

JR



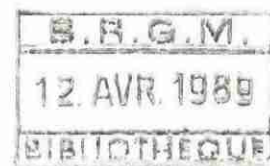
CONSEIL GÉNÉRAL  
DU  
FINISTÈRE

ETUDE DU DEVENIR DES NITRATES  
EN PROFONDEUR SUR LE SITE  
DE LA COOPERATIVE DE PLOUDANIEL (29)

DENITRIFICATION NATURELLE EN SOUS-SOL

88 SGN 584 BRE

Décembre 1988



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES  
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL  
Service Géologique Régional Bretagne  
14, avenue Sergent-Maginot - 35000 RENNES - Tél.: 99.30.94.51



CONSEIL GÉNÉRAL  
DU  
FINISTÈRE

ETUDE DU DEVENIR DES NITRATES  
EN PROFONDEUR SUR LE SITE  
DE LA COOPERATIVE DE PLOUDANIEL (29)

---

DENITRIFICATION NATURELLE EN SOUS-SOL

88 SGN 584 BRE

Décembre 1988

par H. TALBO (BRGM)  
et G. MARTIN (ENSCR)  
avec le concours de  
B. MONOT (Services  
du C.G.)

## R E S U M E

L'étude de la migration des nitrates en profondeur réalisée sur le site de Ploudaniel avait comme objectifs d'identifier le(s) phénomène(s) responsable(s) de l'absence de nitrates dans les eaux profondes, en définir le processus et les limites d'efficacité.

Les recherches ont été réalisées sous la Maîtrise d'Ouvrage du Département du Finistère et orientées par un Conseil Scientifique comprenant des membres du Conseil Général, de la Coopérative Laitière de Ploudaniel, de la Direction Départementale de l'Agriculture, de la Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales, de la Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales de Bretagne, de l'Agence de Bassin Loire-Bretagne, de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Rennes, de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes et de l'Ecole Nationale de la Santé Publique.

Son financement a été assuré par le Département du Finistère, la Région Bretagne, la Coopérative Laitière de Ploudaniel, l'Agence de Bassin Loire-Bretagne, les Ministères de l'Agriculture, de l'Environnement et de la Santé. Des fonds B.R.G.M. ont également été utilisés pour préciser les moyens et méthodes utilisables à la détection a priori des "secteurs dénitrifiants".

La cause de l'absence de nitrates dans ces eaux profondes a été identifiée : des réactions biochimiques, liées à la présence de sulfures (pyrite, marcassite) dans le sous-sol et à l'activité de Thiobacillus denitrificans réduisent  $\text{NO}_3$ , libèrent l'azote sous forme gazeuse, tout en libérant du fer.

La pyrite, consommée par la réaction, contenue dans le sous-sol étant en quantité non connue mais limitée, la "dénitrification naturelle en sous-sol" a une durée de vie finie (vraisemblablement plusieurs décennies, probablement moins dans certains cas).

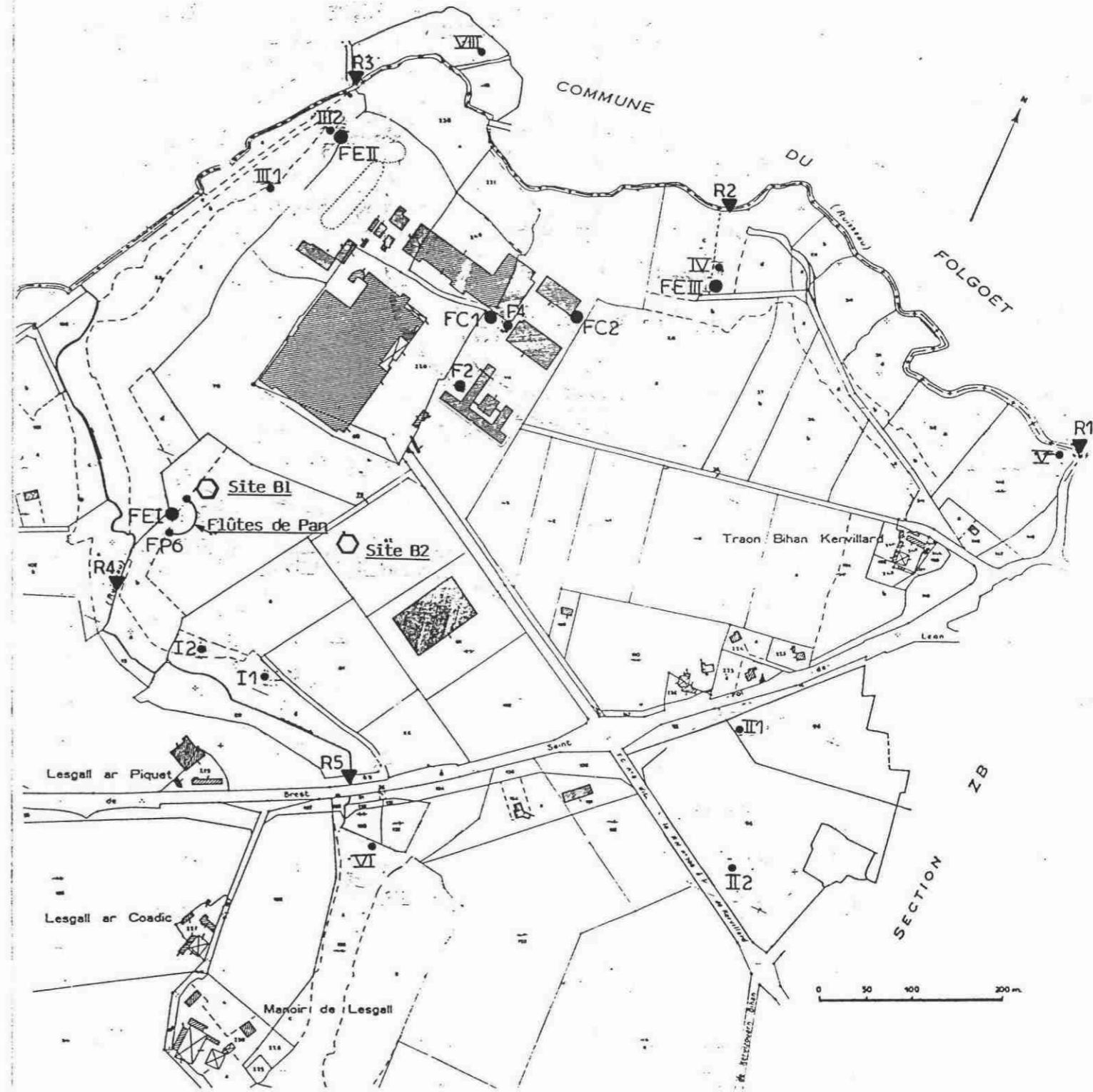
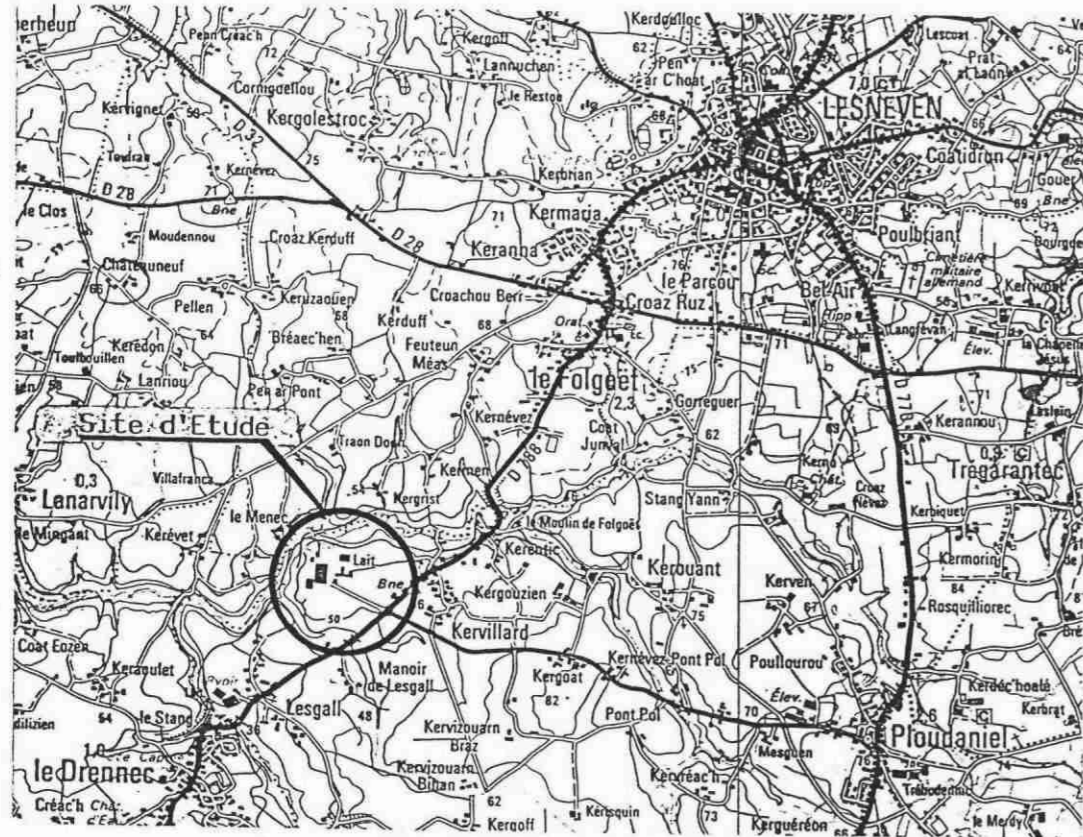
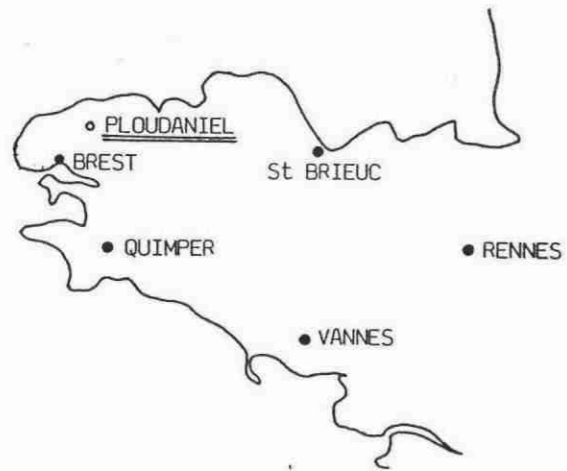
Les travaux de laboratoire ont mis en évidence les phénomènes de dénitrification, définis leurs mécanismes ainsi que les paramètres (vitesses de filtration et temps de contact, masses volumiques) nécessaires à un abattement quasi total des concentrations en nitrates.

Les mesures de terrain ont vérifié la cohérence entre les résultats de laboratoire et ce qui pouvait être observé dans la nature et montré que les conditions naturelles, notamment les vitesses des écoulements souterrains, permettaient à la dénitrification naturelle de jouer son rôle.

Des tests ont été réalisés dans plusieurs secteurs pour reconnaître dans quelle mesure, avant de réaliser des forages, un pronostic pouvait être établi quant à l'existence de sulfures et de dénitrification naturelle dans le sous-sol.

COOPERATIVE LAITIERE DE PLOUDANIEL (29)

LOCALISATION DES OUVRAGES D'EXPLOITATION  
DES PIEZOMETRES ET DU DISPOSITIF DE MESURES



- FC Forage d'exploitation
- FE Forage d'exploitation
- I1 Piézomètre
- F2 Piézomètre
- ▼ Repère sur cours d'eau
- Dispositif bougies poreuses

Coopérative Laitière de Ploudaniel

Groupe E V E N

Intérêt de la dénitrification naturelle  
en sous-sol :

Exigences de qualité

Incidences économiques

**LE GROUPE EVEN**

Ce Groupe rassemble plus de 30 Sociétés de taille différente.

Ces activités sont très diversifiées et très pluridisciplinaires : lait, viande, diététique hospitalière, diététique, charcuterie etc ... et prochainement saumon.

EVEN emploi 1 400 salariés et représente un chiffre d'affaires de 2,8 milliards de francs.

**POSITION ET ACTION DU GROUPE E V E N  
DEVANT LE PROBLEME DES NITRATES DANS L'EAU**

EVEN axe sa philosophie produit sur les thèmes suivants :

- maîtrise de la qualité et de la standardisation des produits en s'approchant du zéro défaut
- respect de l'attente consommateur en matière de produit et de santé
- respect de l'environnement, EVEN considérant que le binôme exploitation - environnement est indissociable
- exportation

Le problème des nitrates dans les eaux était donc un phénomène majeur dans une région ou celle-ci dépasse régulièrement 50 mg/l.

En effet, reprenons les points ci-dessus :

**EXPORTATION :**

La teneur variable selon les pays et les produits est de quelques mg/kg.

La tendance générale est de réduire les teneurs régulièrement admises.

### ENVIRONNEMENT :

EVEN a mis en place un bassin d'anoxie sur sa station d'épuration faisant chuter la teneur en nitrate des eaux en sortie d'épuration de 40 à 1 mg/l.

### RESPECT DU CONSOMMATEUR ET MAITRISE DE LA QUALITE :

Mettre à sa disposition des produits exempts de nitrate.

Or, nos technologies font appel fréquemment à des opérations de lavage ou de nettoyage. C'est ainsi qu'à titre d'exemple, sur la seule usine de Ploudaniel, nous consommons entre 1 200 et 1 500 m<sup>3</sup>/j.

En 1985, notre approvisionnement en eau potable reposait sur 3 origines :

- . prélèvement dans une nappe phréatique (Feunteun Veas), teneur en nitrate : 60 mg/l
- . prélèvement dans l'ABER VRAC'H ; la teneur à cette époque variait de 20 à 50 mg/l
- . des forages profonds (4) 30 - 40 m situés dans l'enceinte de l'usine et dont le profil des eaux étaient sensiblement le suivant : teneur en fer importante, taux de nitrate de l'ordre de 5 mg/l.

Partant de cette constatation, nous nous sommes intéressés aux forages profonds en collaboration avec le BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière). Le Groupe EVEN décidait donc, avec la collaboration de BRGM, de forer en 5 points à une profondeur moyenne de 80-90 m. EVEN prenait donc un risque financier de 1,5 M en 1985 sur ses fonds propres.

Parallèlement, EVEN engageait deux actions.

D'une part, en collaboration avec les partenaires cités dans cette étude, nous cherchions à connaître la réponse à la question suivante : dans ces eaux de forage profond, nous trouvons des taux de nitrates voisins de 1 mg/l. Est-ce parce qu'il y a dénitrification dans le sol ou parce que le front des nitrates n'a pas atteint le niveau de pompage ? De cette étude, donc de cette réponse dépendait la pérennité de notre action.

D'autre part, ces eaux devaient être potabilisées ; elles présentaient des teneurs en fer autour de 4 mg/l et des teneurs en manganèse de l'ordre de 0,3 mg/l. Les traitements de defferisation et de démanganisation se font par voies biotechnologiques. Les teneurs résiduelles dans l'eau traitée sont respectivement pour le fer et le manganèse de 0,05 et 0 mg/l.



En bon gestionnaire, nous devons nous interroger pour savoir si nous avons fait le bon choix économique par rapport à un procédé de dénitrification. Schématiquement, il y a deux possibilités :

- eaux sans fer, avec des nitrates
- eaux avec du fer, sans nitrate

Selon différentes sources, le coût de la dénitrification se situe entre 0,5 et 1 F/m<sup>3</sup>, valeur plus voisine de ce dernier chiffre.

En ce qui concerne le coût de la defferisation par voie biologique pour une eau ayant une teneur en fer de 4 mg/l et un résiduel après traitement de 0,05 mg/l et pour 400 000 m<sup>3</sup>/an, le prix de revient de la defferisation est de 0,2506 F/m<sup>3</sup>, valeur 1988 se décomposant de la façon suivante :

. amortissement	: 0,2046 F/m <sup>3</sup>
. réactif	: 0
. personnel	: 0,0416 F/m <sup>3</sup>
. lavage	: 0,0044 F/m <sup>3</sup>

Cette filière de traitement est donc 2 à 4 fois moins cher que la dénitrification ... sans compter le problème de l'élimination des nitrates que l'on a extrait de l'eau.

Novembre 1988  
 JP ECALARD  
 Directeur Scientifique EVEN

## S O M M A I R E

	Page
RESUME	
INTRODUCTION .....	1
1 - RESULTATS OBTENUS AU LABORATOIRE	
11 - Résultats principaux obtenus par le Laboratoire de Chimie des nuisances et génie de l'environnement .....	10
11.1 - essais en discontinu .....	10
11.2 - Etude sur colonnes alimentées en continu	11
11.3 - Simulation d'une alimentation constante et d'un soutirage variable .....	20
Etude isotopique .....	23
2 - MESURES ET OBSERVATIONS DE TERRAIN	
21 - Les dispositifs .....	29
22 - Résultats .....	31
22.1 - Porosité .....	31
22.2 - Stock d'azote .....	31
22.3 - Présence de sulfures dans le sous-sol ..	32
22.4 - Activité biologique dans le sous-sol ...	34
22.5 - Vitesses des transferts souterrains ....	36
22.51 - Milieu non saturé .....	36
22.52 - Milieu saturé .....	39
22.6 - Composition de l'eau dans les éléments de la flûte de Pan .....	48
3 - CONSEQUENCES DE LA DENITRIFICATION NATURELLE	
31 - Consommation et production de matière .....	52
32 - Hypothèse de durée de vie du réacteur naturel..	52
33 - Conséquences pour les forages d'exploitation...	53
34 - Conséquences pour les aquifères .....	53
35 - Conséquences sur la lutte pour la restauration de la qualité des eaux.....	53

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

## SYNTHESE DES RESULTATS

### QUESTIONS RESTANT POSEES

Les recherches effectuées sur le site de Ploudaniel ont, à l'origine, été motivées par la constatation que certains forages "profonds" - pas seulement à Ploudaniel - délivraient une eau peu, ou pas, nitratée alors que les ouvrages voisins peu profonds étaient pollués.

Les questions posées, auxquelles il convenait de chercher une réponse pouvaient être résumées en 4 points :

. dans quelles conditions l'eau souterraine présente-t-elle des teneurs en nitrates significativement différentes de celles des eaux de surface ou peu profondes ?

. cette meilleure qualité est-elle due à des phénomènes de dénitrification spontanée ? Si oui, quels en sont les processus et les limites ?

. s'agit-il d'une pollution retardée, les matières azotées infiltrées étant en cours de migration per descendum ? Si oui, dans quel délai les nappes seront-elles contaminées ?

. dans les secteurs où l'eau souterraine profonde serait déjà touchée, l'évolution défavorable va-t-elle se poursuivre du fait de l'arrivée de nitrates en cours de migration ? Si oui, dans quel délai les mesures qui seront prises auront-elles un effet sur la qualité des eaux ?

Les mouvements de l'eau souterraine sont très lents. Le temps nécessaire pour que la goutte d'eau tombée sur le sol et qui commence à s'infiltrer arrive à l'exutoire naturel ou artificiel de la nappe est (à Ploudaniel), d'au moins plusieurs années.

Cependant, la disparition des nitrates en profondeur n'est pas due à la durée de migration (pollution retardée), mais bien à des phénomènes de dénitrification, pressentis au moment où commençaient les travaux de Ploudaniel lorsqu'on a constaté que, systématiquement, l'abattement brutal des teneurs en nitrates coïncidait avec des horizons du sous-sol riches en pyrite et que les forages sans nitrates (dans les secteurs où les eaux superficielles sont très chargées) fournissent toujours une eau ferrugineuse ; on sait également, maintenant que l'abattement des nitrates s'accompagne systématiquement d'une augmentation des sulfates.

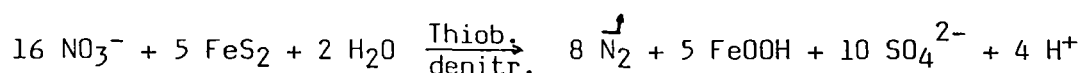
En 1985, les analyses de la composition isotopique " $\delta^{15}\text{N}$ " réalisées à l'Université de Paris IV (B. SIMON - Apports de la biogéochimie isotopique à la connaissance de la dénitrification dans les eaux souterraines - thèse 3ème cycle) ont démontré qu'il y avait bien dénitrification à Ploudaniel, ce qui a permis de focaliser les recherches engagées sur ces phénomènes.

Les travaux menés au Laboratoire de Chimie des Nuisances et Génie de l'Environnement (professeur G. Martin) de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes (N. Abdi-Haider - Etude du rôle des sulfures et pyrite de fer dans la dénitrification en sous-sol - thèse Docteur-Ingénieur) ont permis de définir les processus et de reconnaître les réactions.

Les travaux de terrain, les analyses d'eau étant assurées par le Laboratoire des Eaux de l'Ecole Nationale de la Santé Publique, ont orienté et été orientés par les actions de laboratoire ; il existe une bonne concordance des résultats théoriques et expérimentaux avec les mesures et observations faites in situ.

La dénitrification naturelle est due à la réduction des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) en azote gazeux ( $\text{N}_2$ ) par la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), réaction facilitée et amplifiée par une activité biologique (*Thiobacillus denitrificans*). Si elle consomme de la pyrite, la dénitrification naturelle produit des sulfates (à des concentrations compatibles avec les normes de potabilité) et du fer, dont une partie est extraite avec l'eau, le reste précipitant dans le terrain, probablement de préférence à proximité des forages, ce qui devrait nécessiter de les décolmater périodiquement. L'eau exploitée doit être déferrisée, les procédés de déferrisation étant connus, fiables et peu onéreux (comparés aux coûts des procédés de dénitrification provoquée).

Considérée globalement, la réaction s'écrit :



Le rendement de la réaction dépend moins de la teneur initiale de l'eau en  $\text{NO}_3$  que de la charge volumique (poids de  $\text{NO}_3$  par unité de volume de matériel dénitrifiant et par unité de temps). Dans la nature, il ne semble pas que la charge volumique puisse excéder le 1/100 (ordre de grandeur) de la charge volumique maximale admissible définie en laboratoire.

Un abattement de la concentration en nitrates proche de 100 % suppose des temps de contact de l'ordre de 50 à 100 heures, donc des vitesses d'infiltration et de circulation lentes. Dans la nature, hormis aux abords immédiats des exutoires naturels ou artificiels où elles peuvent être notables, les vitesses de déplacement de l'eau souterraine sont très faibles, de l'ordre de quelques centimètres à quelques décimètres par jour dans les horizons conducteurs ; globalement le temps de séjour de l'eau dans son réservoir souterrain est supérieur à 10 000 heures.

Les besoins en eau de la Coopérative de Ploudaniel ont été, de 1977 à 1986, assurés partiellement par de l'eau souterraine naturellement dénitrifiée, ils le sont totalement depuis 1986. La consommation est de l'ordre de 30 000  $\text{m}^3$  par mois, sans que la nappe montre le moindre signe de surexploitation.

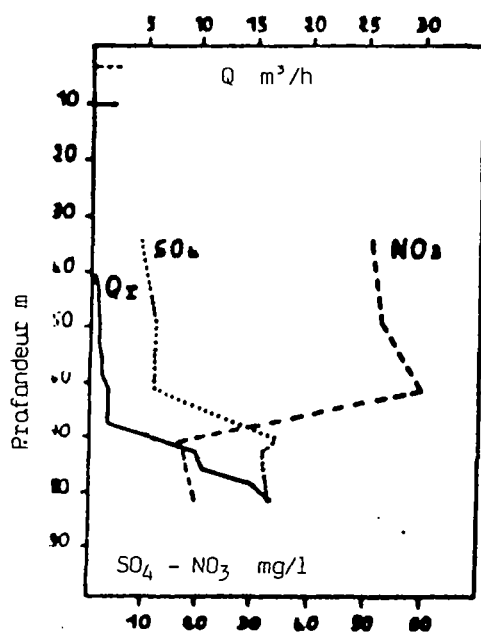
Il faut souligner que l'eau naturellement dénitrifiée puisée dans le sous-sol où sa teneur en nitrates est  $\leq 5$  mg/l est rejetée dans le réseau hydrographique à une concentration qui dépend de l'utilisation qui en a été faite (et, bien entendu, de l'efficacité de son épuration avant rejet), mais forcément très inférieure à ce qu'elle aurait été s'il s'était agit d'eau provenant des ressources traditionnelles.

La *durée de vie* du "réacteur naturel" dépend de la quantité de nitrate à faire disparaître et de la quantité de pyrite présente sur le trajet de l'eau et utilisable par la réaction ; cette durée de vie doit se chiffrer en décennies (peut-être plus d'un siècle à Ploudaniel) mais est sans doute très variable d'un secteur à l'autre.

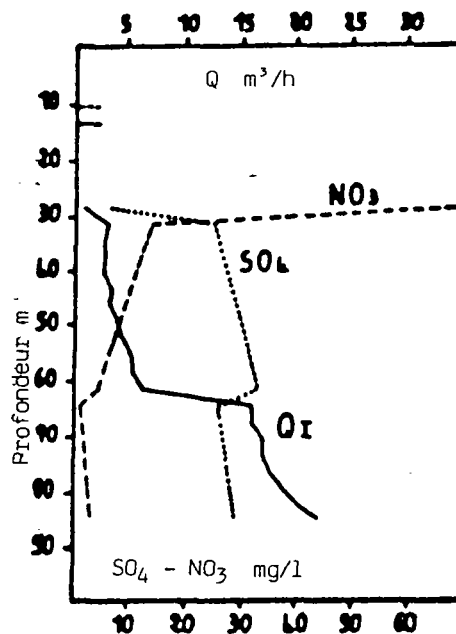
## LA DENITRIFICATION NATURELLE - MODE D'EMPLOI

### IDENTIFICATION PENDANT LA FORATION

Parallèlement à la recherche de pyrite dans les déblais, des échantillons d'eau régulièrement prélevés (en général, tous les 3 m d'approfondissement) et analysés permettent de suivre l'évolution des concentrations. L'abattement des teneurs en nitrates symétrique à l'augmentation des concentrations en sulfate et en fer (ce dernier élément n'étant pas très significatif car pouvant être fortement modifié par le mode d'extraction de l'eau) permet d'établir le diagnostic de dénitrification, qui peut être vérifiée par des dosages  $^{15}\text{N}$  :



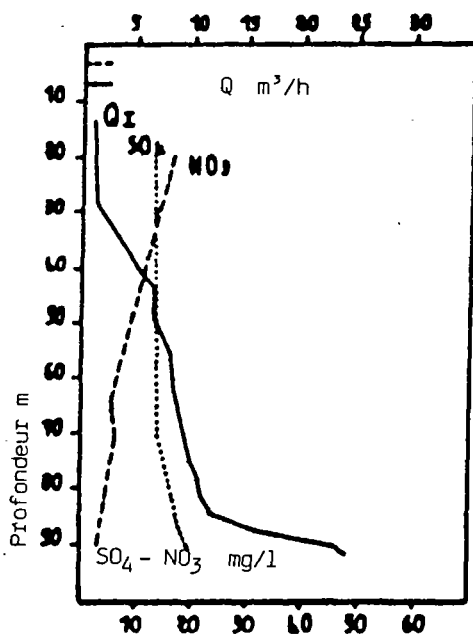
I-1 (Ploudaniel)



F.E.1 (Ploudaniel)

Les deux exemples ci-dessus montrent une évolution remarquablement rapide des concentrations ; cette brusquerie, à l'origine, a permis de pressentir le phénomène, ne constitue pas forcément un critère en soi. En laboratoire, la traversée de 0,5 à 1 m de matériel pyriteux suffit à faire disparaître les nitrates en quasi totalité ; il en est très vraisemblablement de même dans la nature, mais l'eau qui est prélevée en cours

de foration à une certaine profondeur est un mélange de toutes les venues d'eau rencontrées jusqu'à la profondeur atteinte ; les évolutions des concentrations constatées d'un prélèvement au suivant dépendent alors du poids relatif des diverses venues d'eau. Ainsi, un forage peut rencontrer d'abord 10 m<sup>3</sup>/heure d'eau à 200 mg/l NO<sub>3</sub> puis, progressivement, 10 m<sup>3</sup>/heure supplémentaires d'eau sans nitrate. L'analyse globale, en fin de travaux, indiquera de l'eau à 100 mg/l NO<sub>3</sub> ; les profils d'évolution qu'un suivi détaillé permet d'établir serviront cependant à établir le diagnostic de dénitrification, ainsi que la profondeur d'apparition du phénomène ; par un équipement convenable de l'ouvrage, on disposera alors de 10 m<sup>3</sup>/h sans nitrates.



Exemple de profil progressif

III-2 (Ploudaniel)



## PRONOSTIC AVANT FORATION

### A PARTIR DES OUVRAGES EXISTANTS

Les forages existants sont, en grande majorité réalisés pour des particuliers et arrêtés dès que le débit souhaité apparaît atteint ; des phénomènes de dénitrification naturelle peuvent exister ou non, ils peuvent avoir été atteints, ou non, par le forage et lui fournir une proportion plus ou moins importante de son débit. L'évolution du chimisme de l'eau avec la profondeur n'est jamais connue. Dans ces conditions, la seule teneur en nitrates peut ne pas être significative puisque, comme dit plus haut, une forte concentration provenant des horizons peu profonds peut masquer une dénitrification importante.

Cependant, lorsque n'ayant rencontré que peu de venues d'eau importantes près de la surface des forages sont relativement profonds, des teneurs sensiblement inférieures aux moyennes régionales peuvent permettre d'établir le pronostic de dénitrification (*cas de la région de St-Pol de Léon - Plouénan*).

Ailleurs lorsque<sup>il</sup> existent des venues d'eau suffisantes à faibles profondeurs, les ouvrages sont arrêtés précocement et les teneurs en nitrates ne sont pas significativement différentes de ce qui existe aux environs ; des concentrations "anormales" en fer et sulfate peuvent alors indiquer que des phénomènes de dénitrification existent en profondeur (*cas de la région de Ploudalmézeau-Plourin*).

### EN L'ABSENCE DE FORAGES PREEXISTANTS

Couramment utilisée en recherches minières, la géochimie multi-élémentaire peut constituer un outil efficace. Des tests réalisés sur 10 sites de forages bien connus (prélèvements de terrain dans l'horizon B, à une profondeur comprise entre 0,25 et 1,2 m, selon l'épaisseur des sols, et recherche des éléments ou cortèges d'éléments associés aux sulfures de fer) ont montré qu'avec des limitations dues aux recouvrements allochtones, ces méthodes pouvaient fournir des informations claires et être utilisées, soit pour balayer rapidement un territoire et y reconnaître les secteurs où le bed-rock contient des sulfures, soit pour, autour d'un captage, définir la surface au sol de l'aquifère dénitrifiant existant.

## LA DENITRIFICATION NATURELLE, EXCEPTION LOCALE OU PHENOMENE COURANT ?

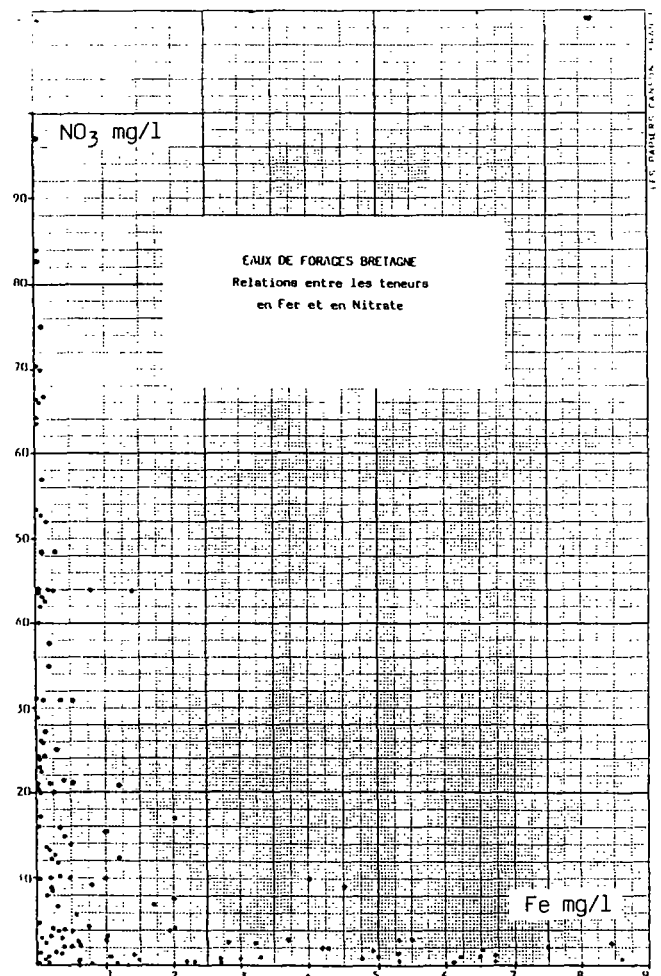


Sites où le phénomène a été identifié

Depuis que les recherches ont été engagées à Ploudaniel, d'autres secteurs où la dénitrification naturelle permet d'obtenir de l'eau de bonne qualité ont été trouvés, une douzaine de sites au total, ne représentant certainement qu'une faible partie du potentiel "dénitrifiant" du sous-sol finistérien.

A priori, la pyrite, minéral très courant dans notre Région, est peu soluble; la principale cause, sinon la seule, de la présence de fer dans l'eau souterraine semble bien être la réaction de dénitrification, c'est en tout cas ce que paraît montrer le graphique ci-contre, établi à partir de plus de 200 résultats répartis dans toute la Bretagne (il faut se souvenir que presque aucun de ces forages n'est isolé des venues d'eau peu profondes).

Le fait qu'au moins un forage sur deux (deux sur trois dans certaines régions à dominante schisteuse) fournisse une eau chargée en fer nous conduit à penser que la *dénitrification naturelle en sous-sol est un phénomène banal*, même s'il reste moins banal de pouvoir l'utiliser car il faut pour cela que s'y ajoute une possibilité de débit exploitable dans des conditions économiquement acceptables.



## LA DENITRIFICATION NATURELLE, UNE CHANCE A UTILISER ... EN LA MENAGEANT

Là où les phénomènes de dénitrification naturelle existent et coïncident avec des débits exploitables, ils représentent de toute évidence une chance, en fournissant aux adductions qui en bénéficient une eau de bonne qualité, sans traitements lourds ni production d'éluats concentrés et, par les rejets après utilisation, en allant dans le sens de l'amélioration du milieu naturel.

Cependant, il est clair que le système est fragile et nullement sécurisant, sauf à court ou moyen terme. En effet, la dénitrification naturelle a une durée de vie *finie*

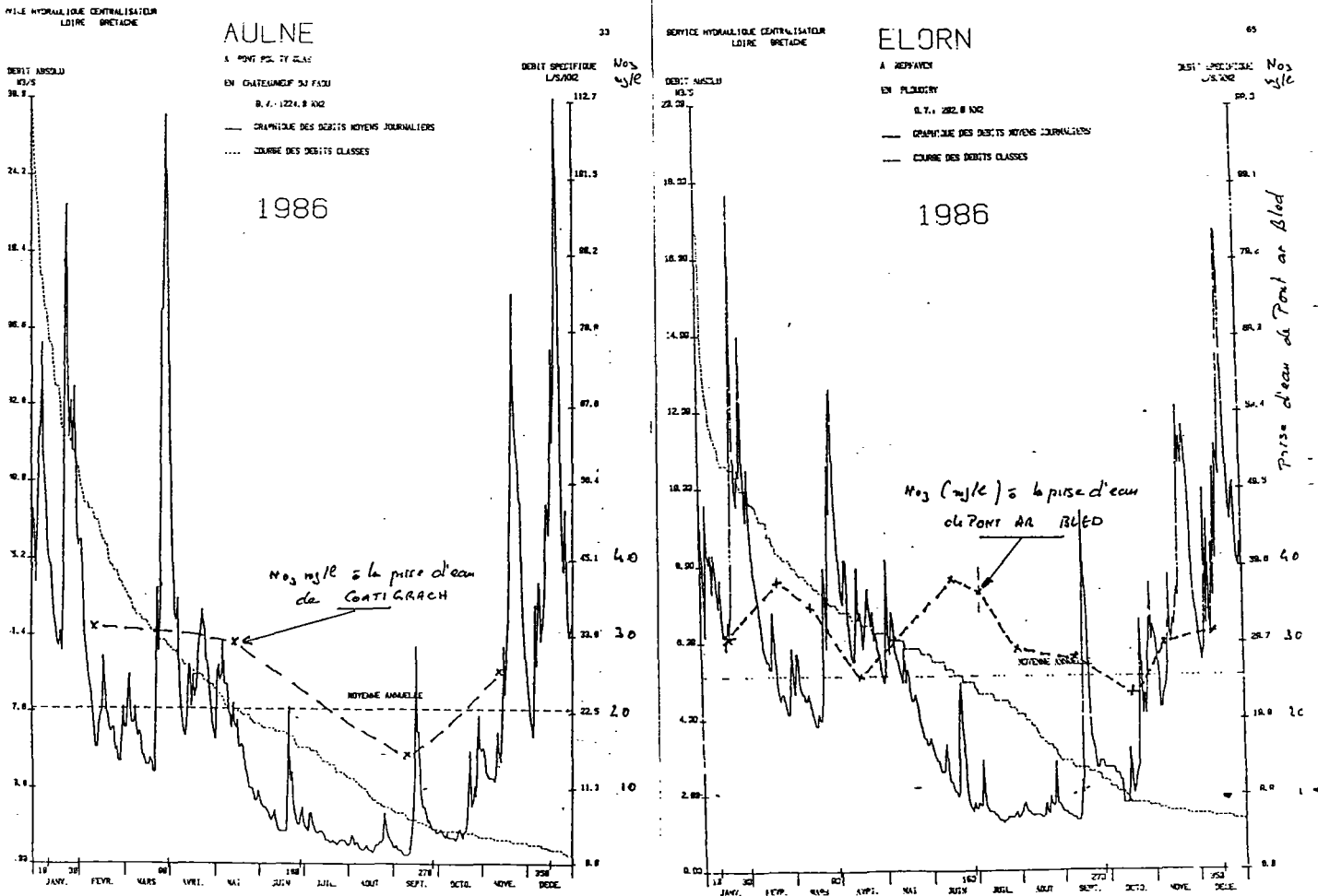
- par colmatage possible des aquifères dû à la réprécipitation du fer dans le sous-sol sous forme d'hydroxydes (ce qui irait dans le sens d'une certaine diminution du rôle de tampon des réservoirs souterrains et d'une aggravation des régimes de crue);

- par consommation certaine du réactif (de la pyrite) ; rappelons que la dénitrification naturelle de 1 000 m<sup>3</sup>/jour d'une eau initialement à 80 mg/l NO<sub>3</sub> doit consommer par an plus de 14 tonnes de pyrite.

Par ailleurs, dans la mesure où la dénitrification naturelle semble un phénomène banal, assez largement réparti sur le territoire breton (1 forage sur 2 ou 2 forages sur 3 fournissent de l'eau à forte teneur en fer) et considérant qu'une part importante - jusqu'à la totalité - de l'eau s'écoulant dans les rivières a eu un trajet souterrain, il est raisonnable de penser que les concentrations en nitrates mesurées dans les cours d'eau (dans certains cours d'eau) sont influencées par des apports d'eau sans nitrates (cette influence devant avoir un poids relatif plus grand en étiage qu'en hautes eaux) ceci peut conduire à sous estimer très sensiblement les excédents d'azote à la source ainsi que les risques de dégradations supplémentaires pouvant survenir par disparition de la pyrite actuellement active dans certains bassins où l'eau, aujourd'hui de qualité correcte, ne semble pas justifier, ou moins prioritairement, d'actions de lutte contre les pollutions.

Le risque n'est pas négligeable de se voir ainsi confrontés, dans quelques années (quelques décennies ?) à des situations imprévues, et paraissant inexplicables ; il serait d'ailleurs aggravé si, ne tenant pas compte du poids éventuel de la dénitrification naturelle dans la qualité actuelle de l'eau, et tirant argument de la bonne santé apparente de ces cours d'eau, un redéploiement de certaines activités était effectué sur leurs bassins versants, augmentant ainsi le flux de nitrates à traiter et accélérant la consommation du stock de réactif pyriteux.

Enfin, les variations saisonnières des concentrations azotées qui sont constatées dans certaines rivières doivent également inciter à la réflexion. Selon que ces fluctuations - qui entre l'hiver et l'été peuvent porter sur plus de 20 points - sont dues principalement à des augmentations hivernales (sols nus, épandages à contre-temps) ou à des abattements estivaux (dénitrification en sous-sol, photosynthèse...), les moyens et méthodes de correction peuvent être assez différents.



Exemple de débits des cours d'eau (données SRAE) et de variations saisonnières des concentrations en NO<sub>3</sub> (données DDASS)

Pour les secteurs qui peuvent en bénéficier, la dénitrification naturelle en sous-sol est une chance à utiliser qui présente le grand intérêt de laisser du temps pour agir. Il faut être conscients que cette chance peut évoluer défavorablement.

Les connaissances acquises à Ploudaniel, sur le site de la Coopérative Laitière, sont à l'échelle d'une exploitation d'un groupe de forages. Il paraît indispensable maintenant de changer d'échelle et de passer à celle d'un bassin versant ou d'un groupe de bassins versants pour mesurer l'importance des phénomènes de dénitrification naturelle en sous-sol, afin de préciser les stratégies de lutte, pour la restauration de la qualité des eaux, la hiérarchisation et le dimensionnement des mesures à prendre ou à préconiser, dont il est important de rappeler qu'elles seront d'autant plus suivies, et donc efficaces, qu'elles apporteront le moins d'entraves économiques possibles aux activités liées à l'agriculture, à l'élevage et aux industries qui leur sont associées.

## 1 - RESULTATS OBTENUS AU LABORATOIRE

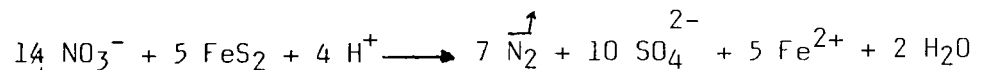
## 11 - RESULTATS PRINCIPAUX OBTENUS PAR LE LABORATOIRE DE CHIMIE DES NUISANCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

### 11.1- Essais en discontinu

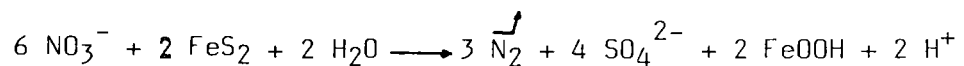
Des essais en discontinu ont été réalisés en utilisant des cuttings fournis par la réalisation des ouvrages FP2, FP3 et FP5 (cf. plus loin). Les cuttings contiennent des porteurs de Fe et de S ; l'analyse microbiologique y a montré l'existence de Thiobacillus dénitrificans.

La réaction de dénitrification est lente, atteint un palier après quelques heures, et son rendement est faible. Elle se produit en deux phases:

. dans la première phase, si  $E_h < -0,200$  volts, la réaction s'écrit

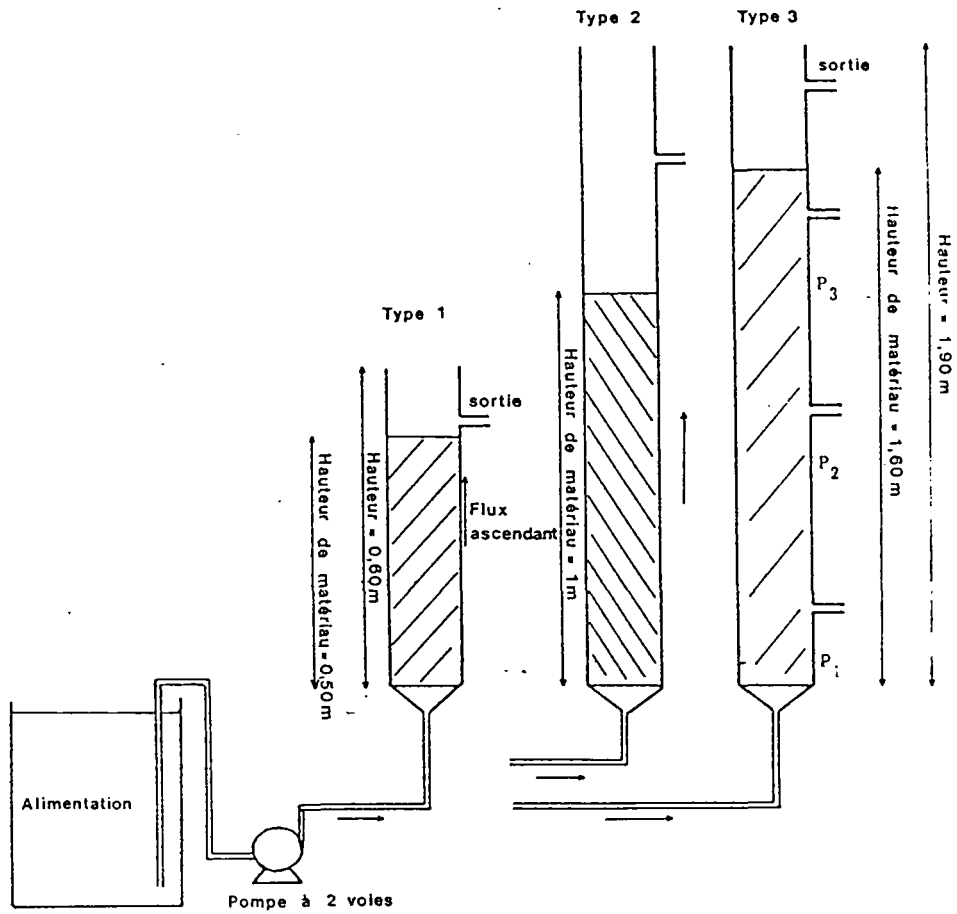


. dans la seconde phase, il se produit une action simultanée des ions ferreux et sulfures libérés lors de la dissolution de la pyrite. Pour  $-0,1 < E_h < 0,0$  volts, la réaction s'écrit



Dans certains essais, l'existence de Thiobacillus denitrificans a été reconnue, mais en faible concentration ; ainsi, leur rôle n'est probablement pas très important, mais la dénitrification lente doit pouvoir être augmentée en apportant un inoculum de Thiobacillus denitrificans.

## 11.2- Etude sur colonnes alimentées en continu



Dispositif expérimental : lits immergés

## MATERIEL ET METHODES

### Les unites pilotes

Les essais sont réalisés avec des colonnes immergées travaillant en flux ascendant. Trois types de réacteurs ont été utilisés. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- |                  |   |
|------------------|---|
| - Colonne type 1 | Hauteur de matériau : 0,50 m<br>Section : $1,45 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  |
| - Colonne type 2 | Hauteur de matériau : 1 m<br>Section : $2,3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$ |
| - Colonne type 3 | Hauteur de matériau : 1,50 m<br>Section : $1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  |

La colonne de type 3 est munie de prises d'échantillons afin de déterminer les profils d'évolution de  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Il est possible de faire varier les débits d'entrée et, par conséquent, les vitesses de passage dans les réacteurs.

### Matériaux de garnissage des colonnes

Le matériau utilisé pour le remplissage des colonnes est un mélange de maërl et de pyrite dans la proportion de 50 % en masse. Le maërl est utilisé comme source de carbone et sert de tampon minéral, sa granulométrie est de 2-5 mm. Le matériau pyritique brut utilisé, riche en chalcopryrite, provient du gisement de la "Porte aux Moines" contrôlé par le B.R.G.M. Avant utilisation, il est broyé et tamisé à une taille de 0,5 à 1,25 mm.

### Ensemencement des filtres

Le démarrage de l'épuration biologique en système continu demande la préparation d'un inoculum et une mise en préculture des micro-organismes fixés sur le garnissage. Nous introduisons dans les colonnes 100 ml d'inoculum. La culture de Thiobacillus denitrificans est réalisée en milieu de POSTGATE (6) dont la composition est la suivante :

2 g de  $\text{KNO}_3$   
1 g de  $\text{Na H CO}_3$   
2 g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   
0,5 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$   
0,5 g de  $\text{Mg SO}_4$   
0,01 g de  $\text{Fe SO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$   
5 g de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3, 5\text{H}_2\text{O}$



Les quantités sont données pour un litre d'eau de dilution ( eau de réseau ).

La colonne fonctionne en circuit fermé. Le milieu de POSTGATE est renouvelé tous les trois jours. La population de micro-organismes se développe et se fixe peu à peu à la surface des grains de pyrite. Thiobacillus denitrificans est une bactérie anaérobie facultative qui peut utiliser une grande variété de composés soufrés :  $S^{2-}$ ,  $S^0$ ,  $S_2O_3^{2-}$ ,  $SO_3^{2-}$ ,  $S_4O_6^{2-}$ , FeS, FeS<sub>2</sub>. Cette phase dure 15 à 20 jours suivant le rythme de développement de la biomasse. Le mode opératoire d'ensemencement des colonnes est analogue à celui préconisé par BLECON lors de ses études sur la dénitrification par Thiobacillus denitrificans sur filtre garni par du mélange de soufre et de maërl (7) (8).

