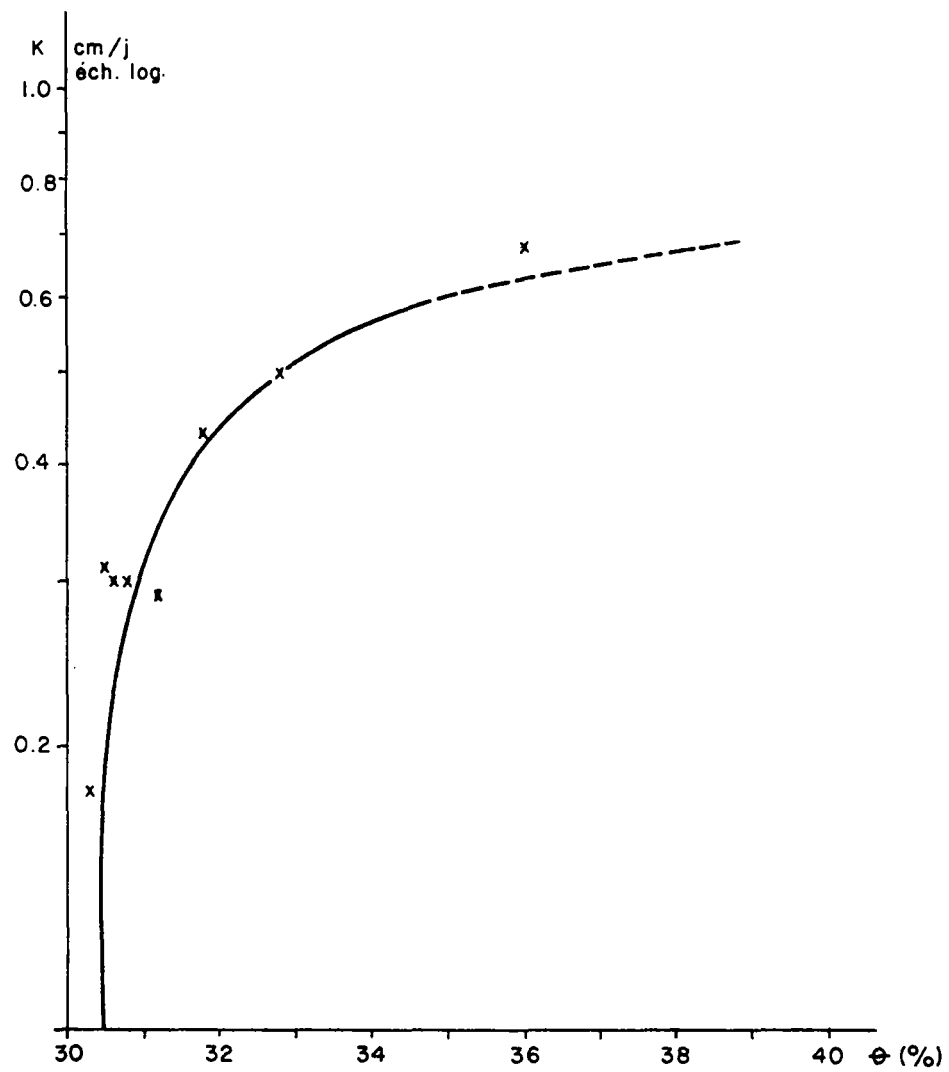


fig. A.24 _ Variation de la perméabilité en fonction
de la teneur en eau volumique (cote $z = 150$ cm)



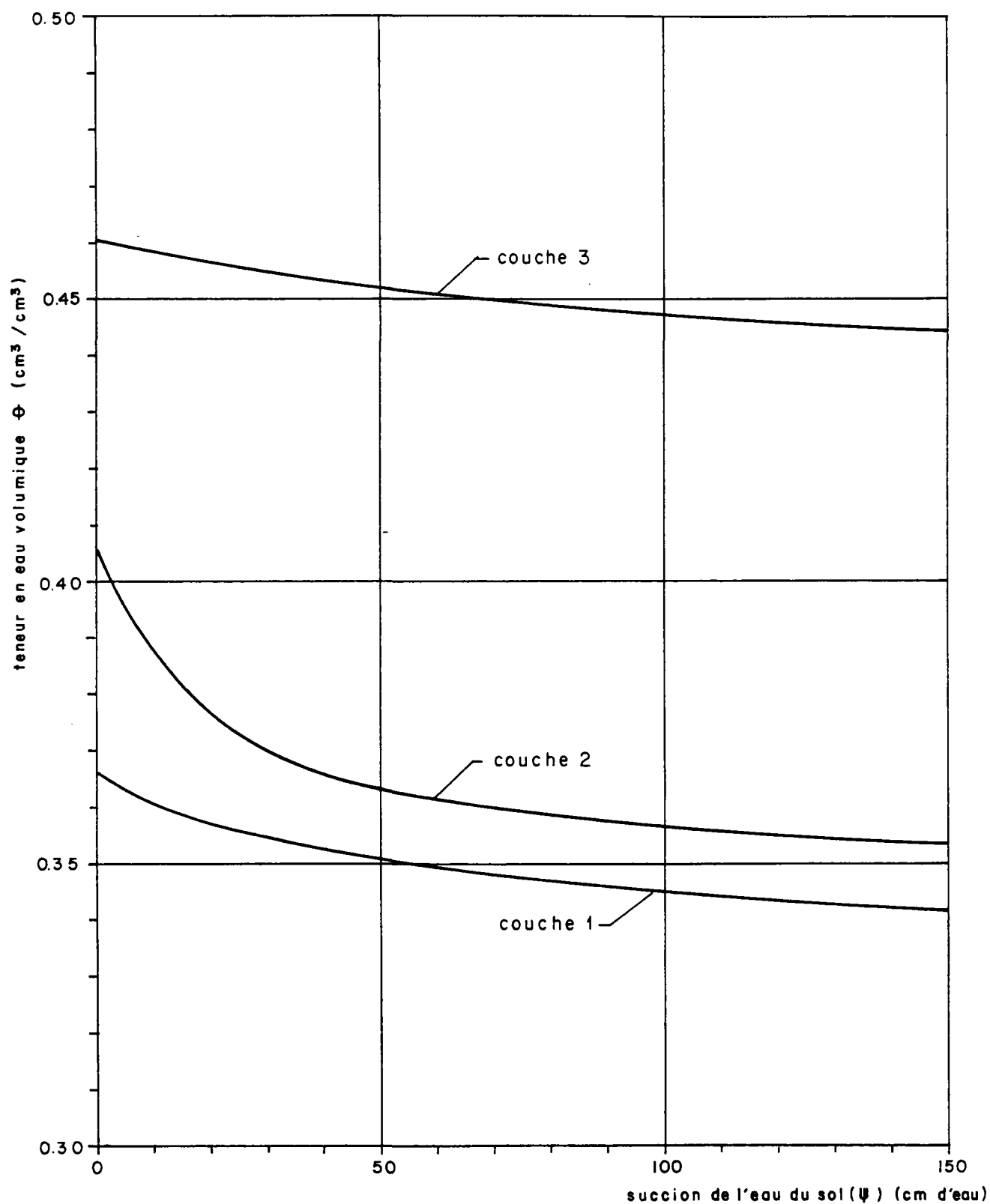
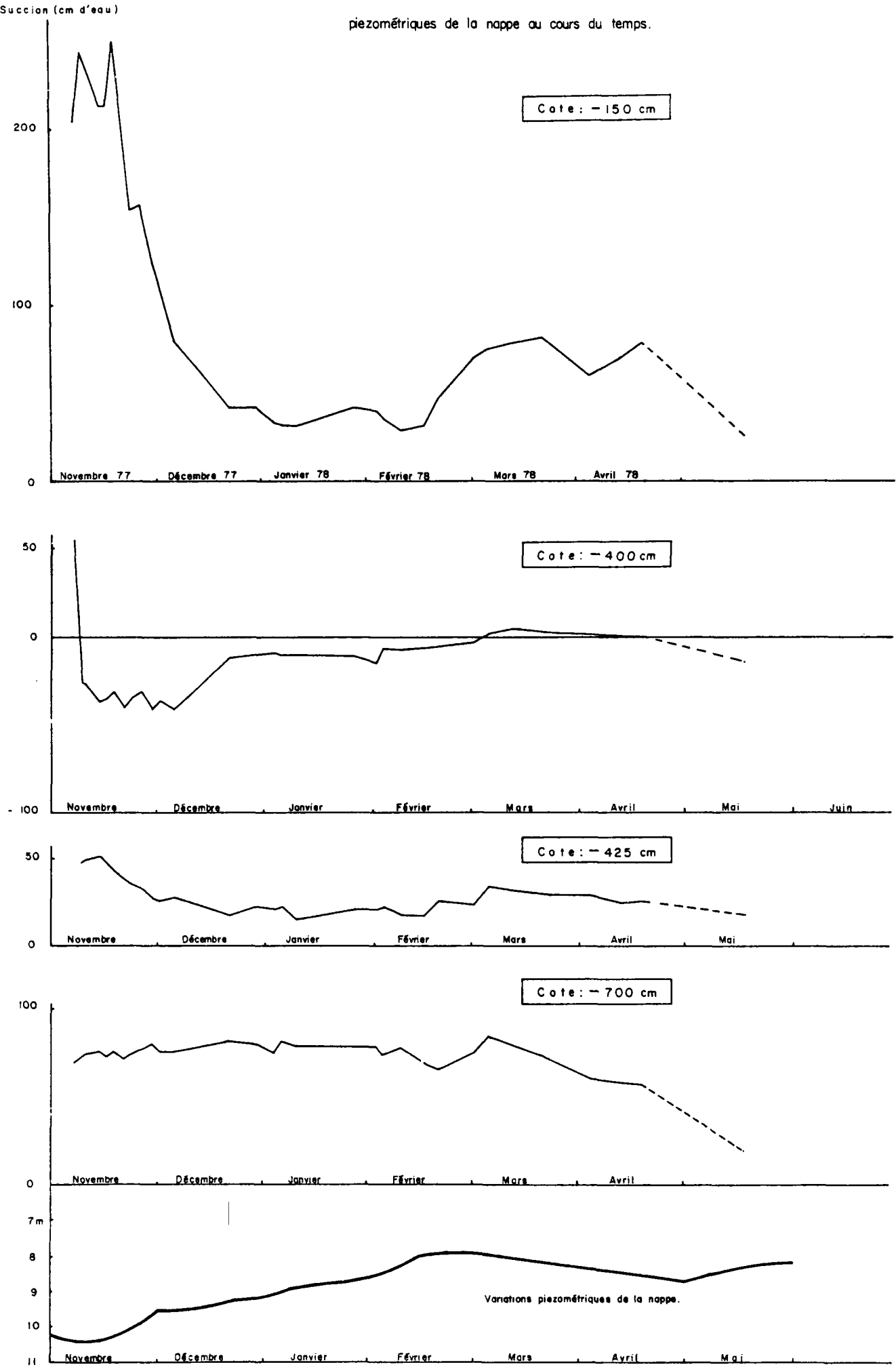


fig. A.25- Variation de la succion en fonction de la teneur en eau volumique

Evolution des suctions dans le terrain et variations
piezométriques de la nappe au cours du temps.



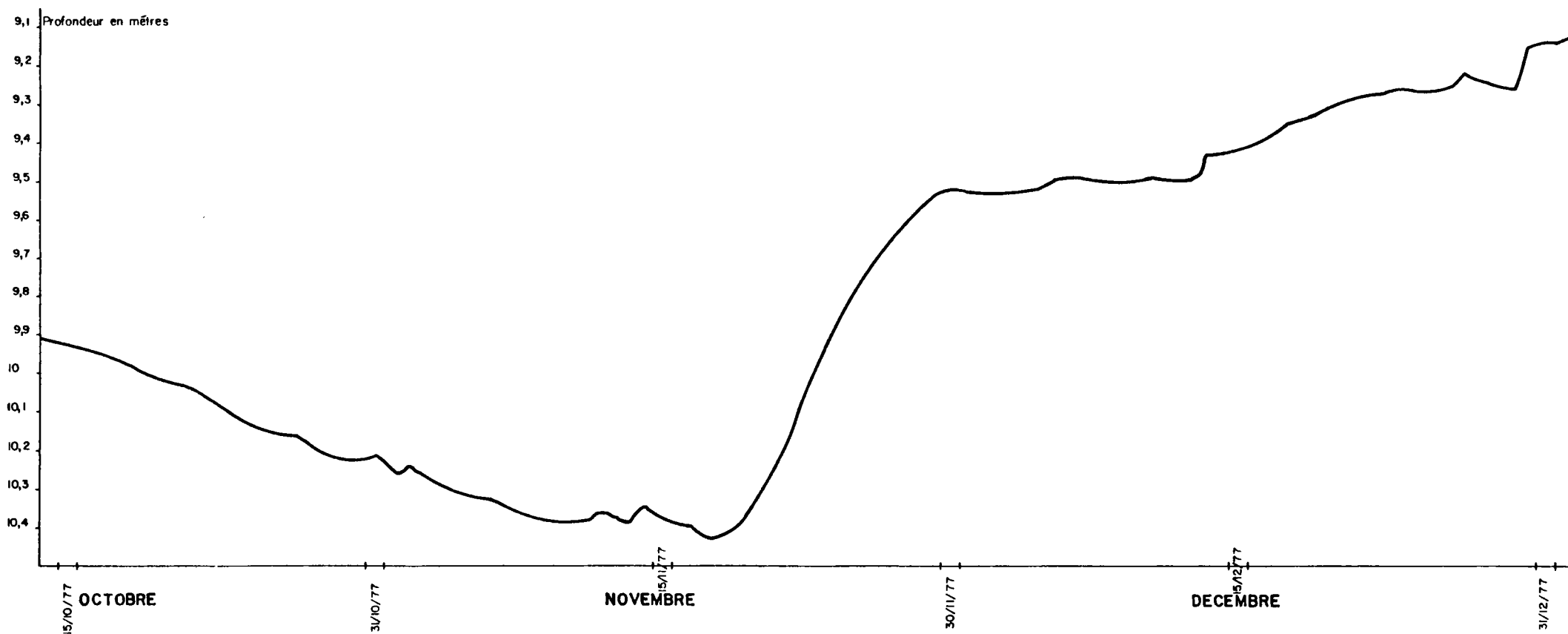
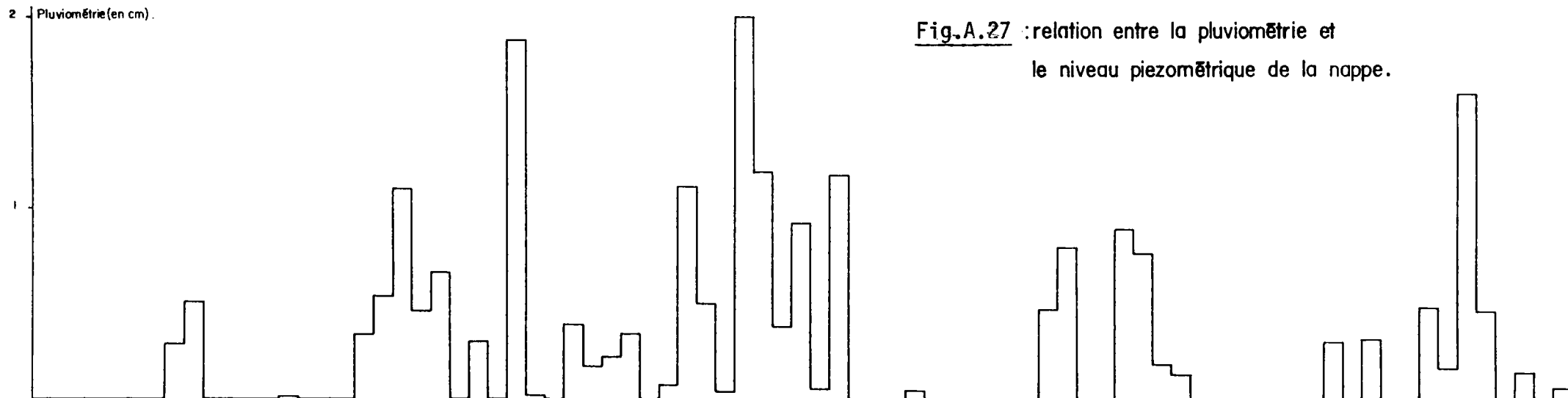


Figure A28: variations de succion enregistrées
au tensiomètre 6.

