



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT  
ET DE LA PRÉVENTION DES RISQUES TECHNOLOGIQUES  
ET NATURELS MAJEURS  
SRETIE Comité Sols-Déchets

*document public*

# étude du confortement de l'imperméabilité de formations crayeuses

résultats obtenus  
sur les planches d'essai  
expérimentales réalisées en  
Champagne (site de Beine-Nauroy, 51)  
et en Normandie (site d'Anneville, 76)  
rapport de fin de contrat (convention n° 86-189)

---

C. Mathon  
J.C. Pinte  
M. Sauter

Collaboration technique :  
P. Jacquot  
R. Panel

Coordination :  
M. Barrès

avril 1991  
R 31 890

**BRGM**  
SERVICE SOL ET SOUS-SOL  
Département Environnement et Risques  
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France - Tél. : (33) 38.64.34.34

## SOMMAIRE

	<u>Page</u>
<b>RESUME .....</b>	4
<b>PRESENTATION GENERALE .....</b>	5
Objectif de la recherche .....	5
Description du programme de recherche .....	5
<b>PREMIERE PARTIE : RESULTATS OBTENUS SUR LA PLANCHE                   REALISEE EN CHAMPAGNE .....</b>	7
1. Présentation du site de la décharge .....	8
1.1. Géologie .....	8
1.2. Hydrogéologie .....	9
2. Etudes de laboratoire .....	9
2.1. Essais réalisés par l'INSA de Lyon .....	9
2.2. Analyses diffractométriques .....	11
3. Planche d'essai .....	13
3.1. Préparation .....	13
3.2. Réalisation .....	14
3.3. Résultats et analyses .....	19
4. Conclusions .....	24
 <u>Annexes</u>	
Ia : Plan de situation générale (échelle 1/150 000)	25
Ib : Plan de situation générale (échelle 1/12 500)	27
II : Courbes granulométriques et de compactage des argiles .....	29
III : Photographies de la planche d'essai .....	34
IV : Courbes de densité sèche en fonction du nombre de passes .....	42
<b>DEUXIEME PARTIE : RESULTATS OBTENUS SUR LA PLANCHE REALISEE                   EN NORMANDIE .....</b>	45
1. Description du protocole expérimental .....	46
1.1. Localisation du site .....	46
1.2. Présentation de la méthodologie .....	46
2. Essais en laboratoire .....	48

	<u>Page</u>
3. Mise en oeuvre des parcelles et déroulement de l'expérimentation .....	50
3.1. Réalisation des parcelles .....	50
3.2. Confection des casiers .....	51
3.3. Déroulement de l'expérimentation .....	53
4. Efficacité du compactage .....	53
4.1. Mesures de densité .....	53
4.2. Evolution de la perméabilité dans le temps.	60
5. Analyse de la qualité de l'eau interstitielle ..	63
5.1. Comportement des jus dans les casiers .....	63
5.2. Evolution de la qualité de l'eau interstitielle .....	64
5.3. Analyse du sol en fin d'expérimentation ....	81
5.4. Conclusions sur les analyses chimiques .....	83
6. Conclusion .....	83
 <u>Annexes</u>	
1 : Essais Proctor Modifié .....	85
2 : Caractéristiques de la bentonite CLARSOL FB2 ...	90
3 : Analyses minéralogiques, chimiques et bactériologiques du sol .....	96
4 : Analyses chimiques et bactériologiques de l'eau interstitielle .....	104

## RESUME

Dans le cadre d'un programme national de recherches sur la mise en décharge, le BRGM a réalisé avec l'aide du Comité Sols-Déchets du Ministère de l'Environnement (SRETIE) et du Conseil Général de Seine-Maritime, une étude expérimentale du confortement de l'imperméabilité de formations crayeuses.