#### Procédure du fonctionnement en continu

Lors du passage en régime continu, l'alimentation utilisée ne contient pas de composés soufrés. De type minéral, cette alimentation est la suivante, pour un litre de réseau de distribution, nous avons :

130 mg de KNO<sub>3</sub>  
420 mg de Na H CO<sub>3</sub>  
1,5 mg de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>

Les microorganismes oxydent le sulfure provenant de la dégradation de la pyrite. L'état d'équilibre est atteint au bout de 2 mois environ.

#### Méthodes d'analyses

Les méthodes d'analyses suivantes ont été utilisées :

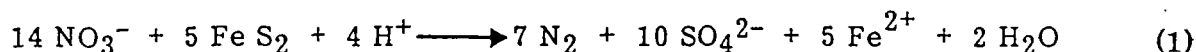
- Dosage des nitrates par la méthode au sulfophénique (Norme Afnor NF T 90 102)
- Dosage des nitrites par le réactif de diazotation (Norme Afnor NF T 90 013)
- Dosage des sulfates par gravimétrie (Norme Afnor NF T 90 009)
- Dosage du fer total par la méthode à l'orthophénantroline. (9)

## RESULTATS - DISCUSSION

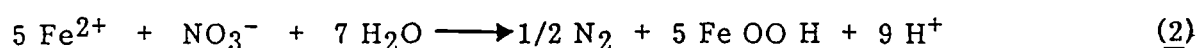
#### Profil et bilan matière dans la colonne

Nous nous sommes fixés une vitesse de passage  $U_0$  de l'ordre de 2 cm . h<sup>-1</sup> qui serait de l'ordre de grandeur des vitesses de percolation de l'eau dans un sous-sol. Nous suivons l'évolution des différents paramètres NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, et Fe<sub>T</sub>. La variation des concentrations de ces entités nous permet d'établir un profil illustré par la figure 1 et représentant l'apparition des nitrites suivie de leur disparition et, enfin, la production de sulfates. Le fer existe à une concentration négligeable, il semblerait qu'il précipite dans le lit.

Un bilan matière réalisé sur les prélèvements effectués au niveau des piquages P<sub>1</sub> (0,45 m), P<sub>2</sub> (0,90 m), P<sub>3</sub> (1,35 m) et la sortie de colonne montre que les réactions qui sembleraient se produire sont, pour Thiobacillus denitrificans :



pour Ferrobacillus ferroxydans :



(Ces réactions ne prennent pas en compte les phénomènes d'assimilation).

Sur le support de l'unité pilote, Thiobacillus denitrificans et Ferrobacillus ferroxydans ont été mis en évidence par culture sur leur milieu spécifique [POSTGATE (6), CHARANJITRAI (11)]. Ceci montre bien une activité biologique dans le réacteur. En outre, la réduction chimique des NO<sub>3</sub><sup>-</sup> par la pyrite de fer est thermodynamiquement possible, mais la cinétique est lente (4) est très dépendante de la solubilisation de FeS<sub>2</sub> (10). Les processus biologiques dans la réduction des nitrates sont donc prépondérants, dans les conditions de l'étude cette activité serait due à Thiobacillus denitrificans dans le cas de la réaction 1 et à Ferrobacillus ferroxydans dans le cas de la réaction 2. Les différentes bactéries oxydent le substrat (S<sub>2</sub><sup>2-</sup>, Fe<sup>2+</sup>) et libèrent ainsi l'énergie nécessaire à leur activité métabolique en utilisant l'oxygène des nitrates, le réacteur travaillant en anoxie.

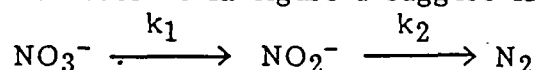
### Rendement de la dénitrification

Nos essais correspondent à des vitesses de passage allant de 0,01 à 0,1 m h<sup>-1</sup> pour deux hauteurs de matériaux (soit des temps de séjour allant de 10 heures à 100 heures) et compatibles avec les vitesses de percolation de l'eau à travers un sous-sol naturel.

La présence de nitrites en sortie de la colonne est fonction de la hauteur de matériau. Ce produit est d'autant moins concentré que la hauteur de matériau est grande. Pour une hauteur de matériau de 1,0 m et un temps de séjour de 80 heures, le pourcentage d'abattement en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> est de 90 %. Les nitrites sont présents à une concentration de 3,3 mg . l<sup>-1</sup>. Il est évident qu'une plus grande hauteur de matériau améliorerait le processus de dénitrification. En effet, pour une hauteur de 1,60 m, les nitrites sont négligeables en sortie de colonne.

### Exploitation des résultats

L'examen des courbes de la figure 1 suggère la suite de réduction biologique



Hauteur de matériau (m)

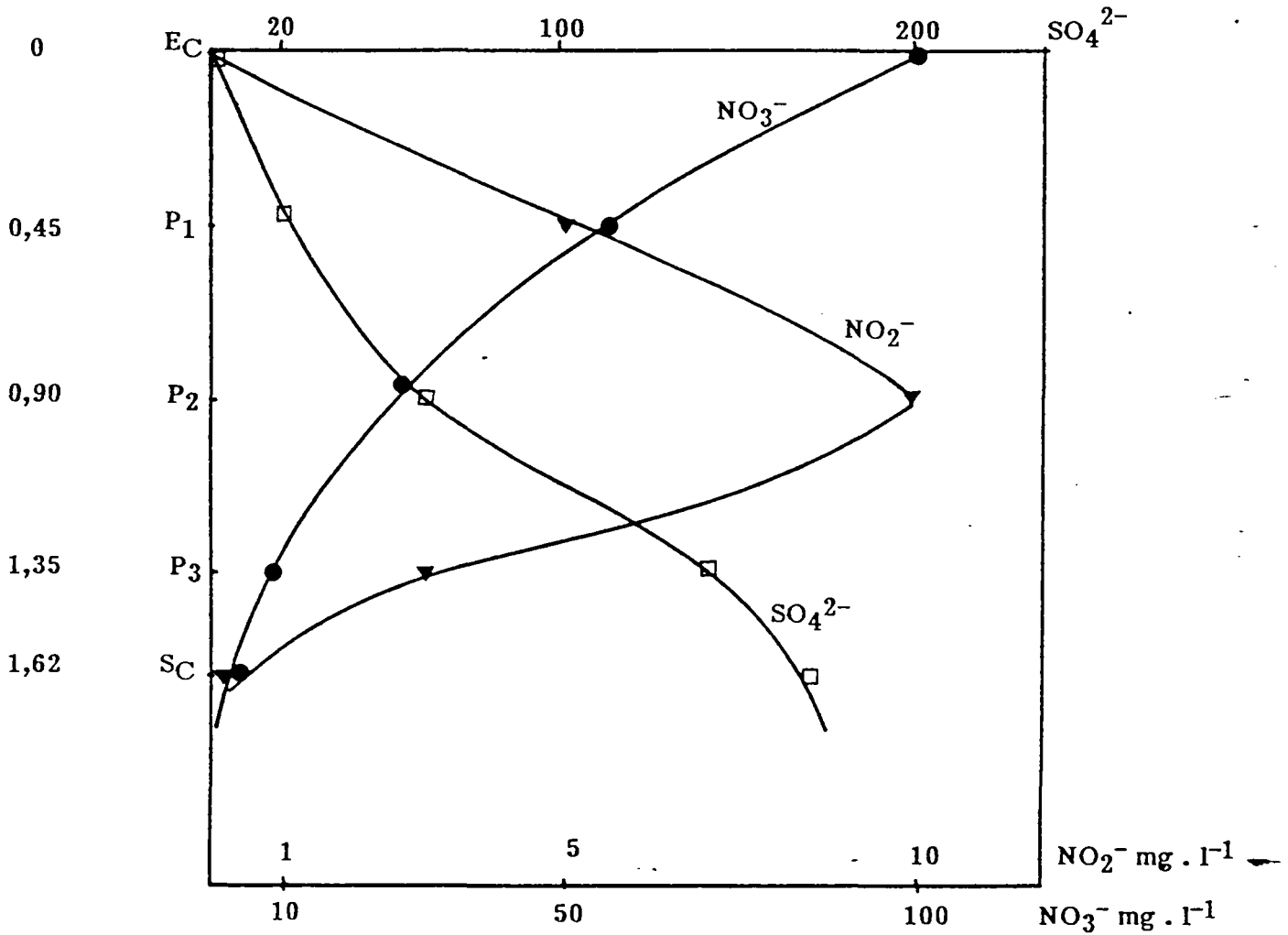


Fig. 1 : Profil  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  sur la colonne type 3 pour  $C_V = 0,03 \text{ kg NO}_3^-/\text{m}^3$  de matériau . j.

Nous nous intéressons seulement à la réduction des nitrates dans le réacteur. En admettant l'image assez réaliste d'un écoulement en flux piston dans le réacteur et d'un indice de vide supposé à peu près invariant, on peut écrire le bilan matière :

$$U_0 dC = - K X (z) C dz \quad (1)$$

avec :

- C : Concentration des nitrates ( $\text{ML}^3$ )
- $U_0$  : Vitesse du fluide dans le réacteur vide ( $\text{LT}^{-1}$ )
- K : Constante cinétique ( $\text{M}^{-1} \text{T}^{-1} \text{L}^3$ )
- $X(z)$  : Biomasse à la cote z ( $\text{M L}^{-3}$ )
- z : Cote dans le réacteur (L)

On admet une réaction de dénitrification du premier ordre par rapport à la biomasse (12), (13), (14). En outre, on suppose une biomasse dénitrifiante répartie dans un réacteur ( $X(z)$ ). En fait, l'exploitation des courbes de répartition de la biomasse montre que la concentration de celle-ci varie avec la cote dans le réacteur 2 suivant la loi (16):

$$X(z) = X_0 z \quad (2)$$

- $X_0$  : Constante de biomasse
- $\alpha$  : Constante

Les expériences réalisées et publiées précédemment (16) montrent qu'il est possible d'estimer les paramètres de cette relation. On obtient alors :

$$X = X_0 Z^{-0,75} \quad (3)$$

En combinant les équations 2 et 3, on obtient :

$$U_0 dC = -K X_0 z^{-0,75} C dz \quad (4)$$

avec les limites suivantes :

$$\begin{aligned} z(0) &= 0 \\ C(z=0) &= C_0 \end{aligned}$$

L'intégration de cette équation entre  $Z = 0$  et  $Z = H$ , Cote de sortie dans le réacteur donne :

$$\frac{\ln C}{C_0} = \frac{-K}{U_0} \cdot \frac{X_0}{0,25} H^{0,25} \quad (5)$$

Soit :

$$\rho = 1 - \exp\left(-k \frac{X_0}{U_0} H^{0,25}\right) \quad (6)$$

$\rho$  : Rendement de l'épuration  
 $C_0$  : Concentration initiale ( $ML^{-3}$ )

En développant  $C_v$ , la charge volumique ( $M L^{-3} T^{-1}$ ), nous obtenons :

$$C_v = \frac{C_0 Q}{V_0} = \frac{C_0 H}{U_0} \quad (7)$$

avec :

$Q$  : débit volumique  
 $V_0$  : Volume du réacteur

En utilisant 6 et 7, nous obtenons la relation :

$$\rho = 1 - \exp\left(-k \frac{X_0}{0,25} H^{-0,75} C_0 C_v^{-1}\right) \quad (8)$$

Pour éviter les fuites de nitrites dans l'effluent, le rendement de dénitrification doit être maximal de l'ordre de 90 - 100 %, ce qui semble se produire pour une hauteur de matériau de 1,60 m et une vitesse de passage  $U_0 = 0,02 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  qui correspond bien à la vitesse de migration des  $\text{NO}_3^-$  en milieu naturel. Le profil donnant l'évolution des  $\text{NO}_3^-$   $\text{NO}_2^-$ , simulant la traversée d'eau chargée en  $\text{NO}_3^-$  dans un sol pyritique en présence de Thiobacillus denitrificans est représenté figure 1. La charge volumique calculée qui permet dans ce cas précis un rendement de dénitrification supérieur ou égal à 90 % est de l'ordre de  $0,03 \text{ kg de } \text{NO}_3^- \text{ j}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$  de matériau.

Le rendement de dénitrification en fonction de la charge volumique est trouvé de la forme suivante :

$$\rho = 1 - \exp(-K C_0 C_v^{-1}) \quad (9)$$

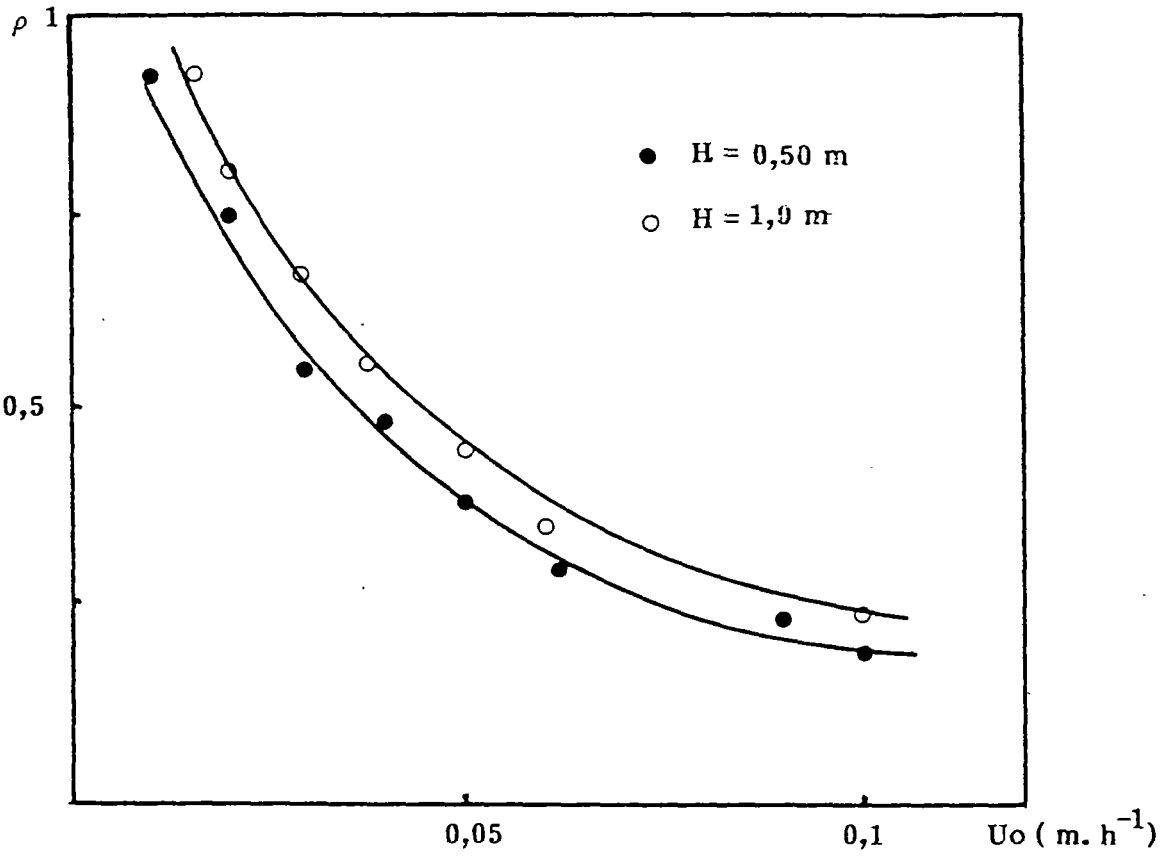


Fig. 2 : Variations du rendement de dénitrification en fonction de la vitesse de passage.

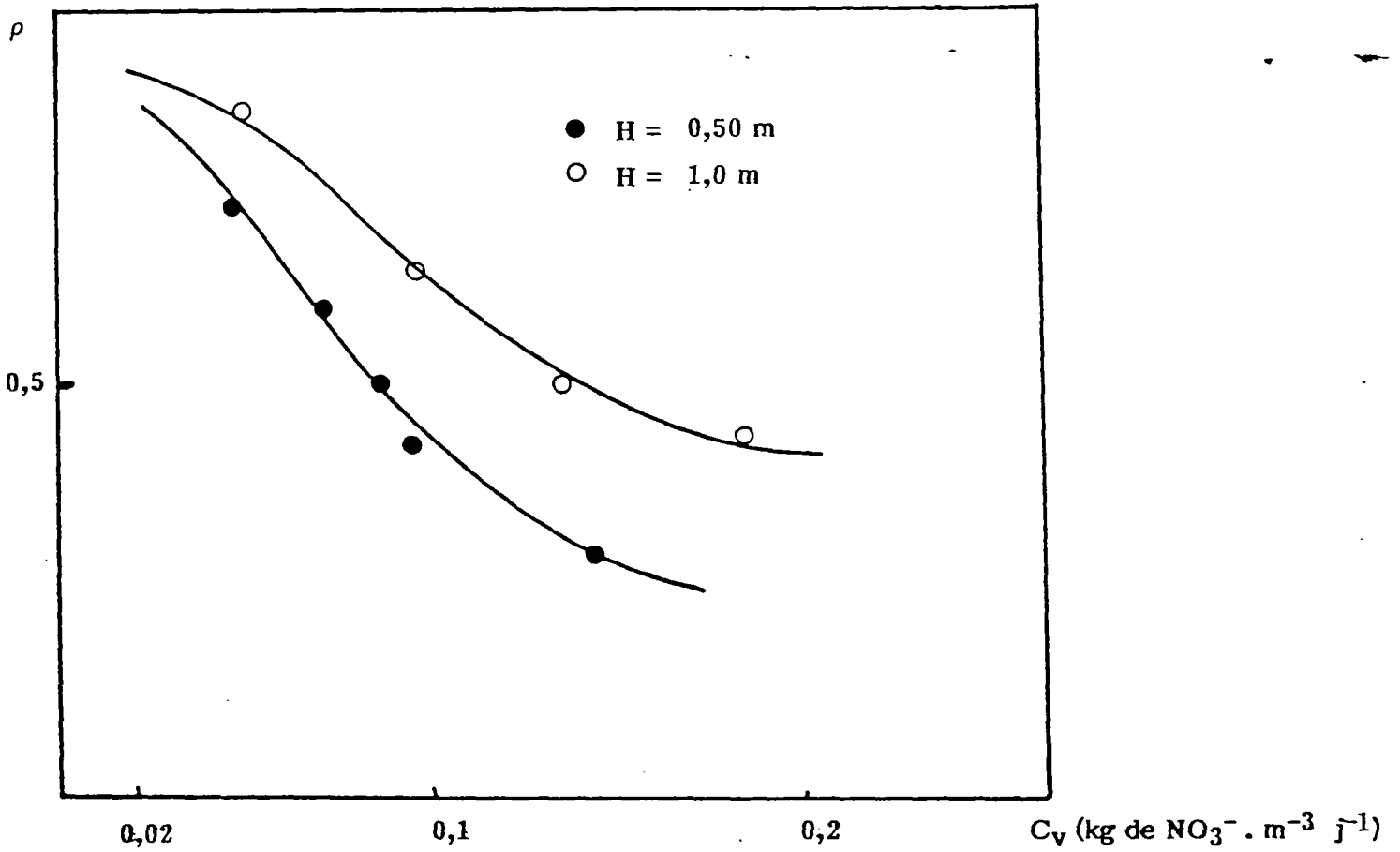


Fig. 3 : Variations du rendement de dénitrification en fonction de la charge volumique  $C_v$ .

Pour :

$$C_0 = 100 \text{ mg l}^{-1} \text{ et } T = 10^\circ\text{C}$$

Nous obtenons :

pour  $H = 0,50 \text{ m}$   
 $\rho = 1 - \exp(-0,123 C_v^{-1})$  (10)

$$\text{Corr.} = 0,980$$

pour  $H = 1 \text{ m}$   
 $\rho = 1 - \exp(-0,057 C_v^{-1})$  (11)

$$\text{Corr.} = 0,987$$

La figure 3 illustre cette évolution. Il apparaît que la charge maximale admissible pour un rendement de plus de 90 % est, dans les deux cas, de l'ordre de 0,02 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> par m<sup>-3</sup> de matériau et par jour. Or, nous savons que la présence de nitrites en sortie de colonne est fonction de la hauteur de matériau. Ce paramètre est d'autant moins important que la hauteur est grande. En effet, pour une hauteur de 1m et une vitesse de passage U<sub>0</sub> = 0,01 m . h<sup>-1</sup>, le pourcentage d'abattement est de l'ordre de 95 %, les nitrites sont présents à une concentration de 5 ppm et la charge volumique dans ce cas est égale à 0,024 kg de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> . kg de matériau/j<sup>-1</sup>. Alors que pour une hauteur de 1,60 m et une vitesse U<sub>0</sub> = 0,015 m . h<sup>-1</sup>, le pourcentage d'abattement est de l'ordre de 93 %, les nitrites dans l'effluent sont à une teneur de 0,8 mg . l<sup>-1</sup> et la charge volumique est de l'ordre de 0,022 kg de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/m<sup>-3</sup> de matériau . j . l<sup>-1</sup>. Il apparaît donc évident qu'un rendement de dénitrification de plus de 90 % sans fuite de nitrites dans l'effluent est étroitement lié à la hauteur de matériau.

Nous voulons obtenir une relation chiffrée entre les équations expérimentales 10 et 11 et l'équation théorique 8. Nous obtenons à partir de 10 et 11 une relation unique :

$$\rho = 1 - \exp(-0,065 H^{-0,75} C_0 C_v^{-1})$$
 (12)

Cette équation n'est bien sûr qu'approximative. La comparaison entre 12 et 8 permet de donner une valeur approximative de K X<sub>0</sub> soit :

$$K X_0 = 0,0162$$

avec :

et  $C_0$  en Kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> m<sup>-3</sup>  
 $C_v$  en Kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> m<sup>-3</sup> j<sup>-1</sup>

L'équation 12 trouvée est à rapprocher de celle déterminée plus empiriquement à partir des données présentées sur la figure 2.

$$\rho = 1 - \exp(-0,028 U_0^{-1,03} H^{0,256})$$
 (13)

La forme et la constante trouvées sont très proches si l'on compare ces deux équations dans un système d'unité cohérent.

L'équation 8 ou 10, 11 conduit à trouver, pour certaine hauteur H de garnissage, la charge d'exploitation (figure 3).

La charge volumique varie selon les paramètres de fonctionnement : vitesse de passage dans la colonne ( $U_0$ ) et la hauteur du matériau disponible ( $H$ ) et, par conséquent, selon le paramètre temps de passage. Ainsi, pour une concentration  $C_0$  de fonctionnement de  $T = 10^\circ\text{C}$ , les charges volumiques correspondant au rendement de dénitrification de 50 à 100 % sont données sur le tableau I.

$\rho$ (%)	$H$ (m)	$U_0$ (m . h <sup>-1</sup> )	$C_V$ (kg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> m <sup>-3</sup> j <sup>-1</sup> )
50	0,50	0,04	0,183
50	1	0,04	0,096
93-95	0,50	0,01-0,02	< 0,04
93-95	1	0,015-0,02	< 0,036

Tableau I : Paramètres de fonctionnement du réacteur biologique dénitrifiant garni de maërl et pyrite.

### - Conséquences pour le terrain

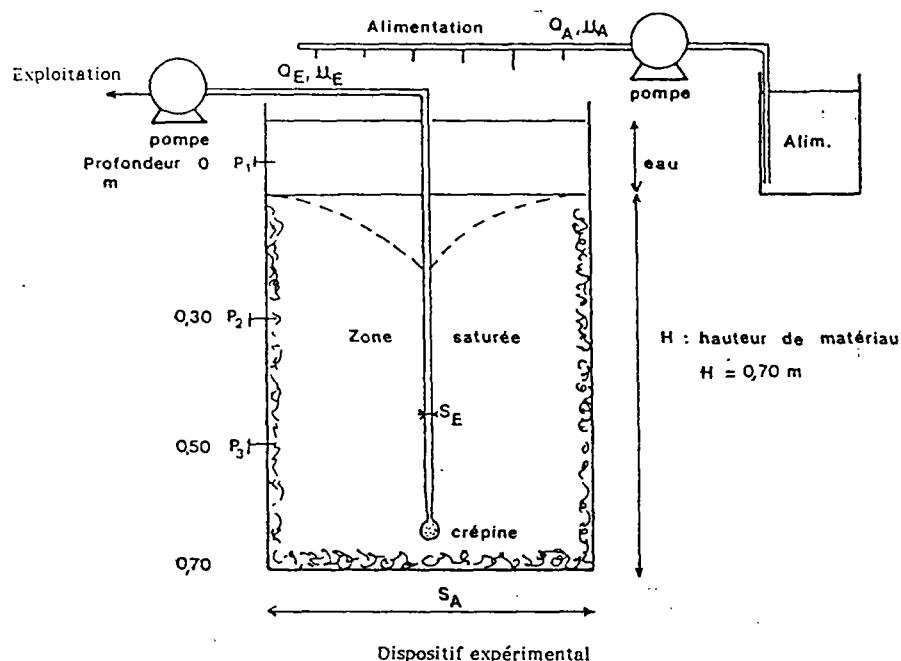
La dénitrification suppose dans le sous-sol la présence de sulfures (notamment de pyrite) et de bactéries (*Thiobacillus denitrificans*); le processus, très rapide, s'effectue en quelques décimètres, ce qui correspond bien aux observations de terrain (abattement des teneurs en  $\text{NO}_3$  en quelques mètres); le rendement du phénomène dépend :

- du temps de contact : vitesse de passage et épaisseur de matériel dénitrifiant. A priori, dans le terrain, l'épaisseur est importante, d'une ou deux puissance de 10 supérieure à la hauteur des colonnes de laboratoire; pour des débits de percolation comparables, les vitesses de transfert doivent par contre être supérieures (porosité efficace plus faible dans le terrain),

- de la charge volumique : poids de nitrate dans l'eau initiale et volume de matériel dénitrifiant traversé. Là encore, le terrain est surdimensionné par rapport aux besoins. Une charge volumique maximale admissible de  $0,03 \text{ kg NO}_3/\text{jour/m}^3$  de matériau, si elle percole verticalement représente une infiltration journalière de  $300 \text{ l d'eau à } 100 \text{ mg/l NO}_3 \text{ par m}^2$  de superficie. Or, en tout état de cause, les précipitations efficaces annuelles moyennes sont de l'ordre de  $530 \text{ mm}$ , soit, réparties sur 6 mois, une infiltration journalière de l'ordre de 3 litres seulement;

### 11.3 - Simulation d'une alimentation constante et d'un soutirage variable

La cuve a été chargée avec du matériel naturel : cuttings d'un forage réalisé au Rest en Plouénan,ensemencé en *Thiobacillus denitrificans*.

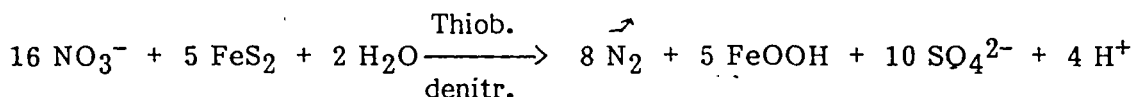




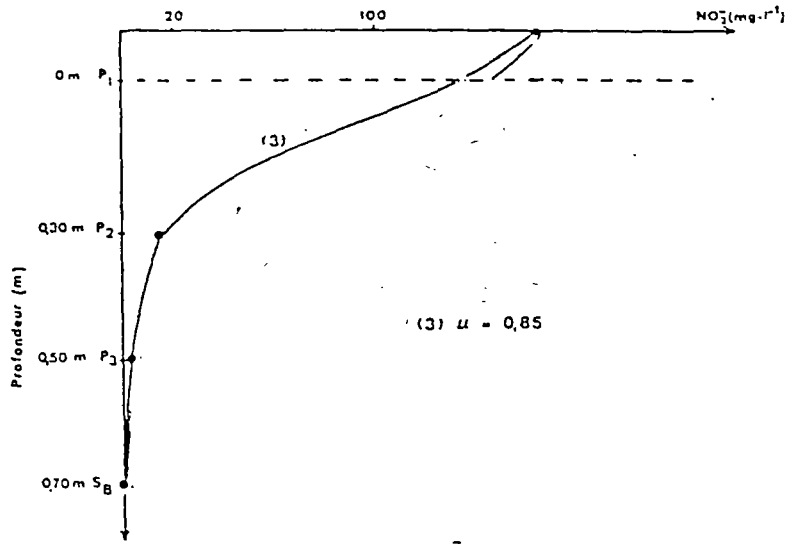
L'intérieur de la cuve est tapissé de grains de maërl pour éviter les chemins préférentiels. La solution alimentaire est synthétique ( $\text{NO}_3^- \sim 100$  à  $200$  mg/l ;  $\text{CO}_3\text{H}^- \sim 300$  mg/l ;  $\text{PO}_4 \text{H Na}_2$  1 à 1,5 mg/l).

Au temps  $t = 0$ , la cuve est remplie de l'alimentation précédente ; 24 h après, une extraction à  $U_E = 0,1$  à  $6$  m/h est réalisée tandis qu'une alimentation  $U_A = 0,12$  mm/h continue simule la pluviométrie moyenne de la Bretagne. Un rapport  $U = U_E/U_A$  égal à 1 correspond à un niveau d'eau constant. Les courbes relatives à  $U = 0,87$  donnent l'efficacité de la dénitrification.

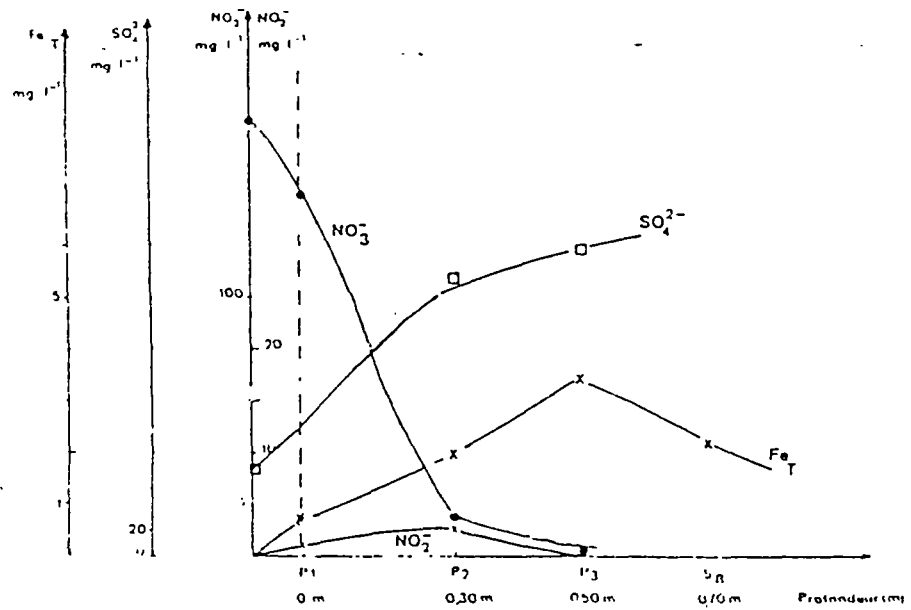
La réaction correspondant à l'évolution des différents paramètres de haut en bas du profil s'écrit :



L'élimination des nitrates s'accompagne d'une production d'azote moléculaire et de sulfate. Le fer produit à l'état ferrique précipite dans le lit. Lorsque les nitrates n'existent plus, les sulfates ne sont plus produits. On assiste à une production de fer qui diminue au niveau du piquage  $P_3$ . Cette chute tardive de la teneur du fer s'expliquerait par l'existence d'une cinétique de précipitation lente (le fer est déplacé avant de pouvoir précipiter). La réaction précédemment écrite donne une idée sur l'évolution des différents paramètres  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}_T$ . Elle n'incorpore pas les consommations de C, N et P pour la biosynthèse cellulaire.



Evolution des  $\text{NO}_3^-$  le long du pilote en fonction de  $U$  pour  $C_0 = 160 - 180 \text{ mg.l}^{-1}$



Profils  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}_T$  pour  $U = 0,85$   
 $T^* = 20.2^\circ\text{C}$

**RAPPORT CONCERNANT LA MIGRATION DES NITRATES EN PROFONDEUR SUR LE  
SITE DE LA COOPERATIVE LAITIERE DE PLOUDANIEL.  
ETUDE ISOTOPIQUE SOMMAIRE**

Réalisé par : A. MARIOTTI, Laboratoire de Biogéochimie des Isotopes Stables, Université

---

Alors que la réduction bactérienne non assimilative (= dénitrification) des nitrates peut être aisément caractérisée, dans la zone agronomique du sol, par des mesures de dégagement gazeux d'oxydes d'azote après blocage de la dernière étape de réduction aboutissant à l'azote moléculaire, sa mise en évidence dans les nappes profondes est plus délicate.

Les différentes techniques susceptibles d'être retenues ont fait l'objet d'une revue bibliographique critique réalisée pour le Ministère de l'Environnement (MARIOTTI , 1986 : *La dénitrification dans les eaux souterraines, principes et méthodes de son identification : une revue* . En cours de publication in J. of Hydrology).

Parmi ces différentes méthodes, le suivi de la **composition isotopique naturelle en  $^{15}\text{N}$**  de l'azote de l'ion nitrate ( $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ ) paraît être particulièrement adaptée à la caractérisation de ce processus dans les aquifères profonds.

La thermodynamique nous apprend que les liaisons chimiques établies avec l'isotope  $^{15}\text{N}$  sont plus difficilement rompues que celles faisant intervenir l'isotope léger abondant  $^{14}\text{N}$ .

Ainsi, au cours d'une réaction faisant intervenir une modification dans les liaisons de l'azote (ex. : rupture d'une liaison N-O au cours de la réduction de l'ion  $\text{NO}_3^-$ ), assiste-t-on à un **fractionnement des isotopes** entre réactif

(enrichi en  $^{15}\text{N} = \delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  élevé) et produit de la réaction (appauvri en  $^{15}\text{N}$ ).

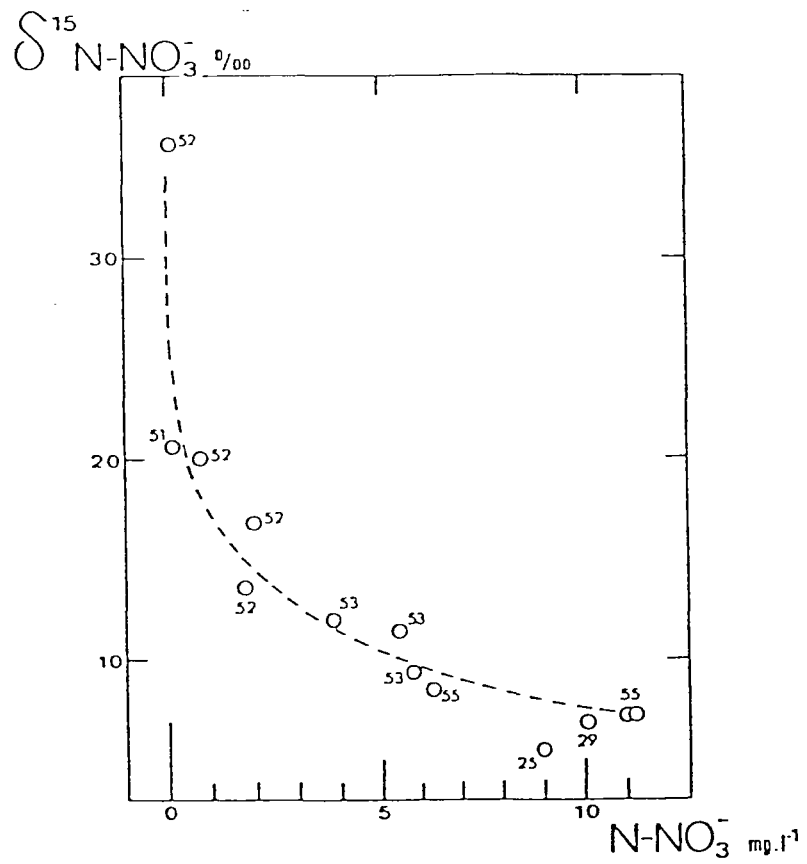
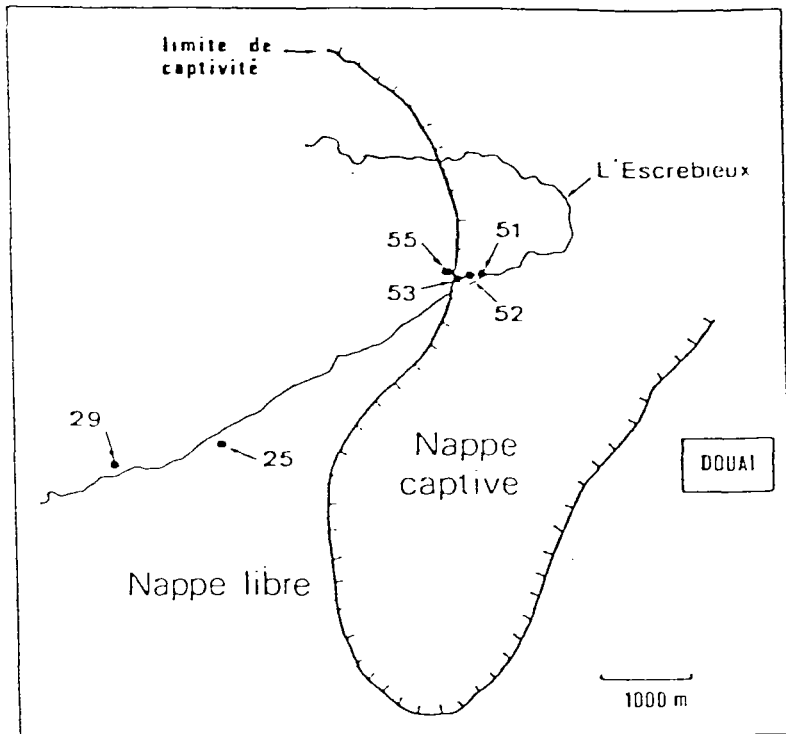
Pour ce qui concerne la dénitrification, une étude en laboratoire a permis de caractériser le phénomène par l'évolution de la composition isotopique du nitrate résiduel pendant le déroulement du processus (suivi par la baisse de concentration des nitrates).

Comme le prévoit la théorie, cette évolution est telle que **l'enrichissement en  $^{15}\text{N}$  augmente exponentiellement avec la disparition des nitrates** (processus de Rayleigh).

Sans ambiguïté, le suivi (dans l'espace ou dans le temps) de la composition isotopique du nitrate dissous dans une nappe doit permettre de mettre en évidence la dénitrification, fractionnante, par rapport aux autres processus potentiellement responsables de la diminution des teneurs en nitrate (assimilation, dilution) dont nous avons pu vérifier qu'ils **n'entraînent aucun enrichissement isotopique.**

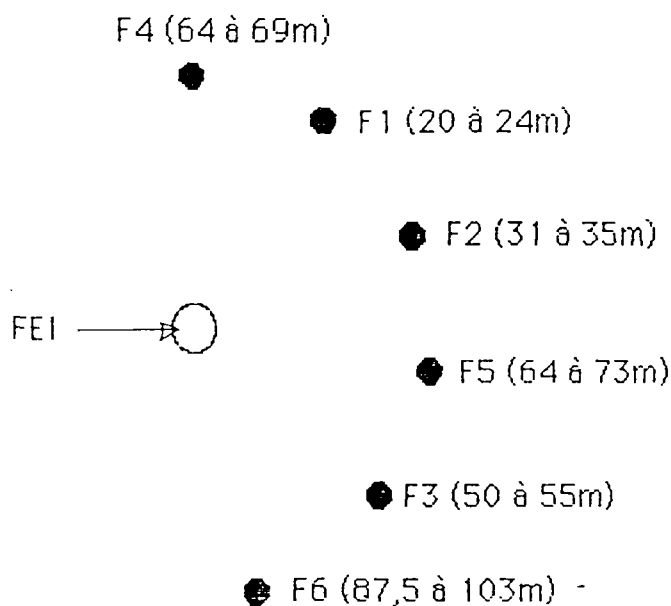
Dans le cadre d'un contrat passé avec le Ministère de l'Environnement ("Mise en évidence et caractérisation de la dénitrification en nappe captive par le traçage isotopique naturel  $^{15}\text{N}$ "), l'applicabilité à des situations de terrain a été testée sur des sites de la nappe de la craie dans le nord de la France.

Comme on peut l'observer sur les deux figures ci après, au passage nappe libre-nappe captive, on assiste à une brutale disparition des nitrates, corrélative d'un enrichissement exponentiel en  $^{15}\text{N}$  caractérisant la dénitrification (MARIOTTI et LANDREAU, "Etude du transfert et de l'évolution des nitrates dans les aquifères au moyen du traçage isotopique naturel  $^{15}\text{N}$ " Colloque "Nitrates dans les Eaux", Paris, 1985).



### Etude du site de Ploudaniel

Sur le dispositif en "flûte de pan" rappelé sur le schéma ci-après, nous avons effectué des mesures de composition isotopique en  $^{15}\text{N}$  des nitrates sur les forages où les teneurs sont suffisantes.



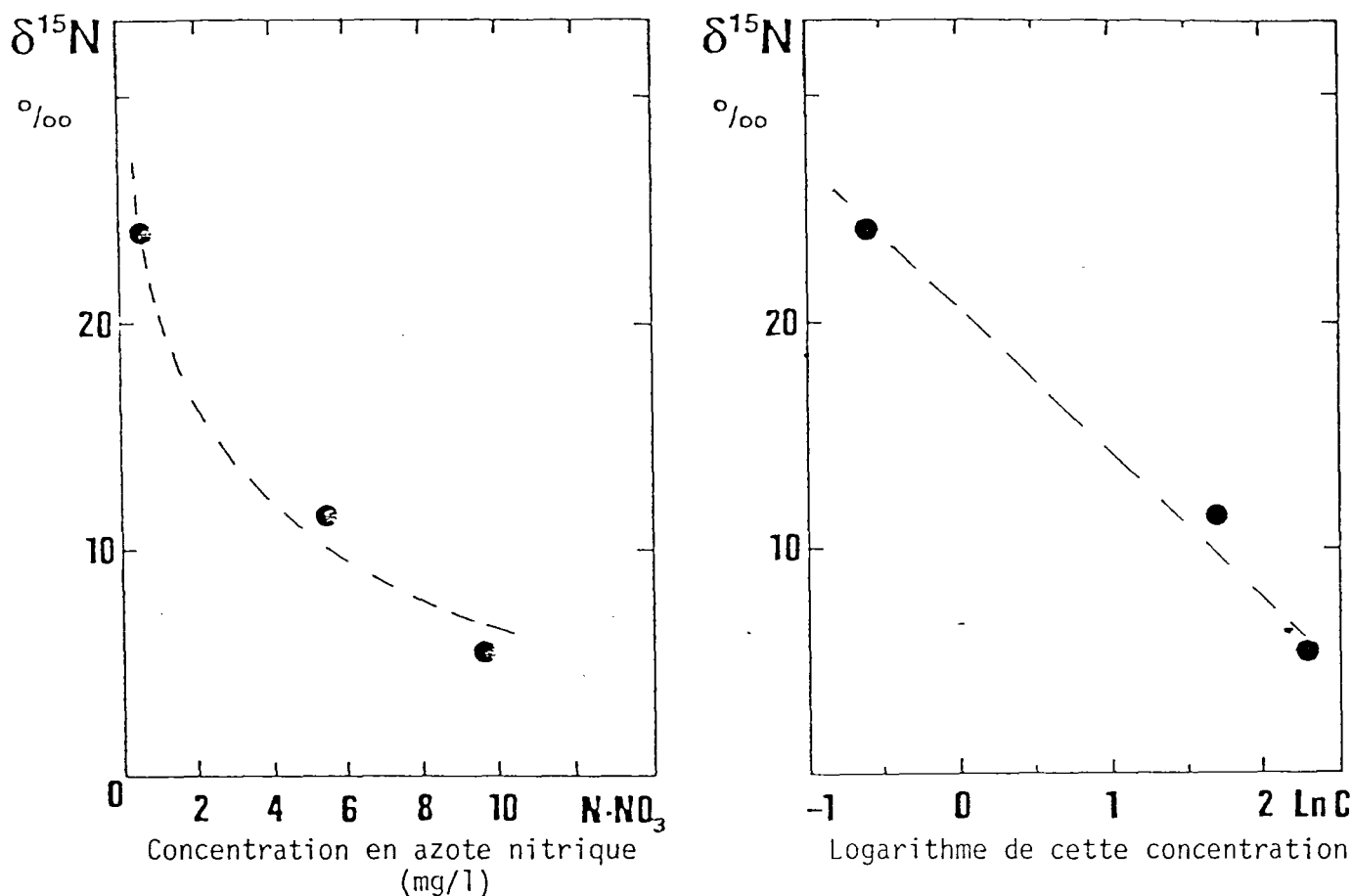
Le dispositif est constitué de 6 forages.  
Les chiffres entre parenthèses indiquent la profondeur de l'horizon capté.

Les résultats des analyses sont reportés sur le tableau suivant :

N° du forage	Concentration en $\text{N-NO}_3^-$ mg/l	Composition isotopique $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$
FEI	0,57	24,0
F1	9,70	5,4
F2	5,70	11,5
F3	0,06	-
F4	0,06	-
F5	0,08	-
F6	0,02	-

Résultats des analyses chimiques et isotopiques  
du dispositif en flûte de Pan de Ploudaniel  
- : pas assez de nitrate pour réaliser une  
analyse isotopique

Il apparaît clairement sur la figure suivante, malgré le faible nombre d'analyses, que **la diminution de la teneur en azote nitrique s'accompagne d'un enrichissement isotopique exponentiel en  $^{15}\text{N}$ .**



Le facteur de fractionnement isotopique estimé d'après ces trois données est de l'ordre de -6,2 pour mille; donc du même ordre que ceux que nous avons pu observer dans la nappe de la craie dans le nord de la France.

Ainsi, pouvons nous conclure que **le phénomène à l'origine de la disparition des nitrates sur le site de Ploudaniel est bien une dénitrification naturelle** dans laquelle, semble-t'il, la pyrite joue un rôle important.

MARTIN et HAIDER, dans leur récent rapport sur ce site, concluent à une dénitrification biologique où interviendrait *Thiobacillus denitrificans* qui oxyde le soufre réduit provenant de sulfures de fer (pyrite et marcassite) en utilisant l'oxygène des nitrates.