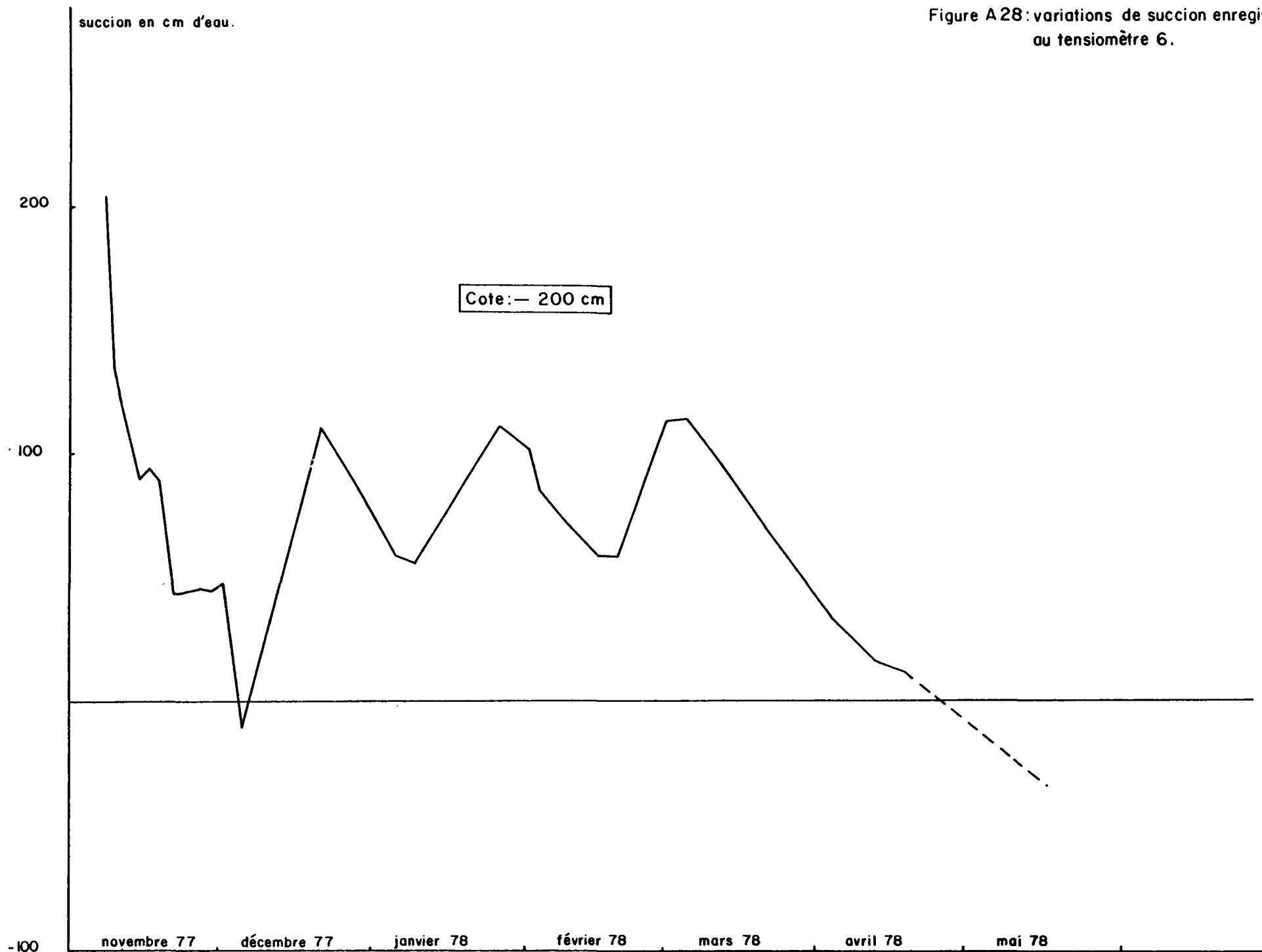
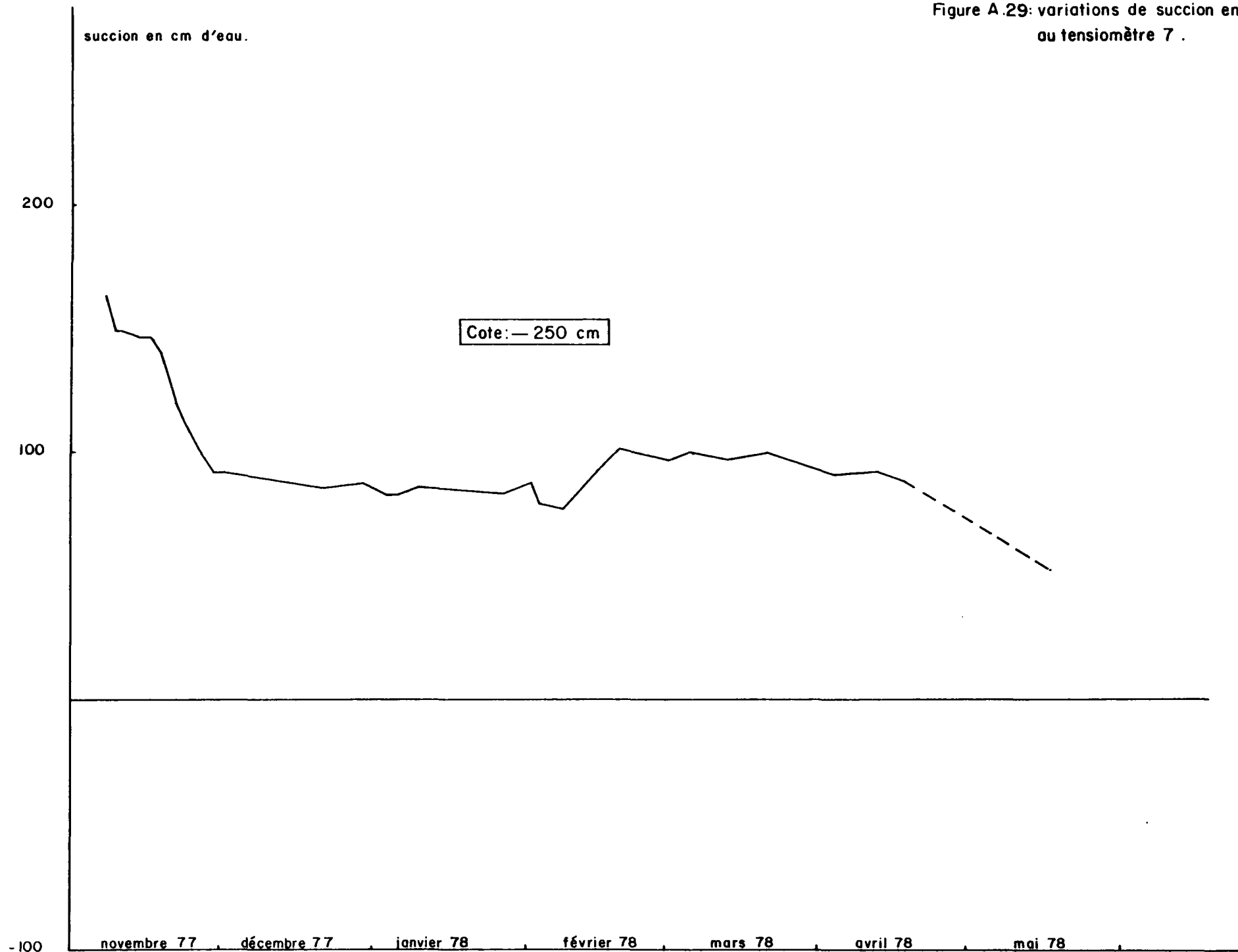


Figure A.29: variations de succion enregistrées
au tensiomètre 7 .



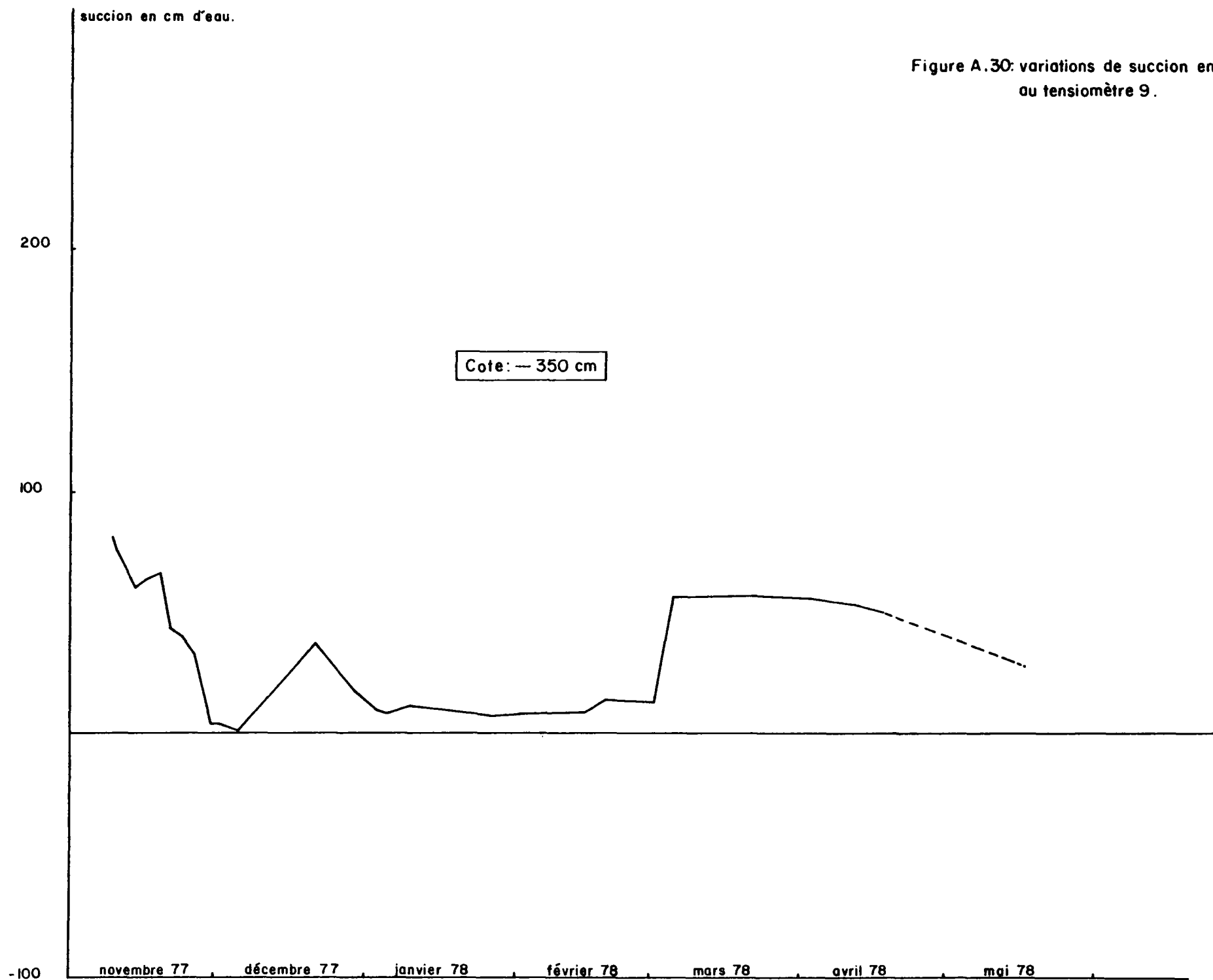


Figure A.30: variations de succion enregistrées
au tensiomètre 9.

Figure B.1: Coupe géologique de la zone non saturée (puits de Sainghin en Mélantois-Nord).

Pro- fon- deur (en m)	Description lithologique	Stratigraphie
0	Silt peu argileux, décarbonaté brun-roux petits grains de Fe-Mn dans l'échantillon 0,80/1,00 humide aux alentours de 1,00 teinte un peu plus claire aux alentours de 1,40	FORMATIONS SUPERFICIELLES
1	caractère plus sablonneux, voire sableux, vers 1,60	
≈1.75	Silt sableux ocre jaune, légèrement verdâtre débris crayeux millimétriques	
2	Silt "id" mais plus argileux à débris crayeux moins nombreux	
≈2.25	Silt très argileux roux, ocre et verdâtre puis brun-roux, petits éclats de silex et débris crayeux centimétriques de 2,40 à 2,60 - éclats de silex seuls de 2,60, petits et nombreux jus- qu'à 2,80, puis gros (2 cm) à la base	
3	granules à graviers de craie dans une matrice silto-argileuse ocre pâle = marnettes	
≈3.50	craie marneuse très altérée avec infiltration d'argiles brunes	ALTERNANCE DE CRAIE MARNEUSE ET MARNES CRAYEUSES
≈3.75		
4	niveau de craie plus marneuse, vert très pâle	
≈4.20	craie plus ou moins marneuse, blanc grisâtre, points noirs (oxydes de Mn)	
5	quelques niveaux plus marneux, verdâtres	
≈5.40	niveau de marne crayeuse vert-clair	
≈5.60		assise des marnes à terebratulina rígida
6		TURONIEN MOYEN
≈6.90	marne crayeuse vert-clair à niveau plus crayeux, blanc grisâtre	
≈7.40	niveau de craie marneuse blanc grisâtre	
≈7.60		
≈7.80		
8		

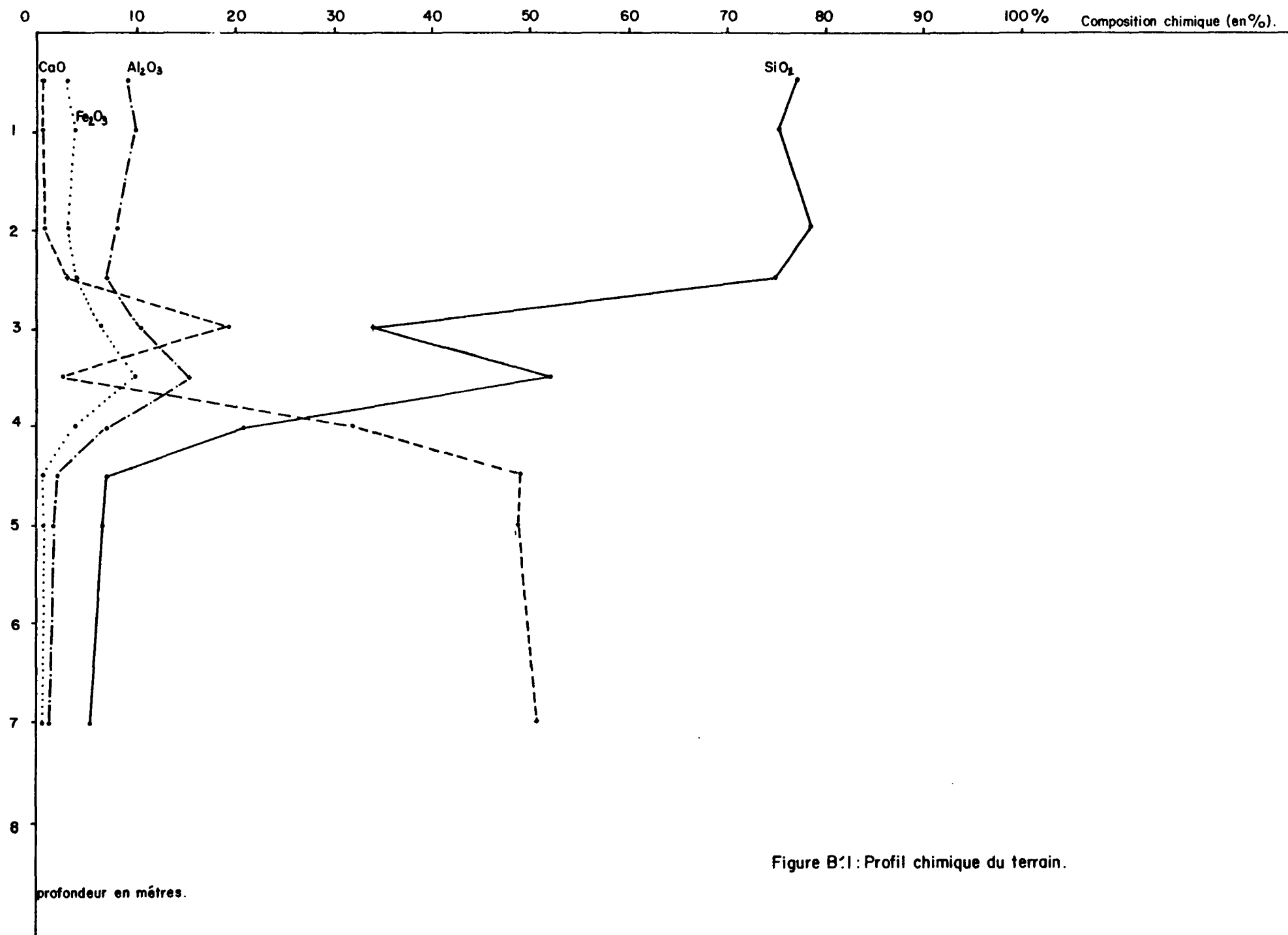


Figure B'1 : Profil chimique du terrain.

(Sainghin en Mélançois - Nord).

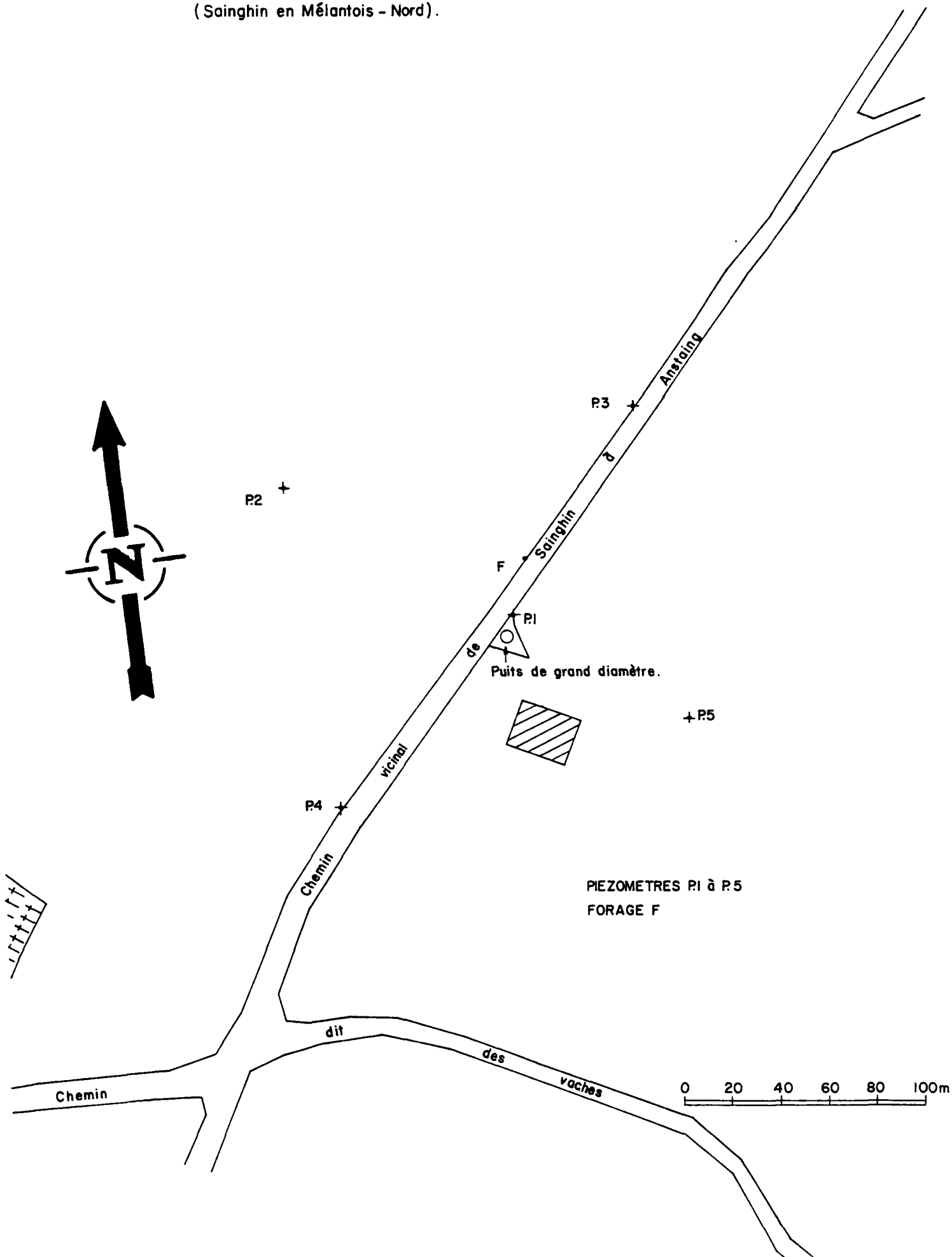
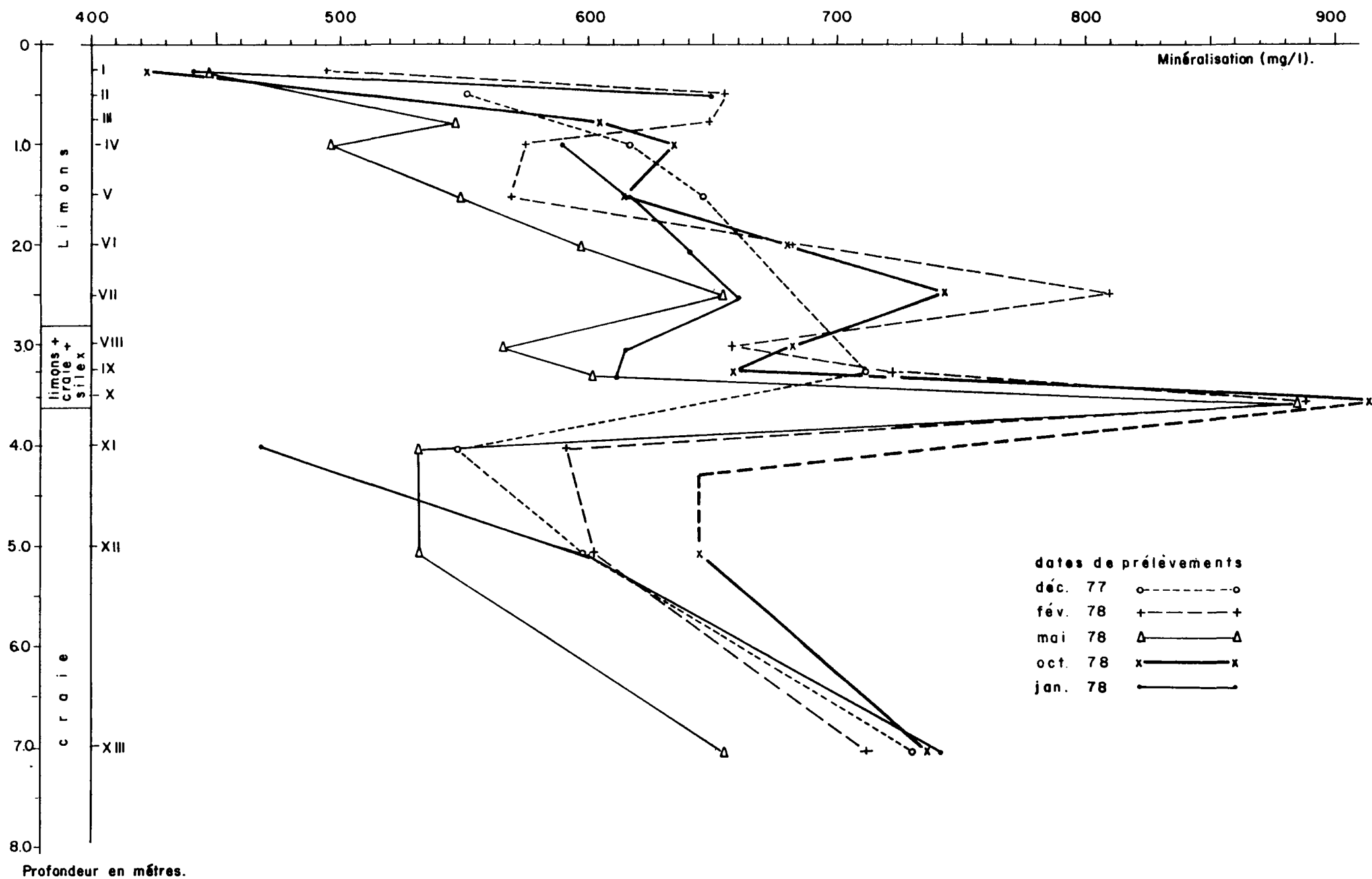


Figure B. 3: Profil de la minéralisation totale.