Sur deux sites de carrière à substratum crayeux sélectionnés l'un en CHAMPAGNE et l'autre en NORMANDIE, des planches d'essai expérimentales ont été réalisées :

- soit avec apport (en différentes proportions) d'argiles régionales (en Champagne) ;
- soit par ajout et mélange de bentonite commerciale (en Normandie).

L'expérimentation réalisée en Champagne a permis de définir et de maîtriser les conditions techniques de réalisation in situ de la planche d'essai (bonne adéquation des engins aux matériaux).

En Normandie, le traitement de la craie par broyage et compactage a permis d'obtenir une couche présentant de bonnes performances d'étanchéité. La faible perméabilité de la couche crayeuse réalisée ainsi que son bon comportement au contact des jus de décharge, limitent de façon significative l'infiltration du flux polluant.

Si l'ajout de 2 % de bentonite améliore encore de façon significative l'étanchéité du sol traité, le mélange nécessite, par contre, des précautions de mise en oeuvre.

## PRESENTATION GENERALE

### Objectif de la recherche

L'examen de la carte géologique de France montre l'importance des affleurements crayeux dans la moitié Nord de la France où la craie constitue l'un des principaux composants du sous-sol, en même temps que l'une des principales ressources aquifères de bonne qualité.

Dans de nombreuses régions (Champagne-Ardenne, Normandie, etc.), l'exploitation des formations superficielles (argiles, sables et graviers, craie) a laissé de grandes excavations (parfois plusieurs centaines d'hectares) dont le fond est généralement constitué par de la craie et où le niveau piézométrique est peu profond.

De fait, dans le passé, de nombreuses fouilles de ce type ont été comblées (de façon non contrôlée) par des déchets variés provoquant des transferts de polluants vers la nappe.

Il n'est possible d'envisager l'exploitation de tels sites pour des décharges que si deux conditions préalables sont remplies :

- perméabilité de la craie (remaniée, compactée) conforme aux exigences de la réglementation ( $K \leq 1.10^{-6}$  m/s sur 5 m minimum) ;
- durabilité de l'étanchéité ainsi constituée au contact des effluents de décharges.

En Champagne notamment, sur plusieurs sites, le broyage et le compactage de craie (à l'optimum d'humidité déterminé par essai Proctor) ont permis d'abaisser la perméabilité du substratum à des valeurs compatibles avec le dépôt d'ordures ménagères ( $K = 1.10^{-7}$ ).

Cette "étanchéité" peut être encore améliorée par l'ajout ou le mélange de matériaux adaptés ou adjuvants argileux (exemple : argiles du Gault et du Sparnacien, attapulgite, bentonite, etc.) mis en oeuvre in situ dans des conditions bien spécifiées par des essais préalables de laboratoire. De plus, la tenue mécanique et physico-chimique au contact prolongé d'effluents de décharges devra être contrôlée pour s'assurer de la pérennité des zones ainsi "imperméabilisées".

### Description du programme de recherche

La recherche a été réalisée en deux phases principales : des essais de laboratoire, suivis de tests in situ sur planches d'essais réalisées dans des conditions d'exploitation proches de celles d'une décharge, sur deux sites sélectionnés d'une part en CHAMPAGNE, et d'autre part en NORMANDIE.

### **ESSAIS DE LABORATOIRE**

Les échantillons de craie, prélevés sur les deux sites proposés ont été soumis à divers essais de laboratoire de mécanique des sols : tests d'identification (densité sèche, granulométrie, teneur en eau, etc.), tests de compactage (essais Proctor modifié) à différents teneurs en eau et à des mesures de perméabilité sur éprouvette de craie compactée.

De plus des échantillons (craie-argiles) ont été acheminés au laboratoire de géotechnique du Département Génie Civil et Urbanisme de l'INSA de Lyon (Professeur G.DIDIER) qui, dans le cadre d'une recherche complémentaire, a étudié les conditions optimales de traitement par ajout d'argiles ou d'adjuvants (conditions de malaxage de la craie avec l'argile, ou l'adjuvant, perméabilités après saturation, sous contraintes et après cycles humidification-dessiccation, etc.). Ces essais de laboratoire ont permis de définir les protocoles de mise en oeuvre in situ des planches d'essai.