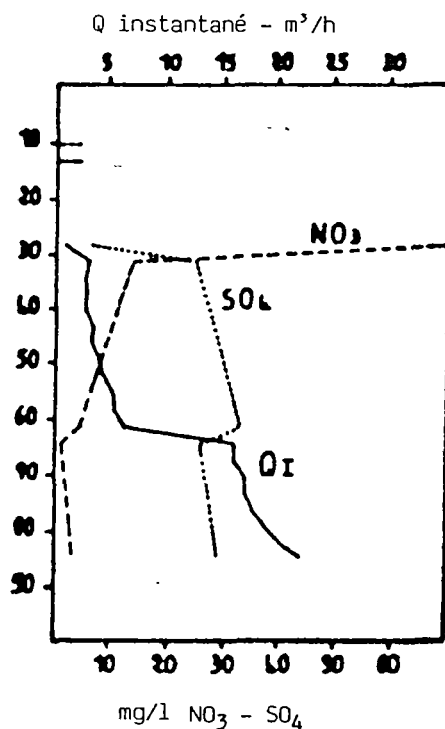
## 2 - MESURES ET OBSERVATIONS DE TERRAIN

## 21 - LES DISPOSITIFS

Outre les divers piézomètres et forages permettant de contrôler les évolutions du niveau de la nappe, le site de Ploudaniel est équipé de

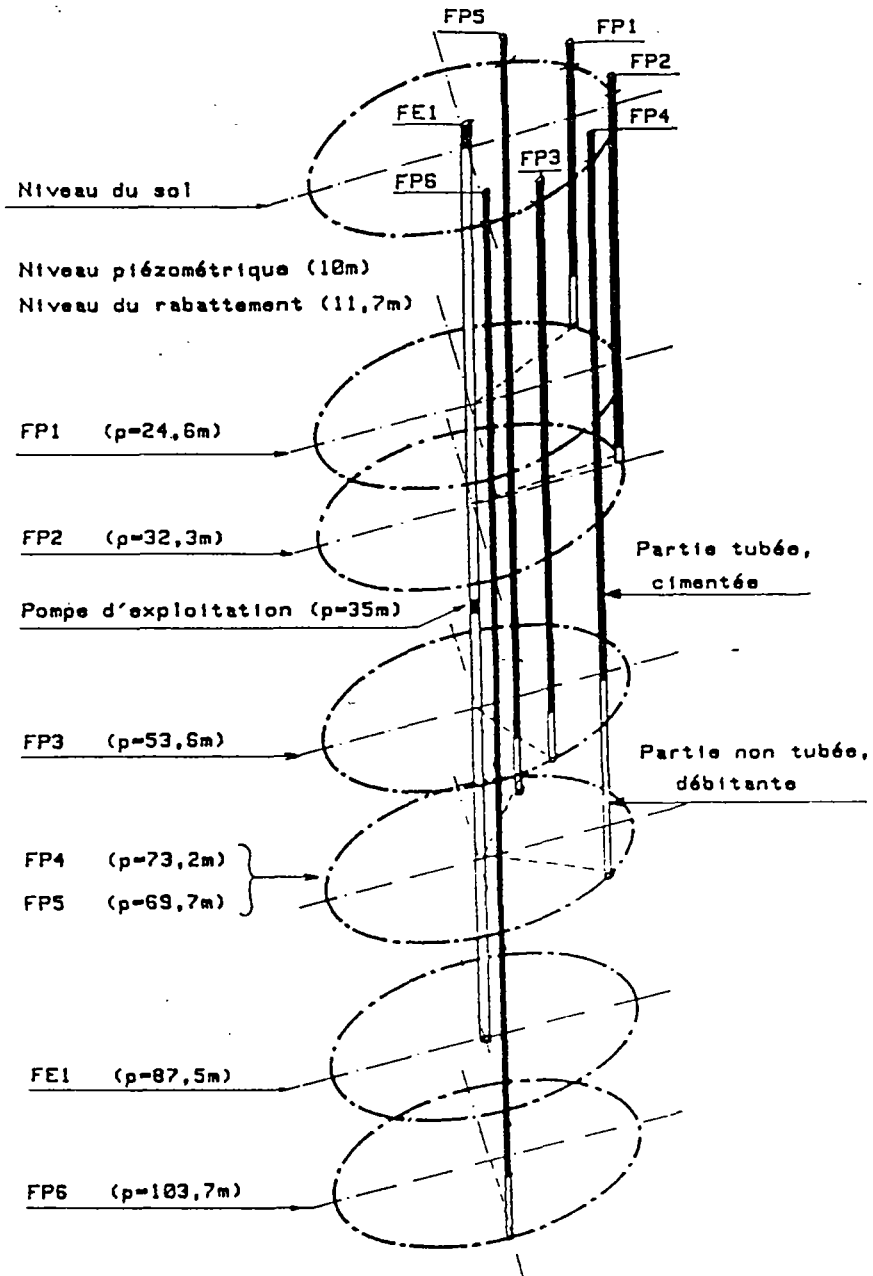
- deux dispositifs permettant de suivre les variations de composition de l'eau dans la tranche supérieure des terrains non saturés. Les dispositifs, numérotés B1 et B2 sont constitués de céramiques poreuses posées tous les 0,5 m, de -0,5 m à -10,5 m de profondeur, échantillonnés en moyenne tous les trois mois.

- un dispositif "flûte de Pan" permettant d'observer ce qui se passe dans la tranche saturée du sous-sol. La flûte de Pan est constituée de 6 piézomètres ouverts à différentes profondeurs, disposés sur un demi cercle de rayon 15 m dont le centre est un forage exploité (FE 1) par la Coopérative. En se basant sur les observations faites lors de la réalisation de FE 1 et qui, en raison de la grande hétérogénéité de détail n'ont pas été retrouvées aux mêmes profondeurs dans les piézomètres :



les éléments de la flûte de Pan ont été réalisés pour permettre

- FP1, l'échantillonnage au niveau des fortes teneurs
- FP2, l'échantillonnage des teneurs intermédiaires



SCHEMA DU DISPOSITIF EN "FLÛTE DE PAN"

- FP3, l'échantillonnage au niveau où les nitrates disparaissent
- FP4, l'échantillonnage au toit de l'arrivée d'eau
- FP5, l'échantillonnage au début de l'arrivée d'eau
- FP6, l'échantillonnage de l'arrivée d'eau importante

En fait, FP1 est sans doute un peu trop profond et capte un niveau où la dénitrification est déjà amorcée (la première eau qui a pu être analysée lors de la mise en place du forage FE 1 contenait 80 mg/l NO<sub>3</sub> et 7 mg/l SO<sub>4</sub>).

## 22 - RESULTATS

### 22.1 - Porosité

La porosité du sous-sol n'est pas connue, cependant, la teneur en eau des horizons non saturés (prélèvements réalisés lors de la pose des céramiques) permet de l'approcher

- en B1, elle varie, *en poids* (en ne tenant pas compte de 2m supérieurs) de 4,7 à 12,2 %, avec une valeur moyenne de 8,5 %
- en B2 (deux premiers mètres exceptés) les extrêmes sont 2,3 % à 10 m et 13,9 % à 7 m de profondeur ; la moyenne est de 6,6 %, assez voisine de la moyenne observée en B1.

Pour une densité du terrain proche de 2,2. la teneur en eau des horizons non saturés pourrait être de l'ordre de 13 à 18 % du volume total.

### 22.2 - Stock d'azote

La quantité d'azote contenue, au moment de la mise en place des dispositifs, dans l'eau percolant dans les horizons non saturés vers la nappe correspond

- au niveau du dispositif B1 (sous maïs fourrage), à 365 kg (exprimé en N) par hectare, soit pour une porosité supposée voisine de 15 % une teneur moyenne dans l'eau de l'ordre de 100 mg/l NO<sub>3</sub>
- au niveau du dispositif B2 (sous friche depuis plusieurs années), à 280 kg (exprimé en N) par hectare, soit pour une porosité de l'ordre de 15 %, l'azote en cours de migration étant supposé - ce qui est inexact - réparti de façon homogène, une teneur moyenne de l'eau venant alimenter la nappe de l'ordre de 78 mg/l NO<sub>3</sub>.

Ces ordres de grandeur correspondent en effet assez bien aux teneurs mesurées dans les céramiques poreuses.

### 22.3 - Présence de sulfures dans le sous-sol

L'analyse minéralogique des cuttings de FP2 - FP3 et FP5 montre la présence de divers sulfures. La pyrite est présente à tous les niveaux, ainsi que la marcassite.

PLOUDANIEL (Finistère)	Echantillons de granulats d = 2,9											
	FP 2		FP 3								FP 5	
	21-28	32-34	28-32	31-34	34-37	37-40	40-43	43-46	46-49	49-52	10-30	34-37
* Blende ZnS	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
* Pyrite FeS <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Galène PbS	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
* Chalcopryrite CuFeS <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Cuivre gris (Cu,Fe,Zn,Hg,Ag) <sub>12</sub> (Sb,As) <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Mispickel Fe As S (arsenopyrite)	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Pyrrhotite FeS	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Marcassite FeS <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Nickeline Ni As	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Zircon	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Leucoxène	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ilménite FeTiO <sub>3</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Chromite FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Graphite C	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Pour mémoire : des analyses ont également été effectuées sur des déblais de forages réalisés à Plouénan (kergoz - Kerlaudy - le Rest) et Taulé (station de pompage) où la disparition brutale des nitrates avait été observée ; on y retrouve bien de la pyrite à tous les niveaux .

LABORATOIRE B.R.G.M. NANTES Date 25.06.86 Mission	Castillite	Scheelite	Tourmaline	Galho	Chabre	Or	Monazite nodules	Rutile	Zircon	Biollite	Magnétite	limonite	Granat	Staurolite	Dichroite	Andalousite	Amphibole	Epidote	Sidérite	Pyrite	AUTRES MINÉRAUX ET OBSERVATIONS
	Niobite	Wolframite	Topaze	Blende	Stibine	Mispickel	Monazite nodules	Anatase	Xénothime	Limonite	Chromite	Hématite	Apatite	Sphère	Sillimanite	Corindon	Pyroxène	Glaucophane	Barytine	Marcassite	
PLOUENAN (29N) Kergoz 5,700kg 0 - 13,50 m				tr																+	Pyromorphite tr
4,950kg 13,50 - 23,50 m				tr																X	mtr
PLOUENAN (29N) Kerlaudy SICA 0-22,50m 4,680kg	0,05						mtr					+									Cassi roulée
4,850kg 22,50 - 67 m	mtr			mtr tr																	Cassi roulée
PLOUENAN (29N) Le Rest 6,580kg 0 - 34 m							mtr		mtr									+			Pyrrho- Molybdonite tine mtr
5,900kg 34 - 67 m																					mtr
1,500kg 67 - 100 m																		+		+	mtr
PLOUESCAT (29N) Station pompage 0-34m 3,660kg							mtr														
3,860kg 34 - 67 m				mtr mtr			mtr														
4,460kg 67 - 100,80 m				mtr mtr			mtr														
TAULE (29N) Station pompage 0-28,80m 3,700kg																		+			

Légende

mtr = présence      tr = <0,03

— = <1 g

+ = entre 1 et 5 g .

X = entre 5 et 50 g

Le poids traité figure dans la colonne du prélèvement

22.4 - Activité biologique dans le sous-sol

Echantillons examinés		Activité biologique Présence de <i>Thiobacillus denitrificans</i>
FP 1	19 - 22 m	x
	22 - 25 m	x
	25 - 28 m	
FP 2	21 - 28 m	} néant
	31 - 34 m	
FP 3	28 - 31 m	
	31 - 34 m	
	34 - 37 m	
	37 - 40 m	
	40 - 43 m	
	43 - 46 m	x
	46 - 49 m	
FP 4	19 - 22 m	
	22 - 25 m	
	25 - 28 m	
	28 - 31 m	
	31 - 34 m	
	34 - 37 m	
	37 - 40 m	
	40 - 43 m	
	43 - 46 m	
	46 - 49 m	
	49 - 52 m	
	52 - 55 m	x
	55 - 64 m	
	64 - 67 m	x
67 - 69 m		
FP 5	0 - 4 m	x
	4 - 7 m	
	10 - 30 m	x
FP 6	94 - 97 m	

### COMMENTAIRES

En confrontant ces données avec les dosages  $\text{NO}_3$  qui ont pu être faits au cours de la foration (pour diverses raisons, il n'a pas été matériellement possible de les faire systématiquement tous les 3 m):

FP1 : de 22 à 28 m, la teneur en  $\text{NO}_3$  diminue de 75 à 65 mg/l. Un échantillon prélevé après réalisation du forage donne 44,2 mg/l - un autre prélèvement (24/12/85) donne 39,7 mg/l. A ces niveaux, la dénitrification semble déjà active (elle doit se poursuivre plus bas), ce qui est très cohérent avec l'activité biologique entre 19 et 25 m.

FP2 : 75 mg/l  $\text{NO}_3$  à 22 m de profondeur, 10 mg/l à 34 m. Un échantillon global donne, le 20/06/85 : 25,4 mg/l  $\text{NO}_3$ , le 24/12/85 : 32,8 mg/l. Ces données, très comparables à ce qui est observé en FP1 supposeraient une activité biologique, qui n'a pas été identifiée. Mais l'eau circule, les thiobacillus peuvent être absents de la verticale explorée par le forage tout en étant proches.

FP3 : La teneur en  $\text{NO}_3$  diminue fortement de 19 m de profondeur (79 mg/l) à 37 m (23 mg/l) ; elle reste relativement stable jusqu'à 46 m puis diminue brutalement entre 46 et 52 m. L'activité biologique identifiée entre 40 et 43 m ne se manifeste pas par une dénitrification importante, par contre il y a une très bonne cohérence entre la chute des  $\text{NO}_3$  entre 46 et 52 m et l'activité biologique entre 49 et 52 m.

FP4 : Une seule mesure de nitrates a été faite en cours de foration : à 70 m, la dénitrification est déjà quasi totale - les échantillons globaux prélevés le 26/06 et le 24/12 donnent 0,7 et 0,5 mg/l  $\text{NO}_3$ . Ceci est cohérent avec une activité biologique identifiée au-dessus de 69 m.

FP5 : En cours de foration, la dénitrification est quasi totale dès 32 m de profondeur. Les échantillons globaux donnent 0,7 mg/l le 20/06 et 0,4 mg/l le 24/12. Ceci est cohérent avec une activité située au-dessus de 32 m.

FP6 : En cours de foration, la dénitrification est déjà réalisée à 40 m de profondeur. Les échantillons globaux donnent 0,8 mg/l  $\text{NO}_3$  le 20/06 et 0,5 mg/l le 24/12. Les seuls échantillons de terrains qui ont pu être examinés (94 et 97 m) sont très en-dessous de la dénitrification active et l'absence d'activité biologique n'est pas incohérente avec le reste.

*Le sous-sol du site de Ploudaniel contient des éléments (pyrite et Thiobacillus dénitrifiants) nécessaires aux processus de dénitrification reconnus en laboratoire.*



## 22.5 - Vitesses des transferts souterrains

### 22.51 - Milieu non saturé

La pose de céramiques poreuses dans le milieu non saturé répondait à un double objectif

- évaluer le stock d'azote en cours de migration vers la nappes par l'analyse du terrain et ses différentes tranches de profondeur(cf.22;2),

- évaluer la vitesse de percolation du stock, en suivant au cours du temps, le dépalcement de pics représentatifs.

Il faut remarquer que ces deux paramètres étaient importants surtout pour l'hypothèse d'une pollution retardée, hypothèse qui a été écartée.

#### Vitesse de percolation

##### Approche indirecte

A Plouvorn (opération "Fertilisation Raisonnée et Qualité des Eaux") on a pu déterminer qu'en 1984-85, le flux de nitrates exportés par l'eau représentait 113 kg/ha/an (exprimé en N) au site de Feunteun veur et 65 kg/ha/an (exprimé en N) au site de Kervinguy.

Pour retrouver de tels flux à Ploudaniel, et compte tenu des quantités d'azote stockées dans le non saturé (quantités que l'on supposera également réparties, ce qui est inexact), il faudrait admettre des vitesses de percolation comprises entre 1,5 m/an et 4,2 m/an.

Si, à titre d'hypothèse on admet que le site B1 se rapproche des conditions de Feunteun veur et le site B2 des conditions de Kervinguy, la vitesse de percolation serait de 2,6 m/an en B1 et de 2,4 m/an en B2.

##### Approche directe

Les graphiques ci-après représentent les profils  $\text{NO}_3$  et ce aux prélèvements effectués dans les céramiques poreuses en février 1986 - février 1987 et décembre 1987 ; les concentrations en  $\text{NO}_3$  mesurées en octobre 1987 sont également notées, elles indiquent que, même pour 2 séries e prélèvements rapprochées, les valeurs peuvent être assez différentes. Les tableaux de mesures concernant tous les prélèvements sont en annexe.

Au cours du temps, on ne voit pas, comme on l'attendait, les pics de concentration se déplacer ; ils restent en place, jusqu'à ce qu'ils soient effacés par les infiltrations depuis la surface d'eau sans nitrates (il n'y a plus de fertilisation en surface).

Si les pics maximaux et minimaux restent en place, les teneurs fluctuent (surtout pour les nitrates), ce qui laisse penser qu'à la percolation lente d'ensemble s'ajoutent des circulations plus rapides, mais représentant probablement des débits et volumes limités (sinon les teneurs varieraient plus fortement).

La progression vers le bas de l'eau sans nitrates ne se fait pas régulièrement, mais par à-coups (liés aux quantités de pluies ou de pluies efficaces).

En deux années, les nitrates ont été "nettoyés", en totalité ou pour une part très importante,

sur au maximum 3,5 m en B1

sur au maximum 5 m (de -1 m à -6 m) en B2

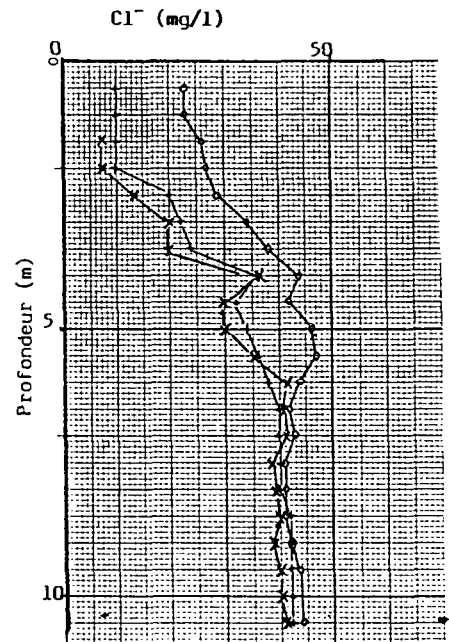
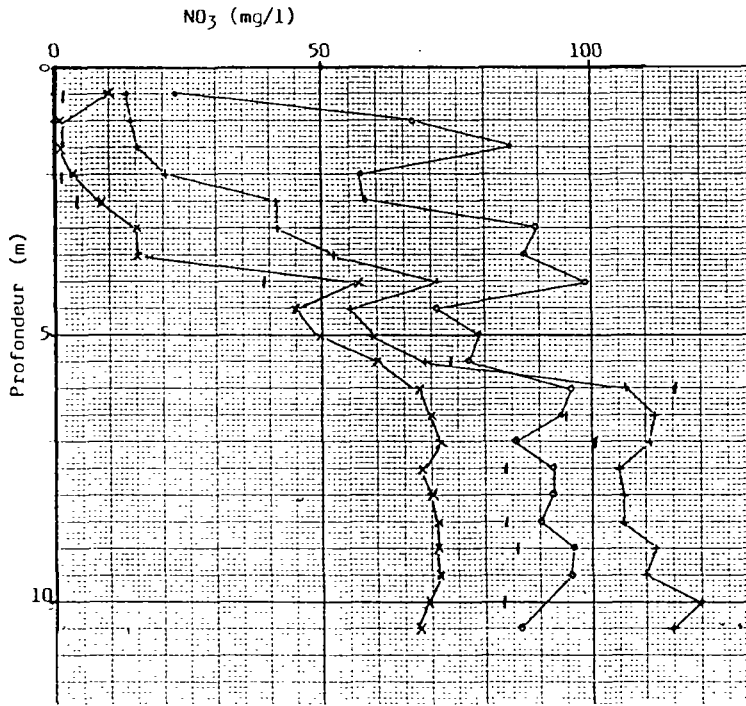
soit une vitesse moyenne de lessivage (percolation de la masse d'eau principale) de 1,75 à 2,5 m par an.

On remarque la bonne cohérence entre ces vitesses *moyennes* mesurées et les estimations indirectes que permettent les bilans réalisés à Plouvorn.

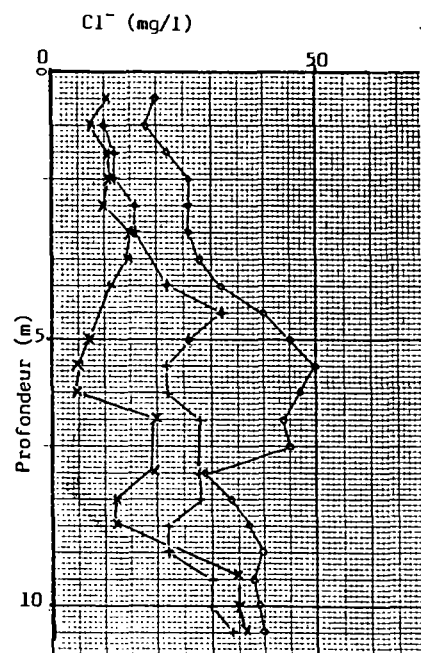
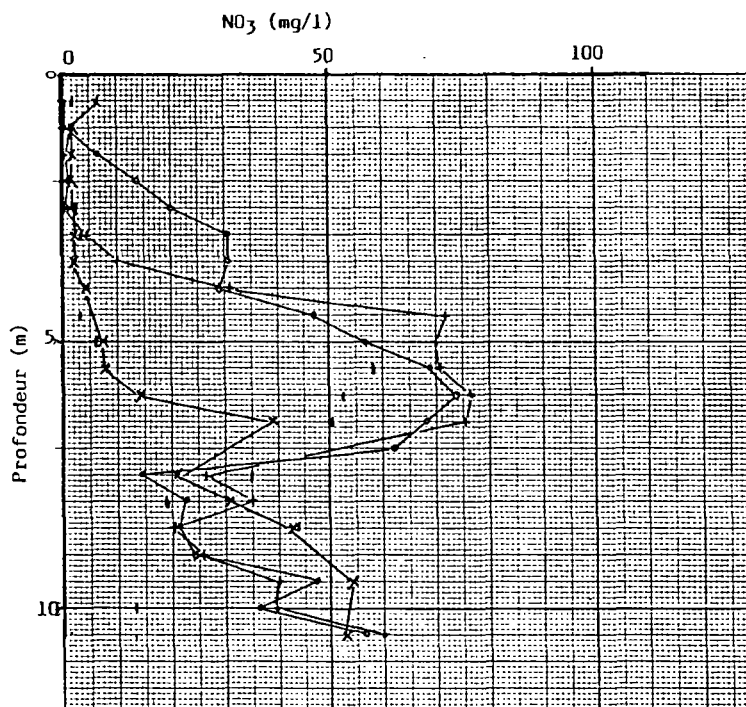
# CERAMIQUES POREUSES

- ° prélèvements de février 1986
- + prélèvements de février 1987
- | prélèvements de octobre 1987
- x prélèvements de décembre 1987

## Dispositif B1



## Dispositif B2



## 22.52 - Milieu saturé

Un multitraçage a été réalisé par la Section d'Application des Traceurs du CNGE. Lancé le 6 juin 1986, l'essai a été poursuivi pendant 4 mois ; dans les conditions de l'expérimentation (pompage constant à 14,4 m<sup>3</sup>/heure), il a permis de mettre en évidence trois catégories de circulations :

- des circulations rapides, avec des temps d'arrivée du traceur, compris entre 1 et 10 heures pour les couches de l'aquifère situées vers -70 mètres de profondeur,
- des circulations lentes, avec des temps d'arrivée du traceur, compris entre 30 et 100 heures pour les couches de l'aquifère situées entre -70 et -100 mètres de profondeur
- des circulations extrêmement lentes, voire nulles ou difficilement décelables, pour les couches de l'aquifère situées au-dessus de -55 mètres de profondeur.

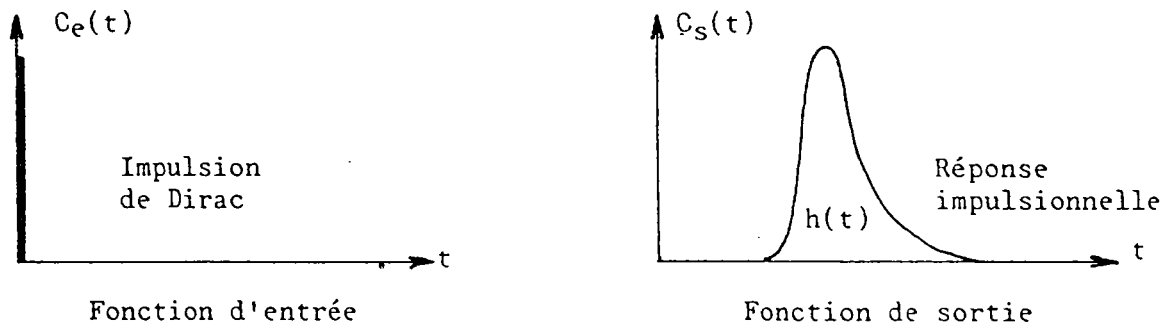
### 22.521 - Principe des mesures

La méthode consiste à observer les modalités de transfert de l'eau de différentes couches de l'aquifère vers un puits de pompage en exploitation continue.

A cet effet, l'eau de chacune des couches de l'aquifère est rendue identifiable dans l'eau pompée, par son marquage momentané avec un traceur. Ce marquage est réalisé par l'injection d'une solution de traceur au niveau de la couche étudiée, au fond d'un piézomètre foré à la profondeur de celle-ci.

Si plusieurs couches sont étudiées un multitraçage est réalisé avec des traceurs mesurables séparément.

Les informations recherchées sont données par la fonction de restitution théorique, que l'on obtiendrait si la fonction d'entrée était instantanée (impulsion Dirac). Cette fonction, appelée "Réponse impulsionnelle" caractérise les écoulements entre le piézomètre d'injection et le puits de pompage.



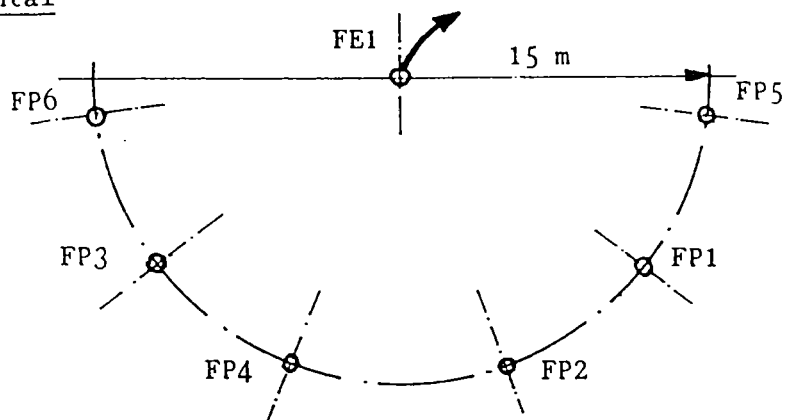
En pratique, si la durée de la fonction d'entrée est négligeable devant la durée de la fonction de sortie, cette dernière est représentative de la réponse impulsionnelle recherchée. Par contre, si la durée de la fonction d'entrée n'est pas négligeable, il devient nécessaire d'utiliser un modèle mathématique pour déterminer la fonction théorique  $h(t)$  qui convoluée à la fonction d'entrée  $C_e(t)$  donnera une fonction de sortie  $C_s(t)$  qui s'ajustera au mieux à la fonction de sortie expérimentale -  $C_s(t) = C_e(t) * h(t)$ .

### 22.522 - Conditions expérimentales

#### Localisation du site

Le site expérimental est situé en Bretagne, à 20 km au Nord-Est de Brest, à proximité de la coopérative laitière de Ploudaniel (Finistère) au Sud de Le Folgoet (Figure 1).

#### Dispositif expérimental



Le dispositif expérimental est constitué d'un puits de pompage FE1 et d'une série de six piézomètres répartis en un demi-cercle de rayon 15 mètres autour de FE1.

Le puits de pompage a une profondeur de 87,5 mètres et la pompe est implantée à 35 mètres de profondeur. Les six piézomètres sont forés à des profondeurs comprises entre 24 et 103 mètres et sont tubés sur la majeure partie de leur hauteur afin de n'intercepter que des couches particulières de l'aquifère, choisies en fonction des arrivées d'eau rencontrées lors du forage.

La répartition en demi-cercle de ces piézomètres de profondeurs différentes est appelée "dispositif en Flûte de Pan" (FP.). Les principales caractéristiques mécaniques et hydrauliques de ces forages sont regroupées dans le tableau qui suit.

Caractéristiques des forages						
Piézomètre Ø int.105	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6
Profondeur théorique (m)	24,00	35,00	55,00	73,00	69,00	103,00
Profondeur mesurée le 10/6 (m)	24,60	32,35	53,58	73,20	69,75	103,70
Longueur tubée en PVC Ø 112x125 (m)	20,00	31,00	50,00	64,00	64,00	87,50
Hauteur débitante (m)	4,60	1,35	3,58	9,20	5,75	6,20
Volume d'eau de la hauteur débitante (l)	40	11,7	31	79,6	50	53,7
Niveau piézo avant pompage le 10/6 à 11h40 (m)	10,07	10,28	10,09	9,84	9,95	9,19
Niveau piézo après stabilisation le 17/6 à 14h40 (m)	11,87	12,39	11,44	11,48	11,72	11,36
Hauteur d'eau totale (m)	12,73	19,96	42,14	61,72	58,03	92,34
Volume d'eau total (l)	110	174	365	535	502	800
Hauteur du tube extérieur (m)	0,47	0,51	0,32	0,75	0,32	0,52
Puits de pompage FE1 : . Profondeur 87,5 m . Cote de la pompe - 35 m						

## 22.523 - Réalisation des marquages

### Choix des traceurs

Les traceurs sélectionnés pour les injections multiples et simultanées réalisées dans les piézomètres sont les suivants :

- . l'iode sous forme d'iodure de sodium en solution
- . le zinc sous forme (E.D.T.A.) en solution
- . le nickel sous forme (E.D.T.A.) en solution
- . l'acide aminé G en solution
- . le cérium (E.D.T.A.) en solution
- . la rhodamine Wt en solution

### Injections des traceurs

Chacun des six traceurs sélectionnés a été injecté dans un des six piézomètres de la "flûte de Pan", le 11/6/1986 entre 9h et 10h15, alors que le niveau du rabattement créé par le pompage était à + 5 % du niveau de stabilisation final.

Les injections ont été réalisées avec une pompe péristaltique et un tuyau vinyl descendu dans la zone non tubée des piézomètres.

Pour chaque injection, le traceur était dilué dans 5 litres d'eau, puis le récipient et le système d'injection étaient rincés avec environ 8 litres d'eau propre.

Les masses de l'élément ou du composé dosé au laboratoire, les quantités du produit injecté et les dates d'injection, sont collectées dans le tableau 2 .

Par ailleurs, au vu de la lenteur de la disparition des traceurs injectés dans FP1 et FP2 et de l'insuffisance des quantités injectées qui en découle pour qu'il soit possible de déceler quelque relation entre ces piézomètres et le puits de pompage, il a été décidé de renouveler les injections dans FP1 et FP2 avec des traceurs différents et des masses plus grandes.

L'une a eu lieu le 19/6/1986 à 18h dans FP1 avec 2 kg d'iodure de sodium, contenant 1,7 kg d'iode. L'autre a eu lieu le 10/7/1986 à 11h dans FP2 avec 50 g d' amino G-acid.

- Traceurs injectés dans les piézomètres				
Piézomètre	Date et Heure d'injection	Traceur	Masse de l'élément dosé	Masse du composé
FP1	11/6 - 9h	Nickel (EDTA)	5,5 g	50 g
	19/6 - 18h	Iode INa	1700 g	2000 g
FP2	11/6 - 9h15	Cérium (EDTA)	100 g	100 g
	10/7 - 11h	Amino G-acid	50 g	50 g
FP3	11/6 - 9h30	Zinc (EDTA)	286 g	2000 g
FP4	11/6 - 9h45	Rhodamine Wt	50 ml	50 ml
FP5	11/6 - 10h	Amino G-acid	10 g	10 g
FP6	11/6 - 10h15	Iode INa	850 g	1000 g

## 22.524 - Résultats des marquages

### Débits de disparition des traceurs dans les piézomètres

#### Principe de la mesure

Lorsqu'un traceur, de l'eau, est injecté dans un forage et qu'il est homogénéisé en permanence dans celui-ci, sa fonction de disparition due aux écoulements souterrains, suit une loi exponentielle de la forme :

$$C = C_0 \cdot e^{-a \cdot t}$$

où C = concentration à un instant t

C<sub>0</sub> = concentration origine (t = 0)



Le terme  $\alpha$  prend en compte la vitesse  $V_i$  et la géométrie  $S/V$  de l'écoulement observé :  $\alpha = \frac{V_i \times S}{V}$  avec :

$V$  : volume d'eau contenu dans le tronçon de piézomètre ou le traceur est homogénéisé

$S$  : la section de l'écoulement interceptée par le tronçon débitant du piézomètre

En général  $S = D \cdot \epsilon \cdot H$  avec :

$D$  : diamètre du forage

$H$  : hauteur du tronçon débitant

$\epsilon$  : un terme correctif de  $D$ , égal à 2 lorsque le forage n'est pas équipé de tube crépiné et que le milieu est homogène ; (il peut être inférieur à 1 dans le cas d'une fracture)

Le produit  $V_i \times S$  représente le débit  $Q$  de l'écoulement dans le tronçon débitant et par suite  $\alpha = \frac{V_i \times S}{V} = \frac{Q}{V} = \frac{1}{\tau}$

$\tau = \frac{V}{Q}$  étant le temps de séjour moyen du traceur dans le forage.

En pratique, on détermine  $\tau$  à partir de la fonction de disparition observée, et, connaissant  $V$  on en déduit  $Q$  et éventuellement  $V_i$ .

Il convient de tenir compte de ce qu'une partie de l'évolution de la concentration provient d'une part, de l'homogénéisation progressive du traceur sur toute la hauteur mouillée du forage, d'autre part, d'une perte de traceur dans le volume de 1,15 litre soutiré à chaque prélèvement.

Cependant, la pondération de  $Q$  par la hauteur non tubée  $H$  des piézomètres risque de donner des valeurs de  $V_i$  (vitesse résultante des écoulements naturels et du pompage) non représentatives de la réalité qui nous occupe. En particulier,

-  $V_i$  est une vitesse apparente. La vitesse réelle dépend de la porosité cinématique  $m_e$  ; pour  $m_e = 10\%$  ou  $1\%$ , la vitesse réelle est 10 fois ou 100 fois supérieure à la vitesse apparente,

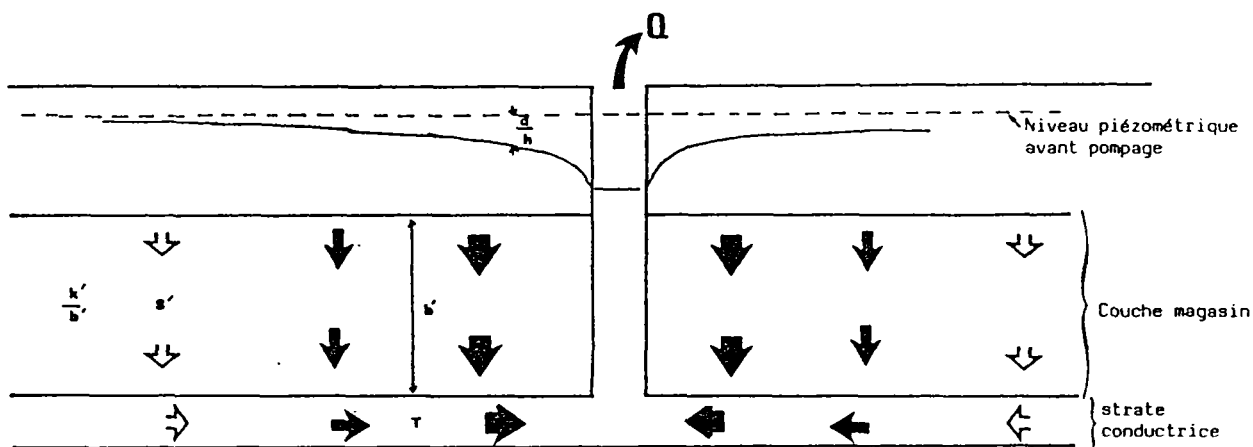
- toutes choses égales par ailleurs, la vitesse dépend directement du gradient hydraulique, proche ici de  $40\%$ . En écoulement naturel (ou suffisamment loin de l'influence directe d'un pompage), le gradient hydraulique est facilement 10 à 50 fois plus faible, les vitesses y sont donc également 10 à 50 fois plus faibles.

Les deux remarques précédentes vont dans le sens d'une compensation, toutefois, les résultats qui suivent, concernant  $V_i$  ne sont donnés qu'à titre indicatif, en tant qu'ordre de grandeur.

N° du piézomètre	Q débit de disparition	$V_i$
FP1	4 l/j	$0,83 \cdot 10^{-2}$ m/j
FP2	18,7 l/j	-0,132 m/j
FP3	1,46 l/j	$0,388 \cdot 10^{-2}$ m/j
FP4	68 l/j	$7 \cdot 10^{-2}$ m/j
FP5	8600 l/j	14,2 m/j
FP6	48 l/j	$7,37 \cdot 10^{-2}$ m/j

Il est intéressant de noter que si PF4 et FP5 sont directement "branchés" sur le forage pompé, l'écoulement observé à FP6 est une composition de l'effet du pompage et des écoulements naturels de la nappe.

Le modèle hydraulique retenu pour schématiser l'aquifère de Ploudaniel est très simplifié :



Site de Ploudaniel  $\sigma = 3 \text{ à } 5 \cdot 10^{-7}$   
 $s' = 2 \cdot 10^{-4} \text{ à } 1 \cdot 10^{-3}$   
 $\tau = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

Dans la réalité, des conducteurs d'importances diverses peuvent exister, et existent, à tous les niveaux, en communication directe ou non avec le conducteur principal capté. Ainsi, FP4 intercepte un conducteur à faible débit qui débouche directement sur la strate captée. A l'inverse, FP6 intercepte un conducteur important (débit instantané,  $26 \text{ m}^3/\text{h}$  à  $97 \text{ m}$ ) qui, bien que très proche, n'est pas en communication directe avec la strate principale captée par F.E.

#### Restitution des traceurs dans le puits de pompage

Les fonctions concentration-temps de restitution des traceurs dans FE1 sont tracées à partir des mesures de leurs concentrations, faites en laboratoire, sur des échantillons d'eau prélevés régulièrement sur un piquage aménagé à la sortie du forage.

La collecte de ces échantillons d'eau s'est faite, automatiquement, à l'aide d'un préleveur automatique, durant le premier mois d'observation, puis manuellement, deux fois par semaine, durant les mois de juillet, août et septembre 1986.

Une interruption de cet échantillonnage a eu lieu, sans graves conséquences, entre le 14/6 vers 15h et le 17/6 à 12h, à la suite de la fermeture de la vanne de sortie du piquage.

Les principales caractéristiques des réponses impulsionnelles et les taux de restitution des traceurs des fonctions expérimentales sont collectés dans le tableau ci-après

- Caractéristiques des réponses impulsionnelles et taux de restitution des traceurs					
Piézomètre	Traceur	Temps d'arrivée (h)	Sommet (h)	Centre de gravité (h)	Taux de restitution (%)
FP6	Iode	38	190	430	76*
FP5	Amino G-Acid	1	8,6	26	37
				74	75
FP4	Rhodamine Wt	14	59	74	2,8
		90	150	470	30
FP3	Zinc (EDTA)	-	-	-	0
FP2	Cerium(EDTA)	-	-	-	0
	Amino G-acid	-	-	-	0
FP1	Nickel(EDTA)	-	-	-	0
	Iode	1000 à 1300 ?	-	-	-

\* sous la courbe lissée et 96 % sous la courbe expérimentale

On notera que FP4 et probablement FP5 montrent un double système de circulations. L'absence de signal provenant de FP2 peut être attribué à

- une absence de relation entre FP2 et FE1
- une relation par des écoulements très lents (temps d'arrivée supérieur à 3 mois)
- une interaction avec le milieu, en particulier avec les hydroxydes de fer.

L'absence de signal provenant de FP3 est cohérent avec la vitesse de disparition très faible (1,46 l/j).

*En résumé, les vitesses de disparition dans les horizons saturés supérieurs, malgré des incertitudes, sont cohérentes avec les indications fournies par les céramiques. Les temps de parcours, sauf pour les communications les plus directes (FP5, 1ère arrivée pour FP6 et FP4) sont supérieures à 50 heures, dans ces conditions très accélérées par le pompage. Un temps de parcours de 1000 à 1300 heures (arrivée depuis FP1) est sans aucun doute plus conforme à ce qui se passe à proximité immédiate d'un captage. Si on considère une distance 10 fois plus grande (150 m au lieu de 15 m), l'eau qui se trouve*

vers le sommet de la nappe mettra plus de 10 fois plus de temps (plus de 10 000 à 13 000 heures) pour arriver à la pompe. Les travaux de laboratoire ont montré que la dénitrification était totale pour un temps de contact de 50 à 100 heures seulement.

## 22.6 - COMPOSITION DE L'EAU DANS LES ELEMENTS DE LA FLUTE DE PAN

La Flûte de Pan n'est pas une colonne de laboratoire : le matériel n'y est pas homogène, les circulations y sont complexes, le flux d'azote n'y est pas constant ; en particulier, l'eau qui sort aujourd'hui sans nitrates, on ignore ce qu'était sa concentration initiale. Par ailleurs, on sait que même en FP1, la dénitrification est déjà présente. Cependant, si les deux outils ne sont pas identiques, les informations qu'ils fournissent doivent être comparables.

Dans le tableau qui suit sont regroupés les "indicateurs de dénitrification":

NO <sub>3</sub> mg/l	NO <sub>2</sub> mg/l
SO <sub>4</sub> mg/l	Fe mg/l

pour les 11 séries de prélèvements effectués (analyses par ENSP). La mention 0 (zéro), signifie une teneur inférieure au seuil de détection (0,01 mg/l pour NO<sub>2</sub>, 0,5 ou 1 mg/l pour NO<sub>3</sub>).

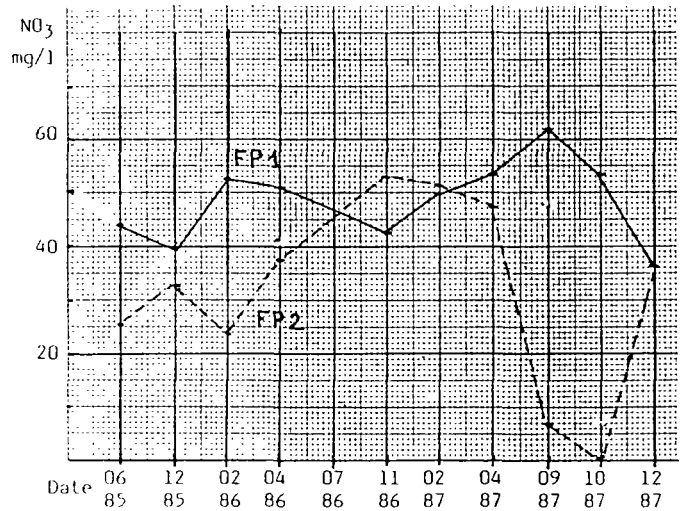
On constate :

- la dénitrification est complète en FP3 les 21.6.85, 24.12.85, 30.4.86, 9.7.86, 10.9.87 et 27.10.87. Le 24.2.86 elle n'est complète que en FP4. Elle ne semble pas parfaitement achevée au niveau de FP3 les 21.11.86, 6.2, 20.4 et 16.12.87.

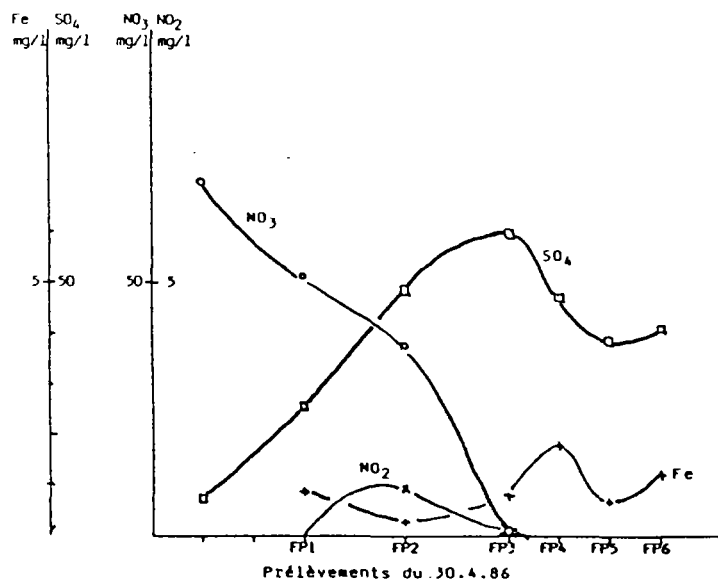
Date prélèvt N° FP	21.6.85	24.12.85	24.2.86	30.4.86	9.7.86	21.11.86	6.2.87	20.4.87	10.9.87	27.10.87	16.12.87
FP 1	44,2 0,32 24	39,7 0,25 28	52,6 0,04 20 0,35	51 0 24 0,87		42,5 0,15 33 0,73	50 0 20 0,45	53,7 0 23 0,4	62 0 31 0	53,5 0,02 22 0,12	36,5 0,02 28 0,06
FP 2	25,4 0,25 40	32,8 0,85 41	23,7 0,07 61 0,26	37,5 0,95 49 0,23		53 0,05 30 0,25	51,6 0,02 47 0,4	47,5 0 50 0,6	7 0 81 0	0 0 40 5,5	36,5 0 42 0,05
FP 3	0,5 0 17	0,6 0,02 42	31,4 0 28 2,5	0,5 0,01 60 0,77	0 0 60 0,5	1,6 0,24 65 0,25	1,6 0 53 1	1,3 0 56 0,85	0 0 62 0,2	0 0 60 0,55	1 0 59 0,45
FP 4	0,7 0 48	0,5 0 50	0 0 50 3,5	0 0 47 1,8	0 0 38 2,95	0,5 0 51 2,65	0 0 50 6,25	0,3 0 53 13	0 0 63 0,15	0 0 68 0,4	0 0 59 1,3
FP 5	0,7 0 43	0,4 0 41	0 0 38 3	0,5 0,01 39 0,62	0 0 43 5,4	3,4 0,02 41 6,8	0 0 48 15	0,2 0 54 2,6	0 0 58 1,05	0 0 60 2,6	0 0 56 2,9
FP 6	0,8 0,01 54	0,5 0 45	0 0 43 2,6	0 0 43 1,18	0 0,48 48 3,9	0,6 0,05 58 9,8	0 0 56 12,5	0,2 0 64 8,8	0 0 66 1,45	0 0 68 2,1	0 0 65 2,9
FE	1,8 0,05 47 2,2				0 0,01 44 4,15	5 0,02 53 2,8	0 0 49 6,75	0,8 0 51 4,8	0 0 53 5,1	0 0 56 5,3	0 0 50 5,8

- Les teneurs en  $\text{NO}_3$  dans FP1 et FP2 varient fortement. L'évolution semble cyclique, encore que sans relations apparentes avec les saisons, et symétriquement opposée dans les deux ouvrages.

Il y a probablement un lien entre ces variations et l'augmentation du flux de nitrates à traiter venant des horizons supérieurs ; des fluctuations d'un ou plusieurs paramètres influant sur la réaction peuvent également intervenir (?)



Malgré le manque d'homogénéité du terrain, le fait que les divers éléments de la flûte de Pan n'interceptent pas une même ligne de courant, l'instrument fournit des valeurs permettant de construire des profils très comparables (plus ou moins selon la série de prélèvements considérée) aux profils issus des colonnes ou du pilote de laboratoire, comme en témoigne l'exemple suivant.

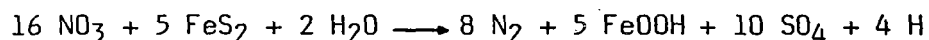


Il serait souhaitable que, profitant des installations en place (flûte de Pan et céramiques), les observations et mesures soient poursuivies, pour savoir comment va évoluer le système et s'il ne va pas montrer de modifications défavorables. Dans l'état actuel des connaissances, le laboratoire et le terrain se rejoignent de façon tout-à-fait satisfaisante, leurs données et résultats convergent de façon apparemment très significative, et on peut admettre la réalité de la dénitrification naturelle, par réaction entre la pyrite et les nitrates, facilitée et amplifiée par *Thiobacillus dénitrificans*. Cette dénitrification existe à Ploudaniel et, par extension, aux autres sites où on a pu reconnaître en cours de foration les variations de concentration des  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Fe et  $\text{NO}_2$  que l'on peut considérer comme représentatives.

Quelles peuvent être les conséquences des phénomènes de dénitrification naturelle pour les exploitants, peut-on estimer la durée de vie du processus, existe-t-il - ou peut-on mettre au point - des méthodes pour prévoir les secteurs où il y a dénitrification en profondeur ?



3 - CONSEQUENCES DE LA  
DENITRIFICATION NATURELLE



### 31 - Consommation et production de matière

Sans tenir compte de l'évolution de la bio-masse, la dénitrification d'une eau à 80 mg/l  $\text{NO}_3$  consomme 48 mg de pyrite par litre d'eau traité, produit 77 mg  $\text{SO}_4$  et 36 mg FeOOH. Une partie du fer est évacuée avec l'eau pompée (3 mg/l), environ 34 mg FeOOH doit précipiter dans le terrain.

Pour une exploitation de 1 000 m<sup>3</sup>/jour (300 000 m<sup>3</sup>/an), la dénitrification naturelle de l'eau initialement à 80 mg/l  $\text{NO}_3$  consomme, par an, 14,4 tonnes, soit environ 3 m<sup>3</sup> de pyrite.

Le volume de terrain intéressé peut être estimé à 50 millions de m<sup>3</sup> (1 km<sup>2</sup> x 50 m d'épaisseur) ; le volume des vides supplémentaires créés est négligeable.

Pendant la même durée, environ 10 tonnes de FeOOH précipitent dans le terrain, par exemple sous forme de limonite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) de densité moyenne 3,8, soit environ 2,6 m<sup>3</sup> (sans tenir compte d'un certain foisonnement probable).