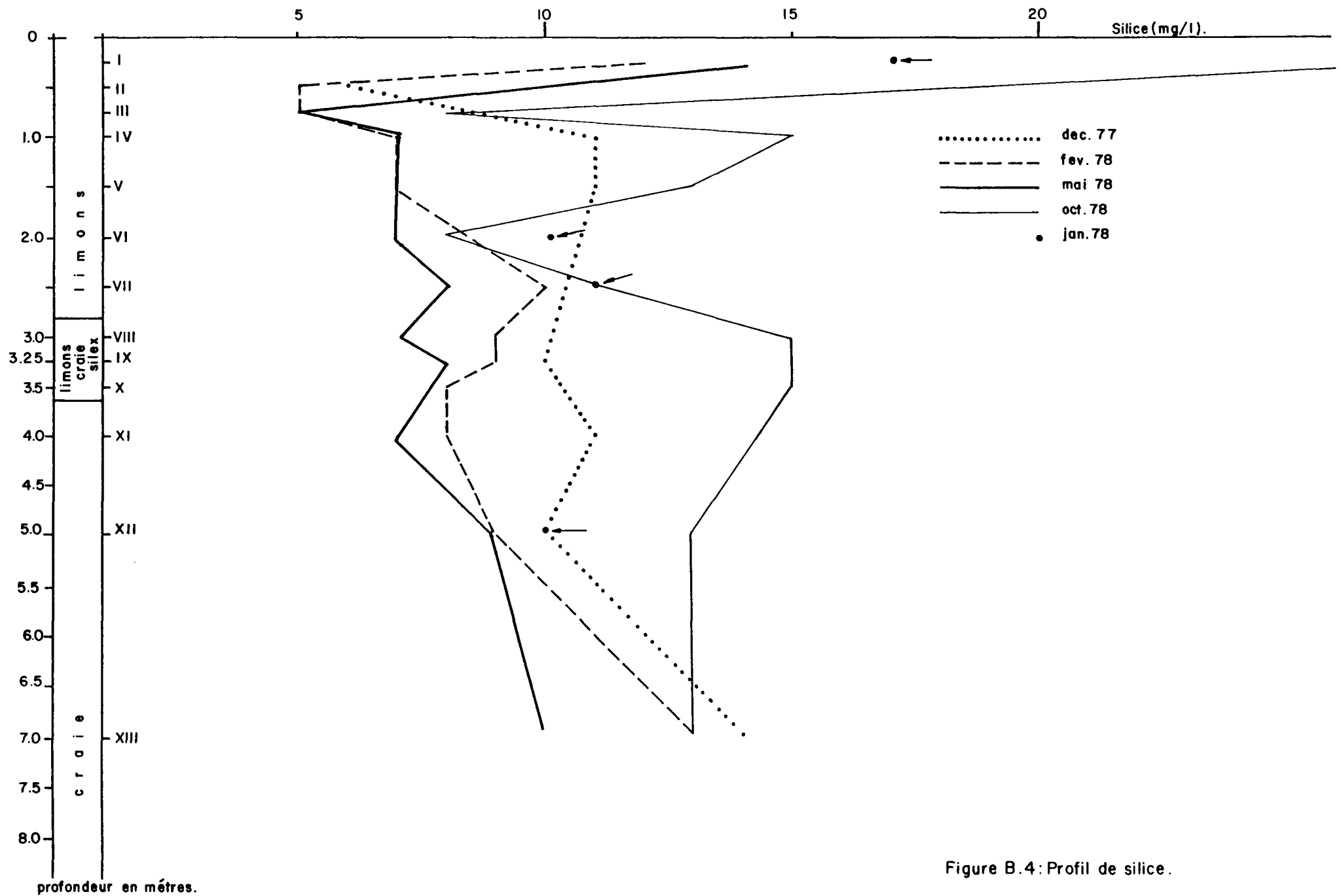


Figure B.4: Profil de silice.

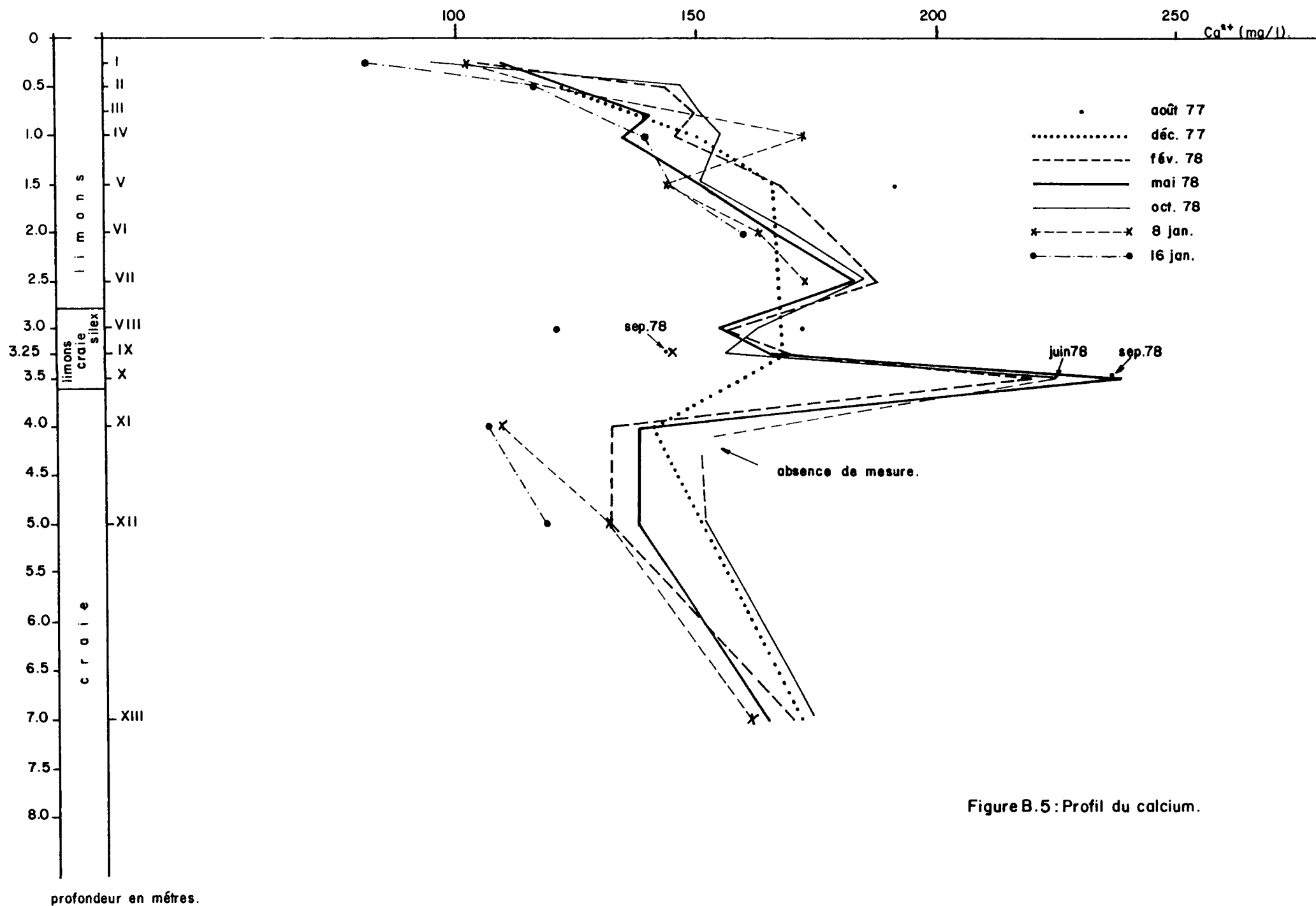


Figure B.5: Profil du calcium.

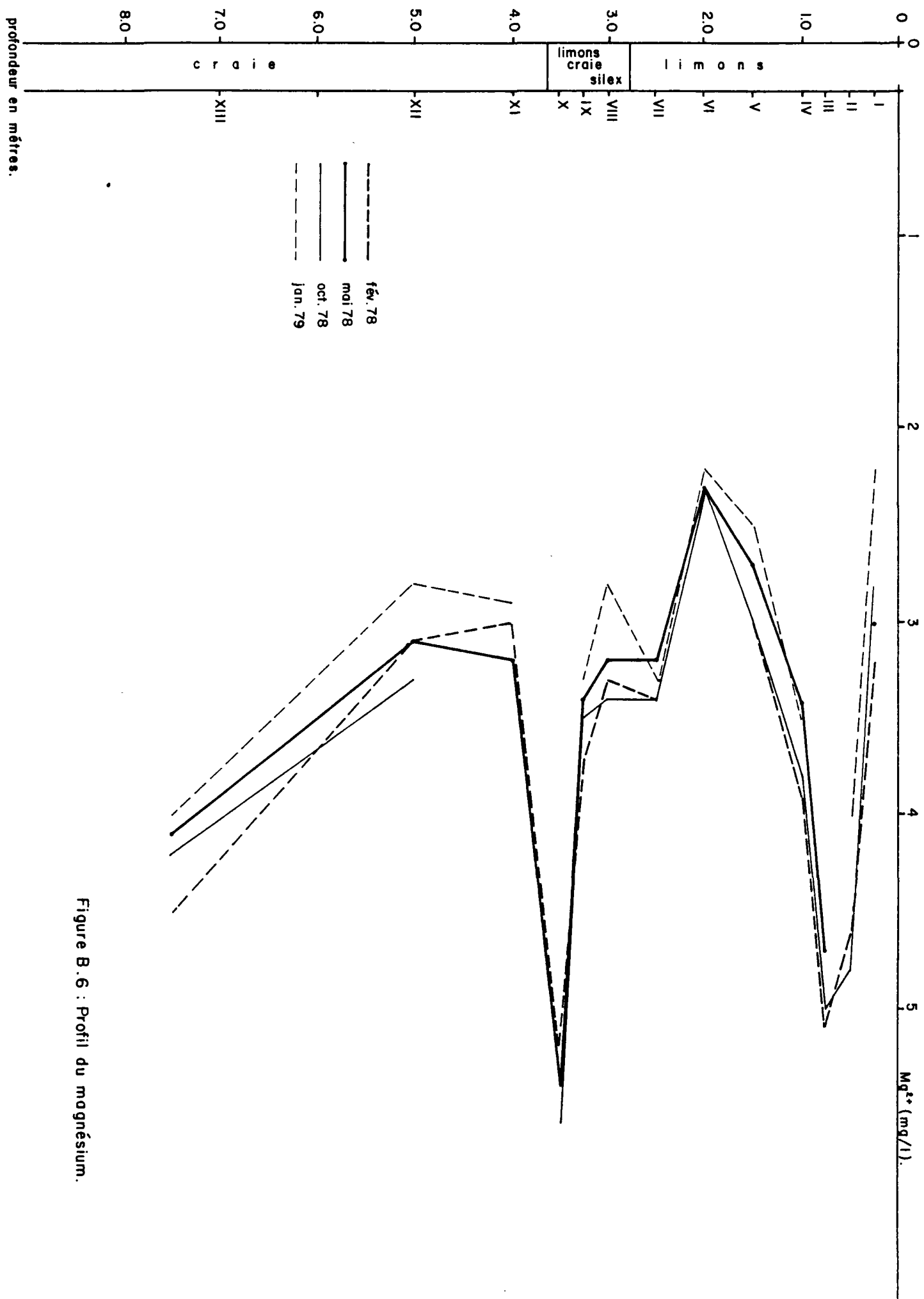


Figure B.6 : Profil du magnésium.

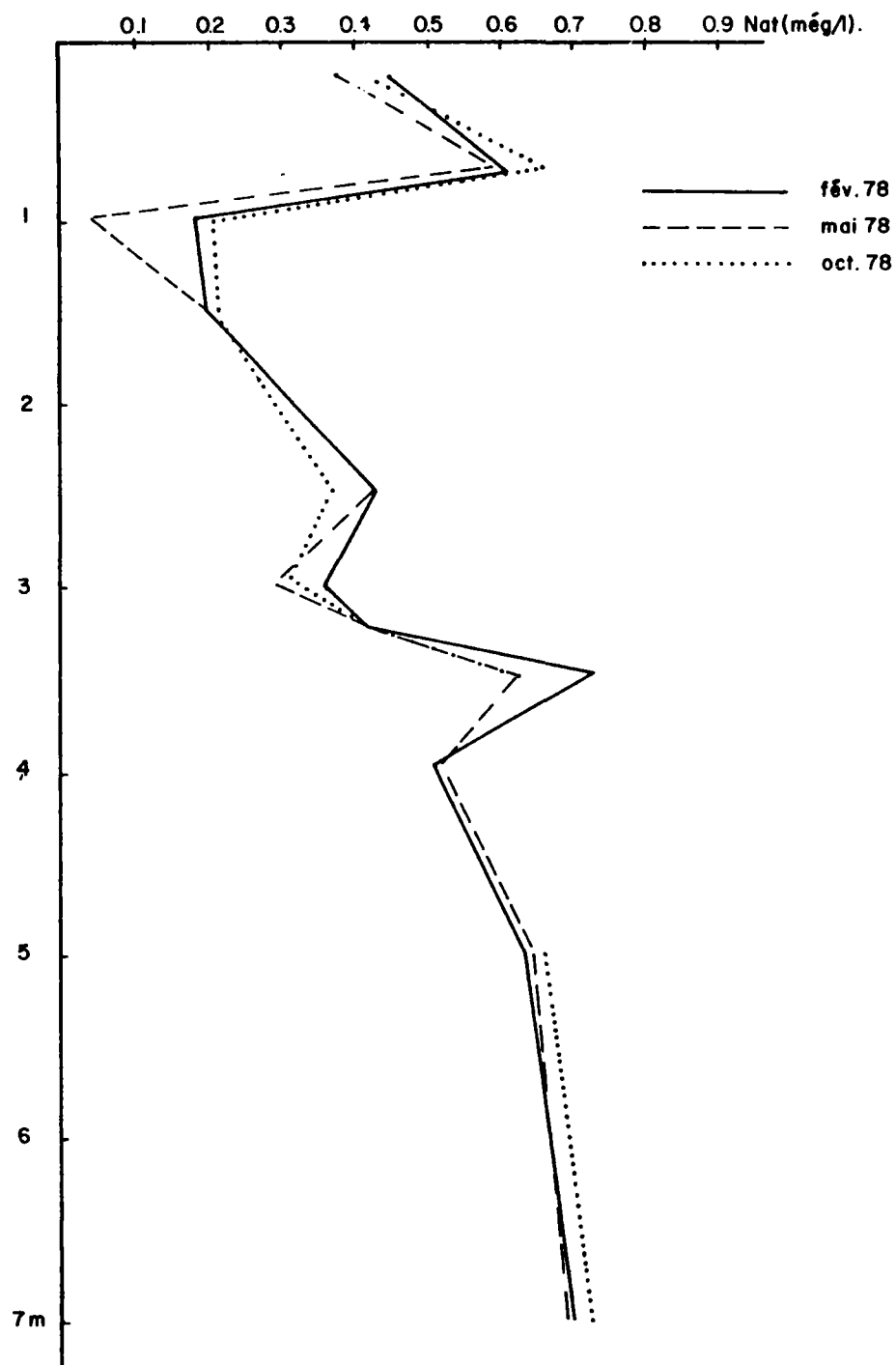


Figure B.7: Profil du sodium.