### **ESSAIS SUR LE TERRAIN**

Les tests in situ ont été réalisés sur des planches d'essai simulant au mieux les conditions d'exploitation en décharge. Les matériaux sélectionnés ont été mis en oeuvre suivant les conditions définies en laboratoire (malaxage, compactage) et contrôlées (densité, teneur en eau, essais répétés de perméabilité in situ par la méthode des doubles anneaux).

Enfin la durabilité physique et chimique des "étanchéités" réalisées a été suivie après mise en contact avec des jus de décharges réels (épandage de lixiviats caractéristiques).

En fin d'observation (Normandie), il a été procédé à une autopsie des sites testés après dégagement des parcelles, comprenant :

- des mesures de perméabilité (évolution) ;
- le creusement d'une tranchée par carottages, observations physiques et analyses de l'eau interstitielle.

### **RESULTATS**

Les résultats obtenus sur chacun des sites expérimentaux sont exposés dans le présent rapport, qui comprend :

- une première partie : planche d'essai réalisée en CHAMPAGNE ;
- une deuxième partie : planche d'essai réalisée en NORMANDIE.

La méthode utilisée pourrait être étendue, après expérimentation, à d'autres types de sols et de roches se trouvant sur le territoire français et permettrait ainsi, à terme, la mise au point de règles de l'art pour l'"étanchéité rapportée" des fonds de décharge, facilitant les choix d'implantation de sites.

## PREMIERE PARTIE

Résultats obtenus sur la planche d'essai expérimentale  
réalisée en CHAMPAGNE (site de Beine-Nauroy, 51)

Rapport de fin de contrat (convention n° 86-189)

J.C.PINTE  
BRGM - Nord-Pas-de-Calais

Collaboration : R.PANEL  
BRGM - Champagne

Coordination : M.BARRES  
BRGM - 4S/ENV

La planche d'essai réalisée en Champagne (site de Beine-Nauroy, 51) a pour but de vérifier les possibilités d'obtenir in situ les caractéristiques de perméabilité enregistrées en laboratoire à l'aide des moyens de terrassements appropriés aux matériaux à traiter.

En effet des études préalables ont montré que la craie pouvait atteindre par action mécanique, broyage et compactage, une perméabilité moyenne de  $10^{-7}$  à  $10^{-8}$  m/s, ce qui autorise l'exploitation en décharge de classe II.

Cette étude prévoit d'examiner la diminution de la perméabilité du fond de fouille par le même procédé mais en ajoutant un matériau argileux qui permettrait de rendre conforme à l'exploitation en décharge de classe II des sites dans lesquels la craie présente des comportements incompatibles avec le procédé précédent (cas de la craie altérée par exemple), ou à garantir une étanchéification dans tous les cas de figures.

## 1. Présentation du site de la décharge

Le BRGM, Agence de Reims, a effectué une recherche de site en Champagne. Le choix s'est finalement porté sur le site d'un ancien vallon sec à Beine-Nauroy dans la Marne ; on trouvera en annexes la situation générale du site à deux échelles.

### 1.1 - GEOLOGIE

La formation géologique rencontrée localement est la craie blanche du Sénonien (Crétacé Supérieur) épaisse de 150 à 200 m. La craie blanche se trouve affectée de fissuration d'origine tectonique, les fissures se trouvant agrandies par le jeu des dissolutions dues aux eaux pluviales agressives. L'épaisseur de la zone altérée peut ainsi atteindre une dizaine de mètres sur les coteaux et quelques mètres dans les fonds de vallée.