### 32 - Hypothèse de durée de vie du réacteur naturel

Si on suppose que le réservoir aquifère de 50 millions de m<sup>3</sup> de terrain a une teneur moyenne en pyrite comprise entre 0,01 et 0,1 g par kg, le réservoir, à une densité de l'ordre de 2,7 pèse 135 millions de tonnes et contient 1350 à 13500 tonnes de pyrite, soit, pour une consommation annuelle de 14,4 tonnes, de quoi fonctionner 94 à 940 ans.

Ceci n'est bien entendu qu'une approximation très grossière, il serait certainement très important de pouvoir estimer la teneur en pyrite du sous-sol de Ploudaniel.

Il est par ailleurs certain que le rendement de la réaction de dénitrification diminuera bien avant que la totalité de la pyrite soit consommée. Sans pouvoir mieux préciser, il est raisonnable de penser que le réacteur naturel de Ploudaniel peut fonctionner plusieurs décennies. Dans des conditions d'aquifère moins étendu et de pyrite moins abondante, la durée de vie de la dénitrification naturelle peut être sensiblement plus courte.

### 33 - Conséquences pour les forages d'exploitation

La précipitation du  $FeOOH$  produit n'est pas instantanée, il reste un certain temps sous forme dissoute, puis sous forme de particules en suspension avant de sédimenter ; l'eau qui le contient se déplace, d'autant plus vite qu'on est près du forage en pompage. On pourrait alors avoir une tendance au dépôt, donc au colmatage, d'autant plus marquée qu'on se trouve près du forage. Dans le cas de Ploudaniel, où cinq forages sont en exploitation depuis 3,5 ans (FC1 et FC2) ou 2 ans (FE1, FE2, FE3), il serait important de vérifier périodiquement l'état des ouvrages et le comparer à l'état initial.

### 34 - Conséquences pour les aquifères

La reprécipitation du fer dans le sous-sol est mal connue. Si elle produit effectivement un colmatage, cela conduirait à une limitation du rôle tampon de régulateur joué par les réservoirs aquifères. Le régime des cours d'eau (de certains d'entre eux) pourrait alors se trouver modifié, avec une aggravation des crues et des étiages.

### 35 - Conséquences sur la lutte pour la restauration de la qualité des eaux

Compte tenu des délais nécessaires (cf. les vitesses des écoulements souterrains dans les horizons non saturés et dans la nappe) pour que les mesures, qui restent à prendre, sur les sources de pollutions diffuses aient un effet sensible sur la qualité des eaux, il paraît évident que les secteurs "dénitrifiants" où l'eau souterraine est exploitable devraient être systématiquement recherchés, au moins dans les zones où la distribution d'eau potable est compromise. Certes, la dénitrification naturelle est un phénomène temporaire, mais qui doit laisser une marge de manoeuvre suffisamment longue pour agir sur les sources de pollutions et recueillir le bénéfice de ces actions, sans traitements lourds de l'eau ni transferts coûteux depuis des bassins qui, après tout, sont peut-être eux mêmes menacés.

En effet, il convient d'attirer l'attention sur des possibilités, à long terme, d'effets pervers dus à la dénitrification naturelle :

- la dénitrification naturelle en sous-sol est une réalité, elle consomme la pyrite qui lui permet d'exister,

- sans qu'on ait plus de détails sur la composition de leurs eaux, on sait que de très nombreux forages réalisés en Bretagne (plus de 1 sur 2) présentent des excès de fer lequel est produit essentiellement par les réactions de dénitrification. On peut en conclure que la dénitrification naturelle est probablement un phénomène banal (sans préjuger des volumes et débits ainsi traités),

- une part importante (jusqu'à la totalité comme il a été démontré sur les schistes de Plouvorn) de l'eau superficielle a eu précédemment un trajet souterrain - qui introduit un décalage important (plusieurs années) entre, par exemple, les pratiques agricoles à l'origine des pollutions diffuses, et leurs effets dans les cours d'eau. Toutes choses égales par ailleurs, les trajets souterrains peuvent être plus près de la surface (hautes eaux), où ils ne peuvent rencontrer de conditions dénitrifiantes, ou plus profonds (étiage), où ils peuvent traverser des secteurs dénitrifiants.

Il est clair que les cours d'eau sont alimentés, dans des proportions non connues et certainement très variables, par de l'eau sans nitrates. Ceci peut entraîner une estimation erronée de la situation actuelle, ainsi qu'une hiérarchisation faussée des mesures à préconiser. Toute mesure se traduisant par une limitation des excédants d'azote va dans le sens de la restauration de la qualité de l'eau, mais la nécessité d'apporter le moins d'entraves possibles à l'économie des activités agricoles oblige à cadrer au mieux les actions les plus intéressantes à entreprendre.

Deux types de distorsions doivent être craints, provoqués par les apports d'eau naturellement dénitrifiée au débit des cours d'eau

- une sous estimation globale des excès d'azote sur certains bassins versants dont la qualité actuellement bonne ou correcte de l'eau n'est en réalité maintenue dans cet état que par les effets de la dénitrification (laquelle, rappelons le, est forcément *temporaire*). De tels bassins, jugés en "bonne santé" ne feraient alors pas l'objet de mesures particulières de restauration de la qualité de l'eau ; on pourrait même envisager d'y redéployer des activités trop concentrées ailleurs,

- une appréciation erronée des causes de variations cycliques des teneurs en nitrates dans les cours d'eau (augmentation en hiver, diminution en étiage) qui, corrélées faussement à certaines pratiques agricoles alors qu'elles sont dues à des abattements estivaux provoqués par le poids relatif, plus important en étiage, de l'eau dénitrifiée, pourraient conduire à préconiser des ensembles de mesures qui se révéleraient peu efficaces.

Ces problèmes, posés par la dénitrification naturelle en sous-sol sont inquiétants pour l'avenir de l'économie agricole. Il paraît nécessaire de chercher à en mesurer le poids et l'importance réelle.

Il conviendrait pour cela de retenir quelques bassins versants, classés en fonction des probabilités que les phénomènes de dénitrification naturelle existent sur leurs territoires et en fonction des contrôles qui y existent déjà (stations de jaugeage, analyses chimiques fréquentes).

La décomposition des hydrogrammes permettrait de définir la part des écoulements souterrains "profonds" participant aux débits ; l'analyse des variations saisonnières des nitrates et sulfates, complétée par des dosages isotopiques ( $\delta^{15}\text{N}$ ) et comparés à l'état de la nappe en cours de migration (qualité de l'eau des forages existants) permettraient d'apprécier à la fois le poids de la dénitrification naturelle sur la qualité globale de l'eau et ce qui se passera lorsque, faute de pyrite, les réactions auront cessé de fonctionner.

#### 4 - DETECTION DES SECTEURS DENITRIFIANTS

## 41 - A partir des forages existants

### 41.1 - Cas du secteur de Plouénan

Cette démarche a précédé les recherches d'eau souterraine de bonne qualité réalisées ensuite pour le compte du Syndicat Mixte de distribution de l'Horn. A l'époque (fin 1984), la dénitrification naturelle n'était que pressentie, son mécanisme n'était pas connu, on constatait simplement qu'il paraissait exister une incompatibilité entre  $\text{NO}_3^-$  et Fe dans les eaux souterraines.

78 forages existants, d'une profondeur moyenne de 40,2 m ont fait l'objet d'analyses (Fe,  $\text{NO}_3^-$ ).

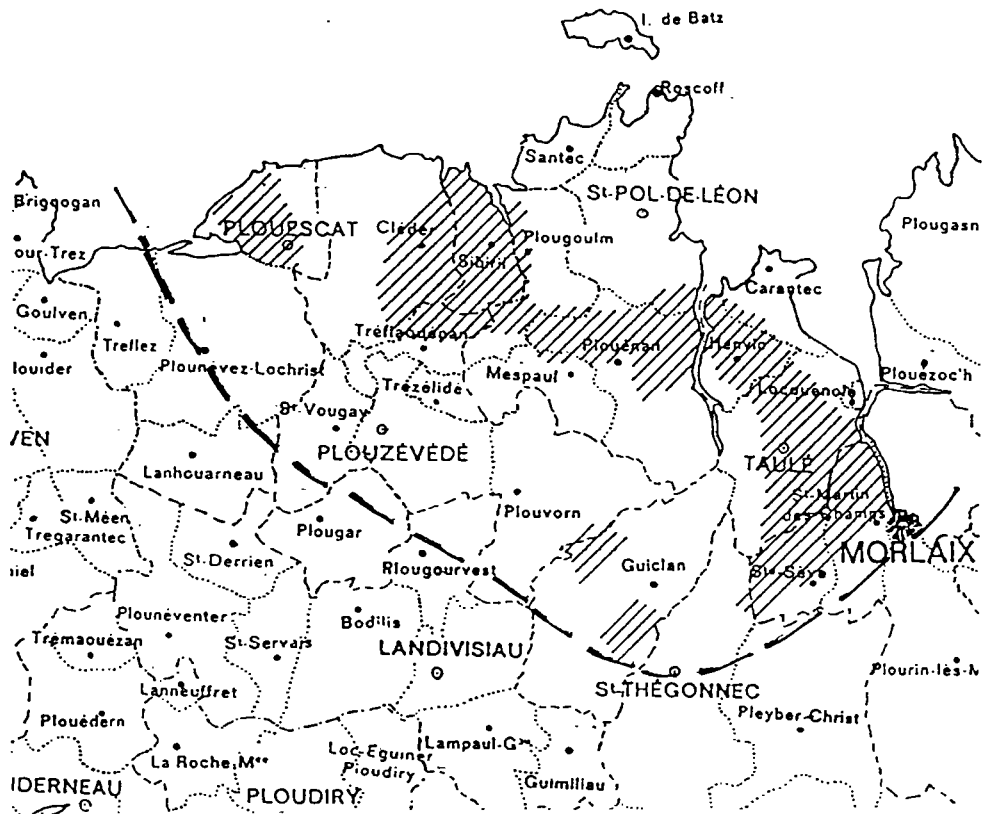
22 de ces ouvrages ont des teneurs en  $\text{NO}_3^-$  inférieures à 50 mg/l (dont 10 < 25 mg/l), sur ces 22 ouvrages, 14 présentent des teneurs en fer supérieures à 0,1 mg/l.

56 forages ont des teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/l (dont 30 > 100 mg/l) ; sur ces 56 ouvrages, 7 seulement ont des teneurs en fer supérieures à 0,1 mg/l.

En reportant ces résultats sur cartes, il est apparu que les faibles teneurs n'étaient pas dispersées, mais regroupées en zones assez étendues, aux contours forcément flous et très imprécis. Tous les forages échantillonnés à l'intérieur de ces zones ont des concentrations en nitrates inférieures à 50 mg/l (inférieures à 25 mg/l pour certains). Tous les forages échantillonnés à l'extérieur de ces zones ont des concentrations en nitrates supérieures à 50 ou 100 mg/l.

Neuf sondages de reconnaissances ont été réalisés dans ces zones *présümées saines en profondeur* - d'une profondeur moyenne voisine de 100 m, huit d'entre eux (à Taulé, Henvic, Plouenan) ont effectivement trouvé de l'eau dénitrifiée en profondeur. Un échec a été rencontré (Cléder, sondage de 100 m de profondeur, 123 mg/l  $\text{NO}_3^-$  dans l'eau).

LOCALISATION DE LA ZONE PRESUMEE SAINNE EN  
PROFONDEUR



#### 41.2 - Cas du secteur de Ploudalmézeau

Une démarche comparable, sur financement B.R.G.M., a été tentée en 1954 étant cette fois dosé, dans la région de Ploudalmézeau.

26 forages de particuliers ont été examinés, pour lesquels on ne connaît pas l'évolution des teneurs en  $\text{NO}_3$  avec la profondeur ; la profondeur moyenne est de 28 m (extrêmes : 10 m et 60 m) ; les teneurs en nitrates varient de 18 à 145 mg/l  $\text{NO}_3$  ; seuls 4 forages ont des teneurs inférieures à 50 mg/l. Peut-on en conclure que les phénomènes de dénitrification sont très rares autour de Ploudalmézeau ? En fait

- les forages de Ploudalmézeau sont peu profonds (11,5 m de moins que dans la région de Plouénan - st Pol de Léon), ils ont été arrêtés dès que l'objectif fixé au foreur était atteint (le plus souvent, l'obtention d'un débit instantané de 3 à 5  $\text{m}^3$ /heure)



- lorsqu'elle existe, la dénitrification se réalise à une certaine profondeur : le plus souvent semble-t-il entre 20 et 50 m. Si on suppose pour simplifier (une telle simplification est certainement très proche de la vérité dans de nombreux cas), qu'un forage a rencontré 2 venues d'eau : une venue d'eau "supérieure" de 2 m<sup>3</sup>/h à 105 mg/l NO<sub>3</sub> et une venue d'eau inférieure complètement dénitrifiée (0 mg/l NO<sub>3</sub>) de 1 m<sup>3</sup>/h, globalement on dispose de 3 m<sup>3</sup>/h à la teneur moyenne de 70 mg/l NO<sub>3</sub>.

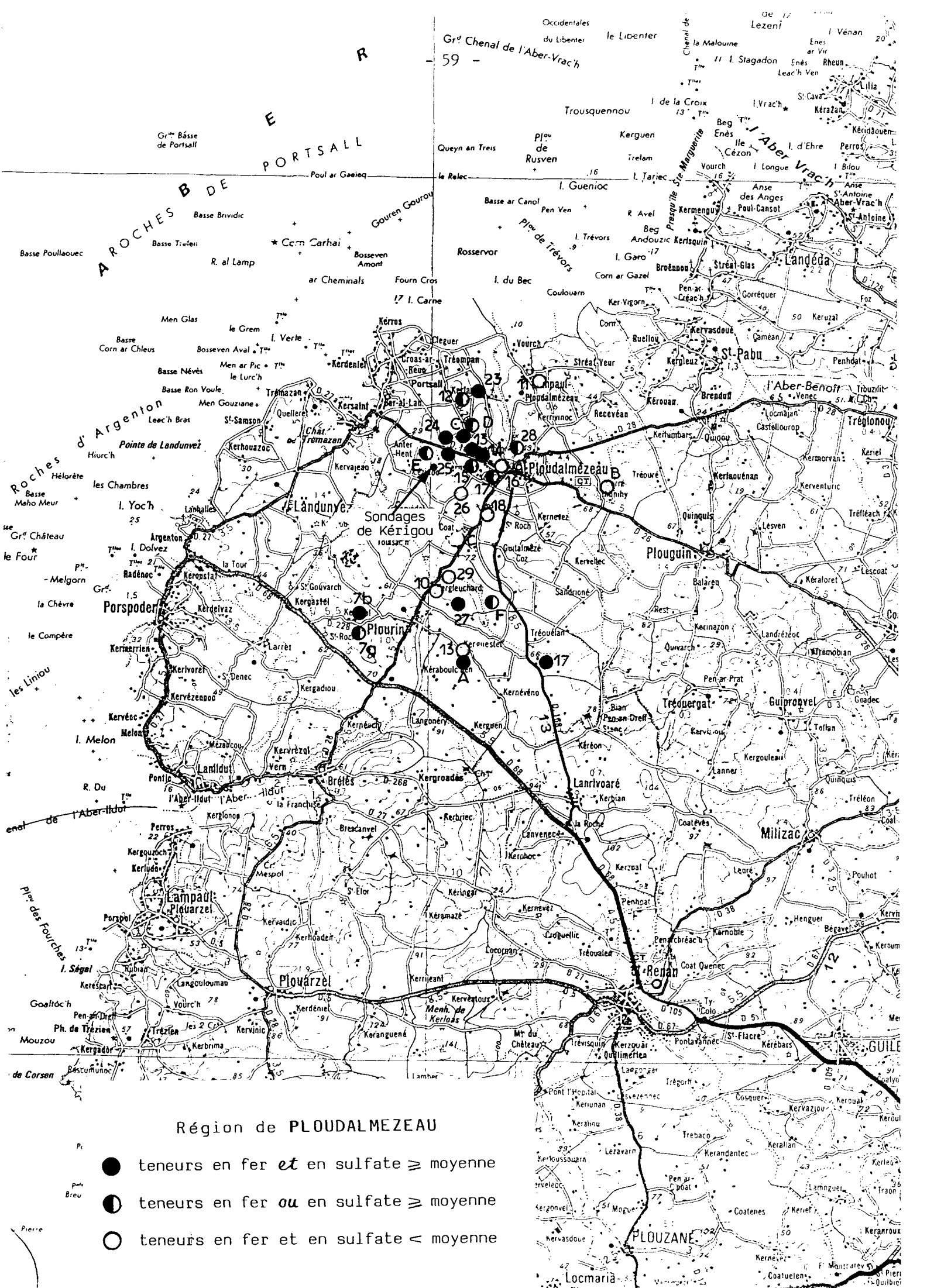
Considérant que, pour des forages peu profonds, la seule concentration n'était pas représentative d'une dénitrification qui pouvait n'être qu'amorcée à la profondeur atteinte, on a cherché l'existence d'autres indices. Compte tenu de ce que l'on sait des réactions, on peut penser qu'une dénitrification amorcée ou n'affectant qu'une partie des venues d'eau doit se manifester par des teneurs en fer et en sulfates "anormales".

En définissant arbitrairement la limite entre les concentrations "normales" et "anormales" comme étant la valeur médiane observée localement (0,08 mg/l pour Fe, 44 mg/l pour SO<sub>4</sub>), on subdivise les 26 forages examinés à Ploudalmézeau, en trois groupes

*Premier groupe* - 10 forages à double critère (ronds noirs sur l'extrait de carte) : Fe  $\geq$  0,08 mg/l et SO<sub>4</sub>  $\geq$  44 mg/l. On remarque que les 4 forages à moins de 50 mg/l NO<sub>3</sub> sont dans ce groupe.

Profondeur m	NO <sub>3</sub> mg/l	Fe mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l
41	101	0,08	44
20	43	0,12	45
47	77	0,38	65
20	18	0,08	60
28	44	1,6	68
20	81	0,11	55
20	34	0,12	49
20	123	0,09	44
60	77	0,08	44
27	53	0,15	45

A priori, il y a de bonnes probabilités pour que les zones où ont été réalisés ces forages soient *dénitrifiantes* ; des venues d'eau plus profondes - dans la mesure où elles peuvent exister - seraient très probablement en mesure de diluer les fortes concentrations des venues d'eau peu profondes (qui, à l'exploitation, devraient de toute façon être isolées par cimentation des annulaires).



Région de PLOUDALMEZEAU

- teneurs en fer *et* en sulfate  $\geq$  moyenne
- ◐ teneurs en fer *ou* en sulfate  $\geq$  moyenne
- teneurs en fer et en sulfate  $<$  moyenne

Pi.  
Brev.  
Pierre

*Deuxième groupe* - 8 forages à critère unique (ronds demi-noirs sur l'extrait de carte) :  $Fe \geq 0,08$  mg/l ou  $SO_4 \geq 44$  mg/l.

Profondeur m	NO <sub>3</sub> mg/l	Fe mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l
30	84	0,06	65
40	61	0,83	34
37	75	0,06	48
20	60	0,03	100
32	77	0,09	20
17	57	0,04	48
10	51	0,08	37
32	73	0,04	71

Il est possible que les secteurs où sont implantés ces forages soient également "dénitrifiants" en profondeur ; les probabilités paraissent moins fortes que pour les forages du premier groupe. On remarquera cependant que les ouvrages des premier et deuxième groupe sont géographiquement groupés.

*Troisième groupe* - 8 forages sans indice (ronds blancs de l'extrait de carte):  $Fe < 0,08$  mg/l et  $SO_4 < 44$  mg/l.

Profondeur m	NO <sub>3</sub> mg/l	Fe mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l
20	55	0,05	41
35	84	0,06	30
20	64	0,05	38
20	79	0,06	30
25	51	0,06	39
16	75	0,05	23
32	78	0,06	13
29	145	0,04	43

Avec les critères que l'on s'est défini en choisissant les seuils de normalité, ces ouvrages ne montrent aucun indice de dénitrification naturelle en profondeur. Tout semble se passer comme si - cf. extrait de carte - deux zones présumées saines en profondeur existaient, l'une à l'W et N.W. de Ploudalmézeau, l'autre au S (Plourin), avec entre elles, une assez large bande de terrain sans présomption que l'on puisse trouver de l'eau de bonne qualité en profondeur.

Cependant, en restant dans le domaine des hypothèses, si on considère les valeurs moyennes :

	Forages 1er groupe	Forages 2ème groupe	Forages 3ème groupe
Profondeur moyenne m	30,3	28,5	24,4
NO <sub>3</sub> mg/l concentration moyenne	64	67	79

On constate une parallélisme certain entre les profondeurs et les concentrations laissant supposer que tout le secteur de Ploudalmézeau-Plourin pourrait être dénitrifiant, le paramètre limitant étant la profondeur des forages.

Le parallélisme ci-dessus peut également n'être qu'une apparence et résulter d'une coïncidence. Aussi bien, ce qui précède ne constitue pas une démonstration, mais la recherche d'indications, d'indices, susceptibles d'augmenter les chances de trouver de l'eau de bonne qualité en profondeur. Dans le secteur de Ploudalmézeau-Plourin, dans l'état actuel des connaissances, on peut raisonnablement penser que de l'eau naturellement dénitrifiée existe en profondeur ; les présomptions sont fortes au Nord et Nord-Ouest de Ploudalmézeau, ainsi qu'au Sud (Plourin) tandis que dans la zone intermédiaire, les indices sont plus ténus.

Deux sondages de reconnaissance, suivis par un forage et un pompage d'essai d'un mois réalisés à Kérigou en Ploudalmézeau (réalisation antérieure à cet inventaire) ont effectivement trouvé de l'eau dénitrifiée en profondeur, ce qui va dans le sens d'une confirmation de l'intérêt des indices indirects (concentration en NO<sub>3</sub> éventuellement élevée, mais concentrations en SO<sub>4</sub> et Fe "anormales")

#### 42 - En l'absence de forages existants

En fait, on a utilisé les connaissances fournies par 10 forages, les uns "dénitrifiants", les autres "non dénitrifiants" pour tester les méthodes géochimiques. Ce travail a été réalisé sur fonds B.R.G.M.

## 42.1 - Pourquoi l'intervention de la géochimie ?

Le problème est de prévoir la présence de sulfures disséminés dans les formations du sous-sol. On est donc confronté, en partie, au même problème que celui de la recherche minière pour lequel la géochimie constitue un outil souvent efficace.

### 421.1 - Cas des sulfures des métaux de base

Effectivement, la géochimie est capable de déceler la présence de sulfures de métaux de base (Pb, Zn, Cu) dans le sous-sol en mettant en évidence des anomalies dans les sols correspondants. Les métaux sont souvent accompagnés de traceurs caractéristiques (As, Ag, Bi, Mo...). Mais certains éléments peuvent avoir une origine uniquement lithologique (Cu, Zn, As...) et donner lieu à des anomalies formationnelles. C'est alors que l'analyse multi-élémentaire prend tout son intérêt. En effet, grâce aux associations d'éléments, une discrimination devient possible entre les anomalies formationnelles, les anomalies en liaison avec des sulfures de métaux de base et aussi les anomalies en liaison avec des oxydes primaires. Cette discrimination sera également facilitée par la connaissance de la lithologie.

### 421.2 - Cas des sulfures de fer

Par contre, pour les sulfures de fer, le diagnostic est plus difficile. En effet, le fer décelé dans les sols a le plus souvent une origine lithologique car les minéraux ferrifères autres que les sulfures sont souvent abondants dans les roches (oxydes, carbonates et surtout silicates).

Mais, heureusement, les sulfures de fer, comme la pyrite par exemple, qui est le plus fréquent, peuvent avoir une signature géochimique bien caractéristique. En effet, ils s'accompagnent souvent de traces d'autres sulfures (As, Pb, Zn, Cu, Mo) bien décelables par géochimie.

## 42.2 - Réalisation du test

### 422.1 - Choix des sites

Un test est effectué sur 10 sites de forages de la région de LESNEVEN et ST POL DE LEON (Nord Finistère) parmi lesquels 6 ont fourni de l'eau dénitrifiée et 4 de l'eau non dénitrifiée. Le sous-sol des premiers contient des sulfures disséminés ; celui des seconds en est dépourvu.

La localisation des sites et leur contexte lithologique sont donnés dans le tableau ci- dessous :

Site	N° forage	Dénitrié	Nbre éch	Contexte lithologique
PLOUENAN	6	oui	12	6 à 13 m de recouvrement ; gneiss à biotite et muscovite ; aplite ; oxydés ; pyrite
PLOUENAN	3	oui	12	6 à 13 m de recouvrement ; gneiss à biotite et muscovite ; aplite ; oxydés ; pyrite
PLOUDANIEL	FEI	oui	9	1 m de recouvrement ; gneiss riche en biotite ; oxydés ; pyrite
PLOUDANIEL	II	oui	1	1 m de recouvrement ; gneiss riche en biotite ; oxydés ; pyrite
PLOUDANIEL	FEII	oui	8	1 m de recouvrement ; gneiss riche en biotite ; oxydés ; pyrite
PLOUDANIEL	IIII	oui	8	1 m de recouvrement ; gneiss riche en biotite ; oxydés ; pyrite
CLEDER	7	non	7	70 cm de recouvrement ; granite à deux micas ; pyrite rare
PLOUNEVEZ-LOCHRIST	1	non	13	2 m de recouvrement ; gneiss et granite
PLOUNEVEZ-LOCHRIST	2	non	12	2 m de recouvrement ; gneiss et granite
PLOUDANIEL	II2	non	12	1 m de recouvrement ; gneiss riche biotite
TOTAL	11		94	

Tableau 1 - Contexte lithologique des sites échantillonnés

#### 422.2 - Echantillonnage

A partir du point de forage, les échantillons sont prélevés à des distances de 10, 25 et 50 mètres, dans l'horizon B à une profondeur comprise entre 0,25 et 1,2 mètre selon l'épaisseur des sols.

#### 422.3 - Analyse

La fraction inférieure à 125 microns des échantillons est soumise à une analyse multiélémentaire (ICP) pour 34 éléments dont les résultats complets sont fournis dans l'annexe 1.

#### 422.4 - Traitement des résultats

Un fichier des résultats est constitué, permettant différents traitements informatisés, parmi lesquels ont été retenus :

- la comparaison des moyennes des différents éléments entre les sites "dénitrifiants" et les sites "non dénitrifiants" ;
- la comparaison des moyennes des différents éléments entre les 10 sites échantillonnés ;
- des diagrammes binaires.

## 42.3 - Interprétation des résultats

### 423.1 - Eléments significatifs de sulfures

Les éléments Pb, Zn, Cu et As (histogrammes de la fig. 1), dont les seuils anomaux sont respectivement à 50, 100, 35 et 80 ppm, présentent des valeurs associées significatives d'une origine sulfurée.

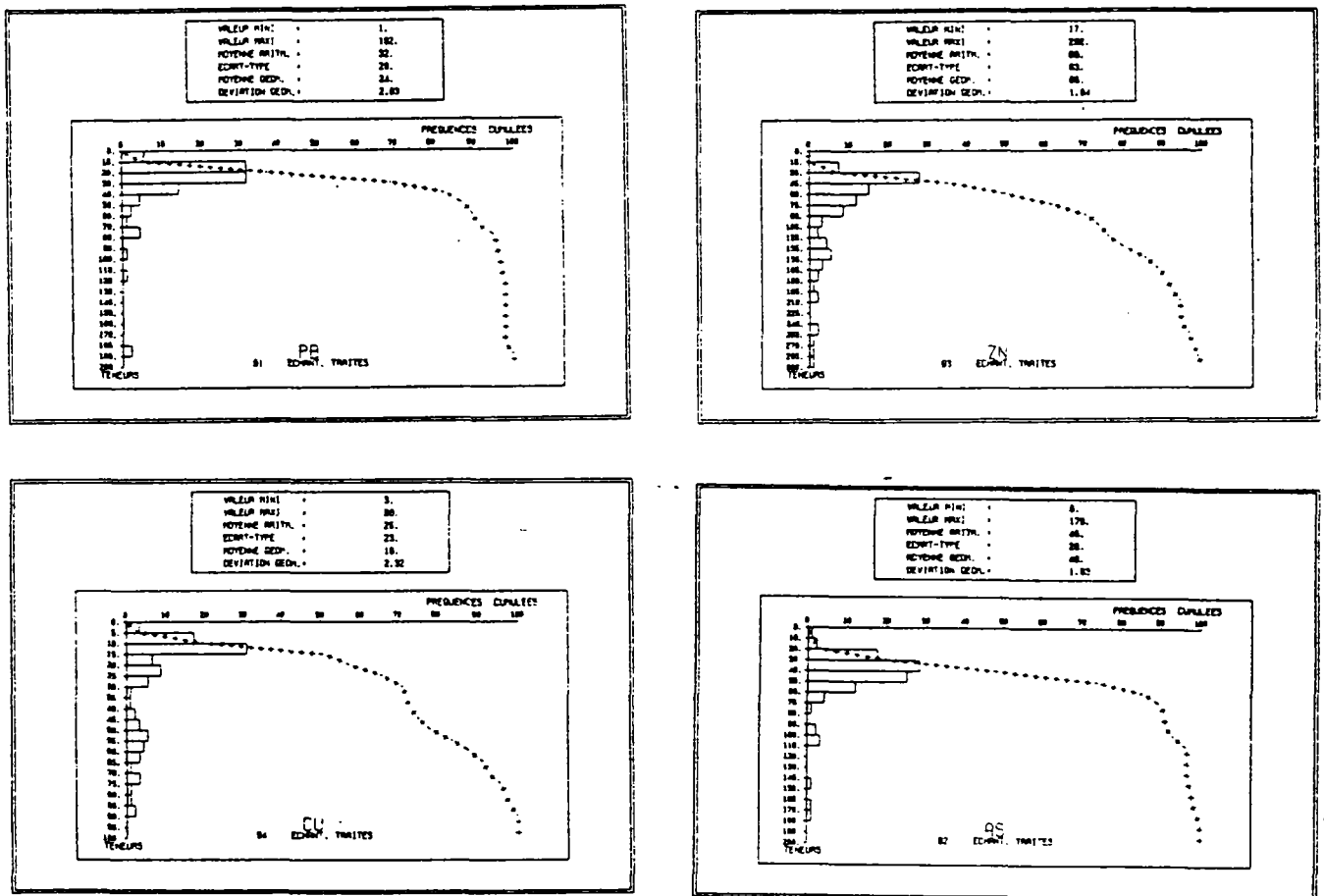


Fig. 1 - Histogrammes des fréquences de Pb, Zn, Cu et As

Par contre, les éléments trace accompagnateurs occasionnels de sulfures (Mo, Ag, Bi) ne montrent pas de valeurs significatives et ne sont donc pas utilisables.

N.B. : à signaler, comme curiosité, la très forte valeur en B de l'échantillon Ploudaniel - II 2 - A50 qui est une arène argileuse avec passage noir (tourmaline possible).



#### 423.2 - Signification des différentes phases minéralogiques

Ce sont les proportions en  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , qui renseignent le plus sur la composition minéralogique des échantillons. En effet, l'élément  $\text{SiO}_2$  correspond en grande partie à la phase quartzeuse, tandis que les éléments  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , se rapportent à la phase argileuse dérivant des silicates d'alumine des métamorphites. Or, cette phase argileuse a la propriété de fixer de nombreux éléments ( $\text{Mn}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$  et  $\text{As}$ ), comme on peut le voir sur quelques uns des diagrammes présentés fig. 2 à 4 :

- sur la fig. 2 transparait le très fort pouvoir fixateur d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , pour des éléments lithologiques tels que  $\text{Co}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  ;

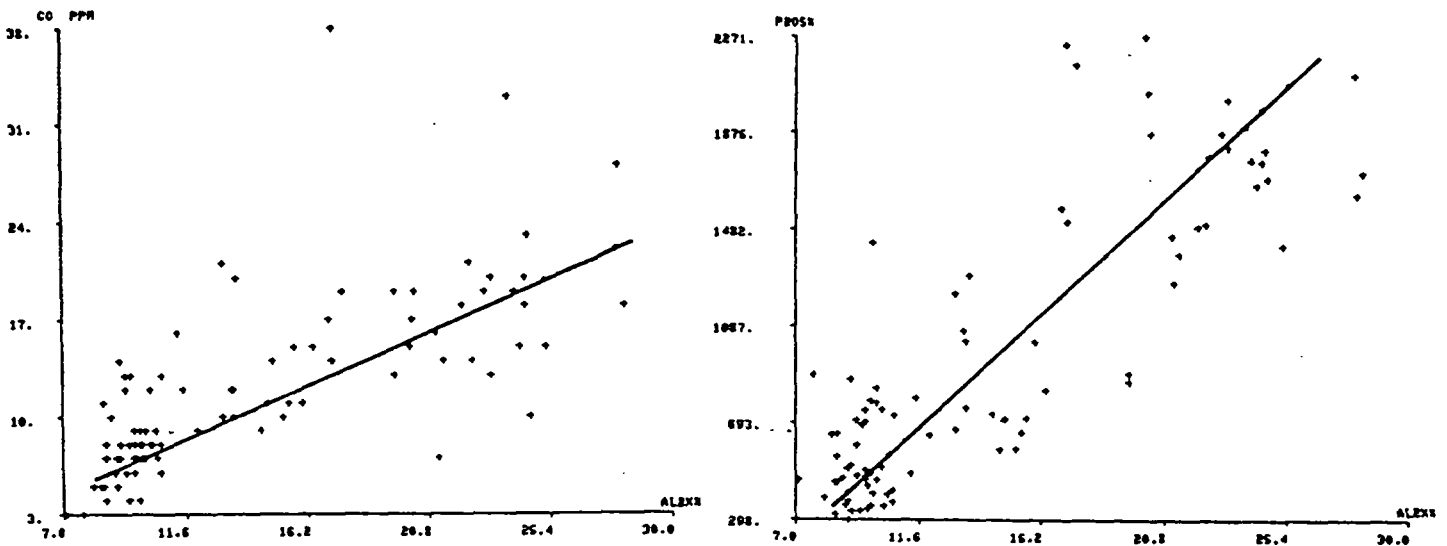


Fig. 2 - Diagrammes binaires  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Co}$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{P}_2\text{O}_5$

- sur la fig. 3 (cf. page suivante), on remarque que ce pouvoir fixateur s'exerce également sur des éléments pouvant avoir une origine sulfurée ( $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cu}$  et  $\text{As}$ ) ; toutefois, pour ces quatre éléments, on voit se détacher une petite population indépendante de la teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , correspondant très certainement à une phase oxydée dérivant de sulfures. Ainsi, chacun de ces diagrammes peut être subdivisé en trois domaines :

- 1 - secteur où l'élément fixé sur la phase argileuse a une origine lithologique ;
- 2 - secteur où l'élément fixé sur la phase argileuse peut avoir une origine sulfurée ;
- 3 - secteur où l'élément est fixé sur une autre phase (oxyde ?) d'origine sulfurée.

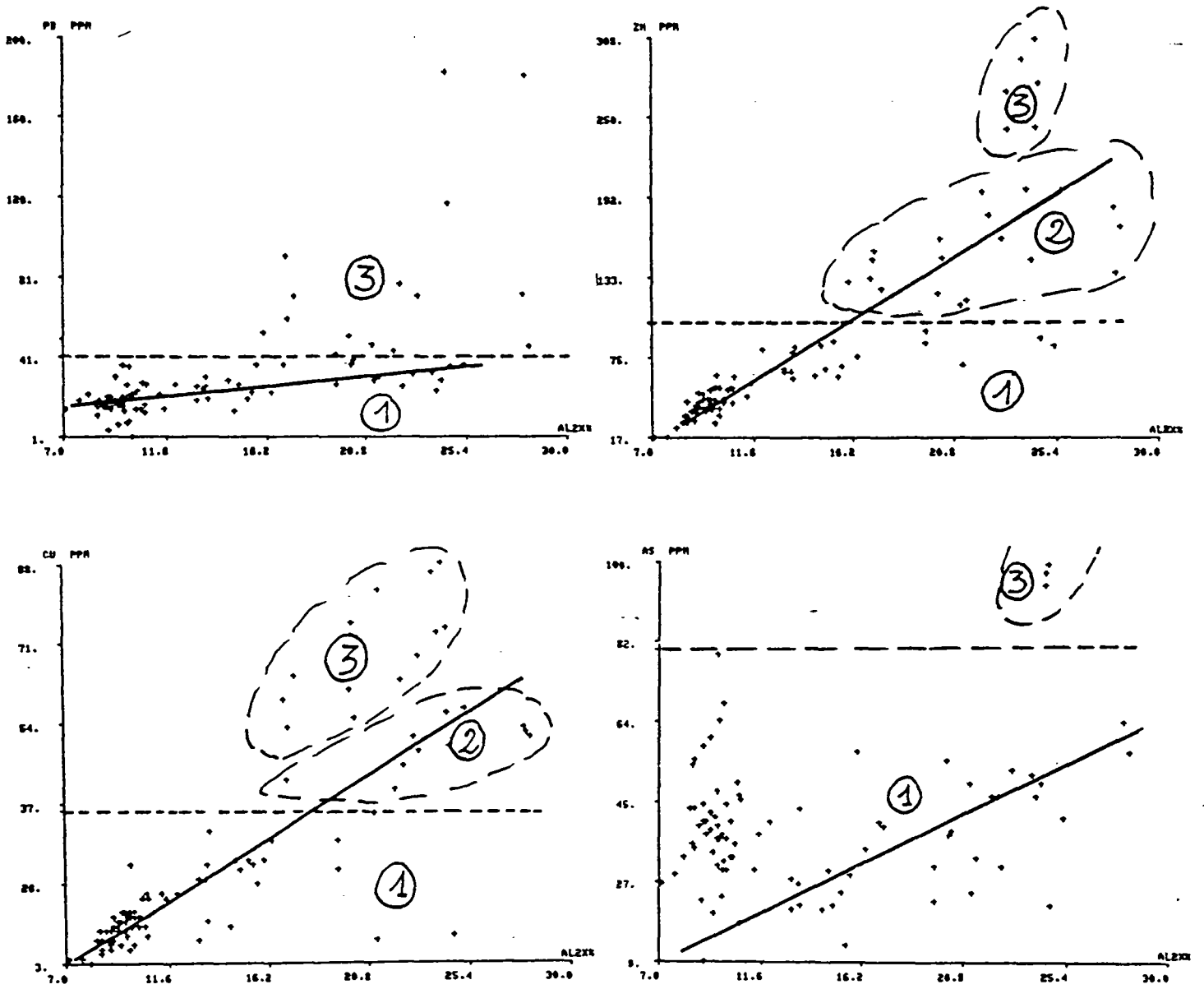


Fig. 3 - Diagrammes binaires d' $Al_2O_3$ , avec Pb, Zn, Cu et As

D'autre part, la forte liaison de  $Fe_2O_3$ , avec  $Al_2O_3$ , et avec  $MgO$  est montrée sur la fig. 4. Elle indique une très forte prédominance du fer "lithologique" (dérivant de silicate ferromagnésien tel que la biotite) par rapport au fer "sulfuré". Ce dernier sera donc très difficile à identifier.

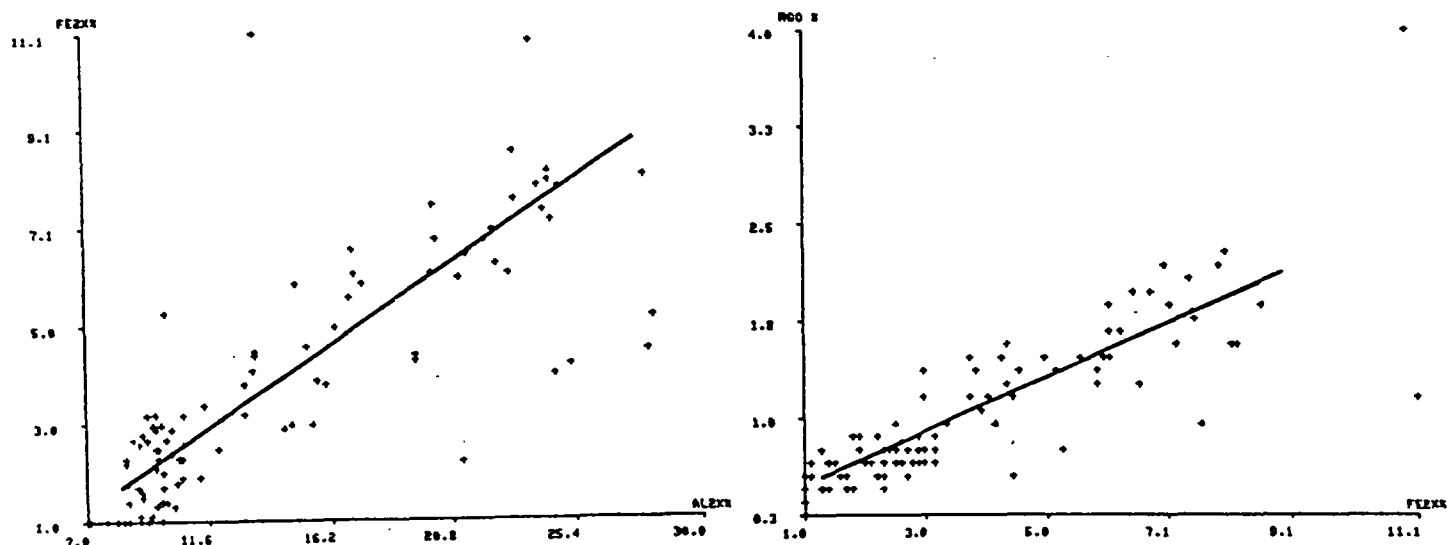


Fig. 4 - Diagrammes binaires  $Al_2O_3$  -  $Fe_2O_3$ , et  $Fe_2O_3$  -  $MgO$

423.3 - Comparaison entre site "non dénitrifiant" et site "dénitrifiant"

La composition géochimique des sols de chacun de ces deux types de sites est fourni sur le tableau 2 ci-dessous.

GR	Nb éch	Titre	$SiO_2$	$Al_2X$	$Fe_2X$	$MgO$	$K_2O$	$MnO$	$P_2O_5$	Li	B	V
1	48	Dénitrif.	70	16.1	4.4	1.2	2.7	0.03	1117	61	69	103
2	43	Non dénitrif.	75	11.9	2.6	0.8	2.1	0.02	736	47	79	77

GR	Nb éch	Titre	Cr	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	As
1	48	Dénitrif.	105	13	42	35	58	107	54
2	43	Non dénitrif.	83	9	31	13	23	53	35

Tableau 2 - Comparaison des moyennes arithmétiques du groupe "non dénitrifiant" et du groupe "dénitrifiant"

Le type "non dénitrifiant" présente une composition d'ensemble tout à fait normale. Les éléments majeurs ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) reflètent un environnement lithologique silico-alumineux, tandis que les éléments trace montrent des valeurs de fond conformes à celles habituellement rencontrées en zones non minéralisées.

Le groupe "dénitrifiant" contient des valeurs en Pb, Zn et Cu deux à deux fois et demi supérieures à celles de l'autre groupe. As est également plus élevé, dans une proportion de 3/2 et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , dans une proportion de 9/5. Tous ces résultats sont à relier à la présence de sulfures dans le sous-sol, mais ils ont besoin d'être détaillés, au niveau de chaque site. En particulier, on a vu que la proportion en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , pouvait être fortement dépendante de la lithologie.

#### 423.4- Comparaison entre les différents sites

La connaissance géochimique de chaque site apparaît sur les tableaux 3 et 4 ci-dessous.

GR	Nb éch	Titre	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{X}$	$\text{Fe}_2\text{X}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	Li	B
S6	11	PLOUENAN	79	10.6	2.1	0.8	2.0	0.93	0.01	401	42	97
S3	12	PLOUENAN	82	9.5	2.4	0.6	2.1	0.78	0.03	536	23	70
FEI	8	PLOUDANIEL	57	24.8	7.4	1.7	4.0	0.99	0.04	1816	105	51
I1	1	PLOUDANIEL	65	17.1	6.6	1.3	2.3	1.18	0.03	2238	113	85
FEII	8	PLOUDANIEL	64	19.2	5.7	1.5	2.6	0.97	0.04	1569	81	57
IIII	8	PLOUDANIEL	61	21.5	6.2	1.6	3.6	0.86	0.04	1683	75	60
S7	7	CLEDER	73	13.8	2.7	0.8	1.9	0.77	0.02	870	77	72
S1	13	PLOUVENEZ- LOCHRIST	78	9.8	2.2	0.6	2.0	0.80	0.01	727	37	83
S2	12	" "	73	13.6	3.3	1.1	2.5	1.02	0.03	635	51	64
SII2	11	PLOUDANIEL	75	11.4	2.2	0.7	2.0	0.85	0.01	773	37	95

GR	Nb éch	Titre	V	Cr	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	As
S6	11	PLOUENAN	76	101	7	30	15	16	50	39
S3	12	PLOUENAN	62	82	10	29	11	16	39	36
FEI	8	PLOUDANIEL	156	125	20	62	58	204	226	95
I1	1	PLOUDANIEL	129	116	14	51	42	91	147	162
FEII	8	PLOUDANIEL	122	113	18	46	57	49	124	51
IIII	8	PLOUDANIEL	123	116	16	55	53	38	149	52
S7	7	CLEDER	58	70	8	30	9	20	39	33
S1	13	PLOUVENEZ-	60	75	6	26	9	20	39	33
S2	13	" "	96	99	12	37	18	20	58	24
SII2	11	PLOUDANIEL	69	83	8	31	16	31	66	52

Tableau 3 - Comparaison des moyennes arithmétiques de chacun des sites échantillonnés

GR	Nb éch	Titre	Fe/Al	P/Al	V/Al	Cr/Al	Co/Al	Ni/Al	Cu/Al	Pb/Al	Zn/Al	As/Al
S6	12	PLOUENAN	0.25	42	7.3	9.5	0.8	2.9	1.4	1.4	4.7	5.3
S3	12	PLOUENAN	0.26	55	6.5	8.6	1.0	3.0	1.1	1.7	4.1	3.8
FEI	9	PLOUDANIEL	0.32	73	6.7	6.1	0.8	3.0	2.4	7.5	9.5	3.6
II	1	PLOUDANIEL	0.39	130	7.5	6.7	0.8	2.9	2.4	5.3	8.6	9.4
FEII	8	PLOUDANIEL	0.31	82	6.5	6.1	1.0	2.4	2.9	2.6	6.5	2.7
IIII	8	PLOUDANIEL	0.30	78	5.9	5.7	0.8	2.6	2.4	1.8	6.8	2.5
S7	7	CLEDER	0.22	63	5.0	6.3	0.7	2.5	0.6	1.8	4.0	3.2
S1	13	PLOUVENEZ-LOCHRIST	0.22	73	6.0	7.7	0.6	2.7	0.8	2.1	3.8	3.5
S2	12	PLOUVENEZ-LOCHRIST	0.24	46	7.0	7.4	0.8	2.6	1.3	1.3	4.1	1.8
SI12	12	PLOUDANIEL	0.19	66	6.0	7.6	0.7	2.7	1.4	3.1	5.5	5.5

Tableau 4 - Comparaison des moyennes arithmétiques du rapport non normé entre chaque élément et  $Al_2O_3$ .

Plouenan S6 et S3, "dénitrifiants", sont en contexte de gneiss à biotite et muscovite, aplite et un peu de granite. La géochimie indique une phase quartzeuse abondante à mettre certainement en relation avec un recouvrement important (de 6 à 13 m), d'origine probablement allochtone. On n'observe pas de valeurs significatives en éléments indicateurs de sulfures sans doute à cause de ce recouvrement, à l'exception de quelques valeurs en As qui se traduisent par un rapport  $As/Al_2O_3$  élevé.

Ploudaniel FEI, II, FEII, IIII, "dénitrifiants", montrent une phase alumineuse à Fe abondante à relier à un environnement de gneiss riches en biotite. Les valeurs en Pb, Zn, Cu et As et surtout leur valeur élevée par rapport à  $Al_2O_3$ , sauf pour As, traduisent la présence de sulfures dans le bed-rock. A noter également les rapports significatifs pour Fe et P respectivement indicateurs de la présence d'oxydes et de phosphates dérivant certainement de sulfures.

Pour les sondages de Cleder et Plounevez-Lochrist 1 et 2, "non dénitrifiants", on ne relève effectivement pas d'indication de présence de sulfures.

Le sondage Ploudaniel II2, bien que "non dénitrifiant", présente cependant, compte-tenu des résultats en Pb et As, des possibilités de présence de sulfures.