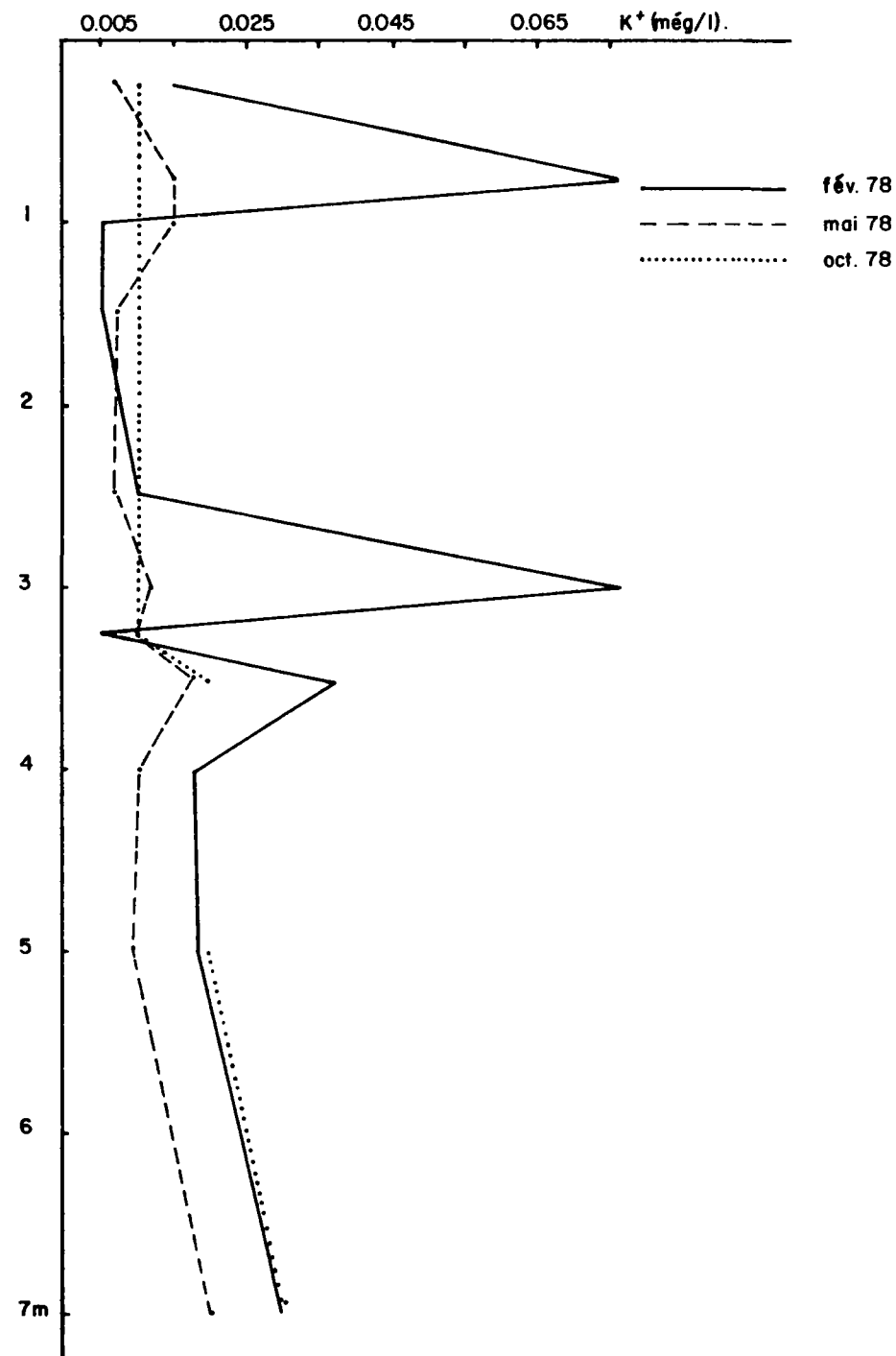


Figure B.8: Profil du potassium.

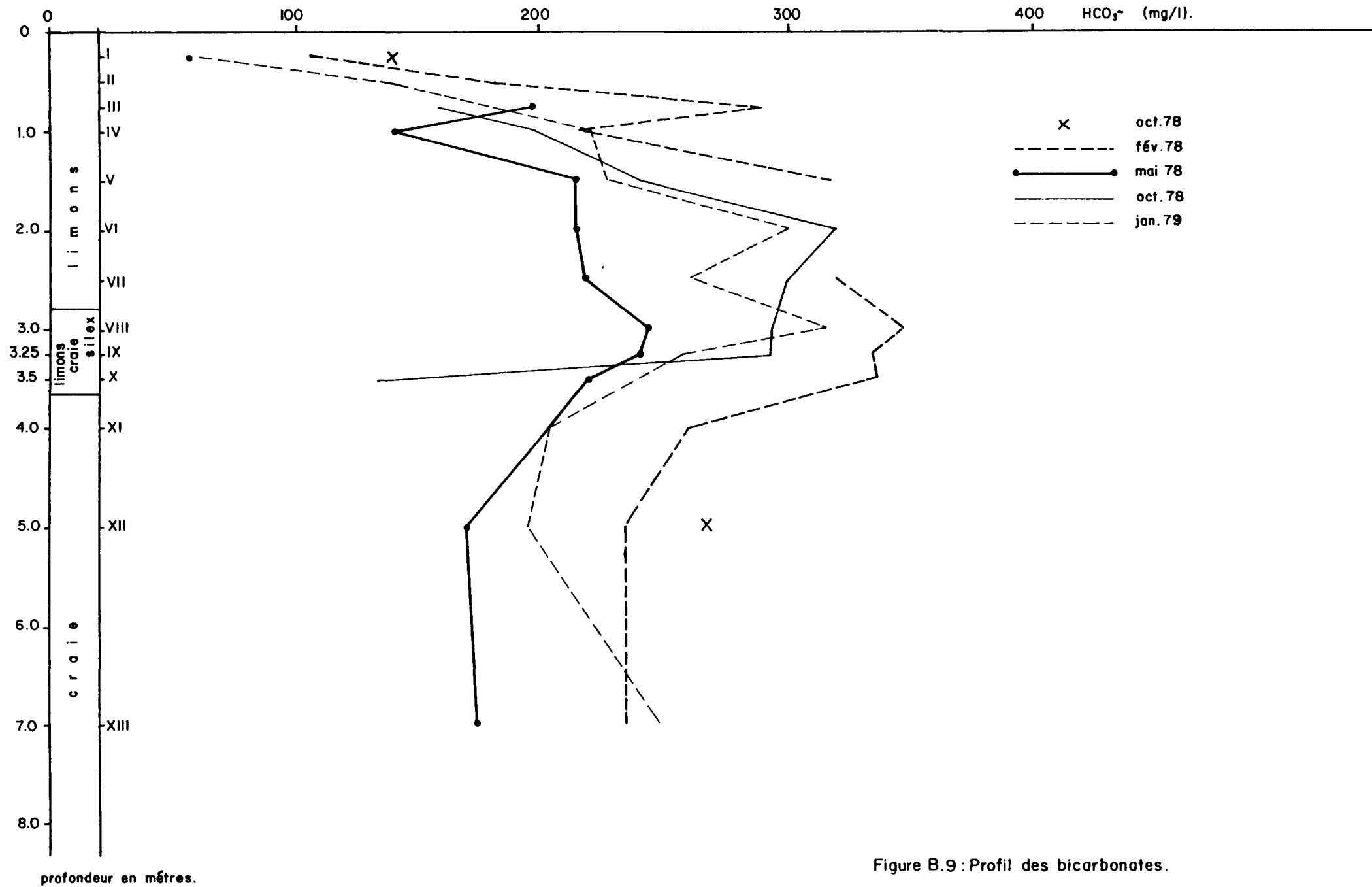


Figure B.9 : Profil des bicarbonates.

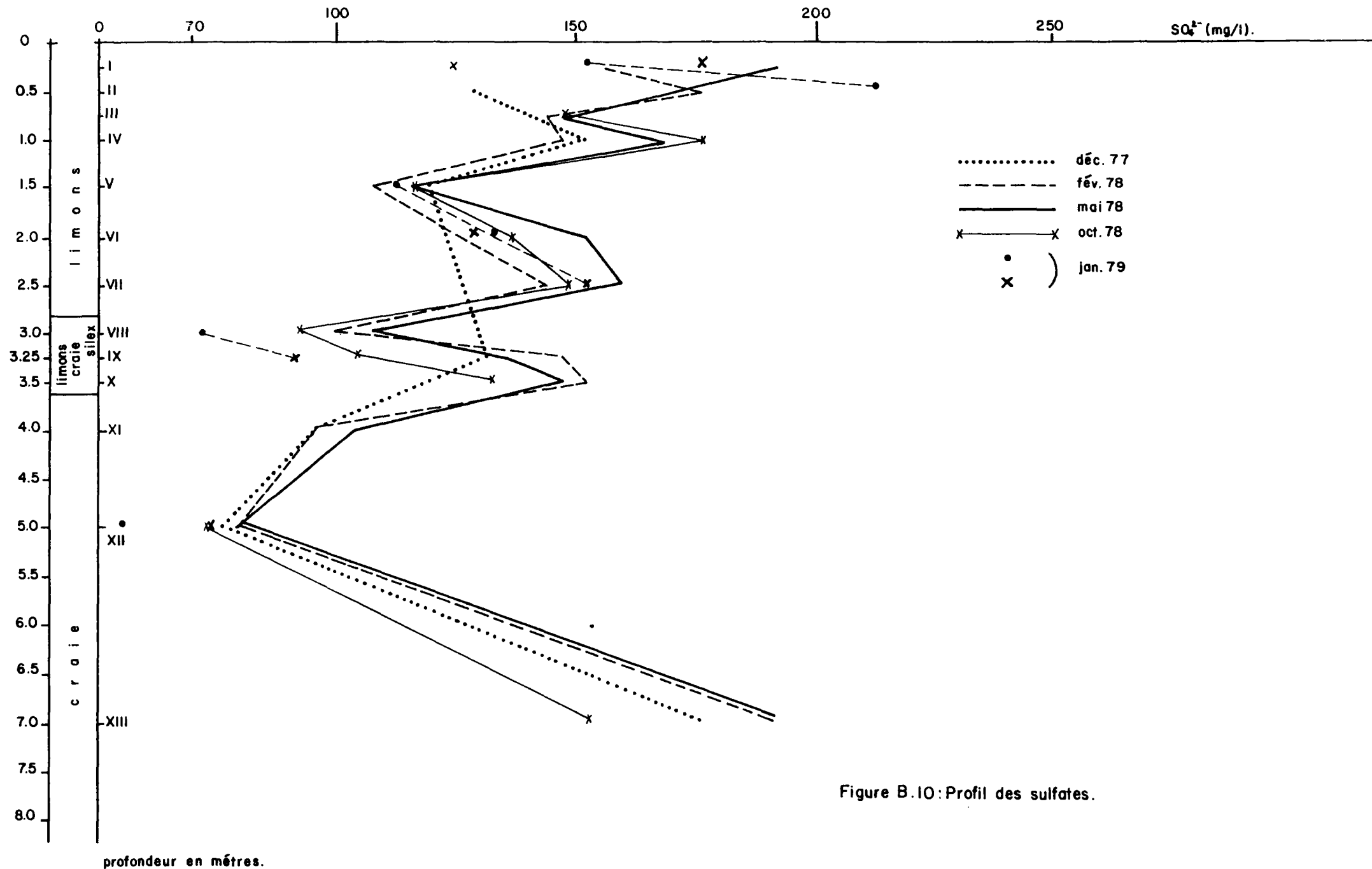


Figure B.10: Profil des sulfates.

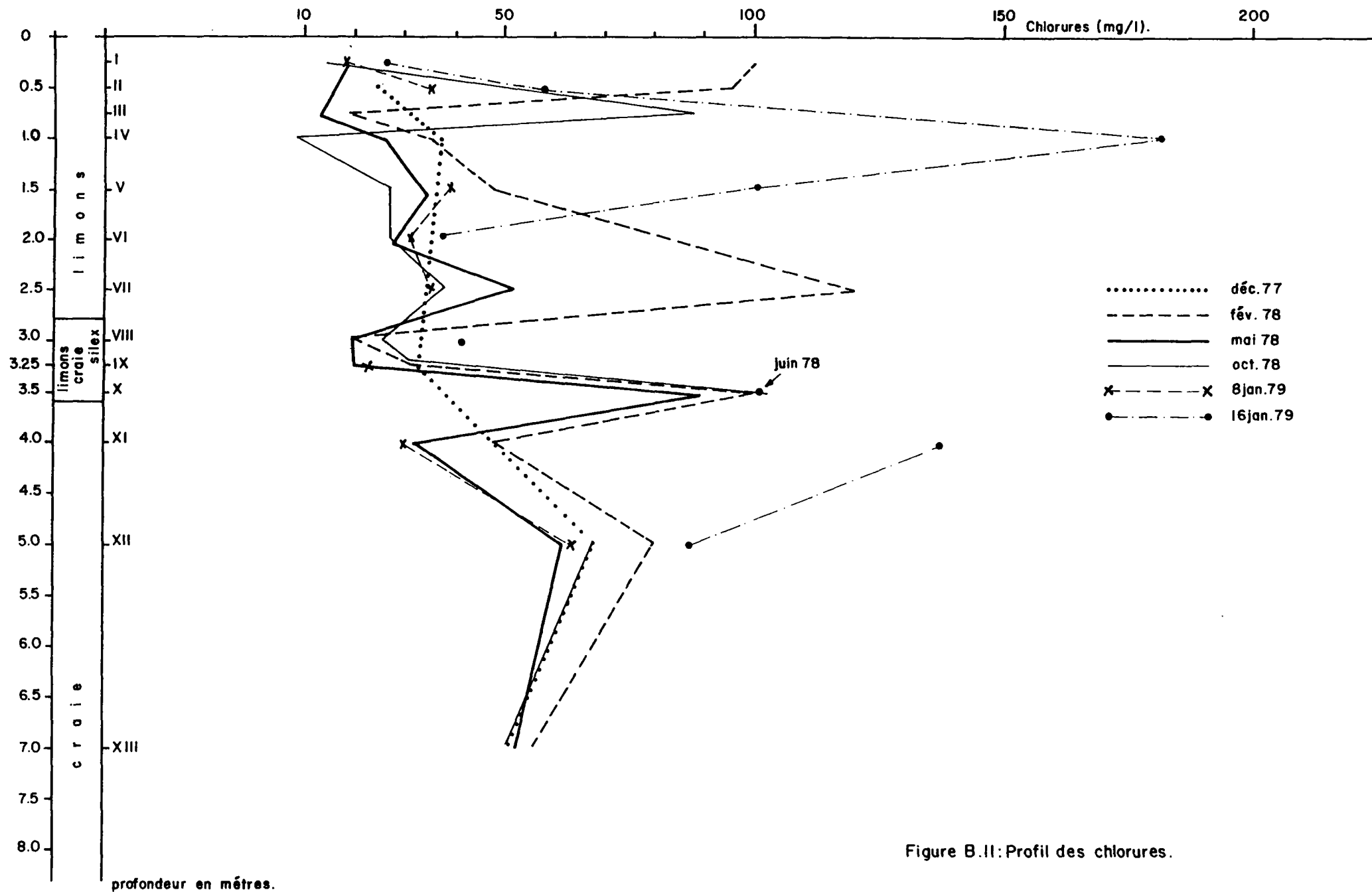


Figure B.II: Profil des chlorures.

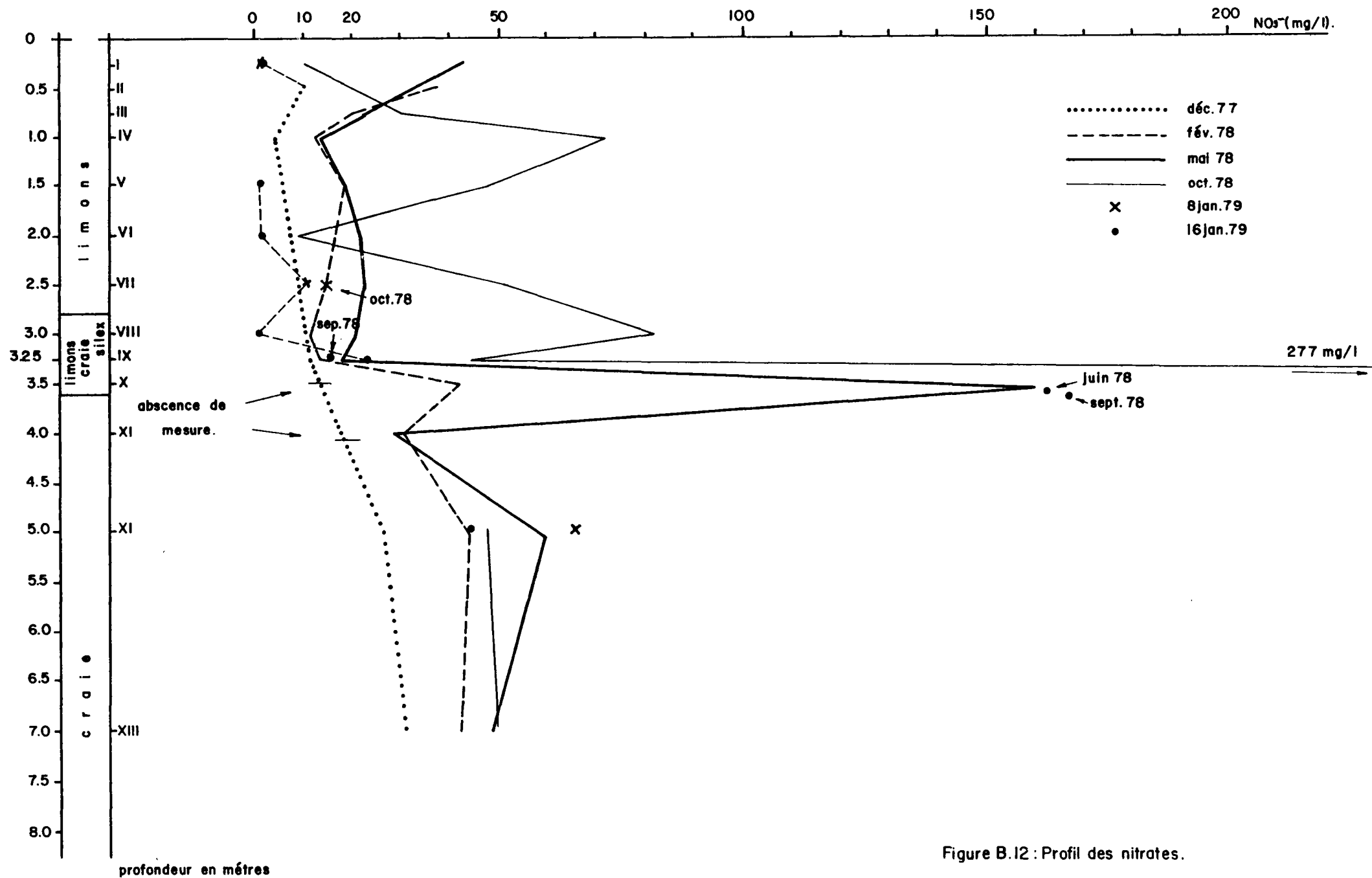


Figure B.12 : Profil des nitrates.