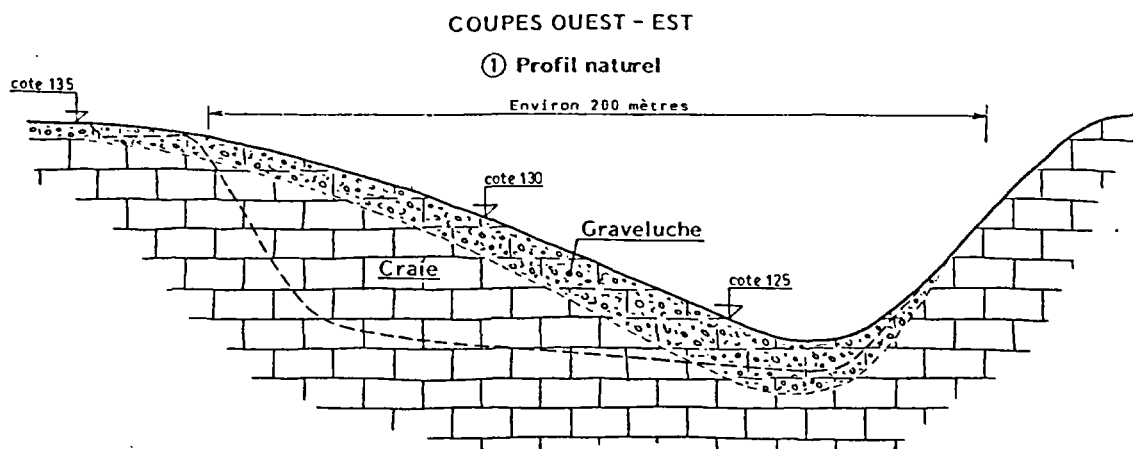
La cryoturbation (\*) due aux récentes glaciations, suivie de colluvionement a créé sur les pentes et au fond de la vallée des dépôts dits "graveluches", ces dépôts étant constitués de nodules de craie roulés enrobés dans une matrice limoneuse. Des colluvions essentiellement limoneuses se sont également déposées en fond de vallée.

---

(\*) mouvements de matière à l'intérieur des sols dus aux gels et dégels successifs.



Une reconnaissance géologique locale a permis d'obtenir le profil géologique suivant :



**Figure 1** : Profil géologique

## 1.2 - HYDROGEOLOGIE

Les études montrent que le site se trouve pratiquement sur une crête piézométrique et que la nappe de la craie est profonde. La profondeur de la nappe en étiage est de 15 m et de 26 m au maximum.

## 2. Etudes de laboratoire

### 2.1 - ESSAIS REALISES PAR L'INSA DE LYON

Les essais ont été réalisés sur la craie saine de la carrière de Saint-Germain-la-Ville (Marne) et sur deux types d'argile, argile réfractaire du Sparnacien (Sézanne, Marne) et argile altérée de l'Aptien inférieur (Soullaines-Dhuys, Aube).

Cependant, le choix du site s'étant porté pour des raisons techniques sur le vallon de Beine-Nauroy, des réserves doivent être émises sur les différents résultats, la craie saine de Saint-Germain-la-Ville devant être différente de la craie altérée de Beine-Nauroy.

Malgré tout, ces résultats ont apporté des indications, en particulier sur le choix de la concentration et de la nature de l'argile à mettre en oeuvre.

Les principaux essais ont été :

- analyse granulométrique,
- essai Proctor Modifié,
- mesure du coefficient de perméabilité (à l'eau).

Les paramètres que l'on a fait varier pour chaque essai sont les suivants :

- nature de l'argile,
- pourcentage d'argile,
- teneur en eau de compactage,
- classe granulométrique de la craie (0/2 et 0/20 mm).