## CONCLUSION

Sur le site de Plouenan, "dénitrifiant", la méthode géochimique de recherche d'indicateurs de la présence de sulfures dans le sous-sol s'est heurtée à un recouvrement important, certainement allochtone.

Sur les sites de Ploudaniel "dénitrifiants", la présence de sulfures, dans le sous-sol, transparait très nettement au niveau des sols. Les marqueurs géochimiques sont Pb, Zn, Cu et As.

Sur le site de Ploudaniel "non dénitrifiant", la signature géochimique des sols indique pourtant la présence de sulfures. On peut expliquer l'absence de dénitrification par le fait que le sondage a surtout fourni de l'eau superficielle qui n'avait pas été assez longtemps en contact avec les sulfures.

5 - EXPLOITATION DE L'EAU SOUTERRAINE  
PAR LA COOPERATIVE

La Coopérative assure la fourniture de ses besoins par cinq forages, en service depuis

- août 1984 pour FC1
- octobre 1984 pour FC2
- avril 1986 pour FE1
- mai 1986 pour FE II et FE III

Les prélèvements d'eau souterraine ont été de 228 000 m<sup>3</sup> en 1985 et 296 000 m<sup>3</sup> en 1986. Depuis juin 1986 la Coopérative est entièrement alimentée par l'eau souterraine, la consommation moyenne est de 30 000 m<sup>3</sup> par mois ; d'avril à novembre 1987, elle est de 33 000 m<sup>3</sup>, avec un maximum de 38 000 m<sup>3</sup> en juillet.

PRELEVEMENTS DANS LE DISPOSITIF ACTUEL - en m<sup>3</sup>/mois

		FC1	FC2	FE1	FEII	FEIII	TOTAL CONNU
1984	08	5 458					5 458
	09	4 396					4 396
	10	?	9 006				9 006
	11	?	8 078				8 078
	12	?	10 276				10 276
1985	01	7 174	10 042				17 166
	02	11 264	6 002				17 266
	03	10 939	9 220				20 159
	04	5 892	12 884				18 776
	05	7 085	10 350				17 435
	06	7 603	5 302				12 907
	07	4 427	7 050				11 477
	08	6 826	6 715	(7 321)			20 862
	09	10 181	9 107	(6 016)			25 304
	10	11 141	11 202				22 343
	11	10 720	11 315				22 035
	12	10 912	11 315				22 227
1986	01	9 068	9 302				18 370
	02	6 084	6 177				12 261
	03	10 020	10 492				20 512
	04	6 054	7 583	1 370			15 007
	05	5 654	3 952	2 591	786	9 202	22 185
	06	5 630	2 710	8 437	878	10 300	28 175
	07	7 038	398	10 505	2 414	8 758	29 313
	08	7 599	1 351	10 880	2 875	10 231	32 936
	09	7 019	2 243	9 868	3 889	9 025	32 044
	10	5 437	4 911	10 479	3 135	6 949	30 911
	11	6 649	6 454	3 293	3 035	8 480	28 711
	12	5 562	4 758	4 540	3 144	7 008	25 012
1987	01	6 255	6 494	2 702	3 650	5 693	24 794
	02	4 761	4 672	5 982	3 899	4 811	24 125
	03	5 093	5 383	7 310	4 537	7 313	29 644
	04	6 460	6 509	6 679	4 143	6 823	30 694
	05	7 376	7 531	7 695	4 628	7 739	34 969
	06	7 515	7 735	7 719	4 648	6 764	34 381
	07	7 782	7 998	9 203	5 506	7 737	38 226
	08	6 005	5 610	6 076	3 696	7 915	29 302
	09	6 756	6 520	6 650	4 101	6 551	30 578
	10	6 654	7 653	8 066	4 877	6 551	33 801
	11	5 799	5 846	6 803	4 011	9 029	31 488

## Réponse de la nappe

Le réseau de mesure est constitué par 16 piézomètres et 5 repères sur cours d'eau. Les cinq forages d'exploitation ont été rattachés au nivellement de l'ensemble, mais aucune mesure de niveau n'y est possible (absence de tube pour le passage des sondes).

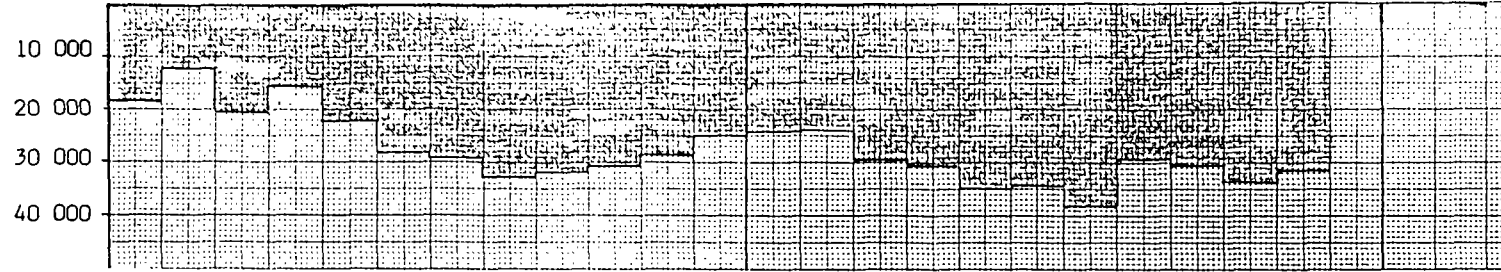
Sur le graphique ci-après ont été reportés, les prélèvements mensuels (par l'ensemble des cinq forages d'exploitation), les précipitations efficaces (Etp calculée par la méthode de Turc mensuelle, R.F.U. = 100 mm) et les variations du niveau de la nappe en trois piézomètres :

- FP5, dont on sait qu'il est en relation directe avec le forage d'exploitation FE1 proche (15 m),
- III 2, très proche (12 m) du forage d'exploitation FE 2,
- III 1, également dans la zone d'influence de FE 2, mais plus éloigné (80 m).

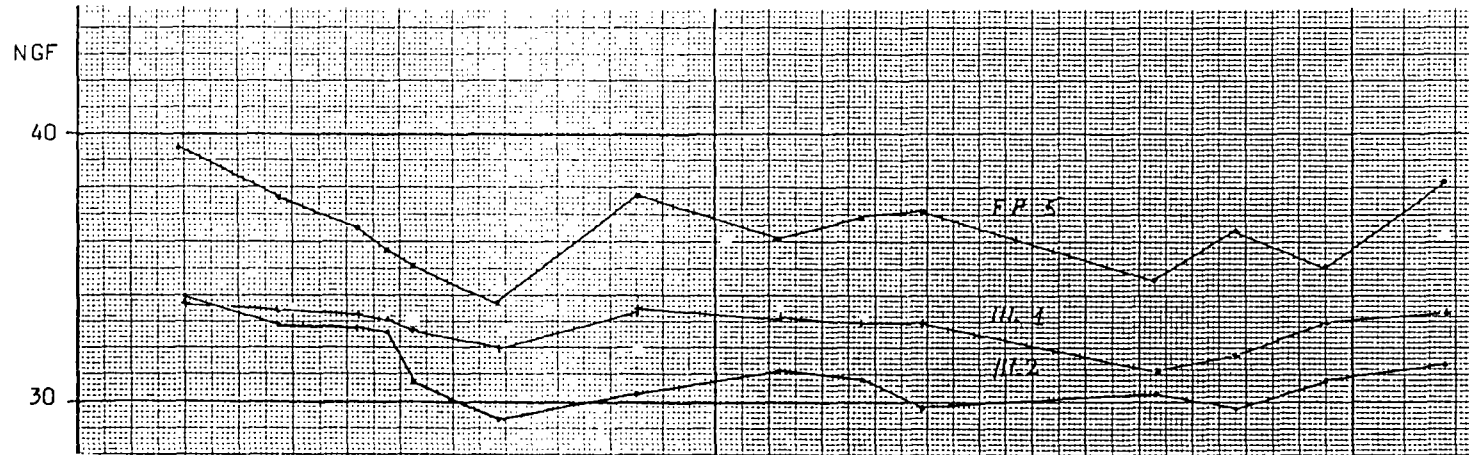
Assez vite après le début, bien marqué, de la phase d'exploitation, la nappe semble retrouver un niveau d'équilibre, avec des variations faibles (2 à 3 m aux piézomètres III.1 et III.2, au maximum 4 m en FP5), selon les fluctuations des prélèvements et sous l'influence des précipitations efficaces. De telles amplitudes restent très faibles et montrent que l'aquifère est loin d'être surexploité.



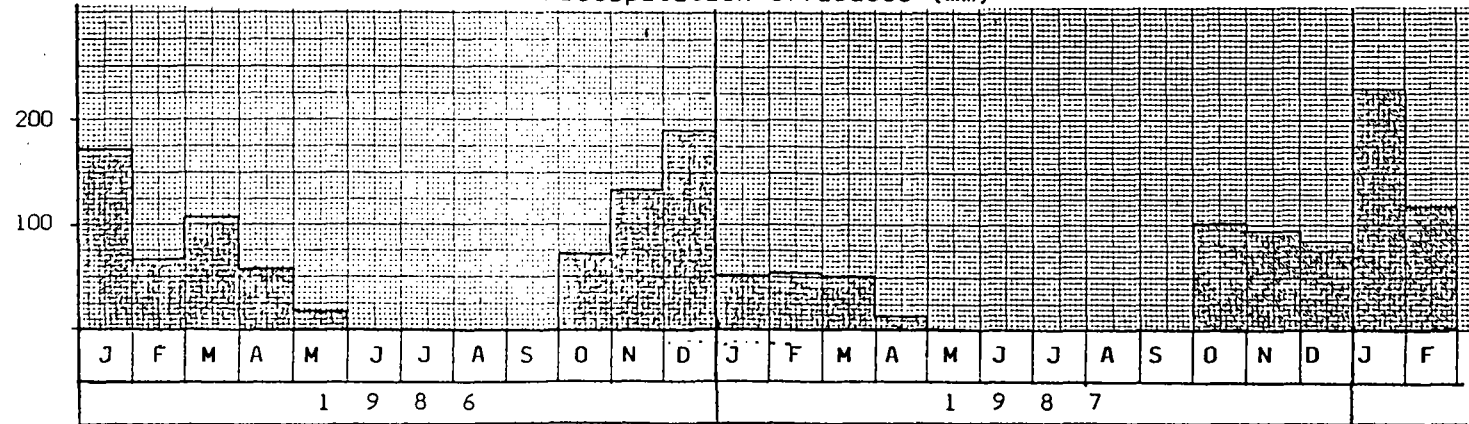
Prélèvements (m<sup>3</sup>/mois)



Fluctuations de la surface de la nappe



Précipitation efficaces (mm)



N° ouvrage	DATE	26/02/86	25/04/86	5/06/86	20/06/86	9/07/86	27/08/86	17/11/86	5/02/87	19/03/87	29/04/87	9/09/87	26/10/87	17/12/87	25/02/88
		Altitude repère(m)	Prof. Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof. Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof. Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof. Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof. Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof. Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof. Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof. Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof. Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof. Nappe(m) Alt. Nappe(m)	Prof. nappe(m) Alt. nappe(m)	Prof. nappe(m) Alt. nappe(m)	Prof. nappe(m) Alt. nappe(m)
FP 1	47,59	8,07	9,75	10,67	11,96	12,51	13,75	9,73	11,28	10,94	10,17	13,47	11,20	11,93	9,11
		39,52	37,84	36,92	35,63	35,08	33,84	37,86	36,31	36,65	37,42	34,12	36,29	35,66	38,48
FP 2	47,77	8,29	10,17	11,26	12,42	12,99	14,25	10,08	11,60	11,68	10,57	14,14	12,95	12,76	9,64
		39,48	37,60	36,51	35,25	34,78	33,52	37,69	36,17	36,09	37,20	33,63	34,82	35,01	38,13
FP 3	47,05	5,89	9,615	10,29	11,57	12,155	13,45	9,42	10,73	10,46	9,97	12,74	10,88	11,35	8,70
		41,16	37,435	36,76	35,48	34,895	33,60	37,63	36,32	36,59	37,08	34,31	36,17	35,70	38,35
FP 4	47,32	7,86	9,64	10,48	11,53	12,123	13,46	9,72	11,00	10,50	10,17	13,07	10,82	11,85	9,01
		39,46	37,68	36,84	35,79	35,197	33,86	37,60	36,32	36,82	37,15	34,25	36,50	35,47	38,31
FP 5	47,44	8,00	9,795	10,88	11,75	12,35	13,70	9,77	11,42	10,575	10,31	12,79	11,00	12,15	9,27
		39,44	37,645	36,56	35,69	35,09	33,74	37,67	36,02	36,865	37,13	34,65	36,44	35,29	38,17
FP 6	46,67	7,23	8,85	9,43	11,40	10,99	12,17	8,86	9,62	9,375	9,51	12,03	10,74	10,44	7,72
		39,44	37,82	37,24	35,27	35,68	34,50	37,81	37,05	37,295	37,16	34,64	35,93	36,23	38,95
FC 1	55,69	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable
FC 2	55,12	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
FE I	45,93	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
FE II	36,35	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
FE III	35,255	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
I 1	41,685	1,68	2,095	2,43	2,995	3,32	4,16	2,19	2,01	2,14	2,43	3,60	3,03	2,37	1,38
		40,005	39,59	39,255	38,69	38,365	37,525	39,495	39,675	39,545	39,255	38,085	38,655	39,315	40,305
I 2	42,97	-	3,62	4,042	4,43	-	5,67	3,60	-	-	3,96	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable
		-	39,35	38,928	38,54	-	37,30	39,37	-	-	39,01	-	-	-	-
II 2	51,565	Artésien	Artésien	0,44	0,565	0,65	0,93	0,54	Artésien	0,27	0,355	1,155	0,96	0,685	artésien
		> 51,565	> 51,565	51,125	51,00	50,915	50,635	51,025	> 51,565	51,295	51,21	50,41	50,605	50,88	> 51,565
III 1	35,735	2,03	2,30	2,49	2,65	3,03	3,82	2,18	2,605	2,79	2,975	4,63	3,97	2,77	2,39
		33,705	33,435	33,245	33,085	32,705	31,915	33,555	33,13	32,945	32,94	31,105	31,765	32,965	33,345
III 2	34,445	0,465	1,56	1,61	1,82	3,84	5,10	4,20	3,27	3,62	4,63	4,14	4,66	3,65	3,07
		33,98	32,885	32,835	32,625	30,605	29,345	30,245	31,175	30,825	29,815	30,305	29,785	30,795	31,375
V	34,145	0,14	0,195	0,53	0,66	0,68	0,77	Artésien	0,235	0,40	0,375	0,945	0,41	artésien	artésien
		34,005	33,95	33,615	33,485	33,465	33,375	> 34,145	33,91	33,745	33,77	33,20	33,785	> 34,145	> 34,145
VI	43,56	2,11	2,40	3,51	3,97	3,55	3,90	1,88	2,39	2,95	3,27	non mesurable	non mesurable	non mesurable	non mesurable
		41,45	41,16	40,05	39,59	40,01	39,66	41,68	41,17	40,61	40,29	< 39,34	artésien	artésien	artésien
VIII	32,335	Artésien	Artésien	Artésien	Artésien	0,92	0,48	Artésien	Artésien	0,03	0,305	0,195	artésien	artésien	artésien
		> 32,335	> 32,335	> 32,335	> 32,335	31,415	31,855	> 32,335	> 32,335	32,305	32,03	32,14	> 32,335	> 32,335	32,335
R 1	34,995	2,31	2,31	2,38	2,41	2,45	2,43	2,13	2,30	2,38	2,39	2,50	1,95	2,30	2,17
		32,685	32,685	32,615	32,585	32,545	32,565	32,865	32,695	32,615	32,605	32,495	33,045	32,695	32,825
R 2	31,33	0,385	0,345	0,505	0,585	0,61	0,605	0,07	0,305	0,44	0,47	0,67	0,08	0,235	0,075
		30,945	30,985	30,825	30,745	30,72	30,725	31,26	31,025	30,89	30,86	30,66	31,41	31,095	31,255
R 3	31,765	1,61	1,59	1,70	1,74	1,73	1,76	1,49	1,60	1,65	1,68	1,85	1,50	1,63	1,53
		30,155	30,175	30,065	30,025	30,035	30,005	30,275	30,165	30,115	30,085	29,915	30,265	30,135	30,235
R 4	37,115	repère		0,765	0,773	0,795	0,75	0,76	0,69	0,71		0,75	0,54	0,615	
		détruit		36,35	36,342	36,32	36,365	36,355	36,405	36,365	36,405	36,365	36,575	36,50	inaccessible
R 5	42,065	0,87	0,81	0,85	0,87	0,88	0,93	0,90	0,88	0,72	0,88	0,955	inaccessible	0,90	0,91
		41,195	41,255	41,215	41,195	41,185	41,135	41,165	41,185	41,185	41,185	41,11	41,165	41,165	41,155
F 2	55,81								12,40	13,55	13,98	15,68	15,55	14,34	10,04
									43,41	42,26	41,83	40,13	40,26	41,47	45,77
F 4	55,60								22,48	21,42	23,10	22,45	22,00	21,73	non mesuré
									33,12	34,18	32,50	33,15	33,60	33,07	
PFC 1	55,62										27,23				
											28,39				

## L'AQUIFERE

### Schéma du modèle d'écoulement souterrain

Le modèle logique le plus simple compte tenu de ce qui a été observé en cours de foration et pendant les pompages d'essai, est celui de la "strate conductrice".

L'aquifère est composé :

- d'une *strate conductrice d'eau privilégiée* détentrice de la transmissivité hydraulique du système en quasi totalité mais d'épaisseur faible avec un coefficient d'emmagasinement nul ou tout au moins négligeable par rapport à celui de l'ensemble,

- et d'une *couche magasin* d'épaisseur importante recèlant la réserve d'eau en quasi totalité, mais de transmissivité négligeable par rapport à celle de la strate conductrice.

L'ensemble aquifère est supposé captif, donc compris entre deux épontes imperméables. La couche magasin est définissable par :

$S'$  = coefficient d'emmagasinement total

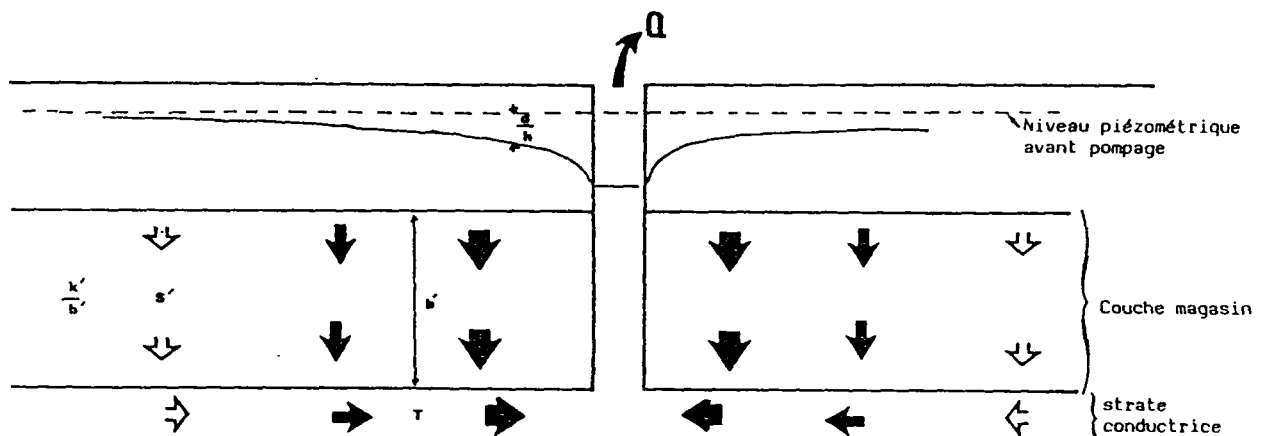
$\sigma = \frac{K'}{b'}$  = paramètre de drainance

et la strate conductrice par :

$I$  = transmissivité hydraulique en  $m^2/s$

$S$  = coefficient de la réserve immédiatement mobilisable supposé nul ou négligeable.

Ce modèle est une simplification : le puits n'est pas "parfait", le niveau de pression de la couche magasin n'est pas constant (entre deux périodes de recharge, sa réserve a tendance à s'épuiser sous l'influence des pompages), l'aquifère n'est ni homogène, ni infini, ni isotrope.



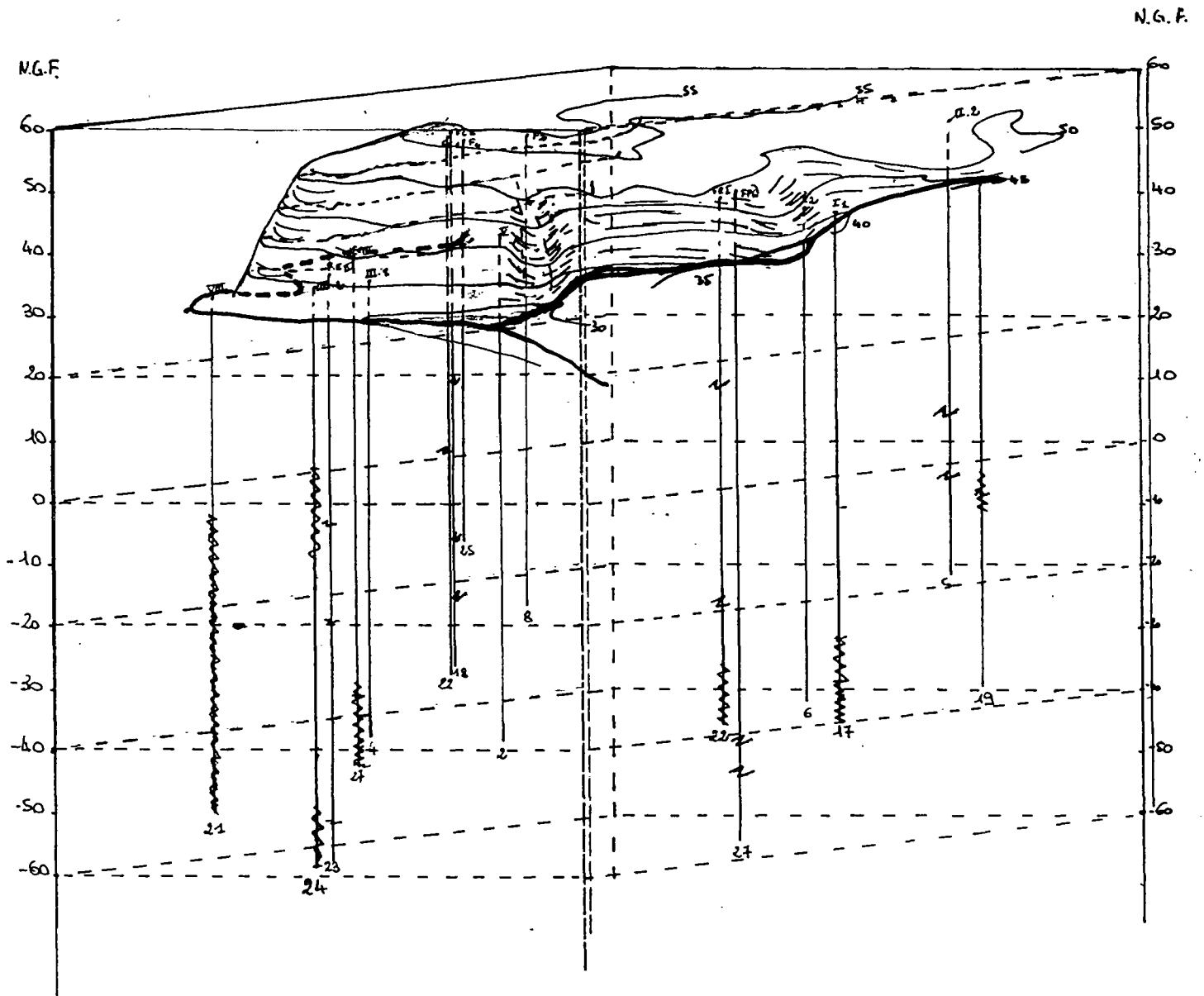
Site de Ploudaniel  $\sigma = 3 \text{ à } 5 \cdot 10^{-7}$   
 $S' = 2 \cdot 10^{-4} \text{ à } 1 \cdot 10^{-3}$   
 $I = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

Les deux figures qui suivent :

- diagramme comportant les différents sondages et forages avec la localisation des horizons fissurés identifiés

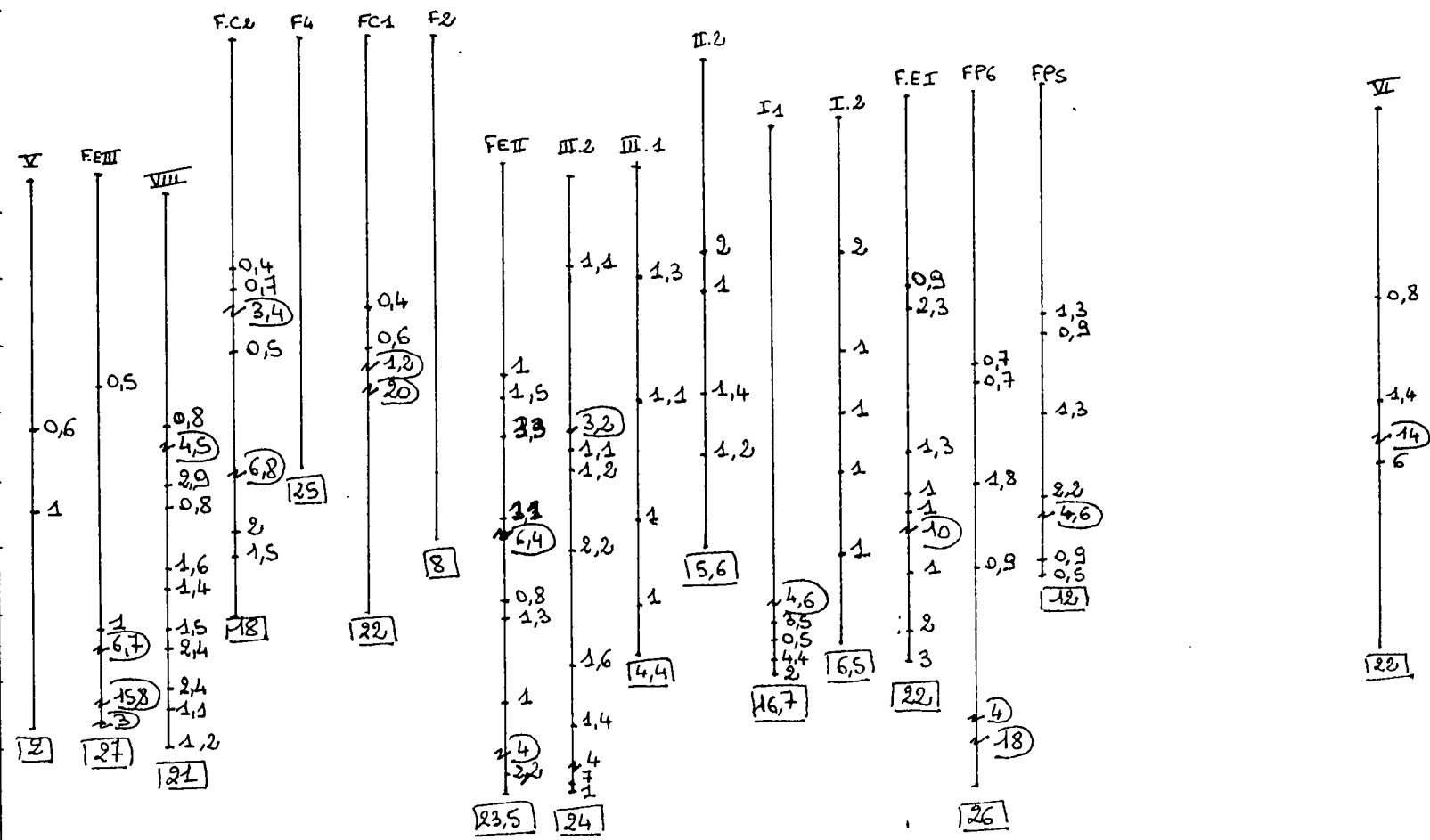
- sondages et forages situés non à leurs places géographiques, mais à leurs altitudes avec les différentes venues d'eau avec la valeur (en m<sup>3</sup>/h) des débits instantanés qu'elles apportent ; les chiffres situés sous chaque ouvrage correspondant aux débits instantanés globaux obtenus en fin de foration,

montrent, d'une part qu'on n'a pas affaire à *une* couche privilégiée, mais à un grand nombre d'horizons conducteurs qui peuvent ne communiquer entre eux que par l'intermédiaire de phénomènes de drainance.



M.G.F

60  
50  
40  
30  
20  
10  
0  
10  
20  
30  
40  
50



## B I L A N   H Y D R I Q U E

Données utilisées

### Météorologie nationale

Précipitations : - Guipavas de septembre 1969 à janvier 1974  
et de janvier 1976 à décembre 1978  
- Lesneven de février 1974 à décembre 1975  
- Ploudaniel à partir de janvier 1979

Températures : - Guipavas de septembre 1969 à mars 1980  
- Ploudaniel à partir de avril 1980

Ensoleillement : - Guipavas de septembre 1969 à juillet 1984  
moyenne Guipavas-Batz -à partir de août 1984

Les précipitations efficaces ont été calculées par la méthode de Turc mensuelle, en considérant une R F U de 100 mm.

### Service Régional de l'Aménagement des Eaux

Débits de l'Aber Benoît à Plabennec

- station de "Taulé" (b.v. = 28 km<sup>2</sup>) pour les années 1967 à 1977 (11 ans)
- station de "Pont de Loc Maria" depuis janvier 1979

Débits de l'Aber Wrac'h Ouest à Le Drennec

- station de Kernéguez (b.v. = 24 km<sup>2</sup>), période 1967-1986

Pluies efficaces

Pour les 19 cycles considérés, les valeurs de pluie efficace (non reprises par l'évapotranspiration et disponibles pour le ruissellement et/ou l'infiltration et la recharge des nappes) sont le plus souvent comprises entre 500 et 600 mm.

Moyenne et médiane sont pratiquement confondues

$$= 547 \text{ mm}$$

la période qui va de septembre 1969 à août 1976 est globalement déficitaire (un seul cycle atteint la moyenne générale) : 376 mm par cycle en moyenne. Au contraire, la période septembre 1976 à juillet 1988 est excédentaire (un seul cycle inférieur à la moyenne générale) : 645 mm par cycle en moyenne.

Au cours d'un cycle moyen, la période de recharge (6 mois) est aussi longue que la période sans recharge (6,05 mois).

Cycle hydrogéologique	Pluies totales mm	Précipitations efficaces mm	Nbre mois p.p. eff.	Nbre mois sans recharge
1969-70	1030	490	6	6
70-71	983	403	5	7
71-72	1132	540	8	4
72-73	783	206	4	8
73-74	909	306	3	9
75	975	471	5	7
76	622	218	5	7
77	1368	759	7	5
78	1166	564	6	6
79	1036	530	6	6
80	1111	578	5	7
81	1058	554	7	5
82	1384	716	7	5
83	1476	981	8	4
84	1033	506	5	7
85	1244	622	6	6
86	1190	591	7	5
87	1101	570	7	5
87-88		782	7	
Total	19601	10387	114	109
Moyenne	1089	547	6	6,05



### Lames d'eau écoulées

L'Aber Wrac'h Ouest et l'Aber Benoît sont contrôlés par le S.R.A.E. depuis 1967, avec une interruption en 1978 pour ce qui concerne l'Aber Benoît (déplacement de la station). Les conditions tant climatiques que géologiques de l'Aber Wrac'h Ouest à Le Drennec (Kerneguez - b.v.= 24 km<sup>2</sup>) et de l'Aber Benoît à Plabennec sont très semblables à celles de l'Aber Wrac'h Est qui a été contrôlé de 1967 à 1977 (station Roch Huez en Ploudaniel - b.v.= 38 km<sup>2</sup>).

Lame d'eau écoulée, moyenne annuelle, période 1967-1977 (11 ans):

Aber Benoît	:	456,9 mm
Aber Wrac'h Est	:	454,4 mm
Aber Wrac'h Ouest	:	469,7 mm

La période 1967-86 (où on n'a de données que pour l'Aber Wrac'h Ouest et l'Aber Benoît) n'est pas absolument identique à celle prise en compte pour le calcul des précipitations efficaces, mais elle en est très proche.

On n'a repris que les écoulements moyens annuels tels que fournis par le S.R.A.E. S'agissant alors d'années civiles, ces valeurs ne sont pas comparables point par point avec les précipitations efficaces calculées par cycles hydrogéologiques. Les moyennes restent comparables :

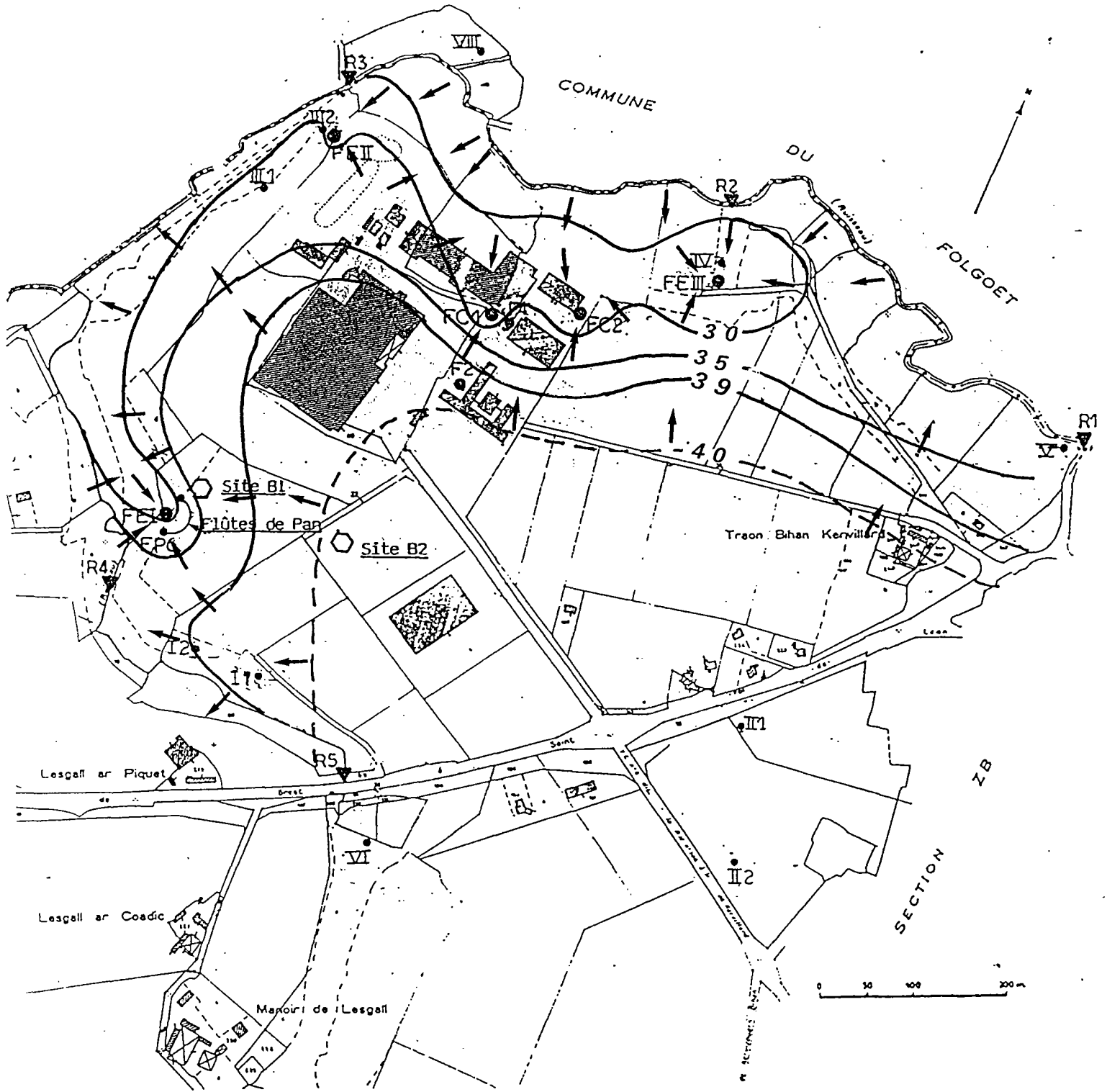
Lame d'eau écoulée, moyenne annuelle :

Aber Wrac'h Ouest - 1967-1986	:	550 mm
Aber Benoît 1967-1986 (1978 exclu)	:	518 mm

Les données sont parfaitement cohérentes avec les pluies efficaces calculées. Compte tenu des prélèvements qui peuvent avoir lieu dans les cours d'eau, la lame d'eau écoulée est généralement sous-estimée. On retiendra comme tout-à-fait fiable les précipitations efficaces calculées en considérant une R.F.U. de 100 mm : 547 mm et 6 mois de recharge par an en moyenne, avec un minimum de 206 mm (cycle 1972-73) et un maximum de 981 mm (cycle 1982-83).

### Alimentation des forages

La répartition des forages d'exploitation permet d'intercepter l'essentiel ou la totalité des écoulements souterrains aboutissant naturellement dans le secteur de la Coopérative. Il est en outre très vraisemblable que les cours d'eau participent au ressoutien et à l'alimentation de l'aquifère déprimé par les pompages, comme indiqué sur le schéma piézométrique ci-après que les diverses cotes de niveaux permettent de tracer.



- FC Forage d'exploitation
- FE Forage d'exploitation
- II1 Piézomètre
- F2 Piézomètre
- ▼ Repère sur cours d'eau
- Dispositif bougies poreuses
- Sens des écoulements souterrains
- 40 — Isopiète avec sa cote NGF

PLOUDANIEL

Schéma de la surface piézométrique de la nappe

## C O N C L U S I O N

La dénitrification naturelle est une réalité qui devrait permettre d'aider à résoudre un certain nombre de problèmes locaux liés à l'excès de nitrates dans les eaux superficielles ou les captages peu profonds.

Certes, en contrepartie de l'absence de nitrates, ces eaux profondes contiennent du fer ; mais les procédés de déferrisation sont bien connus, simples, fiables, non polluants et d'un coût de fonctionnement a priori très acceptable ; les aquifères ferrugineux que, dans un passé proche, on hésitait à mettre en exploitation, devraient maintenant être au contraire recherchés activements.

Dans la mesure où le fer que l'on trouve dans les eaux souterraines profondes provient essentiellement des réactions de dénitrification, et si on en juge par le grand nombre de forages délivrant une eau à forte concentration en fer, la dénitrification apparaît comme un phénomène banal, largement réparti sur le territoire breton. La dénitrification naturelle en sous-sol est un phénomène temporaire ; au-delà de l'intérêt qu'elle peut présenter pour le court ou le moyen terme, sa large répartition pose, pour le long terme, des problèmes qu'il faut élucider pour être en mesure de préciser une stratégie de lutte pour la restauration de la qualité des eaux aussi adaptée que possible à la réalité et de hiérarchiser les actions à entreprendre ou à préconiser. En effet, la dénitrification naturelle pourrait avoir un poids suffisant pour, si elle n'était pas prise en compte, conduire à des erreurs notables d'appréciation de l'importance réelle des pollutions diffuses et de leurs causes principales.

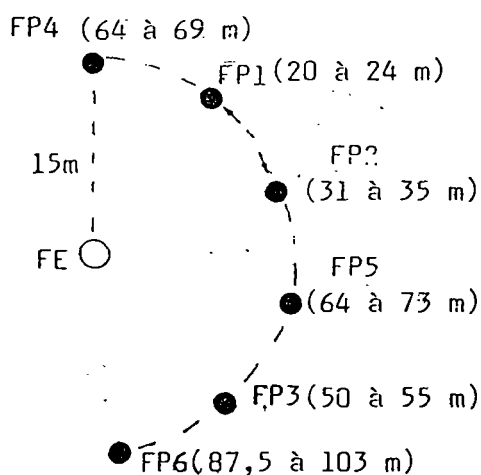
A N N E X E S

A N N E X E 1

Mise en place des dispositifs de mesures  
et d'observations

Les dispositifs mis en place sont destinés à suivre le cheminement de l'eau depuis la surface jusqu'à la profondeur. Ils sont constitués par une "Flûte de Pan" (piézomètres permettant des échantillonnages à différents niveaux de l'aquifère) mise en place à proximité d'un forage d'exploitation (FE) pour l'instant non encore utilisé et complétée par deux dispositifs à céramiques poreuses, équivalents de la Flûte de Pan pour la zone non saturée.

### 1 - FLUTE DE PAN



Le dispositif "Flute de Pan" est constitué par 6 forages, conformément au schéma ci-contre. Les chiffres entre parenthèses indiquent la profondeur de l'horizon capté.

Sur la série de graphiques ci-après sont résumées les caractéristiques de chacun des ouvrages (les triangles indiquent les niveaux riches en pyrite)

- débits à la foration
- profondeurs
- teneurs en nitrates
- coupes techniques

Bien que les forages soient proches les uns des autres, ils montrent une hétérogénéité certaine, notamment pour ce qui concerne les venues d'eau.

Pour saisir la disparition des nitrates qui, ici, se produit en fait au-dessus des arrivées d'eau mesurables, il a fallu, pour les ouvrages les moins profonds, arrêter la foration entre chaque passe de 3 m et attendre que le trou se remplisse d'eau, afin de pouvoir échantillonner.

Le phénomène paraît se produire en 2 temps (cf. notamment le graphique du forage 3) :

- abaissement des nitrates de 80 à une teneur comprise entre 10 et 20 mg/l, ceci à une profondeur variant de moins de 30 m à près de 50 m (Forage 2 : 10 mg/l à 34 m - Forage 3 : 20 mg/l à 46 m - F.E. : 14 mg/l à 32 m),

- disparition quasi-totale des nitrates, en quelques mètres (les teneurs mesurées en cours de foration correspondent à des mélanges de toutes les venues d'eau situées au-dessus de la profondeur atteinte).

On s'est donc efforcé de réaliser les forages de façon à contrôler à la fois le "phénomène nitrates" aux niveaux où l'on l'observe actuellement et les arrivées d'eau :

F1 permet d'échantillonner au niveau des fortes teneurs

F2 permet d'échantillonner une teneur intermédiaire

F3 permet d'échantillonner au niveau où les nitrates disparaissent

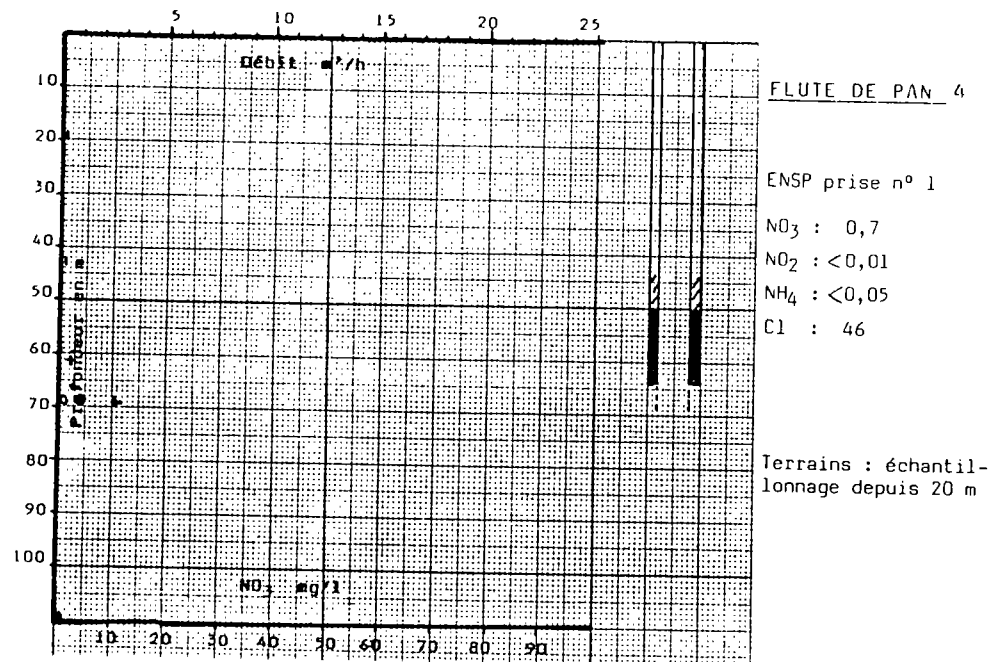
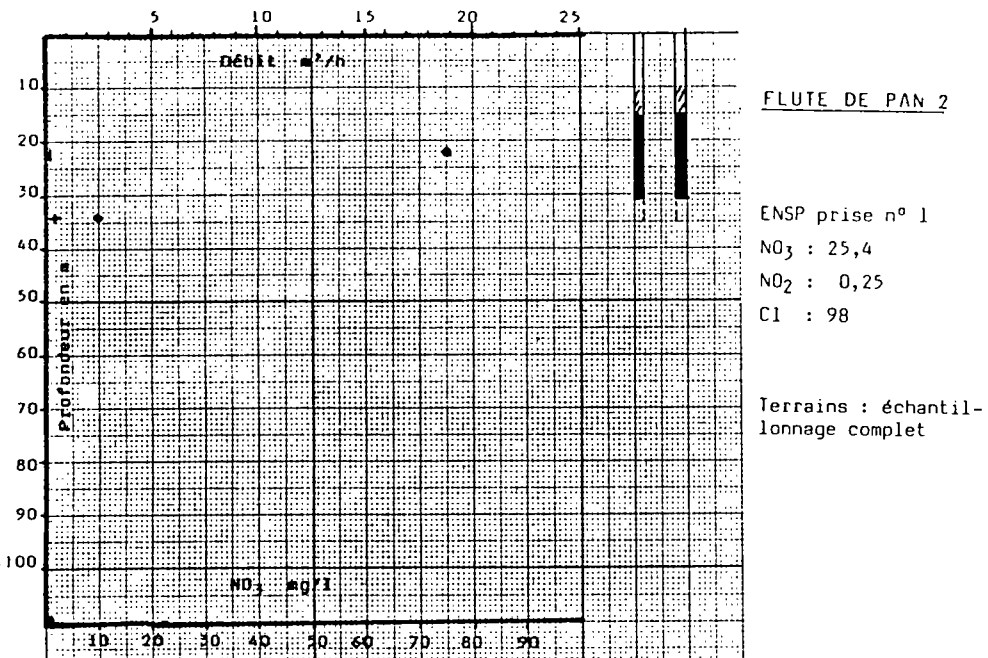
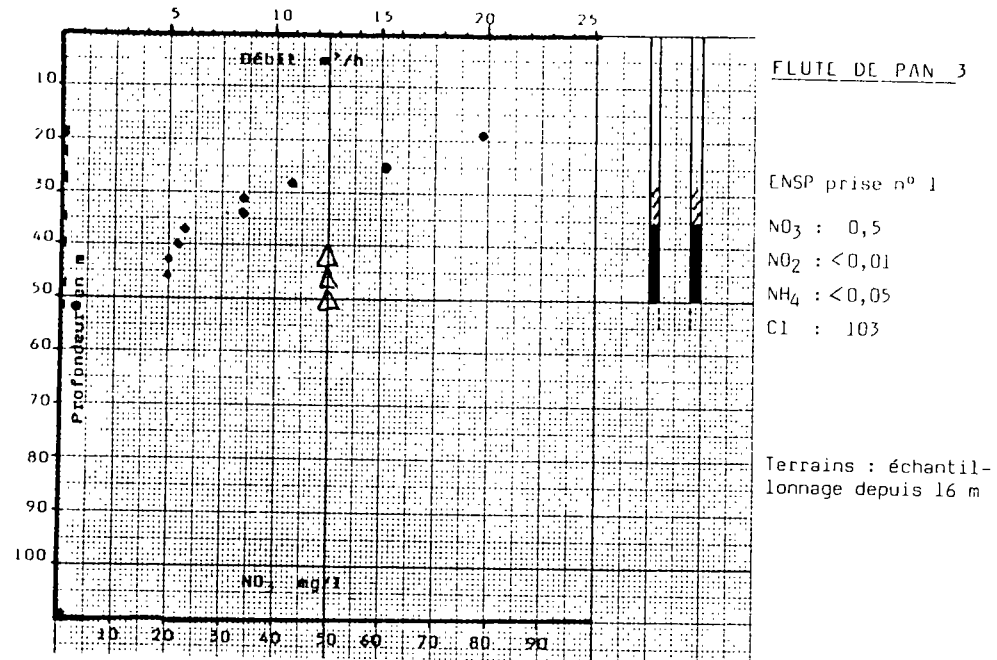
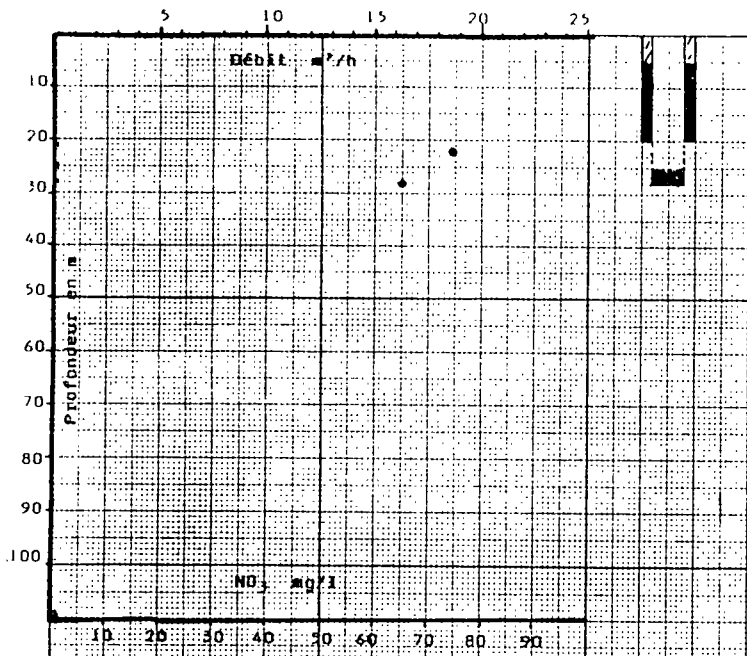
F4 permet d'échantillonner au toit de l'arrivée d'eau

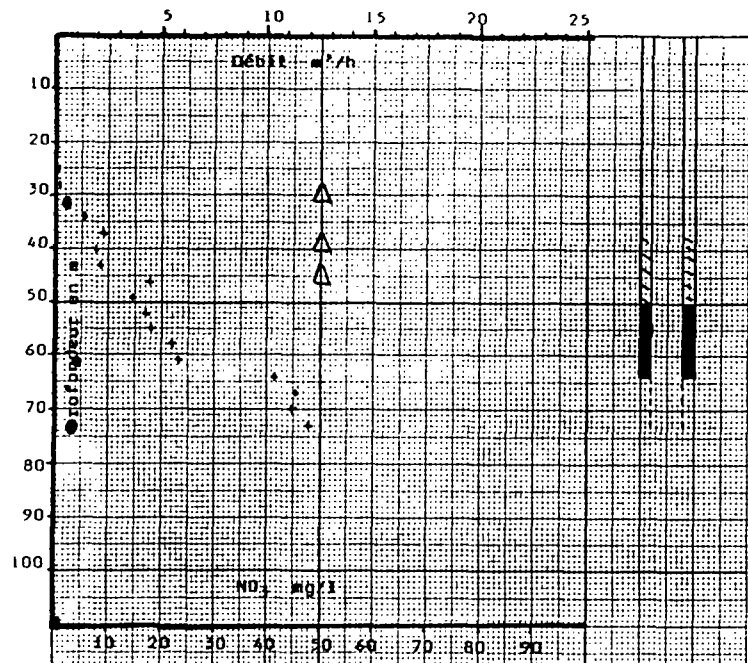
F5 permet d'échantillonner au début de l'arrivée d'eau

F6 permet d'échantillonner l'arrivée d'eau importante.