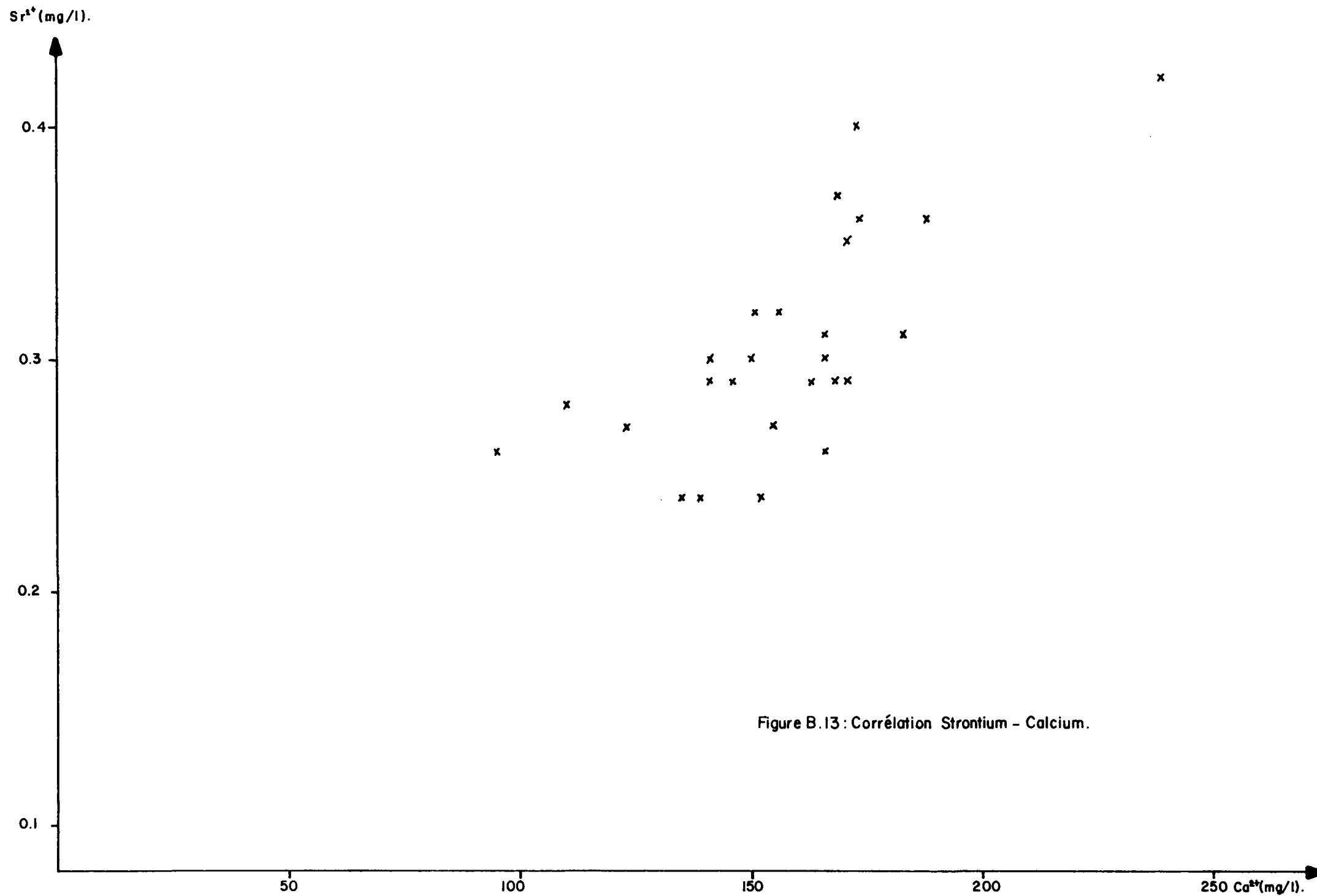


Figure B.13 : Corrélation Strontium - Calcium.

profondeur en mètres.

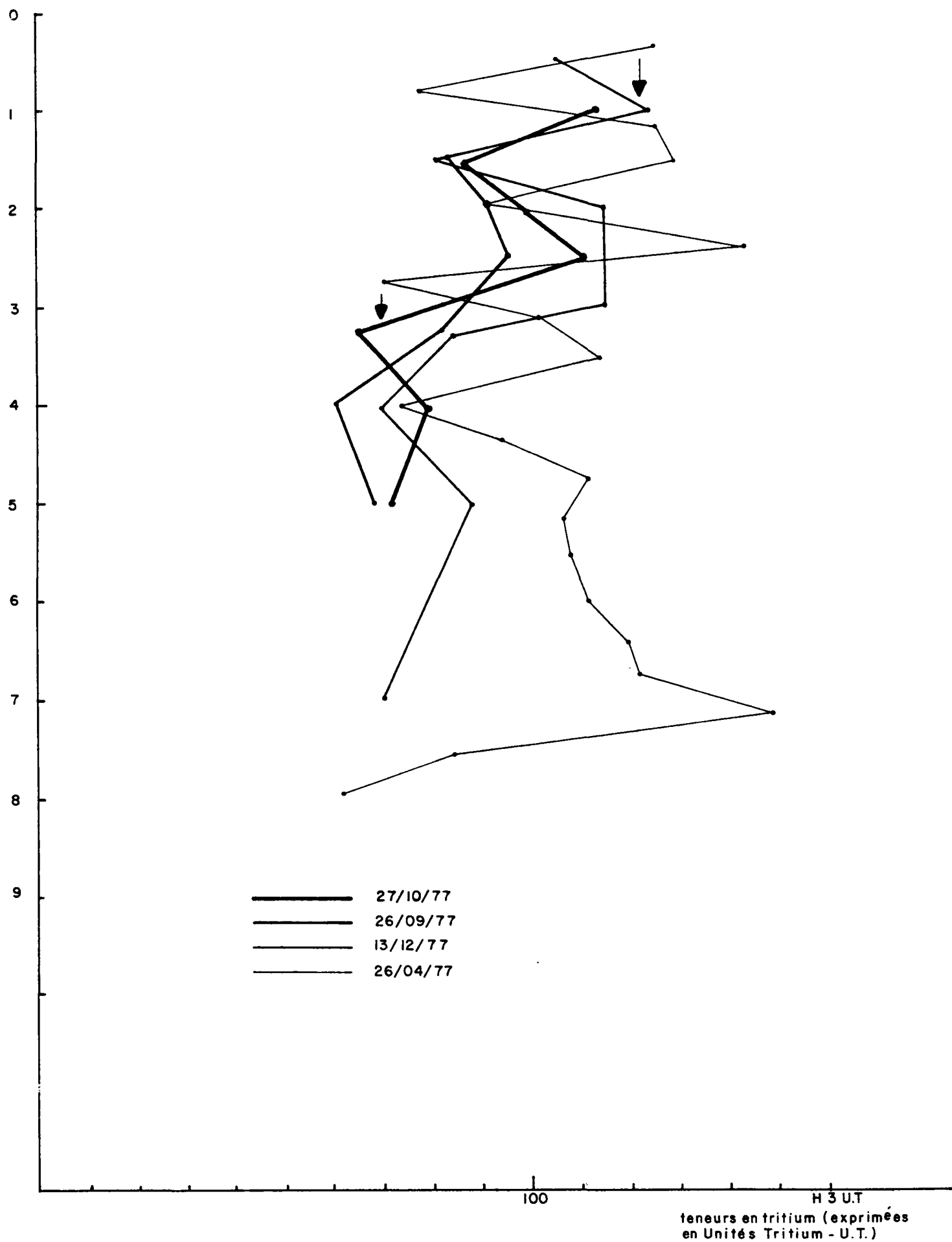


Figure B.14 : Profils Tritium.

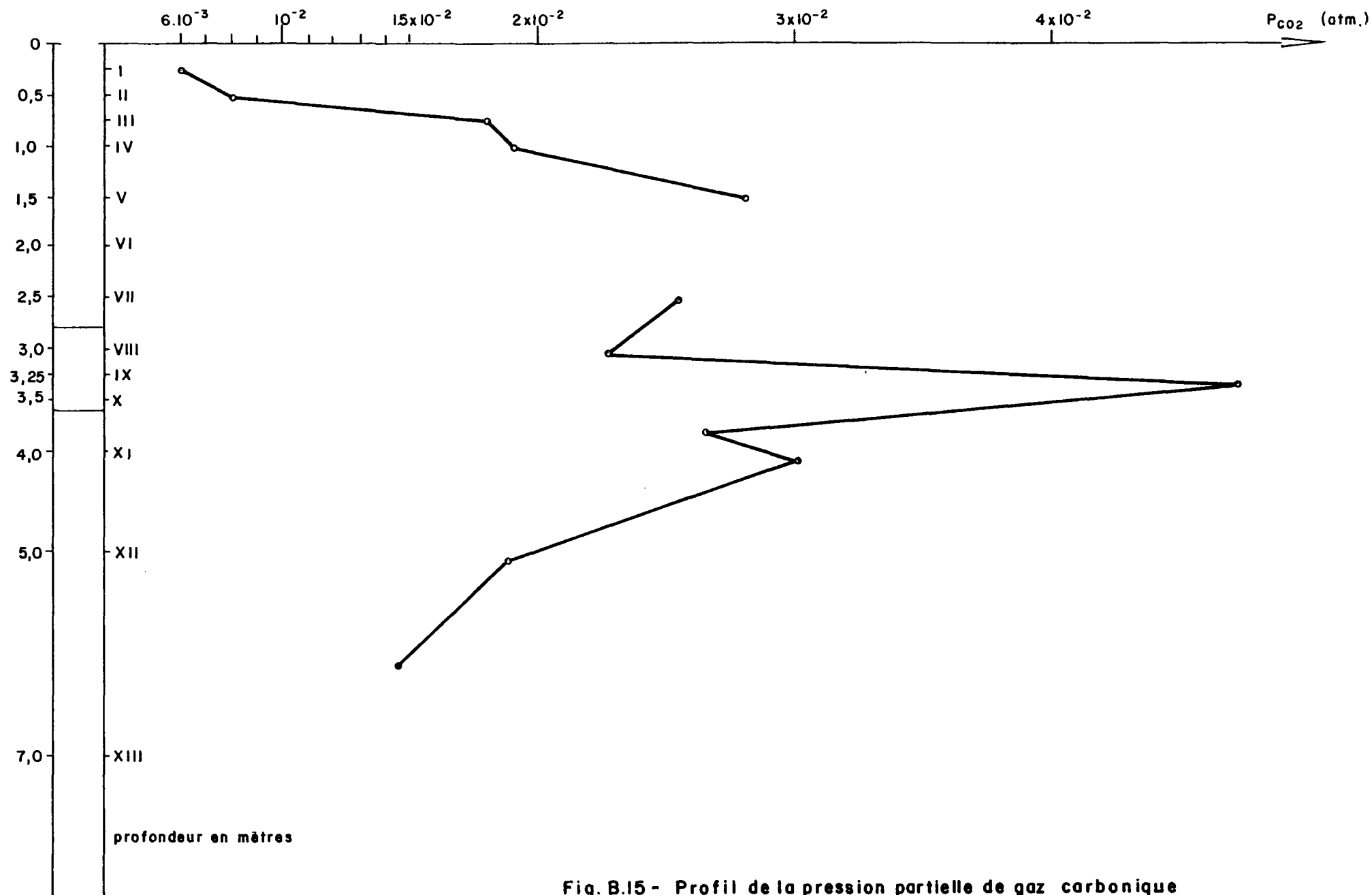


Fig. B.15 - Profil de la pression partielle de gaz carbonique
(d'après prélèvement de février 1978)

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE

HAUT COMITÉ DE L'ENVIRONNEMENT

Comité scientifique "EAU"

14, boulevard du Général Leclerc - 92521 Neuilly-sur-Seine Cédex

Tél.: (1) 758.12.12

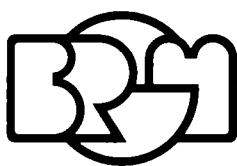
MÉCANISMES D'ACQUISITION DE LA QUALITÉ CHIMIQUE D'UNE EAU SOUTERRAINE

Etude expérimentale in situ

par

M. BONNET et A. LANDREAU

Tableaux et Annexes



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département hydrogéologie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

79 SGN 661 HYD

Novembre 1979

DEL NEUTRONIQUE

LE RALENTISSEMENT ET LA DIFFUSION DES NEUTRONS DANS UN SOL EST ESSENTIELLEMENT FONCTION DE LA TENEUR EN EAU. C'EST SUR CE PRINCIPE QU'EST BASE LA SONDE A NEUTRONS. LE FLUX DE NEUTRONS LENTS (THERMIQUES) A PROXIMITE DE LA SOURCE EST D'AUTANT PLUS ELEVE QUE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE OU EN HYDROGENE EST ELEVEE.

CEPENDANT LA MATRICE SOL JOUE UN ROLE NON NEGLIGEABLE DANS LE PROCESSUS EN FAISANT INTERVENIR DEUX PARAMETRES NEUTRONIQUES:

* LA SECTION EFFICACE D'ABSORPTION ΣA LIEE A LA PRESENCE D'ELEMENTS SOUVENT EN TRACÉ TEL QUE LE BORE, LE GADOLINIUM,...

* LA SECTION EFFICACE DE DIFFUSION ΣD LIEE A LA NATURE ET A LA TENEUR EN ARGILES

METHODE D'ANALYSE

L'ANALYSE EN PILE ATOMIQUE D'ECHANTILLONS DE SOLS PAR LES METHODES D'OSCILLATION D'AMPLITUDE OU D'OSCILLATION DE PHASE PERMET DE DETERMINER ΣA . CEPENDANT SON COUT EST PROHIBITIF. C'EST POURQUOI A CADARACHE A ETE MONTE UN DISPOSITIF D'ANALYSE D'ECHANTILLONS SOUS FLUX DE NEUTRONS THERMIQUES FOURNISSANT LES VALEURS ΣA ET ΣD .

4 ECHANTILLONS PEUVENT ETRE TRAITES PAR JOUR.

COURBES D'ETALONNAGE POUR SONDES A NEUTRONS

LA REPONSE DE L'APPAREIL EST FONCTION DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE H_v ET DES CARACTERISTIQUES NEUTRONIQUES ΣA ET ΣD DU SOL PLUS OU MOINS INFLUENTES SUIVANT SA DENSITE APPARENTE ρ_s .

$$N = (\alpha \rho_s + \beta) + \gamma \rho_s + \delta$$

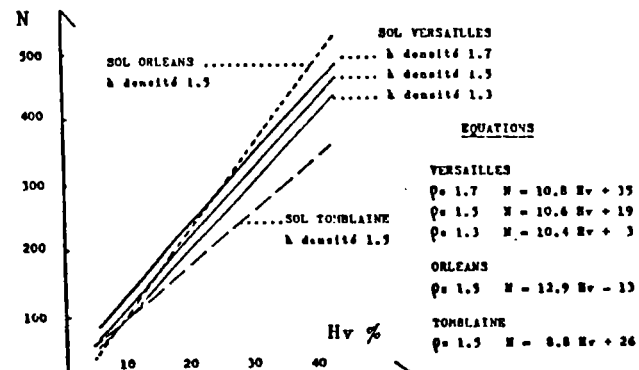
LES COEFFICIENTS $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ DEPEN-
DENT DE ΣA ET ΣD , ET DU TYPE DE SONDE.

POUR UN MEME TYPE DE SONDE LA REPONSE EST PROPORTIONNELLE A LA PUISSANCE DE LA SOURCE NEUTRONIQUE, AU RENDEMENT DU DETECTEUR, ... C'EST POURQUOI L'EQUATION EST DONNEE POUR UNE SONDE THEORIQUE DONT LA MESURE EST 1000 DANS LE MILIEU REFERENCE EAU, AVEC TUBAGE ALUMINIUM ϕ EXTERIEUR 45 mm, DANS UN FUT DE 200 L.

EXEMPLE DE RESULTAT

SOL VERSAILLES (30-50 cm)

$$N = (1.00 \rho_s + 9.13) H_v + 81.6 \rho_s - 103.5$$

UTILISATION DE L'EQUATION ETALONNAGE

A TITRE D'EXEMPLE PRENONS LE CAS D'UTILISATION D'UNE SONDE TYPE "A" DONT LA MESURE "EAU" EST 860 ET QUI INTRODUITE AU MOYEN DE TUBE ALUMINIUM DANS LE SOL DE VERSAILLES DONT LA DENSITE SECHE EST $\rho_s = 1.5$ INDIQUE UNE VALEUR $N^* = 244$.

POUR LA SONDE THEORIQUE L'EQUATION DEVIENT : $N = 10.6 H_v + 19$

POUR LA SONDE VERSAILLES :

$$N^* = N \times 860/1000 = 9.1 H_v + 19$$

POUR $N^* = 244$ ON A $H_v = 25.5$

CAS DES BILANS

SEULE LA PENTE P DE LA DROITE D'ETALONNAGE INTERVIENT. SOIT N_1 LA MESURE AU TEMPS T_1 ET N_2 AU TEMPS T_2 .

$$N_2 - N_1 = (\alpha \rho_s + \beta) (H_{v2} - H_{v1}) = P (H_{v2} - H_{v1})$$

$$BILAN = H_{v2} - H_{v1} = (N_2 - N_1) / P$$

EXEMPLE : DANS LE SOL DE VERSAILLES A LA COTE - 40 cm LA MESURE FAITE LE 12/6 EST $N^*1 = 304$, CELLE DU 22/6 EST $N^*2 = 244$. LE BILAN EST DONC :

$$B = (244 - 304) / 9.1 = -6.6 \%$$

DANS CE CAS LE SOL A PERDU 6.6 mm D'EAU EN 10 JOURS DANS LA TRANCHE DE SOL DE 10 cm ALLANT DE -35 A -45 cm.

Pour chaque analyse chimique, le programme édite quatre tableaux.

Tableau 1

- Paramètres généraux figurant dans l'analyse (t° , pH, Eh, TDS : Total Dissolved Solids).
- Paramètres fondamentaux calculés servant de base aux calculs du programme. Citons notamment la force ionique de la solution et la pression partielle de gaz carbonique en équilibre avec la solution, le total des anions et des cations.
- Valeurs du potentiel redox de l'eau (pE) calculées à partir des couples redox : oxygène/eau, NO_3/NH_4 , $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{S}$.

Tableau 2

Le tableau 2 décrit la distribution des différentes espèces en solution. Il est indiqué en face de chaque espèce ionique susceptible d'être formée :

- la valeur analysée (si cette espèce a été mesurée par l'analyse exprimée en ppm, mg/l et moles/l),
- la valeur calculée également en ppm, mg/l et moles/l,
- l'activité de l'espèce ionique,
- le coefficient d'activité de l'espèce ionique,
- la valeur de $-\log(\text{activité})$.

Tableau 3

- Impression des rapports d'un certain nombre de cations et d'anions entre eux susceptibles d'aider à l'interprétation géochimique des processus.

(Cl/Ca - Cl/Mg - Cl/Na - Cl/K - Cl/Al - Cl/Fe - Cl/SO₄ - Cl/HCO₃ - Ca/Mg et Na/K).

Il est également indiqué sur ce tableau les logarithmes de l'activité de rapports de certains cations avec l'activité en ions H^+ utilisés pour étudier le champ de stabilité de quelques minéraux. (Pour l'ion X : $\log \frac{[\text{X}]}{[\text{H}^+]^z}$ avec z : charge de l'ion X).

Tableau 4

L'état d'équilibre ou non de l'eau avec 82 minéraux est défini en comparant le rapport entre le produit des activités pour la réaction considérée et la constante K correspondant à l'équilibre considéré. Ainsi pour chaque minéral considéré (albite, anhydrite, calcite...) il est indiqué si l'eau au contact de celui-ci est apte ou non à dissoudre ce minéral.

ANNEXE B.2 - SORTIE LISTING DU PROGRAMME WATEQ

LILLE CELLULE 10 FEVRIER 78

3

DATE = 27/02/79

DOX = 9.2000

TOTAL DES CATIONS ANALYSES = 12.1814 TOTAL DES ANIONS ANALYSES = 12.2210 EN MEQ/L.