A la suite des diverses mesures, les résultats définitifs sont les suivants :

- Craie 0/20 mm + 30 % argile aptienne  $k = 10^{-9}$  m/s
- Craie 0/2 mm + 10 % argile aptienne  $k = 10^{-9}$  m/s
- Craie 0/20 mm + 30 % argile sparnacienne  $k = 10^{-8}$  m/s
- Craie 0/2 mm + 10 % argile sparnacienne  $k = 10^{-8}$  m/s

La perméabilité demandée étant de  $10^{-9}$  m/s, les deux premiers mélanges sont acceptables. Cependant, une granulométrie de 0/2 mm étant difficilement réalisable sur chantier, le mélange craie 0/20 mm + 30 % d'argile aptienne de la carrière de Soulaines-Dhuys a été retenu.

Les caractéristiques de cette argile sont :

- 97,5 % de passant à 80  $\mu$ m,
- teneur en eau naturelle : 23,5 %
- pourcentage de CaCO<sub>3</sub> = 1,47 %
- teneur en eau optimale :  $W_{opt} = 13$  %
- densité sèche optimale :  $d_{opt} = 1,93$  t/m<sup>3</sup>
- classification R.T.R. : sol A2 (silt argileux).

Par ailleurs, une autre argile a été retenue dès la connaissance définitive du choix du site. En effet, des essais de perméabilité in situ avaient été réalisés par le BRGM Agence de Reims sur la première cellule de la décharge avec de l'argile du Sparnacien prélevée dans la carrière de Courlandon (Marne) située à proximité de Beine-Nauroy.

Ces essais ont donné des résultats satisfaisants ( $k = 10^{-8}$  m/s avec 50 % d'argile de Courlandon).

Cela a justifié cet intérêt pour l'argile locale de Courlandon.

Les données recueillies sur cette argile sont :

- 84 % de passant à 80  $\mu$ m,
- teneur en eau naturelle : 23,7 %,

- Pourcentage de CaCO<sub>3</sub> : 30,7 %,
- W opt = 12 %,
- d opt = 2 t/m<sup>3</sup>,
- Classification R.T.R. : sol A3.

Pour les travaux, nous nous sommes donc intéressés à ces deux argiles dont on trouvera en annexe II les courbes granulométriques et de compactage Proctor modifié.

## 2.2 - ANALYSES DIFFRACTOMETRIQUES

Les dernières essais de laboratoire ont consisté, en collaboration avec le laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de Lille, à différencier minéralogiquement ces argiles par des analyses diffractométriques.

Les analyses ont été effectuées sur des pâtes orientées contenant la fraction inférieure à 2 µm des matériaux et sur des poudres désorientées contenant la fraction inférieure à 80 µm.

### *2.2.1. Analyses qualitatives sur les poudres désorientées*

#### Argile de Soulaines

L'analyse a montré que cette argile contient une grande quantité de quartz mais également une importante quantité d'argile puisqu'on peut voir sur le diffractogramme des pics d'illite, de kaolinite et de vermiculite, pics qui, en général, apparaissent faiblement dans les analyses sur poudres orientées.

#### Argile de Courlandon

Cette argile est composée principalement de calcite et de quartz. Le diffractogramme comprend également de petits pics d'illite et de goethite.

### *2.2.2. Analyses quantitatives sur pâtes orientées*

La composition de la fraction inférieure à 2 µm des deux argiles est la suivante :

*Etude du confortement de l'imperméabilité de formations crayeuses  
SRETIE*

	Argile de Courlandon	Argile de Soulaines
Kaolinite	15 %	30 %
Illite	10 %	40 % +
Vermiculite		15 %
Smectite		10 %
Interstratifiés 10-14 Vermic.		5 % -
Interstratifiés 7-14 Smectite	75 %	
Feldspath	rare	rare
Quartz	commun	commun
Goethite	commune	commune

Remarques

- les interstratifiés 7-14 S ayant un comportement très proche de celui des smectites, l'argile de Courlandon doit être gonflante, donc à priori très intéressante pour l'étanchéité.  
Ce type d'argile est d'ailleurs utilisé par le Commissariat à l'Energie Atomique pour la réalisation de barrières étanches de stockage des déchets radioactifs ;
- une des particularités principales des smectites est la présence de cations échangeables adsorbés à la surface et entre les feuillets. Il existe alors un risque d'instabilité de l'argile de Courlandon au contact de la craie (cations  $Ca^{2+}$ ).  
Néanmoins, on peut penser que ce risque est faible étant donné le degré calcimétrique important (30 %  $CaCO_3$ ) ;
- les pourcentages importants de kaolinite (30 %) et d'illite (40 %) dans l'argile de Soulaines permettent de penser que cette argile est de structure stable et gonfle très peu (15 % vermiculite - 10 % smectite).