Les travaux ont été réalisés du 14 mai au 5 juin 1985 (fin des cimentations) ; ils ont nécessité 265,5 m de foration en Ø 156 mm, 316,5 m d'alésage en Ø 200 mm, 29 m de foration d'approfondissement en Ø 105 mm, la mise en place de 321,6 m de PVC 112x125 mm, l'utilisation de 2400 kg de ciment et de 72 kg de bentonite. En outre, chaque annulaire à l'exception de F1, a été muni d'un tube PVC de 30 mm, lanterné, descendu au-dessus du niveau de cimentation.







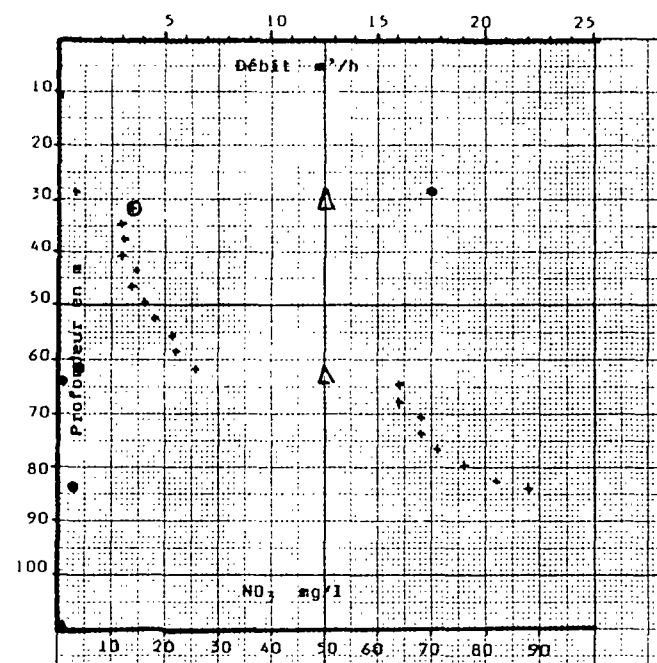
FLUTE DE PAN 5

ENSP prise n° 1

NO<sub>3</sub> : 0,7

Cl : 41

Terrains : échantil-  
lonnage complet



FORAGE D'EXPLOITATION

ENSP prise n° 1

NO<sub>3</sub> : 1,8

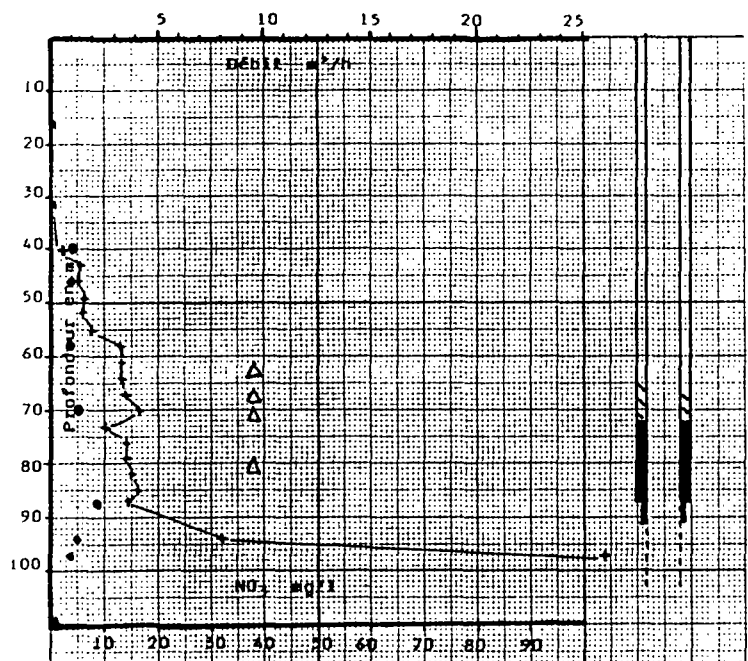
NO<sub>2</sub> : 0,05

Cl : 48

Fe : 2,2

SO<sub>4</sub> : 47

Pb : 19 µg/l



FLUTE DE PAN 6

ENSP prise n° 1

NO<sub>3</sub> : 0,8

Cl : 45

terrains : échantil-  
lonnage depuis 87,5 m

Du 17 au 19 juin, on a procédé, à l'aide d'une petite pompe pneumatique, au rinçage des forages qui ont été échantillonnés le 19 (E.N.S.P.). Rinçage insuffisant et/ou prélèvements prématurés (2 semaines après la cimentation), la composition de l'eau est complètement perturbée par le ciment et les résultats sont sans signification (seules des analyses type II ont été réalisées) à l'exception, cependant, de ceux concernant l'azote, ce qui permet de vérifier que les niveaux captés par les éléments de la Flûte de Pan répondent bien aux objectifs. Néanmoins, FP1 doit être un peu profond : l'eau qu'il permet de prélever est déjà à une teneur intermédiaire ; ceci pourra être facilement pallié par des prélèvements dans les céramiques (cf. plus loin) les plus basses, qui se trouvent - hors pompes prolongés dans F.E. (forage d'exploitation) - dans la nappe.

Les 18 et 19 juin ont également été prélevés des échantillons de 20 litres, expédiés à PARIS VI aux fins d'analyses isotopiques.

Un nouveau rinçage, par émulsion à l'air a été réalisé en juillet. Les améliorations obtenues par les rinçages restent instables.

	20/6 après le 1er rinçage	9/7 2ème rinçage	24/7	25/9	6/9	12/12
FP1	11,5	10	>10	10	9,9	9,9
FP2	11,9	7,8	10	>10	10	>10
FP3	12,0	9,6	>10	>10	10	>10
FP4	9,3	7,1	7,1	7,1	7,5	7,4
FP5	7,7	7,3	7,7	>10	9,9	>10
FP6	10,3	7,5	8,5	9,8	9,5	9,8

pH mesurés dans la Flûte de Pan

Analyses minéralogiques

12 échantillons ont été livrés au département MGA du B.R.G.M. pour identifier les porteurs de Fe, S, Cu et éventuellement Ag.

Il s'agit des échantillons suivants :

FP 2 échantillons 21 à 28 m  
31 à 34 m

FP 3 échantillons 28 à 31 m  
31 à 34 m  
34 à 37 m  
37 à 40 m  
40 à 43 m  
43 à 46 m  
46 à 49 m  
49 à 52 m

FP 5 échantillons 10 à 30 m  
34 à 73 m

FP 2 moyen - < 2,921-28 m - LP 7848

Outre les micas (forme sagénite), le quartz et le peu de sillimanite, on peut noter les espèces sulfurées suivantes :

pyrite et marcasite (provenant de l'altération d'une ancienne pyrrhotite) avec blende et galène associées et mispickel automorphe. La blende se retrouve indépendante en plages assez sombres. Quelques traces de chalcopryrite forment des associations en compagnie de blende pyrite. Rares associations blende-galène. Les produits titanés sont fréquents. Retenir l'existence de nickeline (NiAs) et de gersdorffite (NiAsS) associées (un seul grain observé), traduisant une influence basique. Rare graphite. Trace de covellite en bordure d'un grain de blende. Trace de pyrrhotite microscopique incluse dans la blende.

31-34 m - LM 7849

On retrouve les micas et le cortège habituel des minéraux de gangue. Toujours prépondérante, la pyrite est en petits agrégats polygonaux équi-granulaires et/ou en plages subautomorphes à xénomorphes, associés à un peu de marcasite (ancienne pyrrhotite). Quelques grains de blende et de galène sont libres, très rares. Sous forme de traces on note de la chalcopryrite. Des grains de zircon et des produits titanés (leucoxène) apparaissent indépendants. Une association se compose de pyrite-chalcopryrite-galène-blende-quartz. Quelques pollutions métalliques.

FP 3 - > 2,9

28-31 m - LM 7850

Les formes sulfurées ferrifères sont plus abondantes et mieux développées, en particulier la pyrite, en grains d'ordre > mm. Les associations entre pyrite et marcasite peuvent être encore observées. Sinon, on retrouve un peu de blende libre ou associée à pyrite-marcasite (secondaire). Le peu de galène apparaît libre. Très rare chalcopryrite associée à la pyrite. La gerdorsffite se remarque à nouveau, en micro-cristaux s'associant à blende et galène.

Le graphite (rare) est sous forme lamellaire dans les micas.

31-34 m - LM 7851

Plus grande abondance de sulfures de fer  $\leq$  mm englobant parfois un peu de tourmaline. Le rutile, peu fréquent, est mieux développé que dans les échantillons précédents. Un peu de blende libre peut être hôte de galène retrouvée aussi libre ainsi que la chalcopryrite. Quelques grains d'ilménite libre passent au stade de rutile. Traces de chromite (?) subautomorphe dans les micas (cachet basique). Un peu de graphite.

34-37 m - LM 7852

Grande abondance de sulfures de fer (pyrite prépondérante) < mm. Très rares blende, galène et chalcopryrite associées au mica. En traces on note de la galène libre, l'association de chalcopryrite à pyrite-marcasite. Quelques inclusions de chalcopryrite sont exprimées dans la blende. Rares rutile, graphite libres.

37-40 m - LM 7853

Les sulfures de fer sont nettement moins fréquents (< mm). On les trouve libres ou formant des associations avec de temps à autre de la blende.

Cette dernière est aussi libre (rare), sous forme également très rare se distingue, aussi du mispickel automorphe libre ou associé à un peu de blende et de la galène libre ou aussi liée à la blende. Très rare chalcopryrite libre et en association avec la pyrite. Trace de zircon.

40-43 m - LM 7854

A nouveau on note une assez forte concentration de sulfures de fer mn. La pyrite prédominant toujours sur la marcasite. Les grains sont généralement libres, quelques uns peuvent toutefois s'associer à un peu de gangue quartzo-micacée. Rares grains de blende libre. Très rare mispickel libre, automorphe. Traces de galène, de pyrrhotite et d'ilménite libres. Une petite association chalcopryrite-pyrrhotite-blende-quartz. Les micas renferment très souvent du graphite et des cristaux aciculaires de rutile.

46-46 m - LM 7855

Bien que prépondérants, les sulfures de fer sont nettement moins abondants, en particulier la marcasite. Le peu de blende est soit indépendant, soit à galène incluse, le tout associé à du quartz. Très rare zircon.

46-49 m - LM 7856

La pyrite demeure toujours majoritaire avec marcasite associée (ancienne pyrrhotite). Un peu de blende et de galène peut les accompagner.

Le porteur de zinc est plus fréquent que dans les lames précédentes, en grains  $\leq$  mm. Une croissance zonaire peut y être observée. Traces de galène et chalcopryrite libres. Quelques grains de rutile libre.

49-52 m - LM 7857

La phase de sulfures de fer demeure majeure par rapport à celle des autres sulfures. On remarque à nouveau un peu de blende, des traces de galène et de chalcopryrite. Egalement des traces de mispickel automorphe s'observent libres. Un peu de rutile libre, bien formé. Graphite fréquent dans les micas. Quelques grains d'ilménite.

FP 5 - Moyen > 2,910-13 m - LM 7858

Les sulfures se raréfient mais sont à nouveau plus variés. Il s'agit d'associations entre chalcopryrite-galène-mispickel-quartz. Des traces de civre gris se distinguent dans la chalcopryrite. Rare galène libre.

34-73 m - LM 7859

Les sulfures sont encore fréquents, dominés par la pyrite et la marcasite. Quelques grains libres de blende parfois hôte de chalcopryrite sont remarqués. Certains s'associent à pyrite marcasite. Trace de pyrrhotite libre, de mispickel et de galène. Quelques grains de chalcopryrite à pyrite incluse.

Comme on peut le voir les porteurs potentiels d'argent sont au nombre de deux : galène et cuivre-gris. Le sulfure de plomb est le plus fréquemment observé, en particulier dans la série FP 3 où il se trouve dans chaque lame.

Les sulfures de fer (pyrite et marcassite) sont majoritaires. La chalcopryrite, souvent sous forme de traces, est présente à tous les niveaux (échantillons 43-46 m de FP3 excepté).

PLOUDANIEL (Finistère)	Echantillons de cuttings d 2,9											
	FP 2		FP 3								FP 5	
	21-28 m	31-34 m	28-31 m	31-34 m	34-37 m	37-40 m	40-43 m	43-46 m	46-49 m	49-52 m	10-30 m	34-73 m
BLENDE	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•
PYRITE	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
GALENE	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
CHALCOPYRITE	•	•	•	•	•	•			•	•	•	•
CUIVRE GRIS											•	
MISPICKEL	•					•	•			•	•	•
PYRRHOTITE	•						•					•
MARCASITE	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•
NICKELINE	•											
GERSDORFFITE	•		•									
ZIRCON		•				•		•				
LEUCOXENE				•	•				•	•		
ILMENITE				•			•			•		
CHROMITE(?)				•								
GRAPHITE	•		•	•	•		•			•		
	LM 7848	LM 7849	LM 7850	LM 7851	LM 7852	LM 7853	LM 7854	LM 7855	LM 7856	LM 7857	LM 7858	LM 7859



**A**  
AGUILARITE Ag<sub>2</sub>SeS  
ATKINITE (- PATRINITE) Pb Cu Bi S<sub>3</sub>  
ALABANOITE (- ALABANOINE) Mn S  
ALASKAITE (- VOIR PAVONITE)  
ALGODONITE Cu<sub>6</sub>, 7 As  
ALLARGENTUM Ag<sub>6</sub> Sb  
ALLENMONITE (- VOIR STIBARSEN)  
ALLOCLASITE Co As S  
ALTAITE Pb Te  
AMATASE Ti O<sub>2</sub>  
ANDORITE Pb Ag Sb<sub>3</sub> S<sub>6</sub>  
ANNIVITE (- VOIR CUIVRE GRIS)  
ANTIMOINE Sb  
ANTIMONITE (- VOIR STIBINE)  
ARAMAÏTE Ag (Sb, Bi) S<sub>2</sub>  
ARGENT ARGENT  
ARGENTITE (- ARGYROSE)  
ARGENTOPYRITE Ag Fe<sub>2</sub> S<sub>3</sub>  
ARGYRODITE Ag<sub>8</sub> Ge S<sub>6</sub> ou  
CANFIELDITE Ag<sub>8</sub> Sn S<sub>6</sub>  
ARGYROSE (- VOIR ARGENTITE)  
ARSENIC ARSENOLAMPRITE As  
ASBOLANES Mn O, OH et Ni, Co  
ATHABASCITE Cu<sub>5</sub> Se<sub>4</sub>  
AUROSTIBITE Au Sb<sub>2</sub>  
AWARUITE (- JOSEPHINITE) (Ni, Fe)  
AZURITE Cu<sub>3</sub> (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (OH)<sub>2</sub>

**B**  
BARYTINE Ba SO<sub>4</sub>  
BAUMHAUERITE Pb<sub>5</sub> As<sub>9</sub> S<sub>18</sub>  
BERRYITE Pb<sub>3</sub> (Cu<sub>3</sub>, Ag<sub>1,5</sub> Bi<sub>1</sub> S<sub>16</sub>)  
BERTHIERITE Fe Sb<sub>2</sub> S<sub>4</sub>  
BERZELIANITE Cu<sub>2</sub>, x Se  
BETCHINITE Pb<sub>2</sub> (Cu, Fe)<sub>2</sub> S<sub>15</sub>  
BIRNESSITE (Na, Ca) Mn<sub>7</sub> O<sub>14</sub>, 3 (H O<sub>2</sub>)  
BISMUTH Bi  
BISMUTHINITE Bi<sub>2</sub> S<sub>3</sub>  
BIXBYITE (- SITAPARITE) (Mn, Fe)<sub>2</sub> O<sub>3</sub>  
BLENDE Zn S  
BLENDE (- SPHALERITE) Zn S  
BLOCKITE (- VOIR PENROSEITE)  
BONDAROVICZITE Ag Bi S<sub>2</sub>  
BOURNONITE Co<sub>3</sub> Se<sub>4</sub>  
BORNITE Cu<sub>5</sub> Fe S<sub>4</sub>  
BOULANGERITE Pb<sub>5</sub> Sb<sub>4</sub> S<sub>11</sub>  
BOURNONITE Cu Pb Sb S<sub>3</sub>  
BRAGGITE (- VYSOTSKYITE) (Pt, Pd, Ni) S  
BRANNERITE (U, Ca, Th, Y) (Ti, Fe)<sub>2</sub> O<sub>6</sub>  
BRAUNITE Mn<sup>2+</sup>, Mn<sup>3+</sup>, Si O<sub>12</sub>  
BRAVOÏTE (Fe, Ni, Co) S<sub>2</sub>  
BREITHAUPITE Ni Sb  
BRIARITE Cu<sub>2</sub> (Fe, Zn) Ge S<sub>4</sub>  
BUKOVITE Cu<sub>3</sub> Ti Fe Se<sub>4</sub>

**C**  
CALAVERITE Au Te<sub>2</sub>  
CALCITE Ca CO<sub>3</sub>  
CANFIELDITE (- VOIR ARGYRODITE)  
CARROLLITE (- VOIR LINNEÏTES)  
CANNIZZARITE Pb<sub>3</sub> Bi<sub>5</sub> S<sub>11</sub>  
CASSITERITE Sn O<sub>2</sub>  
CATTIERITE (- VOIR BRAVOÏTE)  
CHABOURNETE (Ti, Pb)<sub>5</sub> (Sb, As)<sub>2</sub> S<sub>34</sub>  
CHALCOHITE Cu<sub>2</sub> S  
CHALCOPIRITE Cu<sub>11</sub> Sb<sub>5</sub> S  
CHALCOPHYNITE (Zn, Mn, Fe) Mn<sub>3</sub><sup>4+</sup> O<sub>7</sub>, 3 H<sub>2</sub>O  
CHALCOPYRITE Cu<sup>+</sup> Fe S<sub>2</sub>  
CHALCOSTIBITE Cu Sb S<sub>2</sub>  
CHLORANTITE (- VOIR SKUTTERUDITE)  
CHROMITE Fe Cr<sub>2</sub> O<sub>4</sub>  
CINABRE Hg S  
CLAUSTHALITE Pb Se  
COBALTITE (INE) Co As S  
COFFINITE U (Si O<sub>4</sub>)<sub>1-x</sub> (OH)<sub>x</sub>  
COHENITE Fe<sub>3</sub> C  
COLORADOÏTE Hg Te  
COLOREO-TANTALITE (Fe, Mn) (Mo, Ta)<sub>2</sub> O<sub>6</sub>  
COLUSITE Cu<sub>3</sub> (Sn, V, As, Fe) S<sub>4</sub>  
COOPERITE Pt S  
CORONADITE (- VOIR PSILOMELANES)  
CORVUSITE V<sub>2</sub> O<sub>4</sub>, 6 V<sub>2</sub> O<sub>5</sub>, H<sub>2</sub> O  
COSALITE Pb<sub>2</sub> Bi<sub>2</sub> S<sub>5</sub>  
COVELLITE (INE) Cu S  
CREDNERITE Cu Mn O<sub>2</sub>  
CROKESITE (Cu, Ti)<sub>2</sub> Se  
CRYPTOPELANE (- VOIR PSILOMELANES)  
CUBANITE Cu Fe S<sub>3</sub>  
CUIVRE Cu  
CUIVRE GRIS (Cu, Fe, Zn, Hg, Ag)<sup>12</sup> (Sb, As)<sup>4</sup> S<sub>13</sub>  
CUPRITE Cu<sub>2</sub> O  
CUPROBISMUTHITE Cu<sub>10</sub> Bi<sub>2</sub> S<sub>23</sub>  
CUPROSTIBITE Cu<sub>2</sub> Sb  
CYLINDRITE Fe Pb<sub>3</sub> Sn<sub>4</sub> Sb<sub>3</sub> S<sub>14</sub>  
DAVIDITE X<sub>2</sub> Y<sub>3</sub> O<sub>10</sub> avec X = Co, Ni, Fe, La, Y + Ti, Cr, Fe, U  
DELAFOSSITE Cu Fe O<sub>2</sub>  
DIAPHORITE Pb<sub>2</sub> Ag<sub>3</sub> Sb<sub>3</sub> S<sub>8</sub>  
DIGENITE (- NEOGENITE) Cu<sub>9</sub> S<sub>5</sub>  
DJERFISHERITE K<sub>3</sub> (Cu, Na) (Fe, Ni)<sub>2</sub> S<sub>14</sub>  
DJURLEÏTE (- VOIR CHALCOHITE)

**D**  
DOMEYKITE a Cu<sub>3</sub> As  
DOMEYKITE b Cu<sub>3</sub> As  
DRYSBALLITE Mo Se<sub>2</sub>  
DUFRENOSYITE Pb<sub>2</sub> As<sub>2</sub> S<sub>5</sub>  
DURANUSITE Pb<sub>2</sub> As<sub>2</sub> S<sub>5</sub>  
DYSCRASE As<sub>4</sub> S  
DYSCRASITE (- VOIR DYSCRASITE)  
DYSCRASITE Ag<sub>3</sub> Sb

**E**  
ELECTRUM (- VOIR OR)  
EPILECTITE Cu<sub>3</sub> Bi S<sub>2</sub>  
ENARGITE Cu<sub>3</sub> As S<sub>4</sub>  
ESKEBORNITE Cu Fe Se<sub>3</sub>  
ESKOLAÏTE Cr<sub>2</sub> O<sub>3</sub>  
EUCALYRITE Ag Cu Se

**F**  
FAMATINITE (- STIBIOLUZOINITE) Cu<sub>3</sub> Sb S<sub>4</sub>  
FER FERBERITE (- VOIR WOLFRAM)  
FERROSELITE (- VOIR WOLFRAM)  
FEUERBLLENDE Fe Se<sub>2</sub>  
(- VOIR XANTHOCONITE)  
FISCHERITE Ag<sub>3</sub> Au Se<sub>2</sub>  
FIZELIYTE Pb<sub>5</sub> Ag<sub>2</sub> Sb<sub>8</sub> S<sub>18</sub>  
FLUORITE (INE) Ca F<sub>2</sub>  
FRANCKÏTE Pb<sub>2</sub> Sn<sub>3</sub> Sb<sub>2</sub> S<sub>14</sub>  
FRANKLINITE (Zn, Fe)<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> (Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>)<sub>2</sub> O<sub>4</sub> avec Ag  
FREIBERGITE (- VOIR CUIVRE GRIS)  
FRIESLEBENITE Ag Pb Sb S<sub>3</sub>  
FRONBERGITE Fe Te<sub>2</sub>  
FÜLÖPITE Pb<sub>3</sub> Sb<sub>8</sub> S<sub>15</sub>

**G**  
GALENE Pb S  
GALENOSMUTITE Pb Bi<sub>2</sub> S<sub>4</sub>  
GALLITE Cu<sub>6</sub> Co S<sub>2</sub>  
GAUDEFROYITE Ca<sub>4</sub> Mn<sup>3+</sup>, x (BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (CO<sub>3</sub>) (O, OH)<sub>3</sub>

**M**  
MACKINAVITE Fe S  
MADAMEITE Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub> Y  
MAGNETITE Fe<sub>3</sub> O<sub>4</sub>  
MAGNETOPYRITE Pb (Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>)<sub>12</sub> O<sub>19</sub>  
MAGNÏTES (- VOIR LINNEÏTES)  
MALACHITE Cu<sub>2</sub> (CO<sub>3</sub>) (OH)<sub>2</sub>  
MALDONITE Au<sub>2</sub> Bi  
MANGANITE Mn O OH  
MANGANOÏTE Mn O  
MARCASITE Fe S<sub>2</sub>  
MARKSITE Co Mn<sub>2</sub> O<sub>4</sub>

**H**  
HAKITE (Cu, Hg)<sub>3</sub> Sb (Se, S)<sub>3, 25</sub>  
HAMMARITE Fe<sub>2</sub> Cu<sub>2</sub> Bi<sub>4</sub> S<sub>9</sub>  
HASTITE Co Se<sub>2</sub>  
HAUHCORNRNITE Ni<sub>9</sub> (Bi, Sb)<sub>2</sub> S<sub>8</sub>  
HAUERITE Mn S<sub>2</sub>  
HAUSMANNITE Mn<sub>3</sub> O<sub>4</sub>  
HEAZLEWOODITE Ni<sub>3</sub> S<sub>2</sub>  
HEDLEYITE (- VOIR TELLUROBISMUTHITE)  
HEMATITE (- OLIGISTE) Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub>  
HESSITE Ag<sub>2</sub> Te  
METAEROLITE Zn Mn<sub>2</sub> O<sub>4</sub>  
HETEROGENITE Co O OH  
HEXASTANNITE (- VOIR STANNÏDITE)  
HOCARITE Ag<sub>2</sub> Sn Fe S<sub>4</sub>  
HOORUSHITE (- VOIR CUPROBISMUTHITE)  
HÖGBOMITE Mg (Al, Fe, Ti)<sub>2</sub> O<sub>7</sub>  
HOLLANDITE Pb (Mn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>)<sub>8</sub> O<sub>16</sub>  
HUBNERITE (- VOIR WOLFRAM)  
HUTCHINSONITE (Pb, Ti)<sub>2</sub> (Cu, Ag) As<sub>5</sub> S<sub>10</sub>

**I**  
IDAÏTE Cu<sub>5</sub> Fe S<sub>6</sub>  
IKALONITE Bi<sub>4</sub> (S, Se)<sub>3</sub>  
ILMENITE Fe Ti O<sub>2</sub>  
ILVAÏTE Ca Fe<sup>2+</sup> Fe<sup>3+</sup> (OH) (Si O<sub>4</sub>)<sub>2</sub>  
INDITE Fe In<sub>2</sub> S<sub>4</sub>  
IRARISITE (Ir, Ru, Rh, Pt) As S  
IRIDIUM Ir  
IRIDOSMIUM (Os, Ir)

**N**  
NAGYAGITE Pb<sub>5</sub> Au (Te, Sb)<sub>4</sub> S<sub>5-8</sub>  
NADAMANNITE Ag<sub>2</sub> Se  
NEOGENITE (- VOIR DIGENITE)  
NICKELINE Ni As (Cu, Ag)<sub>11</sub> As<sub>5</sub>  
NOVAÏTE (- VOIR HEMATITE)  
OLIGISTE (- VOIR HEMATITE)  
OOSTERBOSSCHITE (Pd, Cu)<sub>7</sub> Se<sub>5</sub>  
OR Au  
OREGONITE Ni<sub>2</sub> Fe As<sub>2</sub>  
ORPIMENT As<sub>2</sub> S<sub>3</sub>  
ORUÏTE (- VOIR TETRADYMITTE)  
OSMIRIDIUM -  
OSMIUM (- VOIR IRIIDIUM)  
OSMIUM Os  
OXYHEÏTE Pb<sub>5</sub> Ag<sub>2</sub> Sb<sub>6</sub> S<sub>15</sub>

**J**  
JACOBSITE (Mn, Fe)<sub>3</sub> O<sub>4</sub>  
JALPAÏTE Ag<sub>3</sub> Cu S<sub>2</sub>  
JAMESONITE Pb<sub>4</sub> Fe<sub>6</sub> Sb<sub>4</sub> S<sub>14</sub>  
JORDANITE Pb<sub>5</sub> As<sub>2</sub> S<sub>8</sub>  
JOSEÏTE (- VOIR TETRADYMITTE)  
JOSEPHINITE (- VOIR AWARUITE)

**O**  
OLIGISTE (- VOIR HEMATITE)  
OOSTERBOSSCHITE (Pd, Cu)<sub>7</sub> Se<sub>5</sub>  
OR Au  
OREGONITE Ni<sub>2</sub> Fe As<sub>2</sub>  
ORPIMENT As<sub>2</sub> S<sub>3</sub>  
ORUÏTE (- VOIR TETRADYMITTE)  
OSMIRIDIUM -  
OSMIUM (- VOIR IRIIDIUM)  
OSMIUM Os  
OXYHEÏTE Pb<sub>5</sub> Ag<sub>2</sub> Sb<sub>6</sub> S<sub>15</sub>

**P**  
PALLADIUM Pd  
PARAGUANAÏTE (- VOIR GUANAJUAÏTE)  
PARAPIRROTITE Ti Sb<sub>5</sub> Se  
PARAPAMPERSBERGITE Ni As<sub>2</sub>  
PARKERITE Ni<sub>3</sub> (Bi, Pb)<sub>2</sub> S<sub>2</sub>  
PATRINITE (- VOIR AÏTHÏTE)  
PENTONITE VS<sub>4</sub>  
PAVONITE Ag<sub>2</sub> Cu (Bi, Sb, Pt)<sub>3</sub>  
PAXITE Cu As<sub>2</sub>  
PEARCEÏTE (- VOIR POLYBASITE)  
PECHBLENDE (- VOIR URANIÏTE)  
PENROSEÏTE Ni Se<sub>2</sub>  
PENTLANDITE (Ni, Fe, Co)<sub>3</sub> S<sub>8</sub>  
PERRINGEÏTE Cu<sub>3</sub> Sb Se<sub>4</sub>  
PEROVSKITE Ca Ti O<sub>3</sub>  
PETROVÏTE Cu<sub>3</sub> Mg Pb Bi Se<sub>5</sub>  
PETZITE Ag, Au Te<sub>2</sub>  
PIEDIPPAULITE Ti Fe<sub>2</sub> S<sub>3</sub>  
PIERROTITE Ti<sub>2</sub> (Sb, As)<sub>10</sub> S<sub>17</sub>  
PLAGIOÏTE Pb<sub>5</sub> Sb<sub>8</sub> S<sub>17</sub>  
PLATINE Pt  
PLATINERITE Pd O<sub>2</sub>  
PLUMB (- VOIR PLOMB)  
PLUMBOFERRITE Pb Pb Fe<sub>4</sub> O<sub>7</sub>  
POLIANITE (- VOIR PYROLUSITE)  
POLYBASITE -  
POLYBASSEÏTE Ag<sub>16</sub> Sb<sub>2</sub> S<sub>11</sub> Ag<sub>16</sub>  
POLYDYLITE Ag<sub>2</sub> S<sub>11</sub>  
(- VOIR LINNEÏTES)  
PROUSTITE (- VOIR PYRRARGYRITE)  
PSILOMELANES (Oa, Mn) Mn<sub>8</sub> O<sub>16</sub> (OH)<sub>4</sub>  
PYRRARGYRITE Ag<sub>3</sub> Sb S<sub>3</sub>  
PROUSTITE Ag<sub>3</sub> As S<sub>3</sub>  
PYRITE Fe S<sub>2</sub>  
X<sub>2</sub> Y<sub>2</sub> (O<sub>4</sub>, F)  
Y = Cd, Co, Y, U, et  
Y = Ti, Mo, Ta  
Mn O<sub>2</sub> B

**K**  
KAMIKITE Fe<sub>2</sub> Pb<sub>3</sub> O<sub>8</sub>  
KARELIANITE V<sub>2</sub> O<sub>3</sub>  
KENTROLITE Pb<sub>2</sub> Mn<sub>2</sub> S<sub>2</sub> O<sub>3</sub>  
KERMESITE Sb<sub>2</sub> S<sub>2</sub> O  
KITAÏTE Ni Se Te  
KLOBEÏTE Cu Se  
KOBELLITE Pb<sub>5</sub> (Bi, Sb)<sub>8</sub> S<sub>17</sub>  
KÜSTERITE Cu<sub>2</sub> Zn Sn S<sub>4</sub>  
KOUTEKITE Cu<sub>8</sub> As<sub>2</sub>  
KRENNERITE Au Te<sub>2</sub>  
KRUTAÏTE Cu Te<sub>2</sub>  
KUTINAÏTE Cu<sub>2, 07</sub> Ag<sub>0, 84</sub> As

**Q**  
QUARTZ Si O<sub>2</sub>  
QUEENSELITE Pb Mn O<sub>2</sub> (OH)

**R**  
RAMMOSSITE Pb<sub>3</sub> Ag<sub>2</sub> Sb<sub>6</sub> S<sub>13</sub>  
(- VOIR FIZELIYTE)  
RAMMELSBERGITE Ni As<sub>2</sub>  
RAMSDELLITE Mn O<sub>2</sub> Y  
RASUMVITE K<sub>3</sub> Fe<sub>9</sub> S<sub>14</sub>  
RATHITE (Pb, Ti)<sub>3</sub> As<sub>5</sub> S<sub>10</sub>  
REALGAR As S  
RENIÏREITE Cu<sub>3</sub> (Fe, Ge)<sub>2</sub> Zn (S, As)<sub>4</sub>  
RHODOSTANNITE Cu<sub>2</sub> Fe Sn<sub>3</sub> S<sub>8</sub>  
RICKARDEÏTE Cu<sub>4</sub> Te<sub>3</sub>  
RIITINGERITE (- VOIR XANTHOCONITE)  
ROMANECHITE (Ba, Mn) Mn<sub>8</sub> O<sub>16</sub> (OH)<sub>4</sub>  
ROQUESITE Cu In S<sub>2</sub>  
ROUTHIERITE Ti Hg As S<sub>3</sub>  
RUTHILE Ti O<sub>2</sub>

**S**  
SAFFLORITE Ca As<sub>2</sub>  
SAMSONITE Ag<sub>4</sub> Mn Sb<sub>2</sub> S<sub>6</sub>  
SARTORITE Pb As<sub>2</sub> S<sub>4</sub>  
SCHAPBACHITE Ag Bi S<sub>2</sub>  
(- MATILOÏTE)  
SCHEELITE Ca WO<sub>4</sub>  
SCHIRMERITE Ag Pb<sub>2</sub> Bi<sub>3</sub> S<sub>7</sub>  
SEDERHOLMITE Ni Se  
SELENIUM Se  
SELIGMANNITE Cu Pb As S<sub>3</sub>  
SEMSEYITE Pb<sub>9</sub> Sb<sub>8</sub> S<sub>21</sub>  
SIDÏREITE Fe CO<sub>3</sub>  
SIDÏROSE (- VOIR SIDÏREITE)  
SIEGENITE (- VOIR LINNEÏTES)  
SITAPARITE (- VOIR BIXBYITE)  
SKUTTERUDITE (Ni, Co) As<sub>3</sub>  
SMALTITE (INE) (- VOIR SKUTTERUDITE)  
SMITHITE Ag As S<sub>2</sub>  
SPHYTHITE (Fe, Ni)<sub>9</sub> S<sub>11</sub>  
SPERRYLITE Pt As<sub>2</sub>  
SPHALERITE (- VOIR BLENDE)  
SPHÈNE (= TITANITE) Ca Ti Si O<sub>6</sub>  
SPIELLES Mn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, O<sub>4</sub> (Mg, Fe, Zn) (Mn, Cr, Al)

**T**  
TALNAKHITE Cu<sub>9</sub> (Fe, Ni)<sub>8</sub> S<sub>16</sub>  
TAPOLITE (Fe, Mn) (Te, Mo)<sub>2</sub> O<sub>4</sub>  
TEALLITE Pb Sn S<sub>2</sub>  
TELLURANTIMONITE Sb<sub>2</sub> Te<sub>3</sub>  
TELLURE Te  
TELLUROBISMUTHITE Bi<sub>2</sub> Te<sub>3</sub>  
TENANITE (- VOIR CUIVRE GRIS)  
TENDRITE Cu O  
TETRADYMITTE Bi<sub>2</sub> Te<sub>2</sub> S  
TETRAÏDITE (- VOIR CUIVRE GRIS)  
THORIANITE Th O<sub>2</sub>  
TIEMANNITE Hg Se  
TITANITE (- VOIR SPHÈNE)  
TODOROKITE (Mn<sup>2+</sup>, Co, Mg) Mn<sup>3+</sup> O<sub>7</sub>, 2 H<sub>2</sub>O  
Co Se<sub>2</sub>  
Ni<sub>3</sub> Se<sub>4</sub>  
WS<sub>2</sub>  
Pd (Sb, As)<sub>2</sub> S<sub>4</sub>  
(Cu, Co, Ni)<sub>3</sub> Se<sub>4</sub>

**U**  
ULLMANNITE Ni Sb S  
ULVITE Fe<sub>2</sub> Ti O<sub>4</sub>  
(- ULVÖSPINELLE)  
ULVÖSPINELLE (- VOIR ULVITE)  
URANIÏTE Cu<sub>3</sub> Se<sub>2</sub>  
UO<sub>2</sub>  
VAESITE (- VOIR BRAVOÏTE)  
VALLERITE 2 (Cu, Fe)<sub>2</sub> S<sub>2</sub>, 3 (Mg, Al) (OH)<sub>2</sub> (Cu, Ni, Co, Fe) (S, Se)<sub>2</sub>  
VIOLARITE (- VOIR LINNEÏTES)  
VRBAÏTE Ti<sub>4</sub> Hg<sub>3</sub> Sb<sub>2</sub> As<sub>8</sub> S<sub>20</sub>  
VULCANITE Cu Te  
VYSOTSKYITE (- VOIR BRAGGITE)

**V**  
VACABAYASHILITE (As, Sb)<sub>3</sub> S<sub>4</sub>  
WEHLITE (- VOIR TELLUROBISMUTHITE)  
WEIBULLITE Fe<sub>5</sub> Bi<sub>8</sub> Se<sub>7</sub> S<sub>11</sub>  
WEÏSITE Cu<sub>2-x</sub> Te  
WESTERVELDITE Fe As  
"WHITNEYÏTE" (Cu, As)  
WITTICHENITE Cu<sub>3</sub> Bi S<sub>7</sub>  
WITITE Pb<sub>9</sub> Bi<sub>2</sub> Se<sub>7</sub> S<sub>20</sub>  
WOLFRAM (WOLFRAMITE) (Fe, Mn) WO<sub>4</sub>  
WOLFSBERGITE (- VOIR CHALCOSTIBITE)  
WURZITE Zn S

**X**  
XANTHOCONITE Ag<sub>3</sub> As S<sub>3</sub>  
(- RIITINGERITE)  
ZINCITE Zn O  
ZINKEÏTE Pb<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> S<sub>27</sub>  
ZINCOÏTE Zn S

## 2 - ZONE NON SATURÉE

Deux sites ont été équipés de céramiques poreuses (Nardeux)

- Site 1 : à côté de la flûte de Pan
- Site 2 : près du Centre de Recherches de la Coopérative.

Chaque site est composé de 3 trous  $\varnothing$  200 mm voisins l'un de l'autre, munis chacun de 6 ou 7 céramiques et protégés par des buses et couvercles en ciment.

Site 1 , les trous ont été réalisés à la tarière hélicoïdale jusqu'à 7 m et approfondis quand nécessaire au marteau fond de trou.

- Forage 1 : tarière jusqu'à 7 m, marteau de 7 m à 11 m
- Forage 2 : tarière jusqu'à 7 m, marteau de 7 à 9,5 m
- Forage 3 : tarière jusqu'à 4 m

Site 2 , les trois forages y ont respectivement les profondeurs de 11 m - 11 m et 4 m. La tarière hélicoïdale n'a pu descendre que jusqu'à 4 m, le reste ayant été foré au marteau fond de trou.

Les échantillons de terrain ont été livrés, congelés, à L'ENSP le 13 juin 1985, y compris pour la partie forée au marteau, qui risque de ne pas être très représentative de la réalité pour ce qui concerne la teneur en eau.

Les céramiques sont installées tous les 0,50 m dans le terrain reconstitué mélangé à du matériel inerte (sable de verrerie, poudre de silice), séparées les unes des autres par 0,2 m d'argile-ciment.

### Site 1

Forage 1 (W), céramiques installées aux profondeurs de 10,5 m - 10 - 9,5 - 9 - 8,5 - 8 et 7,5 m.

Forage 2, céramiques à 7 m - 6,5 - 6 - 5,5 - 5 - 4,5 - 4 et 0,5m.

Forage 3, céramiques à 3,5 m - 3 - 2,5 - 2 - 1,5 et 1 m.

### Site 2

Forage 1 (N), céramiques à 10 m - 9,5 - 9 - 8,5 - 8 et 7,5 m.

Forage 2, céramiques à 4 m - 3,5 - 3 - 2,5 - 2 - 1,5 - 1 et 0,5 m.

Forage 3, céramiques à 10,5 m - 7 - 6,5 - 6 - 5,5 - 5 et 4,5 m.

Chaque céramique a été lavée une première fois à l'eau distillée, vidée et mise en dépression. Un deuxième rinçage a eu lieu en juillet.

Un premier échantillonnage est réalisé en décembre.

Lors de la mise en place des céramiques, des échantillons de terrain ont été prélevés tous les 0,5 m et congelés sur place. Le Laboratoire des Eaux de l'E.N.S.P. les a analysés : teneur en eau, dosage des composés azotés et des chlorures, qui peuvent être un traceur plus représentatif que l'azote des vitesses de percolation. Les résultats sont regroupés sur les deux tableaux ci-après et les graphiques qui suivent.