T	PH MESURE	EH MESURE	PE	PE CALC O	EMPIR PE O	PE CALC S	PE CALC N	TOTAL CALCULE EN MEQ/L. CATIONS	ANIONS	AH2O
9.50	7.000	2.300	100.00	14.95	3.50	100.00	100.00	11.2200	11.2673	0.9997

TDS	FOPCE	PO2	PCO2	PCH4	CO2	CO2 NON	COMBINE	CO3 CALCUL
PPM	IONIQUE	ATM	ATM	ATM	TOTAL	MOLES/L	PPM	MOLES/L
383.9	0.01759	0.00E+00	2.69E-02	0.00E+00	0.00701	5.37E-03	2.36E+02	2.61E-06

ION	CHARGE	ANAL PPM	CALC PPM	ANAL MOLAL	CALC MOLAL	ACTIVITE (ALPHA)	COEFF. ACTIV. (GAMMA)	-LOG ACTIV.	
0	CA	2	220.000	197.963	5.494E-03	4.944E-03	3.017E-03	0.6103	2.520
1	MG	2	5.200	4.896	2.141E-04	2.016E-04	1.243E-04	0.6165	3.906
2	NA	1	16.700	16.641	7.271E-04	7.246E-04	6.383E-04	0.9810	3.195
3	K	1	1.500	1.494	3.840E-05	3.825E-05	3.353E-05	0.9767	4.475
63	H	1		0.000112		1.116E-07	1.000E-07	0.9962	7.000
4	CL	-1	100.000	99.989	2.823E-03	2.823E-03	2.475E-03	0.9767	2.606
5	SO4	-2	152.000	114.712	1.584E-03	1.195E-03	7.245E-04	0.6052	3.140
6	HCO3	-1	338.500	327.318	5.553E-03	5.370E-03	4.746E-03	0.9839	2.324
17	CO3	-2		0.151		2.525E-06	1.541E-06	0.6105	5.912
85	H2CO3	0		90.226		1.456E-03	1.462E-03	1.0041	2.835
26	OH	-1		0.000566		3.333E-08	2.921E-08	0.9762	7.535
61	F	-1					0.9762		
97	BR	-1					0.9793		
18	MGMH	1		0.000055		1.335E-09	1.185E-09	0.9990	8.926
22	MGSO4 AQ	0		1.183		9.838E-06	9.878E-06	1.0041	5.005
21	MGHCO3	1		0.186		2.179E-06	1.914E-06	0.9783	5.718
20	MGCO3 AQ	0		0.040		4.745E-07	4.764E-07	1.0041	6.322
19	MGF	1					0.9804		
28	CAOH	1		0.000128		2.237E-09	1.983E-09	0.9862	8.703
31	CASO4 AQ	0		51.776		3.807E-04	3.822E-04	1.0041	3.418
29	CAHCO3	1		16.530		1.637E-04	1.450E-04	0.9862	3.939
30	CACO3 AQ	0		0.549		5.495E-06	5.517E-06	1.0041	5.258
43	NASO4	-1		0.085		7.163E-07	6.331E-07	0.9939	6.199
68	NA2SO4	0		0.001732		1.221E-08	1.226E-08	1.0041	7.912
42	NAHCO3	0		0.142		1.697E-06	1.704E-06	1.0041	5.769
41	NACO3	-1		0.000750		9.045E-09	7.995E-09	0.9839	8.097
48	NA2CO3	0		0.000000		2.939E-12	2.951E-12	1.0041	11.530
93	NaCl	0		0.002297		3.934E-08	3.950E-08	1.0041	7.403
45	KSO4	-1		0.020		1.452E-07	1.284E-07	0.9939	6.992
94	KCl	0		0.000160		2.149E-09	2.158E-09	1.0041	8.666
62	HSO4	-1		0.000510		5.256E-09	4.627E-09	0.9804	8.335
95	H2SO4	0		0.000000		7.216E-19	7.245E-19	1.0041	18.140
92	HCL	0		0.000000		3.491E-17	3.506E-17	1.0041	16.455
34	SiO2 TOT	0	8.000		1.333E-04		1.0041		
23	H4SiO4AQ	0		12.789		1.332E-04	1.337E-04	1.0041	3.974
24	H3SiO4	-1		0.007220		7.599E-08	6.674E-08	0.9783	7.176
25	H2SiO4	-2		0.000000		2.975E-13	1.816E-13	0.6105	12.741
16	ANAL H2S	0					1.0041		
13	H2S AQ	0					1.0041		
66	HS	-1					0.9762		
67	S	-2					0.6062		
7	FE	2					0.6167		
8	FE	3					0.3731		
9	FEOM	2					0.6062		
10	FEOM	1					0.9824		
11	FE(OH)3	-1				</			

ANNEXE B.2 (suite)

76	FE(OH)2	1									0.8839
77	FE(OH)3	0									1.0041
78	FE(OH)4	-1									0.8839
79	FE(OH)2	0									1.0041
12	FEHPO4	1									0.8839
99	FEHPO4	0									1.0041
64	FEH2PO4	1									0.8839
98	FEH2PO4	2									0.6105
14	FES04	1									0.8824
15	FECL	2									0.6062
27	FECL2	1									0.8824
32	FECL3	0									1.0041
33	FES04	0									1.0041
50	AL	3									0.3731
51	ALOH	2									0.6105
52	AL(OH)2	1									0.8839
53	AL(OH)4	-1									0.8824
54	ALF	2									0.6105
55	ALF2	1									0.8839
56	ALF3	0									1.0041
57	ALF4	-1									0.8804
58	ALS04	1									0.8824
59	AL(S04)2	-1									0.8804
44	PO4	-3									0.3242
46	HPO4	-2									0.6062
47	H2PO4	-1									0.8839
39	MGP04	-1									0.8839
72	MGHPO4	0									1.0041
40	MGH2PO4	1									0.8839
74	CAPO4	-1									0.8839
73	CAHPO4	0									1.0041
75	CAH2PO4	1									0.8839
60	KHP04	-1									0.8839
49	HAHP04	-1									0.8839
86	B TOT	0									1.0041
35	H3BO3 AQ	0									1.0041
36	H2BO3	-1									0.8717
84	HO3	-1	42.000	41.996	6.780E-04	6.780E-04	5.925E-04			3.227	0.8740
37	NH3 AQ	0									1.0041
38	NH4	1									0.8717
91	NH4S04	-1									0.8824
80	LI	1									0.8862
81	L IOH	0									1.0041
82	LIS04	-1									0.8824
87	SR	2									0.6062
88	SROH	1									0.8824
89	BA	2									0.6052
90	BAOH	1									0.8824

RAPPORTS IONIQUES D APRES LES MOLALITES MESUREES

CL/CA = 5.1387E-01
 CL/MG = 1.3188E+01
 CL/NA = 3.8830E+00
 CL/K = 7.3528E+01
 CL/AL =
 CL/FE =
 CL/S04 = 1.7826E+00
 CL/HCO3 = 5.0844E-01
 CA/MG = 2.5663E+01
 NA/K = 1.8936E+01

LOG DE L ACTIVITE DES RAPPORTS IONIQUES

Z = CHARGE DE L ION
 LOG CA/? = 11.4796
 LOG MG/? = 10.0944
 LOG NA/? = 3.8050
 LOG K /? = 2.5255
 LOG AL/? =
 LOG FE/? =
 LOG CA/MG = 1.3852
 LOG NA/K = 1.2796

ANNEXE B.2 (suite)

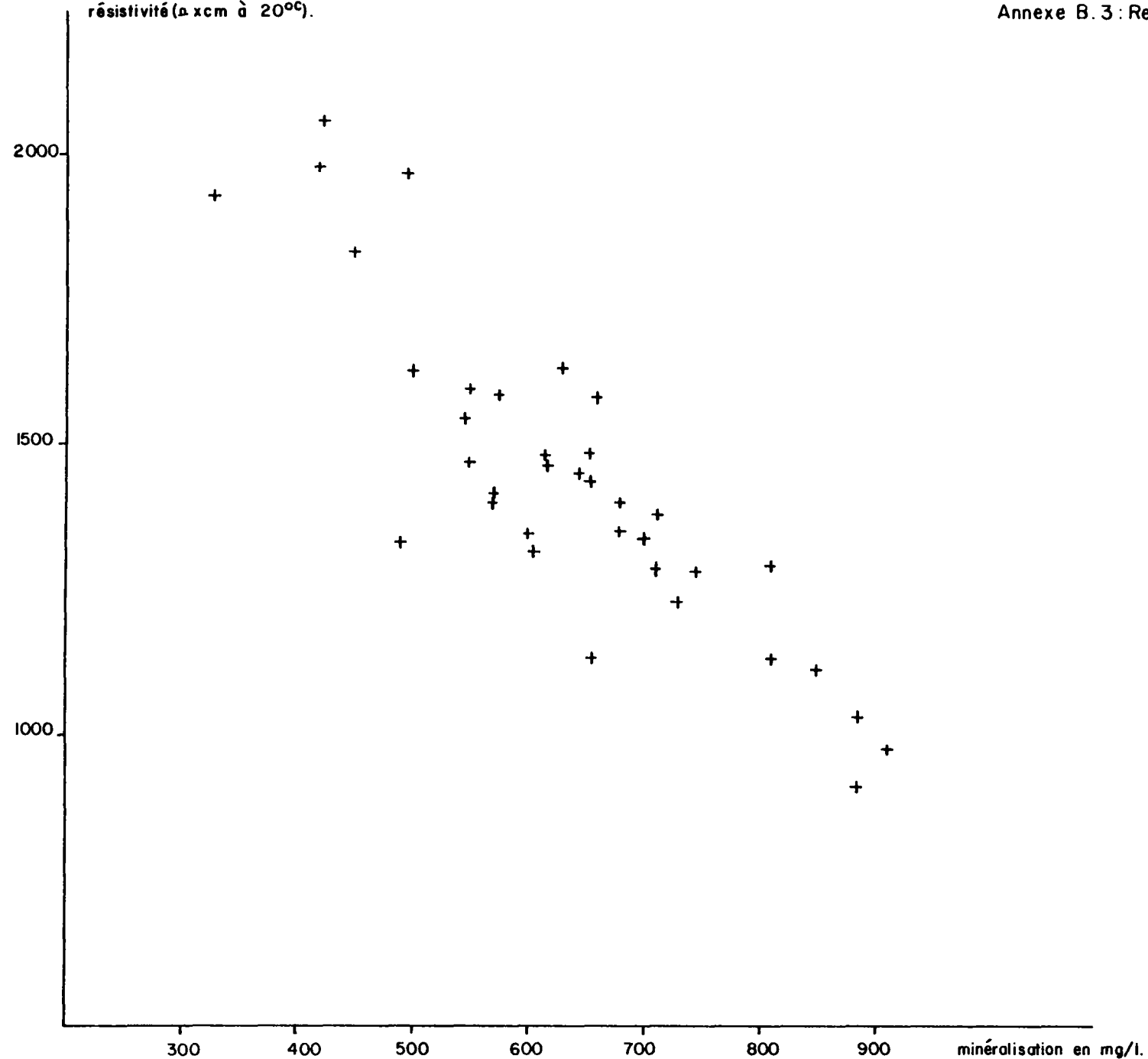
LILLE CELLULE 10		FEVRIER 78		3						PAR	
PHASE	AP	KT	LOG AP	LOG MINKT	LOG KT	LOG MAXKT	AP/KT	LOG AP/KT	DELGR	EQUIVALENT	
894	1.000E+00		0.000								
39 ADULAF		1.542E-22		-22.721	-21.812	-20.903					
40 ALBITE		9.060E-20		-19.595	-19.043	-18.486					
140 ALOH3A		7.360E-33			-32.133						
157 ALSIAM		1.148E+06			6.060						
158 ALSIAF		1.738E+05			5.240						
50 ALUNIT				-86.824	-86.533	-86.239					
42 ANALCM		3.692E-14		-14.077	-13.433	-12.787					
17 ANHYDR	2.186E-06	3.270E-05	-5.660	-5.219	-4.486	-3.753	6.696E-02	-1.175	-1.520	-1.520	
113 ANNITE					-88.156						
41 ANORTH		7.437E-21		-20.979	-20.129	-19.279					
21 ARAG	4.651E-09	6.515E-09	-8.332	-8.443	-8.186	-8.081	7.138E-01	-0.146	-0.189	-0.189	
150 ARTIN	1.196E-26	1.000E-18	-25.922	-18.128	-18.000	-17.868	1.196E-08	-7.922	-10.246	-5.123	
144 BARITE		9.554E-11		-11.486	-10.020	-8.553					
48 BEIDEL		2.005E-48			-47.698						
52 BOEHM		1.275E-34		-34.408	-33.895	-33.895					
19 BRUCIT	1.060E-19	5.779E-12	-18.975	-11.773	-11.238	-10.703	1.834E-09	-7.737	-10.006	-10.006	
12 CALCIT	4.651E-09	5.731E-09	-8.332	-8.262	-8.242	-8.222	8.115E-01	-0.091	-0.117	-0.117	
143 CELEST		4.936E-07		-7.407	-6.307	-5.207					
97 CHALC	1.338E-04	1.957E-04	-3.874		-3.708		6.839E-01	-0.165	-0.213	-0.213	
49 CHLOP					-91.764						
20 CHRYSO	2.134E-65	1.234E-53	-64.671		-52.909		1.729E-12	-11.762	-15.213	-5.071	
29 CLENST	1.419E-23	1.185E-17	-22.848	-17.292	-16.926	-16.632	1.197E-06	-5.922	-7.659	-7.659	
56 CLINOP											
99 CRISTO	1.338E-04	1.556E-04	-3.874		-3.808		8.601E-01	-0.065	-0.085	-0.085	
154 DIASP		1.819E-36			-35.740						
28 DIOPSI	4.888E-45	1.111E-37	-44.311	-38.559	-36.954	-35.349	4.398E-08	-7.357	-9.515	-4.757	
11 DOLOMI	8.909E-19	2.154E-17	-18.050	-16.799	-16.667	-16.535	4.137E-02	-1.383	-1.789	-0.895	
55 ERION											
112 FEON3A		7.780E+04		1.557	4.891	4.996					
119 FESPPT		1.216E-04		-4.050	-3.915	-3.760					
96 FLUAPT		9.234E-69			-68.035						
62 FLUOR		7.807E-10		-9.408	-9.107	-8.807					
27 FORSTR	1.002E+00	1.289E-28	0.001	-28.280	-27.890	-27.500	7.774E+27	27.891	36.073	18.036	
51 GIBCRS		4.410E-34		-34.089	-33.356	-33.136					
110 GOETH		5.968E-46			-45.224						
111 GREENA											
118 GREGIT		1.099E-19		-19.472	-18.959	-18.446					
18 GYPSUM	2.185E-06	1.385E-05	-5.661	-5.663	-4.858	-4.050	1.577E-01	-0.802	-1.037	-1.037	
64 HALITE	1.580E-06	3.508E+01	-5.801	1.318	1.545	1.772	4.503E-08	-7.346	-9.502	-9.502	
47 HALLOY		2.367E-35			-34.626						
108 HEMATI		1.705E-03		-2.993	-2.768	-1.539					
117 HUNTIT	3.270E-38	1.168E-29	-37.486	-29.585	-28.933	-28.265	2.800E-09	-8.553	-11.062	-2.765	
38 HYDMAG	1.426E-58	1.836E-36	-57.846	-35.929	-35.736	-35.554	7.769E-23	-22.110	-28.596	-7.149	
95 HYPAPT		7.703E-61		-62.642	-60.113	-53.452					
45 ILLITE		3.428E-43			-42.465						
46 KADLIN		1.269E-39		-39.776	-38.897	-37.796					
43 KNICA		1.481E-52		-52.798	-51.830	-50.862					
128 LAUMON		2.264E-33			-32.645						
147 LEON		4.204E-74			-73.376						
159 LEPIDO		6.310E-38			-37.200						
67 MACKIT		2.249E-05		-4.655	-4.648	-4.640					
98 MAGADI	2.572E-25	5.012E-15	-24.590		-14.300		5.131E-11	-10.290	-13.308	-13.308	
109 MAGHEM		2.432E+06		6.020	6.386	6.750					
10 MAGNES	1.916E-10	1.656E-08	-9.718	-8.031	-7.781	-7.531	1.157E-02	-1.937	-2.505	-2.505	
107 MAGNET		1.173E-08		-8.301	-7.931	-7.554					
63 MONTCA		4.234E-48			-47.373						
115 MONTBF		1.222E-35			-34.913						
116 MONTAB		2.051E-30			-29.688						
57 MORDEN											
66 MIRABI	2.943E-10	1.327E-02	-9.531	-2.456	-1.877	-1.283	2.218E-08	-7.654	-9.999	-4.950	

ANNEXE B.2 (suite et fin)

58 NAHCOL	3.030E-06	2.007E-01	-5.519		-0.698		1.510E-05	-4.821	-6.235	-6.235
60 NATRON	6.262E-13	1.138E-02	-12.203		-1.944		5.502E-11	-10.259	-13.269	-6.635
149 NESQUE	1.914E-10	1.355E-05	-9.718	-4.950	-4.868	-4.363	1.413E-05	-4.850	-6.273	-6.273
54 PHILIP		1.337E-20			-19.874					
44 PHLOG										
141 PREHNT		7.716E-13			-12.113					
114 PYRITE		1.166E-19		-19.234	-18.933	-18.634				
53 PYROPH		4.853E-49		-51.610	-48.314	-46.480				
101 QUARTZ	1.338E-04	5.546E-05	-3.874		-4.256		2.413E+00	0.382	0.495	0.495
36 SEPIA	2.671E-50	7.154E-42	-49.570		-41.145		3.761E-09	-8.425	-10.896	-5.448
153 SEP PT	2.691E-50	6.138E-38	-49.570		-37.212		4.385E-13	-12.358	-15.983	-7.992
9 SIDER		2.993E-12		-11.890	-11.524	-11.156				
100 SILGEL	1.338E-04	6.361E-04	-3.874		-3.196		2.104E-01	-0.677	-0.876	-0.876
146 STRENG		4.804E-27		-29.041	-26.318	-26.153				
142 STRONT		1.306E-12		-12.375	-11.884	-11.393				
37 TALC	3.821E-73	1.802E-63	-72.418	-66.811	-62.744	-62.711	2.121E-10	-9.673	-12.511	-4.170
65 THENAR	2.952E-10	6.982E-01	-9.530	-0.522	-0.156	0.211	4.228E-10	-9.374	-12.124	-6.062
61 THRNAT	6.279E-13	1.728E+00	-12.202		0.238		3.633E-13	-12.440	-16.089	-8.045
31 TREMOL			-161.040	-146.095	-143.052	-140.009	1.029E-19	-17.987	-23.265	-3.323
59 TRONA	1.902E-18	8.482E-01	-17.721		-0.072		2.242E-19	-17.649	-22.827	-7.609
106 VIVIAN		1.000E-36			-36.000					
155 WAIRKT		1.743E-28			-27.759					

résistivité (μ x cm à 20°C).

Annexe B.3 : Relation Résistivité-Minéralisation.