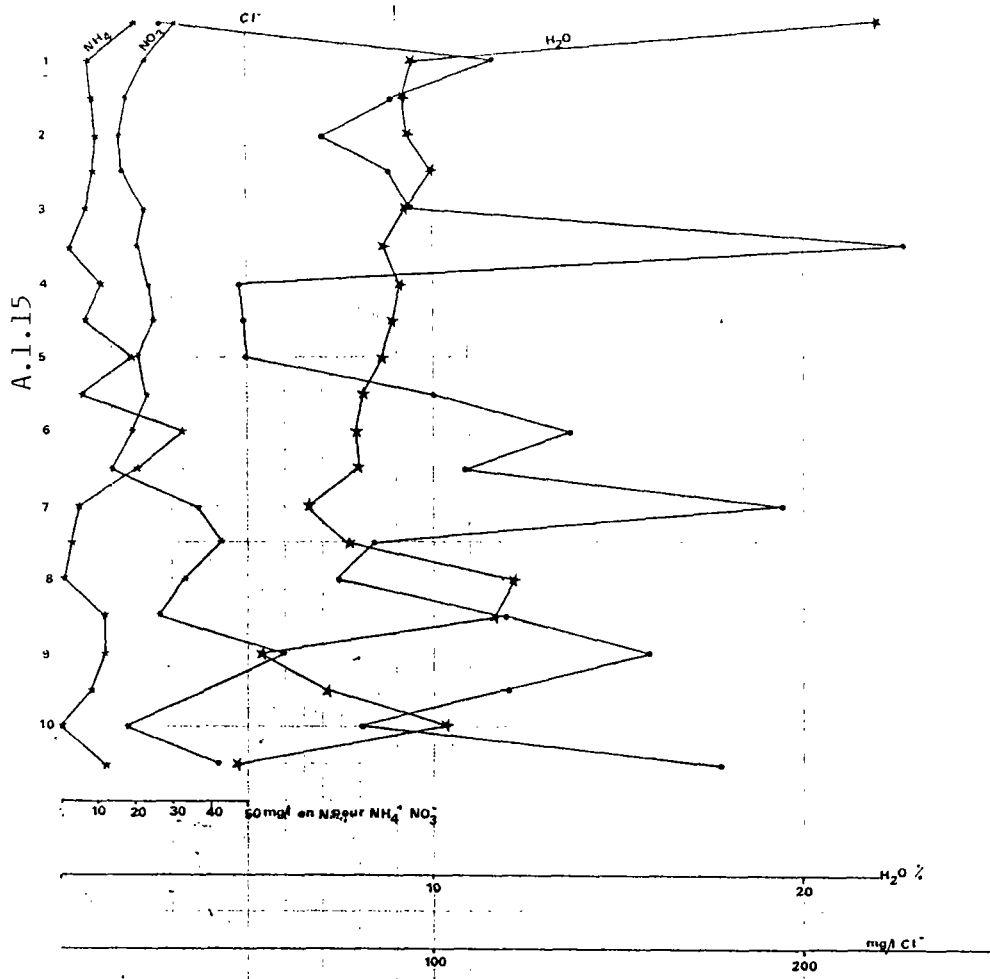
## PLOUDANIEL - non saturé

Référence	Teneur en eau %	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l en N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l en N	NK N mg/g	Cl <sup>-</sup> mg/l
B1 0,5 m	22	31	20	0,38	28
B1 1,0 m	9,4	23	8	0,22	116
B1 1,5 m	9,2	18	9	0,15	89
B1 2,0 m	9,3	16	10	0,13	70
B1 2,5 m	10,0	17	9	0,04	88
B1 3,0 m	9,3	23	7	0,26	94
B1 3,5 m	8,6	31	3	0,26	227
B1 4,0 m	9,1	24	11	0,26	48
B1 4,5 m	8,9	25	7	/	49
B1 5,0 m	8,6	21	20	/	50
B1 5,5 m	8,1	23	6	/	100
B1 6,0 m	7,9	20	33	0,14	137
B1 6,25 m	8,0	14	21	/	108
B1 6,25-7 m	6,6	37	5	/	194
B1 7,5 m	7,7	43	3	/	84
B1 8,0 m	12,2	33	1	/	74
B1 8,5 m	11,7	27	12	0,19	119
B1 9,0 m	5,3	60	12	/	159
B1 9,5 m	7,2	39	8	/	119
B1 10,0 m	10,4	18	/	/	80
B1 10,5 m	4,7	42	12	0,24	178
FP6 19 m	2,3	36	40	0,05	178
FP6 22 m	4,9	12	3	/	128
FP6 25 m	5,2	8	4	/	121
FP6 28 m	5,6	9	22	0,09	113

Dispositif B 1 (près de la Flûte de Pan)

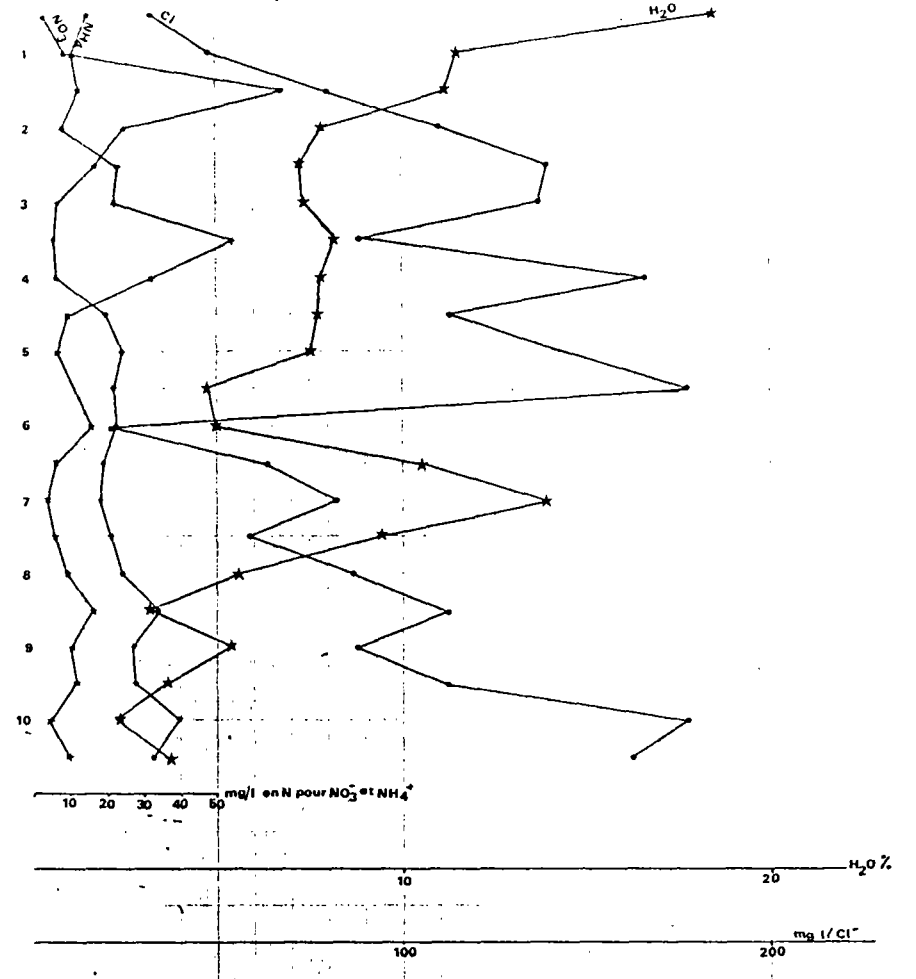
Référence	Teneur en eau %	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l en N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l en N	NK N mg/g	Cl <sup>-</sup> mg/l
B2 0,5 m	18,5	3	15	2,0	32
B2 1,0 m	11,5	9	11	0,41	48
B2 1,5 m	11,2	68	13	0,26	79
B2 2,0 m	7,8	25	8	0,25	111
B2 2,5 m	7,2	17	23	0,15	149
B2 3,0 m	7,3	7	22	0,17	147
B2 3,5 m	8,2	6	54	0,16	88
B2 4,0 m	7,8	7	33	0,14	166
B2 4,5 m	7,7	20	10	/	112
B2 5,0 m	7,5	24	7	/	143
B2 5,5 m	4,7	22	12	/	178
B2 6,0 m	4,9	23	16	0,09	21
B2 6,5 m	10,5	19	6	/	63
B2 7,0 m	13,9	18	4	/	82
B2 7,5 m	9,3	21	6	/	59
B2 8,0 m	5,5	24	9	/	77
B2 8,5 m	3,1	34	16	0,08	112
B2 9,0 m	5,4	27	10	/	78
B2 9,5 m	3,7	28	12	/	112
B2 10,0 m	2,3	40	5	/	178
B2 10,5 m	3,7	33	10	0,15	112

Dispositif B 2 (près du Centre de Recherche)



OCCUPATION DU SOL: CULTURE DE MAIS FOURRAGE

**B1**



OCCUPATION DU SOL: FRICHES

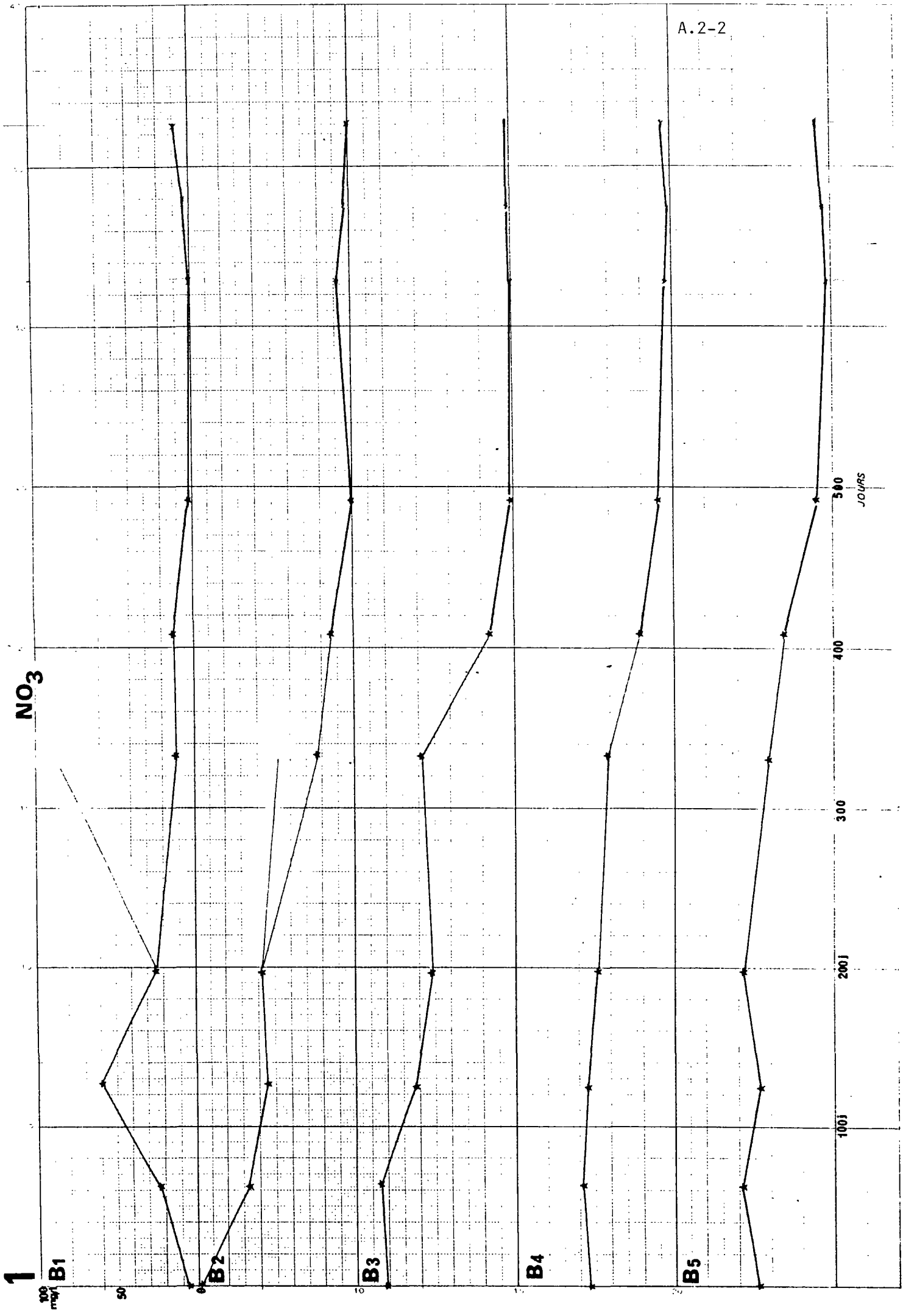
**B2**

A N N E X E 2

Analyses chimiques de l'eau

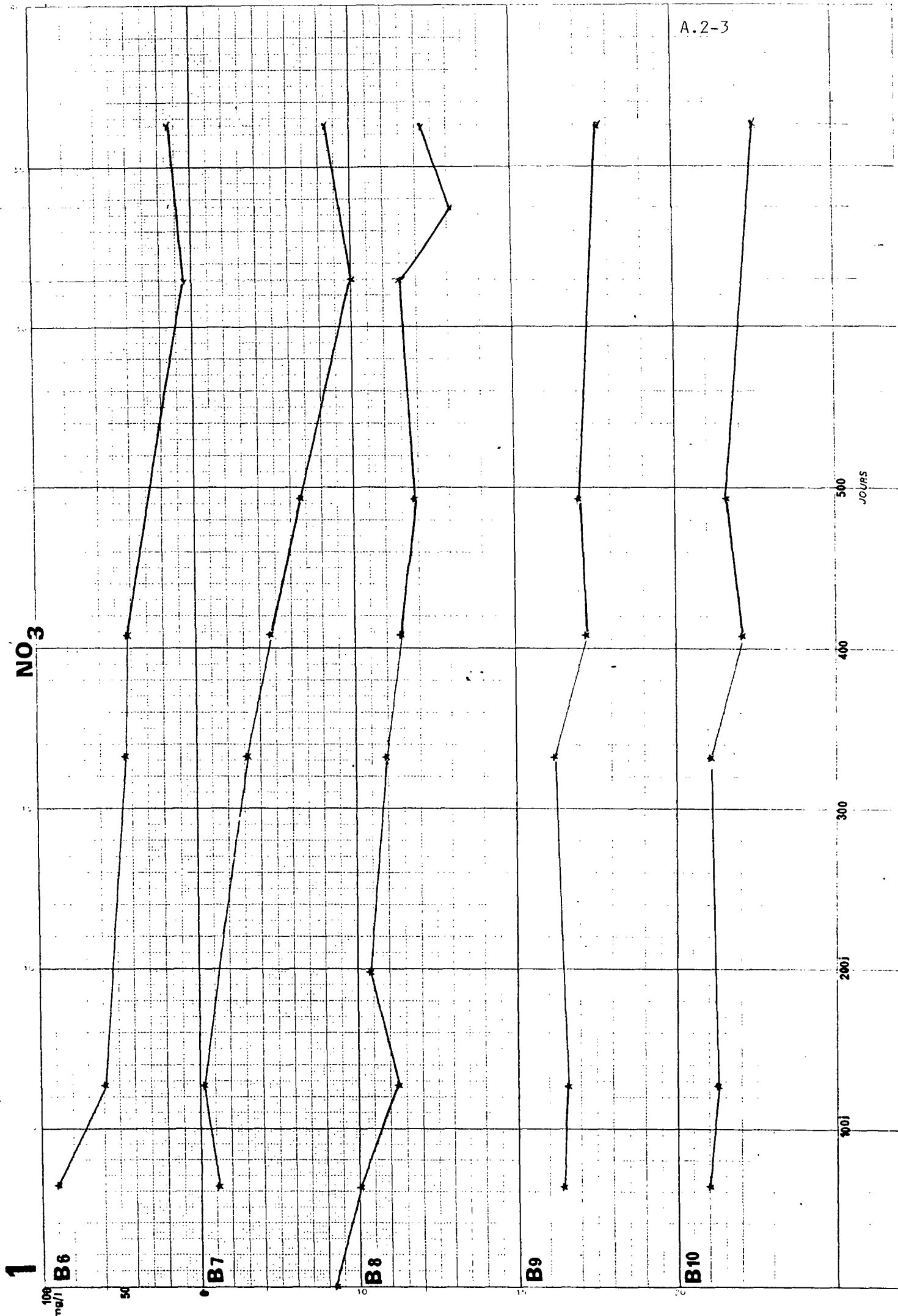
Concentration en  $\text{NO}_3$ 

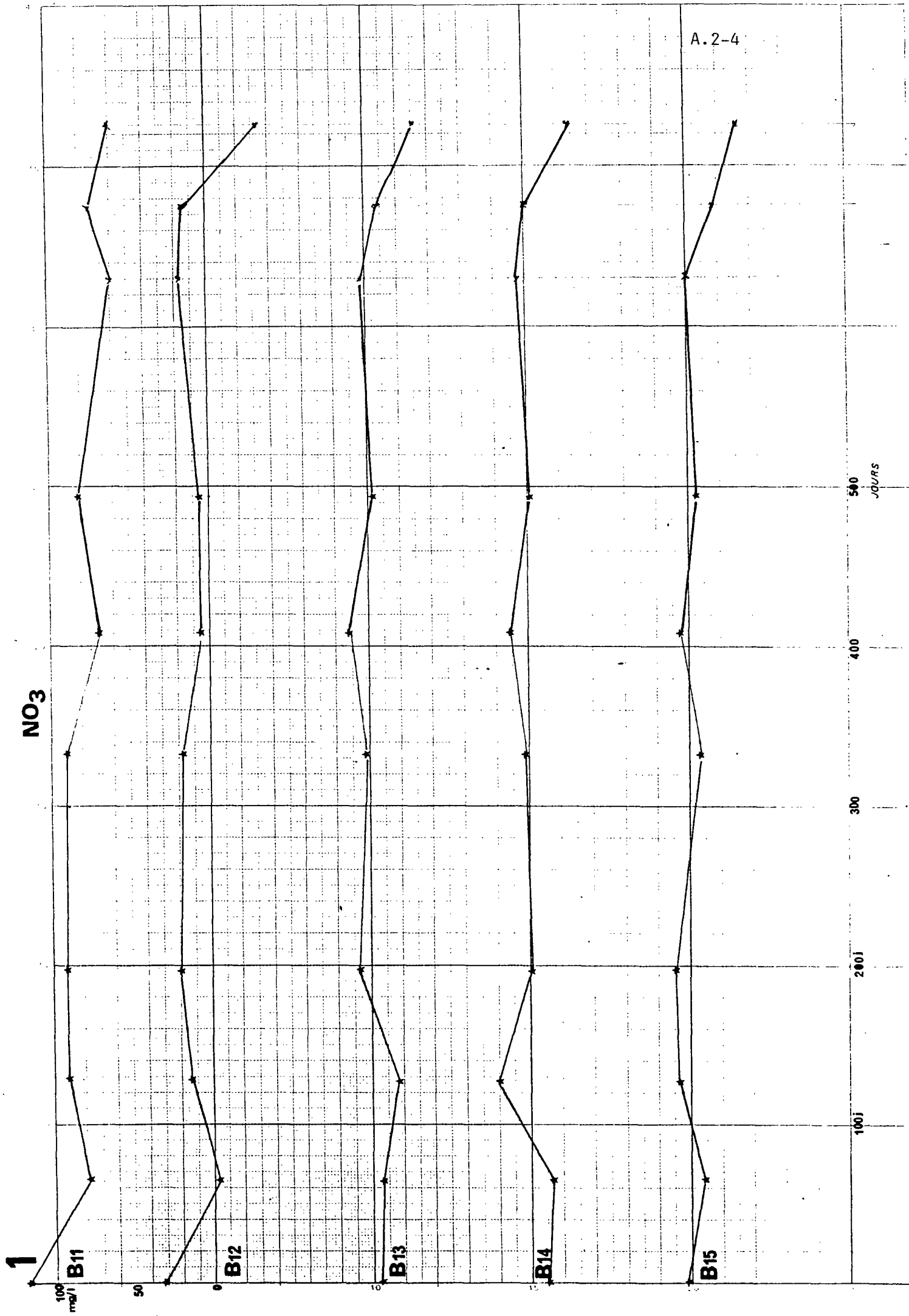
Bougie	Pro- fondeur	D A T E D E L ' A N A L Y S E																	
		24/12/85	25/02/86	30/04/86	09/07/86	21/11/86	05/02/87	30/04/87	10/09/87	27/10/87	16/12/87								
B1	0,50	6,50	22,7	59,5	24,6	12	13,4	2,7	<0,5	1,6	10								
B2	1,00	98,00	66,8	54,5	58	24	14,2	0,9	8,5	1,7	<1								
B3	1,50	81,20	85,0	63,0	51,4	58,6	15,5	1,4	<0,5	1,3	1								
B4	2,00	53,20	57,3	55,0	47,7	40,8	20,8	10,-	4,5	1,5	3,5								
B5	2,50	48,20	58,1	46,0	56,8	41,2	41,2	10,3	2,5	3,8	8,5								
B6	3,00	-	89,5	58,5		54,2	41,6	-	4,0		15,5								
B7	3,50	-	87,5	97,0		68,0	54,1	33,5	<0,5		16								
B8	4,00	116,00	99,0	75,0	92,2	80,8	71,5	62,5	70,0	39	57								
B9	4,50	-	71,3	68		76	55,5	59,5			45								
B10	5,00	-	79,3	75		79	59,0	68			50								
B11	5,50	118	77,2	91,5	90	90	69	81	60	73,5	60								
B12	6,00	132,5	96	114,5	119,2	117,6	106,5	106	118	116	67,5								
B13	6,50	95,40	94	83,0	107,1	101,6	112	97,5	102	94,5	69,5								
B14	7,00	90,20	86	110,0	98	102	111	98,5	106	100,5	71								
B15	7,50	102,40	92,6	106,0	109	93	105	97	100	83,5	68,5								
B16	8,00	87,40	92,6	113,0	96	98,6	106	97			70								
B17	8,50	85,00	90,2	110	98	94,8	106	96,5	101	84	71								
B18	9,00	76,00	96,4	118	102	100	112	107			71								
B19	9,50	101,60	96,2	113	98	100	110	104			71,5								
B20	10,00	95,00	-	114	102	97,2	120	98	94	86,5	69								
B21	10,50	89,00	86,4	109	102	76,5	115	103	101	83,2	68								



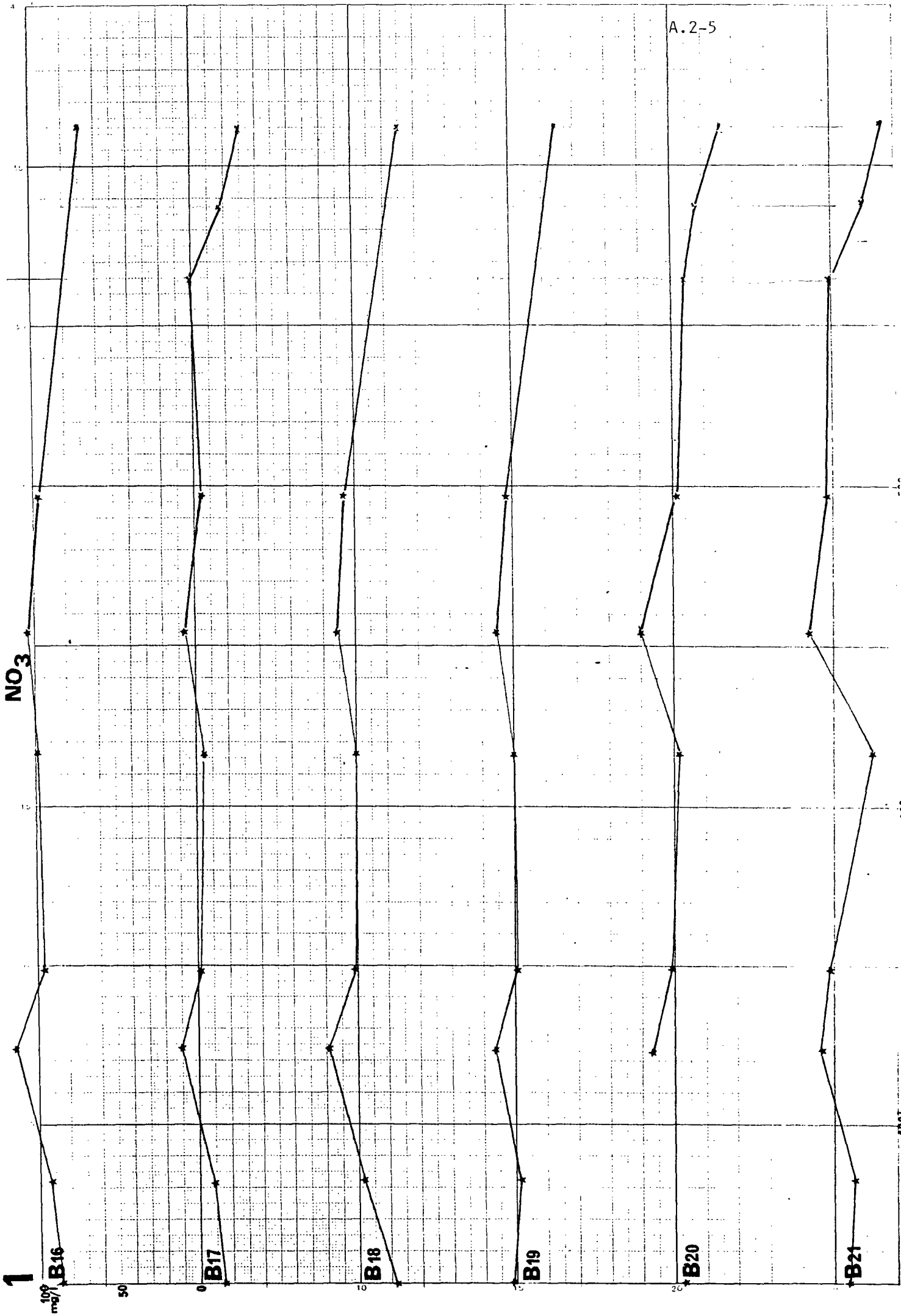


A.2-3





A.2-5



Concentration en **Cl**

## D A T E D E L ' A N A L Y S E

Bougie	Pro- fondeur	24/12/85	25/02/86	30/04/86	09/07/86	21/11/86	05/02/87	30/04/87	10/09/87	27/10/87	16/12/87								
B1	0,50	34,00	23	20	-	10	10	-		30									
B2	1,00	52,00	23	15	14	10	10	-		10									
B3	1,50	36,00	26	16	14	18	10	10	12	20	8								
B4	2,00	36	27	18	34	12	10	60	10	12	8								
B5	2,50	48	29	22	25	14	20	90		30	14								
B6	3,00	-	34	23	-	20	22	-			20								
B7	3,50	-	38	30	-	26	24	170			20								
B8	4,00	60	44	30	42	38	36	180	36	46	36								
B9	4,50	-	42	40	-	38	32	180			30								
B10	5,00	-	46	44	-	44	34	38			30								
B11	5,50	74	47	50	51	48	36	43	28	10	36								
B12	6,00	62	44	44	51	50	38	47	48	50	42								
B13	6,50	60	42	42	43	44	40	42	43	44	40								
B14	7,00	48	43	40	42	44	40	41	44	46	42								
B15	7,50	44	41	40	41	38	40	42	38	36	39								
B16	8,00	44	41	44	-	40	40	43			40								
B17	8,50	50	41	43	42	40	42	43	40		40								
B18	9,00	-	42	43	41	38	42	44			39								
B19	9,50	50	44	43	41	40	42	44			40								
B20	10,00	60	-	40	40	40	42	44	39		40								
B21	10,50	48	44	40	41	40	42	42	41	44	41								

Concentration en  $SO_4$ 

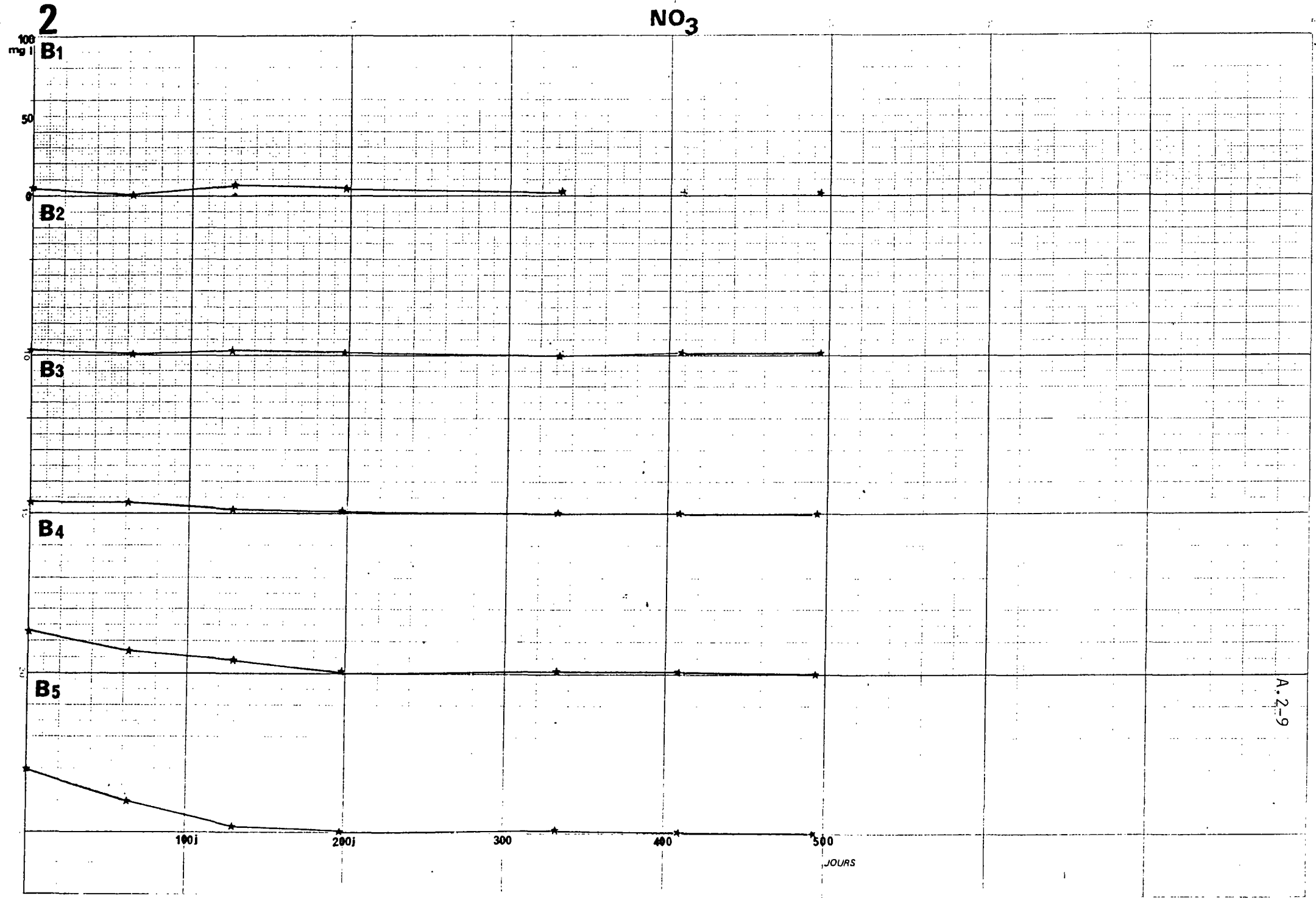
Bougie	Pro- fondeur	DATE DE L'ANALYSE																
		24/12/85	25/2/86	30/04/86	09/07/86	21/11/86	05/02/87	30/04/87	10/09/87	27/10/87	16/12/87							
B1	0,50	-	238	152	-	116	80	50		48	45							
B2	1,00	870	370	247	-	114	88	75		64								
B3	1,50	430	203	168	200	115	132	120		94	93							
B4	2,00	605	433	360	350	242	168	146	205	180								
B5	2,50	645	270	180	215	166	118	106		100								
B6	3,00	-	390	220	-	160	152	-										
B7	3,50	-	270	186	-	172	120	190										
B8	4,00	480	110	-	55	42	34	26	34	54	33							
B9	4,50	-	70	46	-	42	38	36			43							
B10	5,00	-	85	78	-	30	42	32			38							
B11	5,50	265	47	42	40	22	26	21	20	22	28							
B12	6,00	53	17	14	40	16	10	12	23	24	23							
B13	6,50	485	13	46	35	28	12	11	44	32	23							
B14	7,00	52	29	18	35	110	18	13	44	48	26							
B15	7,50	46	23	32	35	56	18	11	19	42	15							
B16	8,00	23	34	42	-	82	22	17			14							
B17	8,50	-	30	36	50	56	24	18		165	18							
B18	9,00	30	18	22	26	56	20	15			19							
B19	9,50	-	25	26	34	30	20	16			15							
B20	10,00	-	-	12	20	34	14	15	30		14							
B21	10,50	50	25	6,0	24	30	14	16	17	18	10							

Concentration en  $\text{NO}_3$ 

## D A T E D E L ' A N A L Y S E

Bougie	Pro- fondeur	24/12/85	25/2/86	30/04/86	09/07/86	21/11/86	05/02/87	30/04/87	10/09/87	27/10/87	16/12/87								
B1	0,50	5,00	0,7	6,0	5,0	2,3	-	2		2,2	7,5								
B2	1,00	3,00	0,9	2,5	1	0,5	1,7	1,7		1,3	1,5								
B3	1,50	8,50	6,8	1,5	1	0,7	0,3	0,5	1,5	< 0,5	1,5								
B4	2,00	27,00	13,7	8,0	1	2,4	1,3	0,6	1,0	< 0,5	0,02								
B5	2,50	39,50	20,1	3,5	1	2,7	0,6	1,8	1,0	1,5	< 0,01								
B6	3,00	28,00	30,6	22,5	1	14,2	4,8	0,6	2,0	3,2	< 0,01								
B7	3,50	31,50	30,7	22,0	-	10,8	10,1	2			< 0,01								
B8	4,00	-	29,3	-	-	30,9	30,8	4,4			0,2								
B9	4,50	24,00	47,3	61,0	44,0	17,8	72,0	8,4	1	3,2									
B10	5,00	-	56,8	93,0	68	48,2	70,0	17,1	3,5	6,8	0,1								
B11	5,50	40,00	69,2	110,0	84	66,2	71,0	9,9	2	58	0,2								
B12	6,00	43,50	74,0	110	90	69,2	76,5	41,6	11	53,2	0,1								
B13	6,50	32,50	68,3	40	86	64,0	75,5	65	45	51,2	39								
B14	7,00	-	61,9	-	-	-	-	-	-	-	-								
B15	7,50	43,00	14,9	42	49	38,3	26,5	29,5	21,5	36,3	21								
B16	8,00	33,00	22,8	28	74	67	35	46,5	39,5	19	31,5								
B17	8,50	23,00	21,3	24	58	60,4	21	47,5	60	44	43								
B18	9,00	-	24,3	48	-	-	26	45,5											
B19	9,50	-	47,6	37,0	50	-	40	61,5			54,5								
B20	10,00	12,00	36,2	62,5	47	45	39,5	53	61	13,3	49								
B21	10,50	30,00	56,8	70,0	-	59	60	69,5	63	6,0	53								

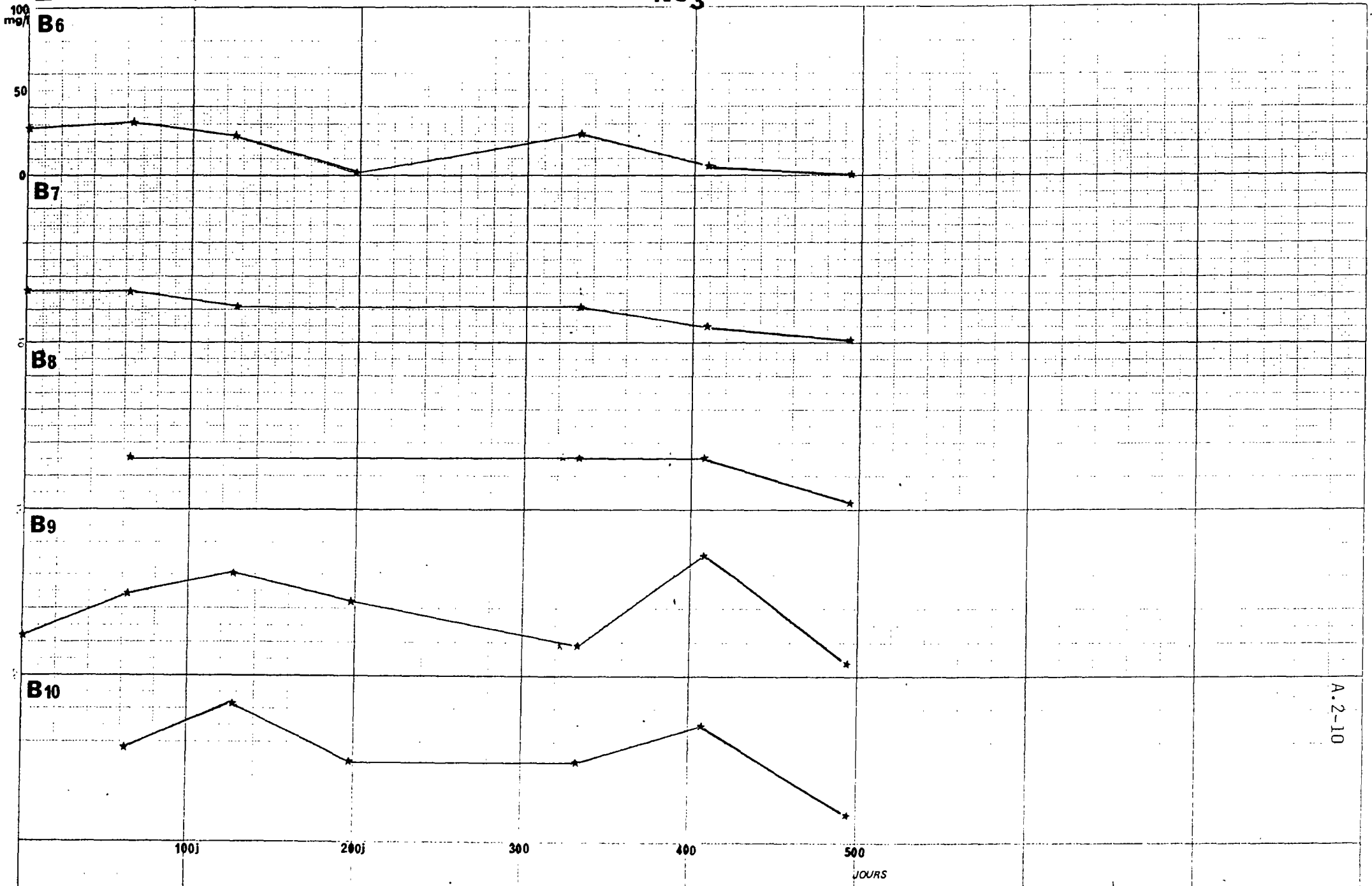
NO<sub>3</sub>



A.2-9

2

NO<sub>3</sub>

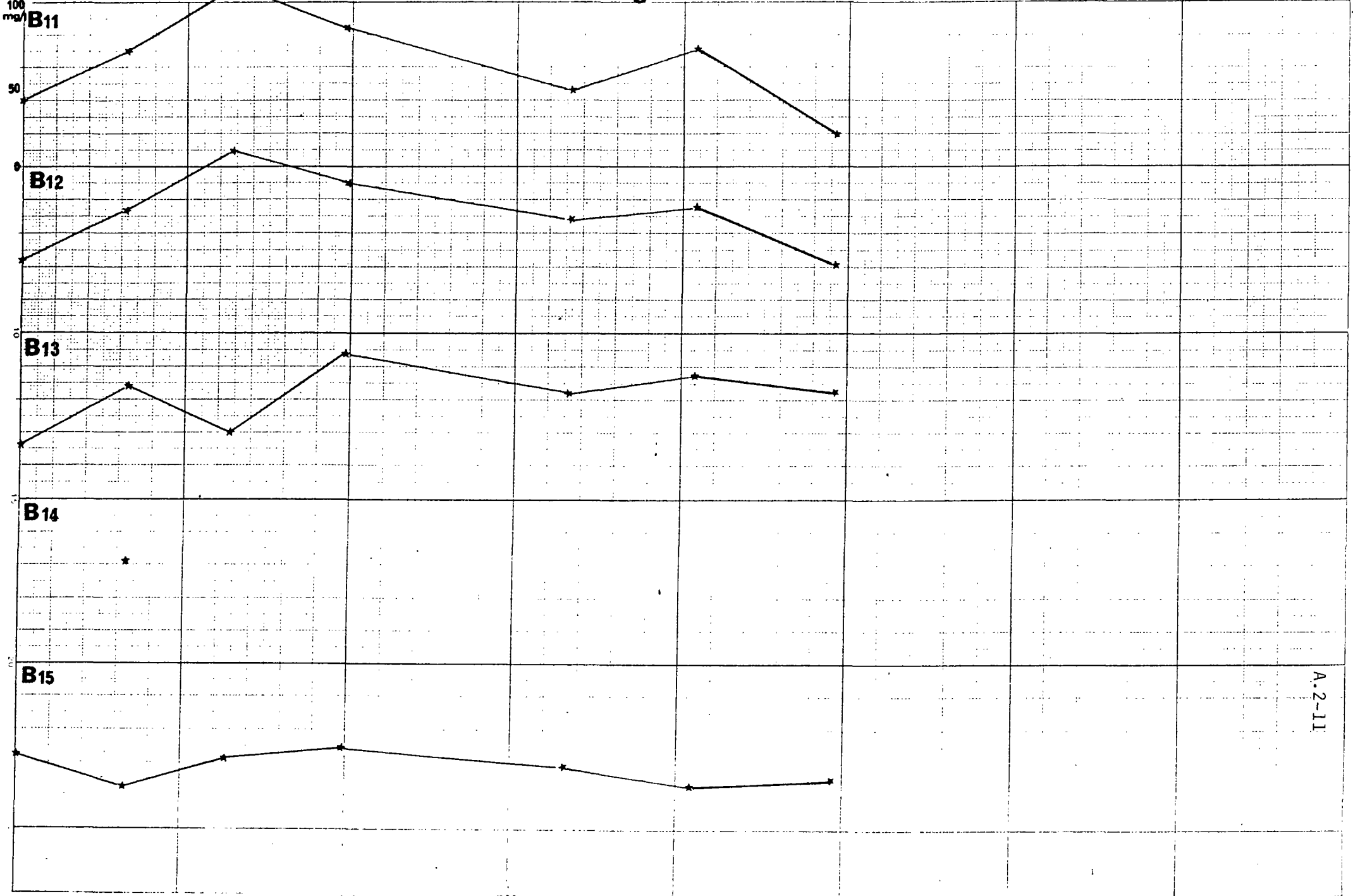


A.2-10



2

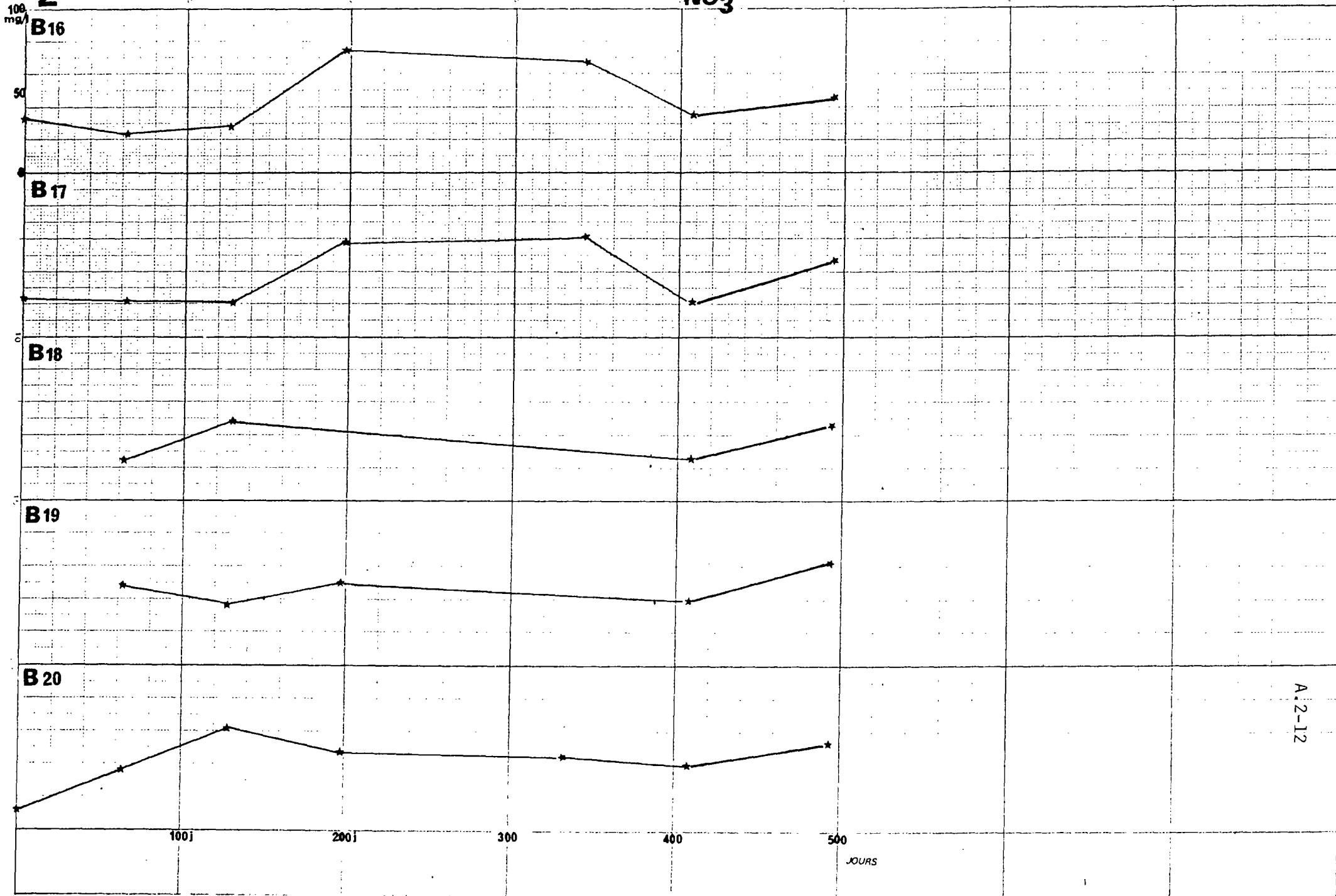
NO<sub>3</sub>



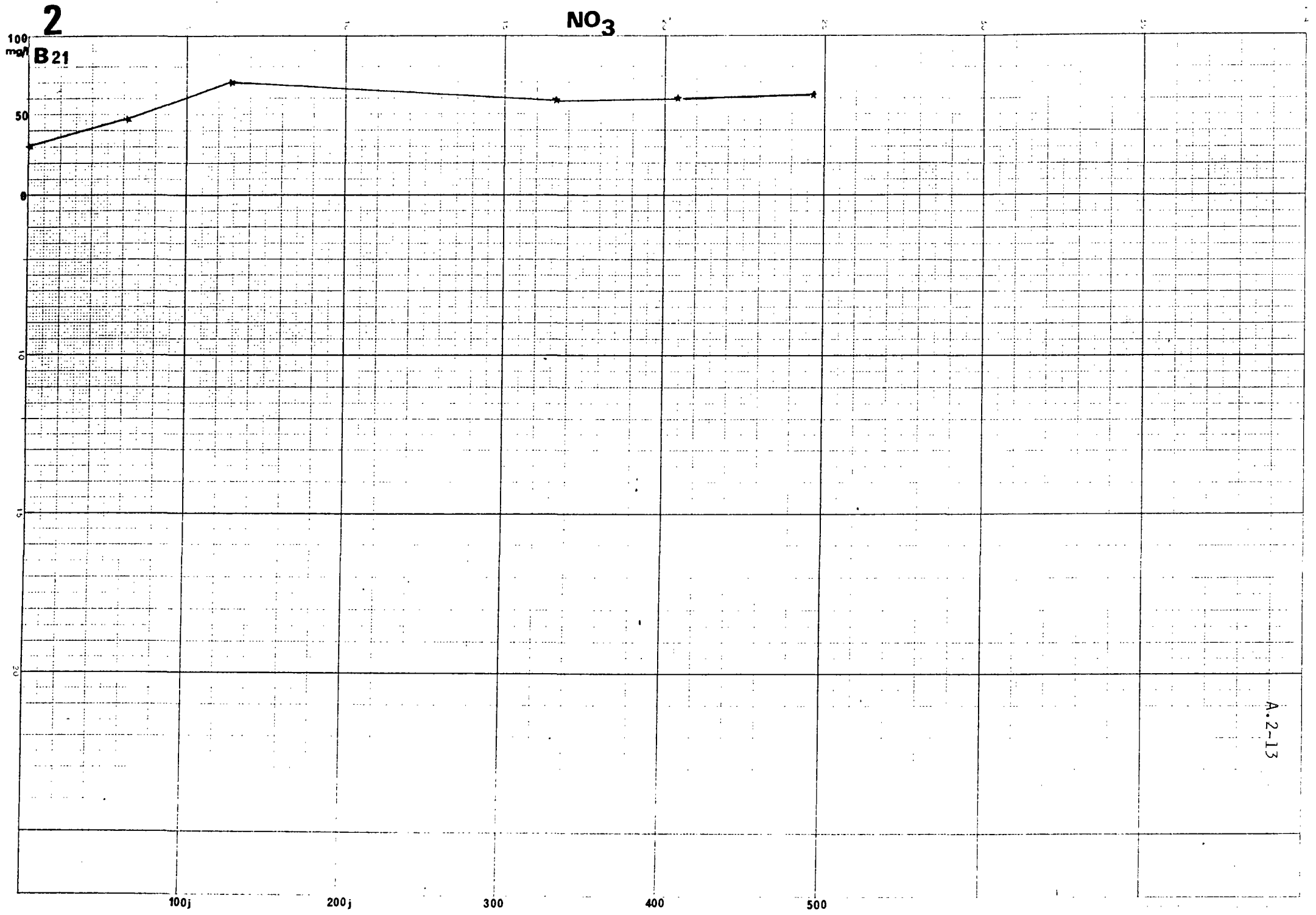
A.2-11

2

NO<sub>3</sub>



A.2-12



A.2-13

Concentration en **Cl**

Bougie	Pro- fondeur	D A T E D E L ' A N A L Y S E															
		24/12/85	25/02/86	30/04/86	09/07/86	21/11/86	05/02/87	30/04/87	10/09/87	27/10/87	16/12/87						
B1	0,50	14	20	22	-	6	-	12		16	12						
B2	1,00	22	18	20	-	10	10	10		10	8						
B3	1,50	34	22	20	18	16	12	14			12						
B4	2,00	42	26	22	-	16	12	14			12						
B5	2,50	48	26	22	16	18	16	12	8		11						
B6	3,00	52	26	22	16	18	16	16			16						
B7	3,50	56	28	22	-	18	-	18			15						
B8	4,00	-	32	-	-	18	22	-			12						
B9	4,50	76	40	36	31	20	32	-									
B10	5,00	-	45	42	39	32	26	14	5	10	8						
B11	5,50	50	50	40	33	30	22	16	4	8	6						
B12	6,00	54	47	42	33	28	22	16	4		5						
B13	6,50	60	44	41	35	32	28	29	20		20						
B14	7,00	-	45	-	-	-	-	-	24	24	20						
B15	7,50	38	29	33	32	28	28	27	28	28	13						
B16	8,00	40	34	33	38	34	28	33	33	30	13						
B17	8,50	54	37	32	37	36	22	31									
B18	9,00	-	40	33	-	-	22	31			36						
B19	9,50	-	38	36	38	-	30	35	34		36						
B20	10,00	38	39	36	30	32	30	33	38	40	36						
B21	10,50	46	40	36	-	36	34	38									

Concentration en  $\text{SO}_4$ 

Bougie	Pro-fondeur	D A T E D E L ' A N A L Y S E															
		24/12/85	25/02/86	30/04/86	09/07/86	21/11/86	05/02/87	30/04/87	10/09/87	27/10/87	16/12/87						
B1	0,50	75	42	44	74	34	-	80		26							
B2	1,00	115	97	110	-	100	86	80		88	75						
B3	1,50	300	128	118	142	106	100	104		115	98						
B4	2,00	150	101	90	112	96	92	92			94						
B5	2,50	360	104	104	132	104	90	97			88						
B6	3,00	725	88	92	115	78	80	81		50	78						
B7	3,50	705	98	92	-	94	-	36			78						
B8	4,00	-	114	-	-	104	86	36									
B9	4,50	1095	166	235	300	540	90	30		65							
B10	5,00	-	116	195	295	760	120	116	119	106	110						
B11	5,50	265	101	96	104	186	190	195	92	180							
B12	6,00	340	84	74	160	260	110	150		250							
B13	6,50	300	74	10	78	150	86	94	110	120							
B14	7,00	-	68	-	-	-	-	-									
B15	7,50	32	58	48	36	32	46	31	36	42	61						
B16	8,00	26	58	48	40	24	52	36	30	30	36						
B17	8,50	32	55	60	52	26	64	43	102		485						
B18	9,00	-	64	56		-	70	28									
B19	9,50	-	22	30	38	-	38	19			39						
B20	10,00	52	50	32	30	26	48	31	32		23						
B21	10,50	24	14	18	-	14	12	10	23	16	11						