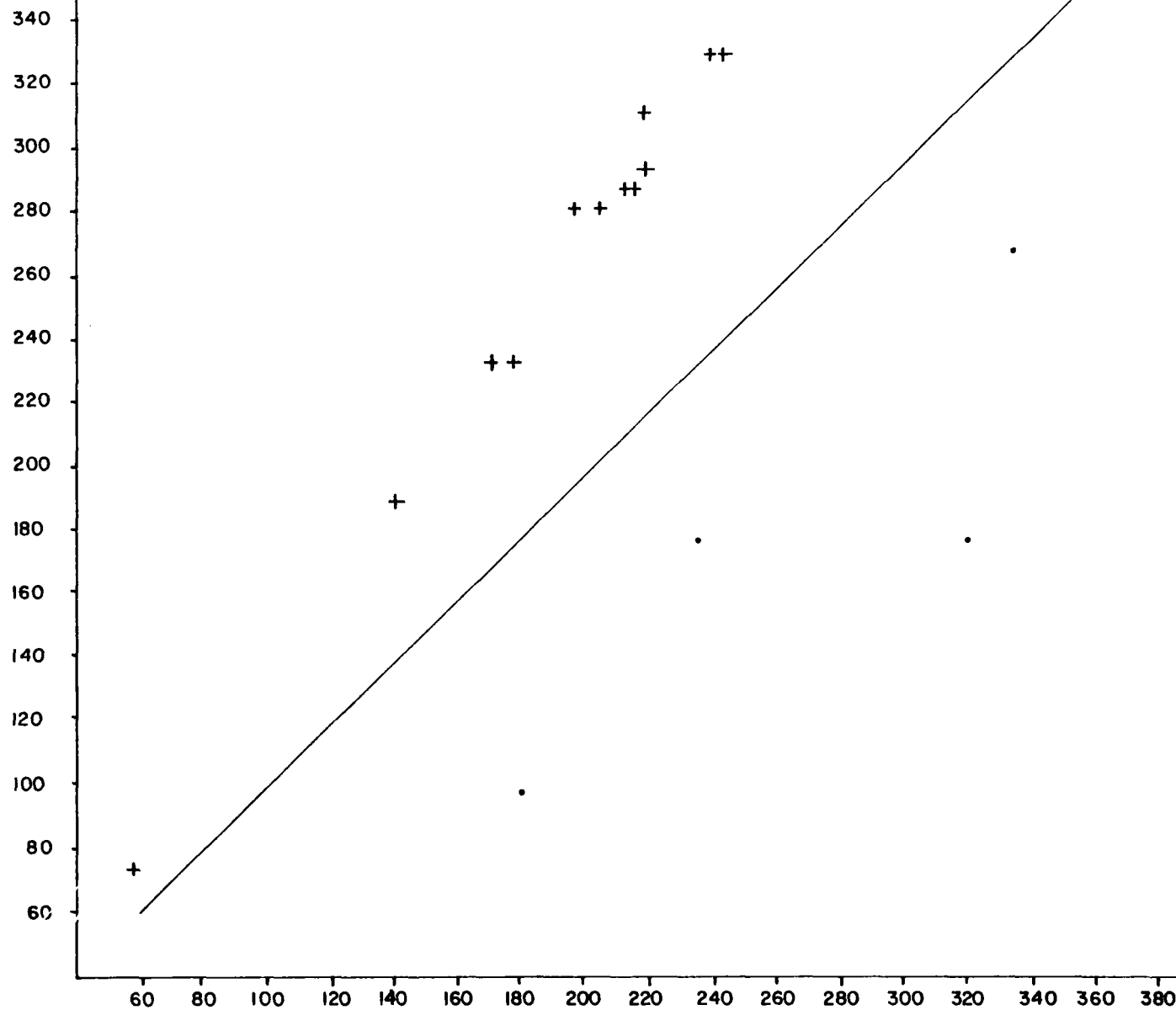


HCO₃ Laboratoire (mg/l).

• mesures de février 1978.

+ mesures de mai 1978.

annexe B.4 : Comparaison HCO₃ laboratoire et
HCO₃ terrain.



HCO₃ Terrain (mg/l).

*Résultats du test d'adsorption chimique
des cellules de prélèvement*

Dans un récipient contenant de l'eau distillée, il a été mis en dépression une cellule de prélèvement pendant une semaine. La chimie de l'eau dans la cellule a été comparée à celle de référence afin de déceler l'importance d'éventuels absorptions ou relargages.

	<u>Eau de référence</u>	<u>Eau de la cellule</u>
Résistivité (en $\Omega \times \text{cm}$ à 20°C)	21 420	19 640
Silice (mg/l SiO_2)	1	1
Ca^{2+} (mg/l)	6,0	5,4
Mg^{2+} "	0,7	1,2
Na^+ "	1,9	3,0
K^+ "	0,7	0,8

TABLEAU A.1 : EVOLUTION EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA PROFONDEUR DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE ET DU STOCK D'EAU

Z	t = 0		t = 4		t = 6		t = 36		t = 46		t = 60		t = 70		t = 82		t = 94		t = 106		t = 150	
	θ	S	θ	S	θ	S	θ	S	θ	S	θ	S	θ	S	θ	S	θ	S	θ	S	θ	S
10	30,7	30,7	30,3	30,3	30,16	30,2	29,56	29,6	29,46	29,5	29,36	29,4	29,32	29,3	29,28	29,3	29,24	29,2	29,2	29,2	29,12	29,1
20	32,3	62,6	32	62,5	31,92	62,5	31,42	62,2	31,30	62,1	31,18	62,1	31,10	62	31	62	30,91	61,9	30,84	61,9	30,8	61,9
30	32,9	95,4	32,5	94,7	32,3	94,5	31,06	93,7	31,5	93,6	31,44	93,4	31,4	93,3	31,39	93,2	31,36	93,1	31,33	93,6	31,32	93,0
40	32	127,8	31,82	128,6	31,78	126,5	30,94	124,9	30,74	124,7	30,52	124,4	30,38	124,2	30,22	124	30,08	123,8	29,95	123,6		123,5
50	31,7	159,5	31,45	158,4	31,36	158,1	30,9	155,8	30,8	155,5	30,62	155	30,52	154,6	30,42	154,3	30,36	154	30,24	153,7	29,60	153,2
60	33,2	192,0	32,7	190,4	32,48	190,1	31,42	187	31,2	186,5	30,96	185,7	30,8	185,3	30,64	184,8	30,48	184,4	30,34	183,9	29,96	182,9
70	33	225	32,6	223	32,36	222,5	31,56	218,5	31,4	217,8	31,20	216,7	31,10	216,2	30,98	215,6	30,86	215	30,75	214,4	30,50	213,1
80	32,6	257,9	32,20	255,4	32,16	254,8	31,60	250,1	31,44	249,2	31,24	247,9	31,10	247,3	31,00	246,6	30,84	245,8	30,72	245,1	30,32	243,5
90	32	290,3	31,72	287,3	31,64	286,6	31,10	281,5	31	280,4	30,88	278,9	30,8	278,3	30,10	277,4	30,64	276,5	30,50	275,7	30,2	273,8
100	31,4	321,9	30,9	318,6	30,8	317,8	30,64	312,4	30,6	311,2	30,56	309,5	30,54	308,9	30,52	308	30,50	307	30,48	306,2	30,4	304,1
110	31,4	353,2	31,00	349,6	30,9	348,7	30,68	343,1	30,64	341,8	30,60	340,1	30,58	339,5	30,56	338,5	30,54	337,5	30,52	336,7	30,44	334,5
120	31,8	384,8	31,62	380,9	31,6	379,9	31,45	374,1	31,42	372,8	31,39	371,1	31,36	370,5	31,34	369,4	31,32	368,4	31,30	367,6		365,4
130	32,4	416,9	32,1	412,7	31,96	411,7	31,44	405,5	31,36	404,2	31,2	402,4	31,12	401,7	31,08	400,6	31,03	399,6	30,92	398,7	30,84	396,4
140	33,7	450	33,3	445,4	33,18	444,3	32,4	437,4	32,24	435,9	32,02	434	31,88	433,2	31,72	432	31,57	430,8	31,44	429,9	31,04	427,3
150	37	485	36,5	480,3	36	478,8	32,8	470	31,8	467,9	31,2	465,6	30,96	464,5	30,76	463,2	30,62	461,9	30,5	460,9	30,3	457,9

**TABLEAU A.2 : VALEURS DE PERMEABILITES CALCULEES POUR
LES COTES 30, 50, 70, 120 et 150 CM**

Cotes	t en heures	θ cm ³ /cm ³	H cm	ds/dt mm/h	dH/dz	K mm/h
z = 30 cm	0	0,329	- 21			
	4	0,325	- 27	0,175	2	0,087
	6	0,323	- 27	0,100	2	0,050
	36	0,319	- 33	0,027	1,92	0,014
	46	0,315	- 44	0,010	1,45	0,006
	60	0,314	- 56	0,014	1,40	0,010
	70	0,314	- 61	0,010	0,98	0,010
	82	0,314	- 69	0,008	1,04	0,008
	94	0,314	- 75	0,008	0,30	0,01
	106	0,313	- 80	0,008	0,74	0,011
	150	0,313	- 96	0,005	0,36	0,014
z = 50 cm	0	0,317	- 50			
	4	0,314	- 56	0,275	0,92	0,29
	6	0,314	- 57	0,150	0,91	0,16
	36	0,309	- 69	0,077	0,75	0,103
	46	0,308	- 77	0,030	0,68	0,044
	60	0,306	- 81	0,035	0,79	0,044
	70	0,305	- 83	0,040	0,69	0,057
	82	0,304	- 86	0,025	0,67	0,037
	94	0,304	- 92	0,025	0,62	0,040
	106	0,302	- 95	0,025	0,63	0,039
	150	0,296	- 105	0,011	0,53	0,020
z = 70 cm	0	0,330	- 69			
	4	0,326	- 69	0,525	0,72	0,73
	6	0,324	- 73	0,250	0,72	0,35
	36	0,316	- 82	0,133	0,57	0,23
	46	0,314	- 87	0,070	0,57	0,12
	60	0,312	- 91	0,078	0,62	0,12
	70	0,311	- 95	0,050	0,63	0,079
	82	0,310	- 98	0,050	0,63	0,079
	94	0,308	- 102	0,050	0,63	1
	106	0,307	- 108	0,050	0,63	1
	150	0,305	- 116	0,029	0,50	0,058
z = 120 cm	0	0,318	- 109			
	4	0,316	- 111	0,975	0,87	1,12
	6	0,316	- 112	0,500	0,87	0,57
	36	0,314	- 125	0,193	0,84	0,230
	46	0,314	- 130	0,130	0,84	0,150
	60	0,314	- 133	0,121	0,83	0,144
	70	0,314	- 136	0,060	0,83	0,072
	82	0,313	- 139	0,092	0,83	0,11
	94	0,313	- 145	0,083	0,83	0,10
	106	0,313	- 146	0,066	0,83	0,079
	150	0,313	- 155	0,050	0,79	0,063
z = 150 cm	0	0,370	- 145			
	4	0,365	- 143	1,175	1,37	0,86
	6	0,360	- 144	0,75	1,20	0,625
	36	0,328	- 154	0,293	1,03	0,284
	46	0,318	- 158	0,210	1	0,210
	60	0,312	- 159	0,164	0,9	0,182
	70	0,312	- 159	0,110	0,9	0,122
	82	0,308	- 163	0,108	0,88	0,122
	94	0,306	- 168	0,108	0,84	0,128
	106	0,305	- 169	0,108	0,82	0,131
	150	0,303	- 178	0,068	0,90	0,075

TABLEAU B.1 : COMPOSITION CHIMIQUE DU TERRAIN (en %)

Profondeur (en m)	0,5	1	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	7
SiO ₂	77,60	75,60	78,50	75,00	34,20	52,10	21,30	6,90	6,60	5,30
Al ₂ O ₃	9,00	9,90	8,20	7,10	10,45	15,40	7,00	2,10	1,85	1,35
Fe ₂ O ₃	3,30	3,78	3,20	3,92	6,40	10,05	3,72	0,65	0,73	0,60
FlO	0,18	0,18	0,22	0,14	0,14	0,14	0,10	0,14	0,10	0,10
TiO ²	0,66	0,74	0,72	0,53	0,24	0,55	0,24	0,11	0,10	0,07
MnO	0,098	0,080	0,072	0,052	0,23	0,38	0,087	0,069	0,067	0,06
CaO	0,80	0,77	0,80	2,92	19,50	2,70	31,95	49,10	49,20	50,70
MgO	0,60	0,83	0,75	0,75	1,40	2,00	1,08	0,50	0,50	0,40
Na ₂ O	0,98	1,00	0,94	0,39	0,12	0,18	0,07	0,06	0,06	0,05
K ₂ O	2,21	2,18	1,92	1,47	1,31	2,00	0,97	0,46	0,36	0,32
P ₂ O ₅	0,10	0,09	0,13	0,07	0,29	0,50	0,15	0,15	0,10	0,10
CO ²	0,15	0,30	0,16	1,68	15,00	0,54	25,50	37,80	38,70	39,70
SO ₄	0,036	0,036	0,042	0,048	0,042	0,048	0,060	0,072	0,096	0,108
C organique	0,13	0,11	0,10	0,07	0,13	0,11	0,07	0,05	0,06	0,04

TABLEAU B.2 : TENEURS EN ELEMENTS DU TERRAIN ET DE L'EAU DE LA NAPPE

	Profondeur	Li	Rb	Sr	Ba	F	B	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn	Ti	V
Limons	25 cm	≤ 50					88			16	130			1600		45			6400	99
"	50 cm	≤ 50					93			22	160			1000		61			5100	140
"	75 cm	≤ 50					87			16	140			910		57			5000	120
"	1 m	≤ 50					87			17	160			910		72			5500	130
"	1,5 m	≤ 50					99			18	150			1200		75			6200	130
"	2 m	≤ 51					100			19	170			980		75			6200	140
"	2,5 m	≤ 50					100			19	170			720		54			4400	140
Limons+craie	3 m	≤ 50					120			15	170			590		44			5100	140
"	3,25 m	≤ 50					110			13	190			440		40			3700	140
"	3,5 m	≤ 50					100			28	180			1900		120			2800	170
Craie	4 m	≤ 50					130			19	210			1800		170			3500	210
"	5 m	≤ 50					≤ 10			≤ 10	25			830		≤ 5			440	≤ 5
"	7 m	≤ 50					35			≤ 10	56			500		7			1300	41
Eau de la nappe		≤0.01	≤0.1	400	≤0.001	0.14	≤0.1	≤ 1	≤0.01	≤0.1	≤0.1	≤0.01	≤0.1	≤0.01	≤0.1	≤0.1	≤0.1	100		

terrain : teneurs exprimées en g/t

eau de la nappe : teneurs exprimées en mg/l

TABLEAU B.3 : ANALYSE MINÉRALOGIQUE DU TERRAIN

(diffractométrie de rayon X)

ECHANTILLONS	ECHANTILLONS TOUT-VENANT (ABREVIATIONS : TA : très abondant - A : abondant - P : présent - F : faible - Tr : traces)																			OBSERVATIONS			
	QUARTZ	FELDSPATH		CALCITE	DOLOMITE	GYPSE	ANHYDRITE	GÉTHITE	HEMATITE	GIBBSITE	MICA <i>illite</i>	CHLORITE	TALC	KAOLINITE	Autres Minéraux								
		PLAGIO	K												SMECTITE								
L1. 0,25 m	TA	P	F											Tr	F								raie très faible non identifiée à 3,13 Å - id -
L2. 0,50 m	A	F	F											Tr	P								
L3. 0,75 m	A	F	F											Tr	A								
L4. 1,00 m	A	P	P											Tr	F								
L5. 1,50 m	A	F	F											Tr	F								
L6. 2,00 m	A	P	F											Tr	A								
L7. 2,50 m	A	F		F											P								
L8. 3,00 m	A			Tr										Tr ?	A								
L9. 3,25 m	A			Tr											A								
L10. 3,50m	P			P											TA								
L11. 4,00m	F			F											TA								
C1 5,50m	Tr			TA											F								
C2 7,00m	Tr			TA																			
FRACTION ARGILEUSE (Estimation quantitative du rapport entre eux des minéraux argileux sur une base décimale)																							
	KAOLINITE	SERPENTINE	CHLORITE	VERMICULITE	SMECTITE (Montmorillonite)	ILLITE	SEPIOLITE	ATTAPAGITE	Interstratifiées	TALC												OBSERVATIONS	
L1- 0,25 m	1				4	5																Très bonne cristallinité	
L2- 0,50 m	1				4	5																	
L3- 0,75 m	1				4	5																	
L4- 1,00 m	1				4	5																	
L5- 1,50 m	1				4	5																	
L6- 2,00 m	1				4	5																	
L7- 2,50 m					7	3																	
L8- 3,00 m	1				6	3																	
L9- 3,25 m					8	2																	
L10- 3,50 m					8	2																	
L11- 4,00 m					8	2																	
C1- 5,50 m					8	2																	
C2- 7,00 m					8	2																	

		août 1977	février 1978					
température	(°C)		10°5					
pH	(unité pH)	6.5	6.75					
résistivité	(ohms x cm à 20°C)	1554	1190					
oxygène dissous	(mg/l)		8.8					
Eh	(m V)		800					
Résidu sec	(mg/l)	845						
calcium	"	204	193					
magnésium	"	6.8	6.2					
sodium	"	17.2	16.8					
potassium	"	0.6	0.9					
bicarbonates	"	314	330.6					
chlorures	"	88	54					
sulfates	"	172	180					
nitrates	" NO ₃ ⁻	42	43					
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	0.3	0.3					
silice	" SiO ₂		10					
fluorures	"		< 0.1					
zinc	"		0.020					
fer	"		0.012					
strontium	"		0.37					

Tableau B.5.1 : Chimisme des eaux de la nappe (forage)

		août 1977	décem. 1977	16 janv. 1979				
température	(°C)		10°5					
pH	(unité pH)	7.0	7.05	6.9				
résistivité	(ohms x cm à 20°C)	1680	1150	1110				
oxygène dissous	(mg/l)		9.5	7.4				
Eh	(m V)		180	150				
Résidu sec	(mg/l)	801	847.5	850				
calcium	"	189	189.8	177.6				
magnésium	"	8.5	8.3	8.6				
sodium	"	16.8	16.8	19.8				
potassium	"	0.6	1.0	0.6				
bicarbonates	"	265	344.6	345.26				
chlorures	"	54	44	100				
sulfates	"	176	164	168				
nitrates	" NO ₃ ⁻	78	66	30				
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	0.3	0.2	0.4				
silice	" SiO ₂	12	12	12				
fluorures	"	0.14	0.14	0.12				
zinc	"	0.100	0.135					
fer	"		0.08					
strontium	"	0.4	0.40	0.30				

Tableau B.5.2 : Chimisme des eaux de la nappe (piézomètre 2)

		août 1977	décem. 1977	16 janv. 1979				
température	(°C)		10°6					
pH	(unité pH)	7.05	7.1	7.05				
résistivité	(ohms x cm à 20°C)	1130	1130	1130				
oxygène dissous	(mg/l)		10.2	6.3				
Eh	(m V)		150	155				
Résidu sec	(mg/l)	770.5	808	763.2				
calcium	"	176	180	167.4				
magnésium	"	8	8.2	10.4				
sodium	"	19.6	19.7	13.2				
potassium	"	0.6	0.9	1.1				
bicarbonates	"	311	343.1	323.3				
chlorures	"	70	48	54				
sulfates	"	156	168	132				
nitrates	" NO ₃ ⁻	29	28	48				
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	0.3	0.2	0.4				
silice	" SiO ₂		11	13				
fluorures	"		< 0.1	0.11				
zinc	"		0.110					
fer	"		0.085					
strontium	"		0.36	0.33				

Tableau B.5.3 : Chimisme des eaux de la nappe (piézomètre 3)

		février 1978	16 janv. 1979					
température	(°C)	10,6						
pH	(unité pH)	6.80	6.90					
résistivité	(ohms x cm à 20°C)	1190	1120					
oxygène dissous	(mg/l)	8,6	6,8					
Eh	(m V)	160	150					
Résidu sec	(mg/l)	812	880					
calcium	"	188	178.4					
magnésium	"	7.8	7.9					
sodium	"	18.0	15.6					
potassium	"	1	11					
bicarbonates	"	318,5	367,5					
chlorures	"	54	100					
sulfates	"	168	152					
nitrates	" NO ₃ ⁻	45	34					
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	0,2	0,4					
silice	" SiO ₂	12	12					
fluorures	"	< 0,1	0,11					
zinc	"							
fer	"							
strontium	"	0,38	0,33					

Tableau B.5.4 : Chimisme des eaux de la nappe (piézomètre 4)

		février 1978	mai 1978	octobre 1978	8 janv. 1979	16 janv. 1979		
température	(°C)	7°8	12°	-	-	3°5		
pH	(unité pH)	7.15	7.2	7.9	7.1	6.7		
résistivité	(ohms x cm à 20°C)	1975	1830	2062	1986	1930		
oxygène dissous	(mg/l)	10.7	6.2	-	-	9.2		
Eh	(m V)	230	240	-	-	235		
Résidu sec	(mg/l)	494	448	423	420	332		
calcium	"	105.2	110	95.6	102.2	81		
magnésium	"	3.2	3.0	2.8	2.9	2.2		
sodium	"	10.5	8.9	9.7	8.3	7.2		
potassium	"	0.6	0.3	0.3	0.2	≤ 0.1		
bicarbonates	"	106.7	57.2	140	92	61		
chlorures	"	100	19.5	14.5	18	26		
sulfates	"	156	192	124	176	152		
nitrates	" NO ₃ ⁻	-	43	10.5	1.9	2.4		
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	-	0.4	-	0.2	-		
silice	" SiO ₂	12	14	26	17	-		
fluorures	"	-	0.64	-	0.44	-		
zinc	"	-	0.036	-	-	-		
fer	"	-	0.03	-	-	-		
strontium	"	-	0.28	0.26	-	-		

Tableau B6. 1 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 1 - profondeur 25 cm

		décemb. 1977	février 1978	octobre 1978	8 janv. 1979	16 janv. 1979		
température	(°C)	7°9	7°			1°5		
pH	(unité pH)	7.05	7.24		7.9	6.45		
résistivité	(ohms x cm à 20°C)	1595	1487	1365	1581	1430		
oxygène dissous	(mg/l)	7.1	8.5	7.8		9.3		
Eh	(m V)	140	220			260		
Résidu sec	(mg/l)	552	656			490		
calcium	"	123	144.4	147	129.2	126.4		
magnésium	"	4	4.6	4.8	4.0	4		
sodium	"	12.4	11.9	12.9	11.7	10.9		
potassium	"	2.7	0.3	0.9	1.3	0.5		
bicarbonates	"	239.5	180	manque d'eau pour analyse	140	68,3		
chlorures	"	25	96		25	58		
sulfates	"	129	176			212		
nitrates	" NO ₃ ⁻	10.5	38			9.4		
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	0.2	0.3			-		
silice	" SiO ₂	6	5					
fluorures	"	0.12	-					
zinc	"	0.3	-					
fer	"		-					
strontium	"	0.27	-					

Tableau B6.2 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 2 - profondeur 50 cm

		décemb. 1977	février 1978	mai 1978	octobre 1978			
température	(°C)	8°8	7°2	13°				
pH	(unité pH)	7.05	7.10	7.5	7.5			
résistivité	(ohms x cm à 20°C)		1450	1540	1316			
oxygène dissous	(mg/l)	10.7	7.6	5.6				
Eh	(m V)		180	230				
Résidu sec	(mg/l)		648	547	605			
calcium	"		150	141	151.2			
magnésium	"		5.1	4.7	5.0			
sodium	"		14.2	14.0	15.1			
potassium	"		0.3	0.4	0.3			
bicarbonates	"	171.6	290	196.9	159			
chlorures	"		19.5	13.5	88			
sulfates	"		144	148	148			
nitrates	" NO ₃ ⁻		20	23	30.5			
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺		0.3	0.2				
silice	" SiO ₂		5	5	8			
fluorures	"		< 0.1	< 0.1				
zinc	"							
fer	"							
strontium	"		0.30	0.29				

Tableau B6.3 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n°3 - profondeur 75 cm

		décemb. 1977	février 1978	mai 1978	octob. 1978	8 janv. 1979	16 janv. 1979	
température	(°C)	8°	8°	10°				
pH	(unité pH)	7.05	6.95	7.15	8.2	7.7	7.7	
résistivité	(ohms x cm à 20°C)	1460	1582	1625	1627	1218	1625	
oxygène dissous	(mg/l)	10.2	7.7	5.9			9	
Eh	(m V)	100	200	230			210	
Résidu sec	(mg/l)	617	574	498	634			
calcium	"	151.2	146.2	135.4	155.4	172.6	139.8	
magnésium	"	3.9	3.9	3.4	3.8	4.7	3.5	
sodium	"	5.0	4.3	4	4.8	11.2	4.7	
potassium	"	0.7	0.2	0.4	0.3	8.4	1.2	
bicarbonates	"	250.1	215	139.7	198	244	220.5	
chlorures	"	38	36	26	8.6		181	
sulfates	"	152	148	168	176			
nitrites	" NO ₃ ⁻	4.5	13	14	72			
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	0.6	0.2	0.4				
silice	" SiO ₂	11	7	7	15			
fluorures	"	< 0.1	< 0.1	< 0.1				
zinc	"	0.33						
fer	"							
strontium	"	0.32	0.29	0.24				

Tableau B6. ⁴ : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 4 - profondeur 100 cm

		décemb. 1977	août 1977	février 1978	mai 1978	octobre 1978	8 janv. 1979	16 janv. 1979
température	(°C)	9°		7°	10°			3°
pH	(unité pH)	7.10		6.95	7.7	8.1	8.1	6.95
résistivité	(ohms x cm à 20°C)			1400	1470	1480	1587	1540
oxygène dissous	(mg/l)	8.5		8.0	5.6			9.2
Eh	(m V)			230	230			225
Résidu sec	(mg/l)	645		569	550	614		588
calcium	"	166	192	168	152.2	151.6	144	144.4
magnésium	"	3.1	3	3	2.7	3.0	2.9	2.5
sodium	"	5.2	10	4.5	4.6	4.8	4.6	4.3
potassium	"	0.4	1.6	0.2	0.3	0.2	0.7	0.5
bicarbonates	"	338.5		317.2	213.4	250	268	222
chlorures	"	-		48	35	27	29	100
sulfates	"	120		108	116	116		112
nitrates	" NO ₃ ⁻	-		19	19	48		2,2
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	-		0.2	0.6			
silice	" SiO ₂	11		7	7	13		
fluorures	"	-		< 0.1	< 0.1			
zinc	"	0.17		0.075	0.030			
fer	"			0.03	0.004			
strontium	"	0.3		0.29	0.24			

Tableau B6.5 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n°5 - profondeur 150 cm

	décemb. 1977	février 1978	mai 1978	octobre 1978	8 janv. 1979	16 janv. 1979	
température (°C)	9°3	9°	10°			3°7	
pH (unité pH)	7.65	7.70	7.2	7.8	8	7.90	
résistivité (ohms x cm à 20°C)		-	1345	1350	1440	1515	
oxygène dissous (mg/l)	10.3	8.8	5.1			9	
Eh (m V)	140	220	240			200	
Résidu sec (mg/l)			300	679	655	642.1	
calcium "			166.2	169.8	163	160	
magnésium "			2.3	2.3	2.3	2.2	
sodium "			6.5	6.5	6.5	6.5	
potassium "			0.3	0.3	0.6	1.1	
bicarbonates "	244.2		214.5	320	305	300.5	
chlorures "			28	27	31	37	
sulfates "			152	136	128	132	
nitrates " NO ₃ ⁻			22	9	9	2.8	
azote ammoniacal " NH ₄ ⁺			0.4				
silice " SiO ₂			7	8	9		
fluorures "			< 0.1		< 0.1		
zinc "			0.048				
fer "			0.004				
strontium "			0.26		0.29		

Tableau B6.6 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 6 - profondeur 2000 cm

		février 1978	mai 1978	octobre 1978	8 janv. 1979	16 janv. 1979		
température	(°C)	9°1	9°			4°		
pH	(unité pH)	7	7.6	7.9	8.2	8.15		
résistivité	(ohms x cm à 20°C)	1290	1130	1280	1342	1460		
oxygène dissous	(mg/l)	8.6	9.4			9.5		
Eh	(m V)	240	250					
Résidu sec	(mg/l)	810	656	744	700			
calcium	"	188	182.8	184.4	173.2			
magnésium	"	3.4	3.2	3.4	3.3			
sodium	"	10	8.7	8.6	8.8			
potassium	"	0.4	0.3	0.3	0.9			
bicarbonates	"	320.25	217.8	299	305	250.1		
chlorures	"	120	52	38	35			
sulfates	"	144	160	148	152			
nitrates	" NO ₃ ⁻	15	23	51	11			
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	0.2	0.3					
silice	" SiO ₂	10	8	11	11			
fluorures	"	< 0.1	0.12		< 0.1			
zinc	"		0.072					
fer	"		0.003					
strontium	"	0.36	0.31		0.36			

Tableau B6.7 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 7 - profondeur 250 cm

	décemb. 1977	août 1977	février 1978	mai 1978	octobre 1978	16 janv. 1979	
température (°C)	10°		10°5	11°		4°5	
pH (unité pH)	7.75		7.10	7.65	8.0	7.9	
résistivité (ohms x cm à 20°C)			1580	1410	1400	1555	
oxygène dissous (mg/l)	9.7		9.3	7.6		10.3	
Eh (m V)			230	270			
Résidu sec (mg/l)			657	565	682	562	
calcium "		173	156.6	155.6	163.2	121.8	
magnésium "		4.8	3.3	3.2	3.4	2.8	
sodium "		15.8	8.4	7.0	7.3	5.7	
potassium "		1.8	0.3	0.5	0.4	0.4	
bicarbonates "	216.7		347.7	243.1	293	315.7	
chlorures "			20	20	26	42	
sulfates "			100	108	92	72	
nitrates " NO ₃ ⁻			11.5	21	82	1.9	
azote ammoniacal " NH ₄ ⁺			0.2	0.4			
silice " SiO ₂			9	7	15		
fluorures "				0.11			
zinc "							
fer "							
strontium "			0.32	0.27			

Tableau B6.8 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 8 - profondeur 300 cm

		décemb. 1977	février 1978	mai 1978	octobre 1978	8 janv. 1979	16 janv. 1979	
température	(°C)	10°3	8°5	13°			5°	
pH	(unité pH)	7.0	6.75	7.2	7.7	8.2	8.2	
résistivité	(ohms x cm à 20°C)	1380	1395	1410	1390	1540	1730	
oxygène dissous	(mg/l)	6.8	8.6	6.3			10.2	
Eh	(m V)	200	250	280				
Résidu sec	(mg/l)	709	724	602	658	602		
calcium	"	168.8	170.8	166	156.4	145.2		
magnésium	"	3.6	3.7	3.4	3.5	3.3		
sodium	"	10.4	9.6	10	10.1	9.8		
potassium	"	0.4	0.2	0.4	0.4	0.7		
bicarbonates	"	338.5	335.5	239.8	293	305	258	
chlorures	"	33	34	20	31	23		
sulfates	"	132	148	136	104	92		
nitrates	" NO ₃ ⁻	12	13.5	18.5	45	23		
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	0.2	0.2	0.3				
silice	" SiO ₂	10	9	8	15			
fluorures	"	0.11	< 0.1	0.11				
zinc	"	0.06	0.055	0.058				
fer	"	0.07	0.004	0.002				
strontium	"	0.37	0.35	0.31				

Tableau B6. 9 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 9 - profondeur 325 cm

		février 1978	mai 1978	octobre 1978				
température	(°C)	9°5	13°					
pH	(unité pH)	7.0	7.6	7.9				
résistivité	(ohms x cm à 20°C)	1030	910	980				
oxygène dissous	(mg/l)	9.2	6.4					
Eh	(m V)	230	210					
Résidu sec	(mg/l)	884	883.5	910				
calcium	"	220	239	225				
magnésium	"	5.2	5.4	5.6				
sodium	"	16.7	14.5	14.5				
potassium	"	1.5	0.7	0.8				
bicarbonates	"	338.5	218.9	137				
chlorures	"	100	89	103				
sulfates	"	152	148	132				
nitrates	" NO ₃ ⁻	42	160	277				
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	-	0.6					
silice	" SiO ₂	8	8	15				
fluorures	"		< 0.1					
zinc	"							
fer	"							
strontium	"		0.42					

Tableau B6.10 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 10 - profondeur 350 cm

		décemb. 1977	février 1978	mai 1978	8 janv. 1979	16 janv. 1979		
température	(°C)	10°3	10°5	12°		5°5		
pH	(unité pH)	7.5	6.85	7.4	8.2	7.9		
résistivité	(ohms x cm à 20°C)		1665	1555	1862	1870		
oxygène dissous	(mg/l)	7.6	7.3	5.8		9.7		
Eh	(m V)	220	230	205				
Résidu sec	(mg/l)	546	591	531				
calcium	"	140.8	133.2	138.8	110	107.2		
magnésium	"	3.0	3.0	3.2	2.7	2.9		
sodium	"	12.4	11.8	12.1	11.5	11.8		
potassium	"	0.9	0.7	0.4	0.7	1		
bicarbonates	"	282.1	259.25	204.6	183	204.3		
chlorures	"	-	48	32	30	138		
sulfates	"	96	96	104	-	-		
nitrates	" NO ₃ ⁻	-	31	29	-	-		
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	-	0.2	0.3				
silice	" SiO ₂	11	8	7				
fluorures	"	-	0.12	0.14				
zinc	"	0.07						
fer	"							
strontium	"	0.30	-	0.24				

Tableau B6. ¹¹ : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 11 - profondeur 400 cm

		décemb. 1977	février 1978	mai 1978	octobre 1978	8 janv. 1979	16janv. 1979	
température	(°C)	10°3	9°1	10°5			5°5	
pH	(unité pH)	7.2	7.0	7.4	7.5	8	7.8	
résistivité	(ohms x cm à 20°C)		1570	1435	1330	1495	1585	
oxygène dissous	(mg/l)	6.8	9.1	6.7			10.7	
Eh	(m V)	200	220	150				
Résidu sec	(mg/l)	594.5	600	529	641	580	520	
calcium	"	138.2	133	138.4	152.2	132.8	119.2	
magnésium	"	3.0	3.1	3.1	3.3	3.1	2.8	
sodium	"	15.0	14.8	14.9	15.4	14.6	14.3	
potassium	"	0.7	0.7	0.4	0.6	0.6	1.1	
bicarbonates	"	256.2	234.8	170.5	268	214	195.2	
chlorures	"	68	80	62	68	64	88	
sulfates	"	76.0	80	80	72	74	56	
nitrates	" NO ₃ ⁻	27	45	60	48	66	44	
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	0.3	0.2	0.2				
silice	" SiO ₂	10	9	9	13	10		
fluorures	"	0.12	0.12	0.16		0.11		
zinc	"	0.095	0.085	0.057				
fer	"	0.10	0.003	0.003				
strontium	"	0.32	0.33	0.27		0.34		

Tableau B6. 12 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 12 - profondeur 500 cm

		décemb. 1977	février 1978	mai 1978	octobre 1978	8 janv. 1979	16 janv. 1979	
température	(°C)	12°	9°	12°			5°5	
pH	(unité pH)	7.35	7.20	7.2	7.6	8.2	7.25	
résistivité	(ohms x cm à 20°C)		1285	1270	1230	1309		
oxygène dissous	(mg/l)	10.4	10	10			10.9	
Eh	(m V)	190	160	260				
Résidu sec	(mg/l)	727.4	709	650	73.1			
calcium	"	173	170.8	166.8	174.2	162.4		
magnésium	"	4.2	4.5	4.1	4.2	4.0		
sodium	"	16.3	16.3	16.1	16.8	17.6		
potassium	"	1.3	1.2	0.8	1.00	1.2		
bicarbonates	"	268.4	234.85	177.1	268			
chlorures	"	42	46	43	52			
sulfates	"	176	192	192	152			
nitrates	" NO ₃ ⁻	32	43	50	50			
azote ammoniacal	" NH ₄ ⁺	-		0.2				
silice	" SiO ₂	14	13	10	13			
fluorures	"	0.18	< 0.10	0.15				
zinc	"	0.30						
fer	"							
strontium	"	0.40		0.29				

Tableau B6.13 : analyses chimiques d'eau de la zone non-saturée

Cellule n° 13- profondeur 700 cm

TABLEAU B.7 : RESULTATS DES ANALYSES DE TRITIUM

Eau extraite des carottes de terrain prélevées lors de la mise en place du piézomètre P1 (26.4.77)		Eau extraite des cellules de prélèvement			
Profondeur (en m)	³ H (U.T)	n° de cellule	26.9.77	27.10.77	13.12.77
0,30 - 0,40	124 ± 20	1			
0,70 - 0,80	77 ± 14	2			105 ± 18
1,10 - 1,20	124 ± 20	3			
1,50 - 1,60	128 ± 20	4		112 ± 18	124 ± 20
1,90 - 2,00	92 ± 16	5	84 ± 14	85 ± 14	81 ± 14
2,30 - 2,40	143 ± 22	6	91 ± 8	100 ± 8	115 ± 18
2,70 - 2,80	70 ± 12	7	96 ± 8	110 ± 9	
3,10 - 3,20	107 ± 18	8	±	±	115 ± 18
3,50 - 3,60	119 ± 18	9	81 ± 7	65 ± 12	82 ± 7
3,90 - 4,00	73 ± 12	10	±	±	
4,30 - 4,40	94 ± 16	11	60 ± 12	78 ± 14	70 ± 12
4,70 - 4,80	111 ± 18	12	68 ± 6	67 ± 6	87 ± 14
5,10 - 5,20	106 ± 18	13			70 ± 6
5,50 - 5,60	108 ± 18	Eau de la nappe dans le puits (28.4.77) Piézomètre P ₁ (15.4.77) Piézomètre P ₂ (13.12.77) Piézomètre P ₃ (13.12.77)			
5,90 - 6,00	111 ± 18				
6,30 - 6,40	119 ± 18				
6,70 - 6,80	121 ± 20				
7,10 - 7,20	149 ± 22				
7,50 - 7,60	84 ± 14				
7,90 - 8,00	61 ± 12				