F E I

DATE	Résistivité	P H	T A	TAC	T H	CO 2 libre	O 2 dissous	S i O 2	Ca	Mg	N a	K	Fe	Mn	Al	HCO 3	Cl	SO 4	N O 3
27.04.84	3.580	6,9	0	3,2	6,8	20	7,0	25	11	9,7	32	3,1	3,6	0,11	0,05	39,0	45	46	1
20.06.85	3.600	6,4	0	2,4	6,8	39,5	0,9	27,1	16	6,7	31,2	2,75	2,2	0,09	0,25	29,3	48	47	1,8
09.07.86	3.210	6,6	0	3,3	7,8	28,6	6,4	15,5	14	10,3	34,7	3	4,15	0,13	0,045	40,3	52	44	1
21.11.86	2.970	7,0	0	2,8	8	51	4,6	28,0	18	8,4	37,1	3,8	2,8	0,13	0,01	34,1	55	53	5
06.02.87	2.820	6,4	0	3,2	9,2	38,7	2,2	29,0	16,6	12,2	37,5	3,7	6,75	0,15	0,13	39	64	49	<0,5
20.03.87													4,8					51	0,8
30.04.87	2.880	6,4	0	3,0	8,5												65	49	3,6
10.07.87	2.800	6,8	0	3,2	9,6								5,1				70	53	<0,5
27.10.87	2.670	6,6	0	3,7	10,4								5,3				74	56	<0,5
16.12.87	2.730	6,4	0	3,1	10,4								5,8				68	50	2,0

P P 1  
 Profondeur : 20 à 24 m

DATE	Résistivité	PH	TA	TAC	TH	CO 2 libre	O 2 dissous	Si O 2	Ca	Mg	Na	K	Fe	Mn	Al	HCO 3	Cl	SO 4	NO 3
24.03.86	2.860	6,9	0	5,8	10,4	46,2	3,8	11,5	26	9,4	34,5	5,4	0,35	0,012	0,35	71	52	20	52,6
30.04.86	2.380	6,75	0	7,8	12,4	19,8	7,4	23	32	10,5	35	5	0,87	0,004	0,08	95	50	24	51
21.11.86	2.480	8,70	0,35	6,7	9,8	5	12,4	22,5	25	8,5	46	13,3	0,73	0,04	1,07	74	52	33	42,5
06.02.87	2.655	6,65	0	3,6	9,2	34	8,3	22	20	10	46,6	4,3	0,45	0,20	0,78	44	57	20	50
20.03.87													0,40					23	53,7
30.04.87	2.845	6,50	0	3,0	8,0								< 0,01				55	21	50,5
10.09.87	2.990	7,3	0	3,3	8								< 0,05				50	31	62
27.10.87	2.920	6,45	0	3	8,2								0,12				52	22	53,5
16.12.87	2.790	6,5	0	4,4	10,4								0,06				46	28	36,5

P P 2  
Profondeur : 31 à 35 m

DATE	Résistivité	P H	T A	TAC	T H	CO 2 libre	O 2 dissous	S i O 2	Ca	Mg	N a	K	Fe	Mn	Al	HCO 3	Cl	SO 4	N O 3
24.03.86	3.140	6,25	0	2	8	41,8	1	2,5	17	9	34,5	4,6	0,26	0,03	0,27	24,5	46	61	23,7
30.04.86	2.780	8,25	0	3,2	7,6	< 2	7,4	12,2	23	4,4	38	8,6	0,23	0,005	0,05	39	44	49	37,5
21.11.86	2.940	7,10	0	2,8	8,1	41	6,1	19,0	17	9,2	39,5	7,1	0,25	0,04	0,36	34	45	30	53
06.02.87	2.925	6,05	0	1,6	8,4	41	5,4	20,5	18	9,4	36,5	4,85	0,40	0,02	0,60	19,5	42	47	51,6
20.03.87													0,60					50	47,5
30.04.87	2.990	6,10	0	1,2	8,2								0,02				43	42	53
10.09.87	2.930	6,7	0	2,3	8,8								< 0,05				45	81	7,0
27.10.87	2.465	7,85	0	12,2	13,6								5,5				48	40	< 0,5
16.12.85	3.010	5,95	0	1,6	10,4												40	42	36,5



P P 3  
Profondeur : 50 à 55 m

DATE	Résistivité	P H	T A	TNC	T H	CO 2 libre	O 2 dissous	S i O 2	Ca	Mg	N a	K	Pe	Mn	Al	HCO 3	Cl	SO 4	N O 3
24.03.86	3.115	7,15	0	6,4	9,6	15,4	9,1	25,2	28	6,2	33,1	5	2,5	0,09	1,2	78	46	28	31,4
30.04.86	3.140	9,25	1,1	3,9	7,6	< 2	5,2	20,4	23	4,4	32,5	6,2	0,77	0,02	< 0,01	20,7	44	60	0,5
09.07.86	3.010	9,60	1,75	4,9	8,2	< 2	5,4	18,5	27	3,6	35,3	7,3	0,50	0,03	0,385	17,1	44	60	< 1
21.11.86	2.790	9,40	1,5	5,7	9,4	< 1	6,5	18,5	35	1,6	37,1	10,8	0,25	0,03	0,23	33	44	65	1,6
06.02.87	2.970	9,20	1,5	5,6	10,5	< 2	6,8	18,5	37	3,0	34,4	7,4	1,00	0,03	0,80	31,5	42	53	1,6
20.03.87													0,85					56	1,3
30.04.87	2.675	7,45	0	8,5	13								0,13				43	54	1
10.09.87	2.810	7,8	0	7,8	12,4								0,2				42	62	< 0,5
12.10.87	2.760	7,4	0	8,4	12								0,55				44	60	< 0,5
16.12.87	2.790	7,2	0	7,2	12,8								0,45				40	59	1,0

P P 4  
Profondeur : 64 à 69 m

DATE	Résistivité	P H	T A	TNC	T H	CO 2 libre	O 2 dissous	S i O 2	Ca	Mg	N a	K	Fe	Mn	Al	HCO 3	Cl	SO 4	N O 3
24.03.86	3.780	6,25	0	2,4	6,8	37,4	6	10,5	12	10	33,3	1,8	3,5	0,13	0,035	29,2	46	50	< 0,5
30.04.86	3.130	6,6	0	4,8	8,4	17,6	4,6	27,1	18	9,4	32,5	4,3	1,8	0,14	< 0,01	58,5	44	47	< 0,5
09.07.86	-	7,05	0	6,1	10,1	6	-	-	24,5	9,6	31,6	4,6	2,95	0,10	0,175	74,4	44	38	< 1
21.11.86	2.995	7,80	0	5,7	10,2	19	6,3	18,0	22	11,3	33	7,1	2,65	0,13	0,07	69	41	51	0,5
06.02.87	3.210	7,0	0	4,8	8,8	21,8	7,3	29,0	20	9	32,3	4,15	6,25	0,06	0,28	58,5	41	50	< 0,5
20.03.87													13					53	0,3
30.04.87	3.220	6,7	0	3,9	8,5								0,04				45	57	< 0,5
10.09.87	3.170	7,1	0	4	9,2								0,15				45	63	< 0,5
27.10.87	3.045	6,8	0	4,2	10								0,4				46	68	< 0,5
16.12.87	3.170	6,8	0	3,9	11,2								1,3				40	59	< 1

F P 5  
Profondeur : 64 à 73 m

DATE	Résistivité	P H	T A	TAC	T H	CO 2 libre	O 2 dissous	S i O	Ca	Mg	N a	K	Fe	Mn	Al	HCO 3	Cl	SO 4	N O 3
24.03.86	4.120	6,25	0	2,9	6	41,8	3,8	31	11	7,8	32	3	3	0,11	0,035	35,3	42	38	< 0,5
30.04.86	3.430	6,65	0	4,8	7,6	8,8	7,2	24	16	8,6	32,5	4,3	0,62	0,10	0,22	56,2	41	39	0,5
09.07.86	3.390	6,7	0	3,7	7,5	26,4	4,4	32	14	9,7	33	3,2	5,4	0,14	0,150	45,1	46	43	< 1
21.11.86	3.410	7,35	0	3,5	7,6	58	6,4	24	16	8,6	28,9	4,1	6,8	0,12	0,22	43	46	41	3,4
06.02.87	2.985	6,8	0	3,9	9,8	29	8,9	27,5	12,6	11,0	35,5	3,8	15,0	0,08	0,75	47,5	53	48	< 0,5
20.03.87													2,6					54	0,2
30.04.87	2.785	6,7	0	3,6	9,4								0,03				59	55	< 0,5
10.09.87	2.780	7,2	0	4	10								1,05				65	58	< 0,5
27.10.87	2.680	6,7	0	3,8	10,2								2,6				66	60	< 0,5
16.12.87	2.750	6,6	0	3,6	12								2,9				60	56	< 1

F P 6  
Profondeur : 87 à 103 m

DATE	Résistivité	P H	T A	TAC	T H	CO 2 Libre	O 2 dissous	S i O 2	Ca	Mg	N a	K	Fe	Mn	Al	HCO 3	Cl	SO 4	N O 3
24.03.86	3.580	6,95	0	4,6	8	19,8	2	8	18	7,2	32	3,5	2,6	0,13	0,045	56,1	42	43	< 0,5
30.04.86	2.970	7,7	0	6,6	9,8	2,2	4,4	25,8	25	8,5	32,5	5,9	1,18	0,11	0,16	80,5	42	43	< 0,5
09.07.86	2.545	7,6	0	8,6	12,6	6,6	4,6	32	32	11	35,5	4,9	3,9	0,18	0,230	105	51	48	< 1
21.11.86	2.660	7,85	0	6,6	11,0	27	5,8	37,5	22	13,2	37,1	7,9	9,8	0,18	0,02	134	46	58	0,6
06.02.87	2.710	7,05	0	6,6	12	17	5,7	30,5	33,5	11,0	37,5	6,75	12,5	0,15	0,45	80	46	56	0,5
20.03.87													8,8					64	0,2
30.04.87	2.690	7	0	5,8	10,8								1,50				49	62	< 0,5
10.09.87	2.790	7,3	0	6,2	12								1,45				48	66	<0,5
29.10.87	2.645	6,9	0	6	12,4								2,1				50	68	<0,5
16.12.87	2.750	6,9	0	5,8	12,8								2,85				46	65	<1

## A N N E X E 3

### Résultats analytiques

#### Géochimie

##### Fichier NITBRE

En GRO1 : 1 site "dénitrifiant"  
2 site "non\_dénitrifiant"-

En GRO2 : n° du sondage

En DIV. : n° échantillon terrain

```

* nom du fichier = NITBRE
* indic. debut-fin : 0001 - 0094
* Code fichier = 2 ( Fichier trie sur INDR = OUI )
* nombre de donnees = 95
* nombre de ligne particulieres = 50
* longueur d'une ligne (en mots). = 60
* libelle =
GEOCHIMIE SOLS SUR SITES DE SONDRAGES DE BRETAGNE (PROBLEME NITRATES)
* nombre de variables alphanumeriques = 11
* nombre de variables flottantes = 44
* nombre de variables entieres = 2

* noms des variables alphanumeriques =
GR10 GR01 GR02 GR03 GR04 GR05 GR06 GR07 GR08 GR09 INDR
* noms des variables flottantes =
XXXX YYYY ZZZZ SIO2 AL2X FE2X CAO MGO K2O MNO TIO2 P205 LI DE B V
CR CO NI CU ZN AS SR Y NB MO AG CD SN SB BA LA
CE W PB BI ZR 1 2 3 4 5 6 N.FE
* noms des variables entieres =
ECH. POSI

* longueur de la zone divers = 12

* type de coordonnees =
* coordonnees x1 y1 = 0.000 0.000
* coordonnees x2 y2 = 0.000 0.000
* coordonnees x3 y3 = 0.000 0.000
* coordonnees x4 y4 = 0.000 0.000

* vecteur unitaire en x et en y = *****

* label ado =
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
* label utilisateur =
1 8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
* texte ligne cartouche no : 1 =
* texte ligne cartouche no : 2 =
* texte ligne cartouche no : 3 =
* texte ligne cartouche no : 4 =
* texte ligne cartouche no : 5 =
* texte ligne cartouche no : 6 =
* texte ligne cartouche no : 7 =

```

\*\*\*\*\*  
 \* EDITION DES RESULTATS \*  
 \*\*\*\*\*

ELEMENTS	LIMITES INFERIEURES DE DOSABILITE	LIMITES SUPERIEURES DE DOSABILITES
SI02	1.00 %	100.00 %
AL203 (AL2X)	1.00 %	100.00 %
FE203 (FE2X)	1.00 %	100.00 %
CAO	1.00 %	100.00 %
MGO	1.00 %	50.00 %
K2O	0.50 %	20.00 %
MNO	0.01 %	20.00 %
TIO2	0.01 %	35.00 %
P	100. G/T	80000. G/T
LI	10. G/T	40000. G/T
BE	2. G/T	3500. G/T
B	10. G/T	18000. G/T
V	10. G/T	40000. G/T
CR	10. G/T	15000. G/T
CO	5. G/T	25000. G/T
NI	10. G/T	18000. G/T
CU	5. G/T	8000. G/T
ZN	5. G/T	20000. G/T
AS	20. G/T	50000. G/T
SR	5. G/T	10000. G/T
Y	20. G/T	5000. G/T
NB	20. G/T	15000. G/T
MO	5. G/T	7500. G/T
AG	0.2 G/T	700. G/T
CD	2. G/T	5000. G/T
SN	10. G/T	20000. G/T
SB	10. G/T	25000. G/T
SA	10. G/T	3500. G/T
LA	20. G/T	15000. G/T
CE	10. G/T	5500. G/T
W	10. G/T	15000. G/T
PB	10. G/T	6500. G/T
BI	10. G/T	10000. G/T
ZR	20. G/T	14000. G/T

## REMARQUE:

=====

UNE VALEUR EGALE A LA LIMITE INFERIEURE DE DOSABILITE DOIT ETRE CONSIDEREE COMME INFERIEURE OU EGALE A LA LIMITE  
 UNE VALEUR EGALE A LA LIMITE SUPERIEURE DE DOSABILITE DOIT ETRE CONSIDEREE COMME SUPERIEURE OU EGALE A LA LIMITE

LES CONCENTRATIONS SONT DETERMINEES PAR RAPPORT A UN ECHANTILLON EVENTUELLEMENT DEBARRASSE DE SA MATIERE ORGANIQUE.

LES ELEMENTS MAJEURS SONT DONNES AVEC UNE PRECISION DE 5 % RELATIVE EN MILIEU DE GAMME ET LES ELEMENTS TRACES AVEC 10 % DANS LES MEMES CONDITIONS.

TOUTE VALEUR SUPERIEURE A LA LIMITE DE DOSABILITE PEUT ENTRAINER UNE INTERFERENCE NON CONTROLEES SUR L'UN QUELCONQUE DES AUTRES ELEMENTS.

-----  
 ! ATTENTION: !  
 -----

-----  
 L'interpretation de toute valeur situee en dehors des seuils fixes par le laboratoire, est laissee au jugement du lecteur.

INDR	GRO1	GRO2	PB	AG	ZN	BA	AS	MO	CU	CR	NI	CO	V	SN	SD	BI	W	LI	BE	DIV.
0001	1	S6	24.	0.1	45.	372.	33.	5.	13.	101.	29.	8.	77.	8.	12.	1.	9.	31.	1.	PLN-S6-A10
0002	1	S6	20.	0.1	87.	488.	25.	1.	25.	157.	43.	10.	129.	9.	15.	1.	6.	93.	2.	PLN-S6-A25
0003	1	S6	15.	0.1	49.	339.	38.	3.	13.	82.	28.	8.	60.	9.	17.	1.	10.	29.	1.	PLN-S6-A50
0004	1	S6	14.	0.1	38.	384.	64.	6.	13.	87.	27.	7.	70.	10.	13.	1.	10.	21.	1.	PLN-S6-B10
0005	1	S6	20.	0.1	83.	459.	284.	5.	31.	142.	50.	20.	133.	7.	14.	1.	7.	80.	3.	PLN-S6-B25
0006	1	S6	16.	0.1	35.	291.	58.	3.	10.	74.	26.	7.	56.	8.	11.	1.	8.	22.	1.	PLN-S6-B50
0007	1	S6	14.	0.1	84.	513.	30.	4.	25.	140.	40.	11.	115.	10.	13.	1.	6.	95.	2.	PLN-S6-C10
0008	1	S6	15.	0.1	52.	385.	36.	6.	17.	99.	36.	9.	76.	8.	12.	1.	8.	43.	1.	PLN-S6-C25
0009	1	S6	17.	0.1	42.	405.	47.	2.	9.	97.	28.	6.	69.	10.	12.	1.	9.	32.	1.	PLN-S6-C50
0010	1	S6	13.	0.1	53.	366.	18.	5.	18.	104.	31.	8.	81.	10.	11.	1.	8.	53.	1.	PLN-S6-D10
0011	1	S6	17.	0.1	38.	373.	34.	5.	12.	90.	27.	8.	59.	11.	13.	1.	10.	33.	1.	PLN-S6-D25
0012	1	S6	12.	0.1	32.	327.	54.	5.	10.	85.	23.	5.	54.	8.	12.	1.	9.	19.	1.	PLN-S6-D50
0013	1	S3	16.	0.1	29.	319.	23.	3.	8.	78.	23.	6.	54.	5.	11.	1.	10.	22.	1.	PLN-S3-A10
0014	1	S3	19.	0.1	38.	356.	43.	4.	12.	82.	32.	13.	64.	10.	12.	1.	9.	18.	1.	PLN-S3-A25
0015	1	S3	19.	0.1	45.	327.	42.	4.	14.	80.	31.	13.	64.	9.	11.	1.	8.	19.	1.	PLN-S3-A50
0016	1	S3	16.	0.1	33.	305.	36.	7.	10.	72.	26.	11.	56.	9.	13.	1.	9.	20.	1.	PLN-S3-B10
0017	1	S3	16.	0.1	36.	309.	40.	6.	10.	79.	28.	10.	57.	8.	12.	1.	10.	18.	1.	PLN-S3-B25
0018	1	S3	16.	0.1	42.	324.	41.	6.	11.	78.	33.	14.	61.	7.	13.	1.	7.	17.	1.	PLN-S3-B50
0019	1	S3	9.	0.1	42.	362.	32.	6.	11.	84.	28.	7.	67.	8.	17.	1.	8.	22.	1.	PLN-S3-C10
0020	1	S3	19.	0.1	37.	341.	37.	4.	9.	86.	25.	7.	62.	9.	12.	1.	8.	24.	1.	PLN-S3-C25
0021	1	S3	21.	0.1	33.	352.	30.	4.	7.	85.	25.	7.	64.	7.	11.	1.	9.	35.	1.	PLN-S3-C50
0022	1	S3	21.	0.1	41.	340.	40.	4.	10.	85.	29.	8.	66.	11.	12.	1.	11.	24.	1.	PLN-S3-D10
0023	1	S3	15.	0.1	45.	320.	33.	3.	13.	86.	32.	12.	67.	10.	11.	1.	9.	26.	1.	PLN-S3-D25
0024	1	S3	15.	0.1	57.	330.	38.	3.	17.	97.	40.	12.	72.	10.	12.	1.	9.	39.	1.	PLN-S3-D50
0025	1	FEI	180.	0.1	137.	644.	170.	1.	52.	63.	79.	28.	65.	5.	5.	1.	1.	53.	3.	PDL-FE1-A10
0026	1	FEI	33.	0.1	292.	441.	52.	1.	86.	339.	171.	33.	229.	5.	5.	1.	1.	162.	3.	PDL-FE1-A25
0027	1	FEI	24.	0.1	198.	420.	47.	2.	73.	121.	58.	19.	179.	5.	5.	1.	1.	102.	3.	PDL-FE1-A50
0028	1	FEI	660.	0.1	243.	490.	95.	1.	56.	150.	64.	20.	171.	5.	5.	1.	1.	107.	3.	PDL-FE1-B10
0029	1	FEI	72.	0.1	185.	474.	64.	1.	53.	128.	67.	22.	162.	5.	5.	1.	1.	151.	3.	PDL-FE1-B25
0030	1	FEI	44.	0.1	196.	372.	47.	1.	40.	118.	59.	18.	146.	5.	5.	1.	1.	82.	2.	PDL-FE1-B50
0031	1	FEI	182.	0.1	308.	638.	98.	3.	74.	134.	60.	18.	185.	5.	5.	1.	1.	106.	3.	PDL-FE1-C10
0032	1	FEI	117.	0.1	275.	483.	100.	2.	49.	137.	70.	23.	150.	5.	5.	1.	1.	123.	3.	PDL-FE1-C25
0033	1	FEI	355.	0.1	269.	513.	146.	2.	68.	151.	46.	13.	196.	5.	5.	1.	1.	120.	3.	PDL-FE1-C50
0034	1	II	91.	0.1	147.	499.	162.	3.	42.	116.	51.	14.	129.	9.	6.	1.	1.	113.	2.	PDL-II-A10
0035	1	FEII	37.	0.1	84.	255.	42.	1.	57.	87.	34.	15.	107.	5.	5.	1.	1.	102.	2.	PDL-FE2-A10
0036	1	FEII	51.	0.1	122.	365.	55.	3.	61.	115.	50.	15.	126.	6.	8.	1.	1.	64.	1.	PDL-FE2-A25
0037	1	FEII	37.	0.1	133.	368.	41.	1.	59.	117.	49.	17.	118.	6.	13.	1.	1.	74.	1.	PDL-FE2-A50
0038	1	FEII	77.	0.1	179.	474.	47.	3.	63.	125.	64.	21.	142.	6.	5.	1.	1.	81.	3.	PDL-FE2-B10
0039	1	FEII	60.	0.1	153.	379.	40.	4.	53.	133.	54.	38.	139.	8.	9.	1.	2.	92.	2.	PDL-FE2-B20
0040	1	FEII	31.	0.1	79.	408.	44.	2.	24.	102.	37.	10.	95.	8.	11.	1.	8.	85.	1.	PDL-FE2-B30
0041	1	FEII	31.	0.1	117.	437.	33.	1.	82.	125.	43.	14.	142.	5.	7.	1.	1.	91.	1.	PDL-FE2-C10
0042	1	FEII	71.	0.1	125.	443.	109.	1.	64.	106.	41.	19.	113.	8.	8.	1.	3.	65.	2.	PDL-FE2-C25
0043	1	IIII	71.	0.1	241.	343.	102.	1.	48.	100.	78.	20.	80.	5.	5.	1.	11.	62.	4.	PDL-3-1-A10
0044	1	IIII	37.	0.1	167.	365.	38.	1.	75.	147.	56.	17.	153.	5.	7.	1.	1.	85.	2.	PDL-3-1-A25
0045	1	IIII	32.	0.1	162.	417.	53.	1.	51.	128.	63.	19.	133.	5.	6.	1.	1.	88.	2.	PDL-3-1-A50
0046	1	IIII	26.	0.1	101.	690.	31.	1.	45.	109.	41.	14.	136.	5.	6.	1.	1.	77.	1.	PDL-3-1-B10
0047	1	IIII	29.	0.1	147.	421.	50.	1.	88.	130.	45.	15.	151.	5.	5.	1.	1.	93.	1.	PDL-3-1-B25
0048	1	IIII	27.	0.1	61.	335.	46.	7.	17.	91.	38.	13.	74.	7.	13.	1.	10.	34.	1.	PDL-3-1-B50
0049	1	IIII	39.	0.1	148.	398.	39.	1.	55.	126.	64.	19.	142.	5.	5.	1.	1.	77.	3.	PDL-3-1-C10
0050	1	IIII	46.	0.1	171.	319.	57.	1.	51.	93.	57.	18.	110.	5.	5.	1.	1.	85.	3.	PDL-3-1-C20

A-3.3



INDR	GR01	GR02	SI02	AL2X	FE2X	MGO	CA0	K20	T102	MNO	P205	Y	NO	LA	CE	ZR	SR	B	DIV.
0051	2	S7	77.	9.6	2.9	0.7	1.0	2.3	0.83	0.02	742.	41.	20.	16.	72.	489.	86.	69.	CDR-S7-A10
0052	2	S7	77.	9.3	2.7	0.8	1.0	1.4	0.80	0.04	707.	32.	20.	10.	67.	468.	84.	77.	CDR-S7-A25
0053	2	S7	79.	9.0	2.6	0.7	1.0	1.2	0.76	0.01	510.	28.	20.	10.	53.	464.	86.	72.	CDR-S7-A50
0054	2	S7	61.	24.7	4.0	1.1	1.4	3.3	0.68	0.03	1688.	23.	10.	78.	199.	388.	158.	72.	CDR-S7-B10
0055	2	S7	72.	14.4	2.9	0.9	1.0	2.1	0.81	0.01	733.	27.	14.	23.	92.	504.	106.	77.	CDR-S7-B20
0056	2	S7	66.	21.2	2.2	0.9	1.0	2.6	0.74	0.02	1263.	24.	10.	62.	157.	402.	132.	66.	CDR-S7-B40
0057	2	S7	84.	8.6	1.8	0.5	1.0	0.7	0.78	0.01	451.	21.	19.	10.	37.	471.	83.	74.	CDR-S7-C10
0058	2	S1	75.	13.0	3.2	0.8	1.0	3.6	0.76	0.01	1221.	20.	15.	13.	72.	421.	102.	70.	CDR-S7-C50
0059	2	S1	81.	7.7	1.0	0.3	1.0	3.5	0.73	0.01	809.	36.	16.	15.	79.	483.	82.	67.	PLT-S1-A10
0060	2	S1	83.	9.1	1.6	0.6	1.0	1.3	0.76	0.01	872.	26.	19.	10.	42.	429.	87.	75.	PLT-S1-A25
0061	2	SJ	72.	13.3	4.1	1.2	1.0	2.7	1.02	0.03	1068.	45.	21.	27.	102.	508.	90.	95.	PLT-S1-A50
0062	2	S1	77.	10.2	2.4	0.8	1.0	2.2	0.84	0.01	514.	25.	19.	10.	53.	437.	84.	69.	PLT-S1-B10
0063	2	S1	76.	9.8	3.0	0.8	1.0	1.8	0.78	0.01	783.	26.	19.	10.	60.	427.	80.	69.	PLT-S1-B25
0064	2	S1	77.	9.6	2.5	0.8	1.0	1.4	0.77	0.01	463.	25.	18.	10.	46.	403.	82.	62.	PLT-S1-B50
0065	2	S1	84.	7.1	1.0	0.3	1.0	1.5	0.67	0.01	459.	43.	15.	22.	90.	546.	82.	70.	PLT-S1-C10
0066	2	S1	81.	8.6	1.0	0.5	1.0	2.4	0.77	0.01	651.	39.	17.	26.	94.	491.	90.	167.	PLT-S1-C25
0067	2	S1	82.	8.4	1.0	0.4	1.0	1.1	0.79	0.01	647.	30.	18.	10.	60.	476.	83.	75.	PLT-S1-C50
0068	2	S1	70.	13.4	4.4	1.3	1.0	2.3	1.02	0.03	1026.	52.	19.	36.	123.	565.	95.	114.	PLT-S1-D10
0069	2	S1	83.	8.1	1.0	0.4	1.0	1.4	0.71	0.01	386.	27.	18.	10.	53.	476.	85.	88.	PLT-S1-D25
0070	2	S1	80.	9.6	3.2	0.7	1.0	1.5	0.78	0.01	472.	25.	19.	10.	48.	462.	84.	68.	PLT-S1-D50
0071	2	S2	70.	15.7	3.9	1.4	1.0	3.1	1.14	0.03	712.	57.	18.	55.	153.	560.	79.	66.	PLT-S2-A10
0072	2	S2	70.	15.5	3.0	1.2	1.0	3.1	0.97	0.02	658.	54.	14.	41.	125.	560.	85.	56.	PLT-S2-A25
0073	2	S2	65.	19.5	4.4	1.6	1.0	4.2	1.22	0.03	895.	72.	15.	72.	106.	739.	75.	56.	PLT-S2-A50
0074	2	S2	79.	11.3	1.9	0.8	1.0	1.9	0.91	0.01	485.	40.	17.	16.	79.	522.	92.	62.	PLT-S2-B10
0075	2	S2	70.	14.9	5.9	1.3	1.0	2.9	1.13	0.03	711.	54.	20.	41.	126.	613.	87.	76.	PLT-S2-B25
0076	2	S2	79.	10.0	5.3	0.8	1.0	2.0	0.83	0.01	834.	31.	21.	20.	59.	462.	89.	64.	PLT-S2-B50
0077	2	S2	82.	9.0	1.0	0.6	1.0	1.7	0.76	0.01	298.	25.	16.	10.	46.	523.	92.	61.	PLT-S2-C10
0078	2	S2	83.	9.4	1.1	0.6	1.0	1.7	0.77	0.01	332.	24.	20.	10.	44.	477.	95.	57.	PLT-S2-C20
0079	2	S2	83.	9.8	1.0	0.5	1.0	1.6	0.74	0.01	353.	19.	16.	10.	35.	414.	96.	55.	PLT-S2-C40
0080	2	S2	66.	19.5	4.3	1.5	1.0	2.0	1.18	0.05	860.	83.	14.	92.	225.	857.	71.	52.	PLT-S2-D10
0081	2	S2	69.	13.0	3.8	1.5	1.0	2.4	1.32	0.04	666.	45.	20.	41.	121.	703.	91.	71.	PLT-S2-D25
0082	2	S2	64.	16.4	5.0	1.5	1.0	3.8	1.24	0.05	825.	77.	17.	79.	202.	708.	82.	99.	PLT-S2-D50
0083	2	S112	78.	9.8	1.4	0.7	1.0	1.6	0.85	0.01	485.	34.	19.	10.	70.	558.	90.	190.	PDL-S112-A10
0084	2	S112	67.	16.0	3.8	1.2	1.0	3.2	1.05	0.02	1024.	45.	11.	50.	125.	540.	118.	154.	PDL-S112-A25
0085	2	S112	50.	32.5	7.1	1.9	1.0	3.3	1.88	0.02	1531.	94.	10.	23.	72.	576.	101.	4855.	PDL-S112-A50
0086	2	S112	74.	10.5	2.3	0.7	1.0	1.9	0.82	0.01	565.	22.	17.	10.	45.	484.	92.	90.	PDL-S112-B10
0087	2	S112	79.	10.0	2.7	0.8	1.0	2.5	0.81	0.01	774.	22.	16.	10.	43.	438.	92.	77.	PDL-S112-B25
0088	2	S112	59.	21.1	6.0	1.5	1.1	2.3	0.82	0.03	1451.	17.	10.	10.	54.	319.	402.	56.	PDL-S112-B50
0089	2	S112	75.	12.0	2.5	1.0	1.0	2.5	0.92	0.01	647.	38.	15.	32.	96.	687.	99.	93.	PDL-S112-C10
0090	2	S112	81.	9.3	1.0	0.5	1.0	1.8	0.85	0.01	479.	34.	16.	15.	73.	740.	87.	67.	PDL-S112-C25
0091	2	S112	78.	9.9	1.7	0.6	1.0	2.3	0.88	0.01	1424.	25.	19.	10.	54.	523.	81.	94.	PDL-S112-C50
0092	2	S112	80.	8.6	1.4	0.5	1.0	1.7	0.78	0.02	554.	21.	15.	10.	44.	453.	85.	81.	PDL-S112-D10
0093	2	S112	81.	9.0	1.1	0.6	1.0	2.4	0.77	0.01	410.	21.	16.	10.	39.	435.	89.	76.	PDL-S112-D25
0094	2	S112	82.	9.6	1.3	0.5	1.0	0.8	0.83	0.01	699.	23.	19.	10.	39.	407.	77.	75.	PDL-S112-D50

INDR	GR01	GR02	SIO2	AL2X	FF2X	MGO	CAO	K2O	TI02	MNO	P205	Y	NB	LA	CE	ZR	SR	B	DIV.
0001	1	S6	84.	10.3	1.3	0.8	1.0	1.5	0.94	0.01	353.	36.	25.	10.	62.	518.	96.	90.	PLN-S6-A10
0002	1	S6	74.	15.3	4.6	1.4	1.0	3.3	1.26	0.02	589.	38.	17.	16.	79.	426.	99.	114.	PLN-S6-A25
0003	1	S6	80.	9.1	1.5	0.7	1.0	3.1	0.77	0.01	331.	29.	16.	10.	51.	541.	88.	70.	PLN-S6-A50
0004	1	S6	80.	9.7	2.5	0.7	1.0	1.7	0.82	0.01	340.	32.	23.	10.	54.	439.	91.	85.	PLN-S6-B10
0005	1	S6	63.	13.5	11.1	1.2	1.0	2.3	1.19	0.03	1292.	41.	27.	22.	84.	400.	91.	145.	PLN-S6-B25
0006	1	S6	81.	9.0	1.7	0.6	1.0	2.5	0.70	0.01	376.	24.	15.	10.	47.	408.	80.	63.	PLN-S6-B50
0007	1	S6	77.	14.7	3.0	1.4	1.0	1.9	1.30	0.02	586.	41.	25.	11.	83.	491.	105.	147.	PLN-S6-C10
0008	1	S6	79.	10.4	1.8	0.9	1.0	1.8	0.93	0.01	400.	30.	23.	10.	60.	501.	93.	99.	PLN-S6-C25
0009	1	S6	83.	10.6	2.3	0.8	1.0	2.1	0.96	0.01	416.	30.	18.	10.	62.	591.	100.	103.	PLN-S6-C50
0010	1	S6	78.	10.6	1.9	0.9	1.0	1.5	0.94	0.01	369.	31.	21.	11.	62.	465.	87.	122.	PLN-S6-D10
0011	1	S6	79.	9.4	1.1	0.7	1.0	1.8	0.82	0.01	333.	29.	21.	10.	57.	461.	90.	100.	PLN-S6-D25
0012	1	S6	80.	8.5	2.3	0.5	1.0	1.4	0.78	0.01	319.	30.	19.	10.	54.	526.	85.	75.	PLN-S6-D50
0013	1	S3	84.	8.9	1.7	0.5	1.0	3.5	0.79	0.01	357.	24.	16.	10.	44.	515.	91.	69.	PLN-S3-A10
0014	1	S3	83.	9.3	3.2	0.7	1.0	1.6	0.78	0.09	603.	30.	10.	10.	53.	441.	97.	65.	PLN-S3-A25
0015	1	S3	80.	9.5	3.0	0.7	1.0	5.8	0.76	0.06	684.	29.	18.	10.	61.	473.	93.	68.	PLN-S3-A50
0016	1	S3	81.	8.5	2.2	0.6	1.0	1.5	0.69	0.01	454.	22.	10.	10.	43.	433.	82.	70.	PLN-S3-B10
0017	1	S3	79.	8.8	2.7	0.6	1.0	1.4	0.72	0.02	471.	20.	18.	10.	40.	455.	79.	67.	PLN-S3-B25
0018	1	S3	80.	9.1	2.8	0.7	1.0	1.3	0.72	0.05	521.	24.	19.	10.	51.	397.	78.	64.	PLN-S3-B50
0019	1	S3	85.	9.9	2.0	0.7	1.0	1.2	0.81	0.01	407.	28.	20.	10.	60.	505.	95.	77.	PLN-S3-C10
0020	1	S3	84.	9.7	2.3	0.6	1.0	1.5	0.81	0.01	435.	28.	17.	10.	56.	536.	100.	71.	PLN-S3-C25
0021	1	S3	83.	10.0	1.4	0.7	1.0	1.8	0.85	0.01	460.	24.	16.	10.	44.	702.	98.	71.	PLN-S3-C50
0022	1	S3	84.	9.6	2.1	0.7	1.0	2.3	0.80	0.01	501.	28.	18.	10.	54.	504.	99.	68.	PLN-S3-D10
0023	1	S3	83.	10.2	2.9	0.8	1.0	1.7	0.83	0.05	750.	26.	17.	10.	56.	498.	100.	71.	PLN-S3-D25
0024	1	S3	80.	11.5	3.4	1.0	1.0	2.3	0.84	0.06	797.	36.	17.	10.	74.	505.	105.	81.	PLN-S3-D50
0025	1	FE1	57.	28.1	4.5	0.6	1.0	3.9	0.36	0.04	1624.	19.	10.	10.	51.	117.	144.	43.	PDL-FE1-A10
0026	1	FE1	55.	23.9	10.9	4.0	1.0	3.5	1.50	0.09	1901.	63.	10.	34.	124.	413.	76.	47.	PDL-FE1-A25
0027	1	FE1	54.	24.1	7.9	2.2	1.0	4.7	1.14	0.04	1765.	56.	10.	87.	215.	316.	57.	55.	PDL-FE1-A50
0028	1	FE1	56.	24.5	8.0	2.3	1.0	4.6	1.07	0.04	1970.	62.	10.	56.	150.	312.	91.	50.	PDL-FE1-B10
0029	1	FE1	56.	28.0	8.1	1.6	1.0	4.5	0.99	0.04	2113.	58.	10.	46.	134.	306.	118.	54.	PDL-FE1-B25
0030	1	FE1	60.	22.1	6.8	2.0	1.0	2.9	0.91	0.03	1491.	51.	10.	42.	131.	447.	84.	36.	PDL-FE1-B50
0031	1	FE1	60.	24.5	8.2	1.6	1.0	4.0	1.18	0.03	1756.	53.	10.	55.	152.	366.	102.	54.	PDL-FE1-C10
0032	1	FE1	56.	24.6	7.2	1.6	1.0	3.7	1.07	0.05	1805.	46.	10.	29.	104.	303.	96.	57.	PDL-FE1-C25
0033	1	FE1	60.	23.2	8.6	1.9	1.0	3.8	1.19	0.04	2008.	54.	10.	46.	147.	340.	78.	63.	PDL-FE1-C50
0034	1	I1	65.	17.1	6.6	1.3	1.0	2.3	1.18	0.03	2238.	44.	15.	27.	104.	398.	110.	85.	PDL-I1-A10
0035	1	FE11	64.	25.3	4.2	1.0	1.0	1.7	0.60	0.03	1412.	44.	10.	28.	96.	317.	40.	48.	PDL-FE2-A10
0036	1	FE11	62.	20.1	6.1	1.5	1.0	2.7	0.89	0.03	2271.	45.	10.	33.	106.	388.	99.	54.	PDL-FE2-A25
0037	1	FE11	68.	17.0	5.6	1.5	1.0	3.1	1.04	0.03	1568.	60.	13.	61.	166.	652.	88.	49.	PDL-FE2-A50
0038	1	FE11	62.	22.4	7.0	2.2	1.0	3.3	1.00	0.04	1505.	70.	10.	63.	171.	503.	90.	48.	PDL-FE2-B10
0039	1	FE11	64.	17.2	6.1	1.7	1.0	2.5	1.17	0.06	1513.	46.	14.	44.	133.	461.	76.	79.	PDL-FE2-B20
0040	1	FE11	73.	13.4	4.5	1.2	1.0	2.1	1.04	0.02	757.	39.	18.	28.	101.	589.	91.	75.	PDL-FE2-B30
0041	1	FE11	59.	21.4	6.5	2.0	1.0	3.2	1.02	0.03	1380.	81.	10.	90.	228.	592.	80.	33.	PDL-FE2-C10
0042	1	FE11	66.	17.5	5.9	1.4	1.0	2.9	0.98	0.06	2153.	45.	10.	35.	114.	412.	93.	71.	PDL-FE2-C25
0043	1	I111	56.	23.2	7.6	1.0	1.0	3.6	0.56	0.04	1818.	24.	10.	10.	50.	176.	92.	118.	PDL-3-1-A10
0044	1	I111	61.	20.2	7.5	1.8	1.0	2.9	1.11	0.05	2034.	62.	10.	55.	148.	462.	115.	48.	PDL-3-1-A25
0045	1	I111	58.	23.0	6.1	1.9	1.0	3.0	0.88	0.03	1872.	84.	10.	99.	231.	527.	121.	36.	PDL-3-1-A50
0046	1	I111	62.	27.5	6.3	1.7	1.0	4.6	0.82	0.04	1776.	83.	10.	96.	236.	528.	86.	39.	PDL-3-1-B10
0047	1	I111	57.	24.3	7.4	2.1	1.0	5.8	0.87	0.04	1663.	69.	10.	96.	236.	504.	66.	50.	PDL-3-1-B25
0048	1	I111	74.	10.7	3.2	0.9	1.0	1.7	0.87	0.03	727.	35.	19.	13.	76.	477.	81.	77.	PDL-3-1-B50
0049	1	I111	60.	20.3	6.8	2.0	1.0	3.5	1.13	0.05	1866.	104.	10.	104.	259.	683.	127.	36.	PDL-3-1-C10
0050	1	I111	59.	28.3	5.2	1.4	1.0	4.2	0.66	0.02	1713.	59.	10.	56.	162.	391.	94.	77.	PDL-3-1-C20

A-3.5

INDR	GRO1	GRO2	PB	AG	ZN	BA	AS	MO	CU	CR	NI	CO	V	SN	SB	BI	W	LI	BE	DIV.
0051	2	S7	20.	0.1	45.	294.	48.	3.	12.	83.	29.	9.	66.	9.	12.	1.	10.	26.	1.	CDR-S7-A10
0052	2	S7	18.	0.1	44.	294.	39.	6.	11.	79.	33.	12.	63.	8.	11.	1.	9.	16.	1.	CDR-S7-A25
0053	2	S7	19.	0.1	38.	298.	45.	7.	10.	80.	32.	7.	60.	9.	13.	1.	10.	21.	1.	CDR-S7-A50
0054	2	S7	36.	0.1	90.	222.	22.	1.	9.	55.	37.	10.	61.	8.	5.	1.	1.	203.	10.	CDR-S7-B10
0055	2	S7	29.	0.1	62.	287.	21.	2.	11.	72.	30.	9.	61.	7.	17.	1.	7.	87.	3.	CDR-S7-B20
0056	2	S7	29.	0.1	70.	222.	25.	1.	8.	49.	23.	7.	48.	8.	9.	1.	1.	170.	9.	CDR-S7-B40
0057	2	S7	17.	0.1	32.	298.	44.	7.	6.	75.	26.	8.	53.	11.	11.	1.	10.	19.	1.	CDR-S7-C10
0058	2	S1	26.	0.1	67.	281.	28.	2.	8.	76.	34.	10.	62.	9.	11.	1.	5.	80.	2.	CDR-S7-C50
0059	2	S1	19.	0.1	17.	291.	29.	4.	4.	55.	16.	3.	38.	8.	12.	1.	9.	18.	1.	PLT-S1-A10
0060	2	S1	21.	0.1	39.	326.	41.	8.	8.	77.	29.	7.	56.	7.	13.	1.	10.	22.	1.	PLT-S1-A25
0061	2	S1	25.	0.1	65.	349.	27.	2.	21.	102.	39.	12.	96.	12.	10.	1.	9.	62.	1.	PLT-S1-A50
0062	2	S1	23.	0.1	42.	314.	41.	4.	11.	86.	29.	8.	68.	9.	12.	1.	9.	33.	1.	PLT-S1-B10
0063	2	S1	21.	0.1	44.	295.	38.	3.	14.	83.	30.	8.	65.	8.	11.	1.	11.	33.	1.	PLT-S1-B25
0064	2	S1	17.	0.1	39.	319.	31.	3.	10.	79.	27.	6.	65.	9.	13.	1.	10.	27.	1.	PLT-S1-B50
0065	2	S1	15.	0.1	17.	288.	27.	5.	4.	53.	17.	3.	32.	8.	12.	1.	12.	21.	1.	PLT-S1-C10
0066	2	S1	18.	0.1	28.	327.	35.	4.	5.	66.	21.	4.	43.	10.	12.	1.	9.	38.	1.	PLT-S1-C25
0067	2	S1	18.	0.1	28.	316.	44.	4.	8.	65.	23.	5.	49.	8.	11.	1.	11.	32.	1.	PLT-S1-C50
0068	2	S1	26.	0.1	60.	351.	22.	2.	12.	98.	38.	12.	102.	9.	9.	1.	9.	65.	1.	PLT-S1-D10
0069	2	S1	22.	0.1	24.	317.	33.	7.	3.	64.	22.	5.	43.	9.	13.	1.	11.	30.	1.	PLT-S1-D25
0070	2	S1	16.	0.1	38.	316.	37.	3.	10.	83.	25.	6.	63.	12.	10.	1.	12.	25.	1.	PLT-S1-D50
0071	2	S2	37.	0.1	69.	446.	29.	2.	20.	114.	44.	15.	117.	8.	8.	1.	4.	76.	2.	PLT-S2-A10
0072	2	S2	23.	0.1	61.	404.	13.	2.	24.	107.	38.	11.	105.	7.	8.	1.	3.	63.	1.	PLT-S2-A25
0073	2	S2	42.	0.1	95.	447.	31.	1.	29.	126.	49.	13.	144.	10.	12.	1.	2.	88.	2.	PLT-S2-A50
0074	2	S2	22.	0.1	47.	402.	30.	4.	18.	92.	38.	16.	76.	9.	12.	1.	11.	39.	1.	PLT-S2-B10
0075	2	S2	27.	0.1	67.	432.	22.	3.	23.	117.	44.	14.	112.	8.	9.	1.	6.	57.	1.	PLT-S2-B25
0076	2	S2	1.	0.1	38.	344.	37.	1.	14.	90.	25.	7.	73.	8.	9.	1.	8.	22.	1.	PLT-S2-B50
0077	2	S2	4.	0.1	35.	363.	9.	1.	7.	76.	20.	5.	61.	10.	8.	1.	6.	15.	1.	PLT-S2-C10
0078	2	S2	7.	0.1	36.	388.	20.	1.	7.	76.	18.	4.	64.	11.	10.	1.	8.	21.	1.	PLT-S2-C20
0079	2	S2	8.	0.1	27.	384.	24.	2.	6.	67.	18.	4.	55.	10.	9.	1.	8.	30.	1.	PLT-S2-C40
0080	2	S2	27.	0.1	86.	445.	23.	1.	23.	114.	53.	19.	120.	9.	7.	1.	1.	73.	2.	PLT-S2-D10
0081	2	S2	19.	0.1	65.	376.	21.	3.	21.	102.	47.	21.	117.	8.	12.	1.	10.	52.	1.	PLT-S2-D25
0082	2	S2	23.	0.1	76.	413.	35.	2.	29.	114.	50.	15.	117.	7.	7.	1.	4.	78.	2.	PLT-S2-D50
0083	2	S112	27.	0.1	53.	362.	30.	6.	13.	87.	30.	9.	67.	11.	12.	1.	9.	27.	1.	PDL-S112-A10
0084	2	S112	53.	0.1	130.	539.	57.	3.	25.	93.	41.	11.	90.	11.	7.	1.	11.	83.	2.	PDL-S112-A25
0085	2	S112	223.	0.1	139.	154.	414.	2.	74.	228.	74.	15.	143.	264.	7.	3.	7.	68.	8.	PDL-S112-A50
0086	2	S112	28.	0.1	53.	306.	50.	4.	11.	89.	30.	7.	74.	14.	12.	1.	12.	23.	1.	PDL-S112-B10
0087	2	S112	22.	0.1	53.	315.	45.	4.	13.	84.	30.	9.	67.	10.	13.	1.	9.	29.	1.	PDL-S112-B25
0088	2	S112	47.	0.1	114.	433.	50.	1.	35.	89.	49.	16.	106.	9.	5.	1.	1.	68.	2.	PDL-S112-B50
0089	2	S112	27.	0.1	81.	358.	41.	3.	18.	100.	34.	9.	78.	9.	11.	1.	10.	43.	1.	PDL-S112-C10
0090	2	S112	31.	0.1	48.	333.	60.	5.	10.	81.	25.	6.	50.	10.	12.	1.	12.	30.	1.	PDL-S112-C25
0091	2	S112	36.	0.1	62.	329.	68.	5.	24.	78.	25.	8.	65.	12.	15.	1.	12.	34.	1.	PDL-S112-C50
0092	2	S112	19.	0.1	43.	311.	55.	5.	8.	70.	23.	7.	51.	10.	12.	1.	11.	29.	1.	PDL-S112-D10
0093	2	S112	21.	0.1	40.	317.	41.	4.	6.	76.	25.	7.	53.	9.	11.	1.	10.	23.	1.	PDL-S112-D25
0094	2	S112	37.	0.1	51.	330.	79.	7.	14.	76.	30.	7.	60.	11.	13.	1.	11.	27.	1.	PDL-S112-D50