### 3. Planche d'essai

#### 3.1 - PREPARATION

Dans un premier temps, nous avons utilisé les diverses informations recueillies lors de la recherche bibliographique pour les appliquer au cas qui nous intéresse.

Nous avons alors établi une procédure de réalisation de la planche d'essai pour lequel nous avons retenu le phasage des travaux suivant :

- broyage et compactage de la craie avec contrôle granulométrique pour obtenir des éléments d'un diamètre inférieur à 20 mm ;
- épandage des argiles à des concentrations différentes :
  - . 30 % d'argile de Soulaines-Dhuys,
  - . 30 % et 50 % d'argile de Courlandon ;
- malaxage ;
- compactage du mélange et contrôle de la densité ;
- mesures de perméabilité.

Nous nous sommes ensuite intéressés aux différents engins permettant la mise en oeuvre de chaque phase, guidés en cela par l'expérience de travaux similaires et en utilisant la Recommandation pour les Terrassements Routiers.

Nous avons alors porté notre choix sur le matériel suivant :

- un ripper : il s'agit d'un bulldozer chenillé comportant à l'arrière une barre porte outil recevant 1, 3 ou 5 dents très résistantes pouvant s'enfoncer sur une profondeur de 30 à 150 cm. Cet appareil permet de dessoler la craie, c'est à dire d'enlever une partie des blocs en les faisant remonter à la surface, et/ou de la fracturer si elle est peu altérée ;
- un compacteur à pied dameur (tamping) : ce compacteur comprend un ou plusieurs cylindres d'un diamètre de 1,20 m à 1,60 m. Les cylindres comportent des reliefs variés, le plus souvent des pièces à base élargie et rappelant un peu des pieds de mouton. Une variante de ce matériel utilisée pour compacter les déchets comprend à l'avant des rouleaux à pieds de mouton de section trapézoïdale et à l'arrière des rouleaux à couteaux de section triangulaire. Ce type d'engin permet d'assurer un broyage efficace de la craie, en combinant un effet de poids et un effet dynamique ;

- un malaxeur rotatif à axes horizontaux : cet appareil est constitué par un axe ou rotor muni de lames ou de disques supportant des couteaux spéciaux facilement remplaçables en acier très dur traités en surface pour limiter leur usure. Le nombre de couteaux ou de dents varie de 50 à 100, le diamètre des rotors va de 0,6 à 1,20 m et la largeur de travail de 1,8 à 2,5 m environ. De plus, la profondeur malaxée peut atteindre 40 cm. Pour notre traitement, le mélange sera effectué sur 30 cm ;
- un compacteur mixte : Cet appareil combine le compactage vibrant avec le compactage statique. Il se compose :
  - . d'un train de pneus chargés (comme dans le cas des compacteurs à pneus),
  - . d'un cylindre sur essieu vibrant.Ce compacteur a l'avantage d'augmenter la densité en surface par rapport au rouleau vibrant seul où le maximum de densité se situe à quelques centimètres de la surface. Ce type d'engin permet de diminuer le volume des vides du sol traité ainsi que l'influence de l'eau.

### 3.2 - REALISATION

La planche d'essai a été effectuée du 17 au 19 Mai 1989 dans la première cellule de la décharge de Beine-Nauroy exploitée par l'entreprise Gournoff.

Le piquetage a été réalisé dans le quart Nord-Ouest de la cellule selon le schéma suivant :

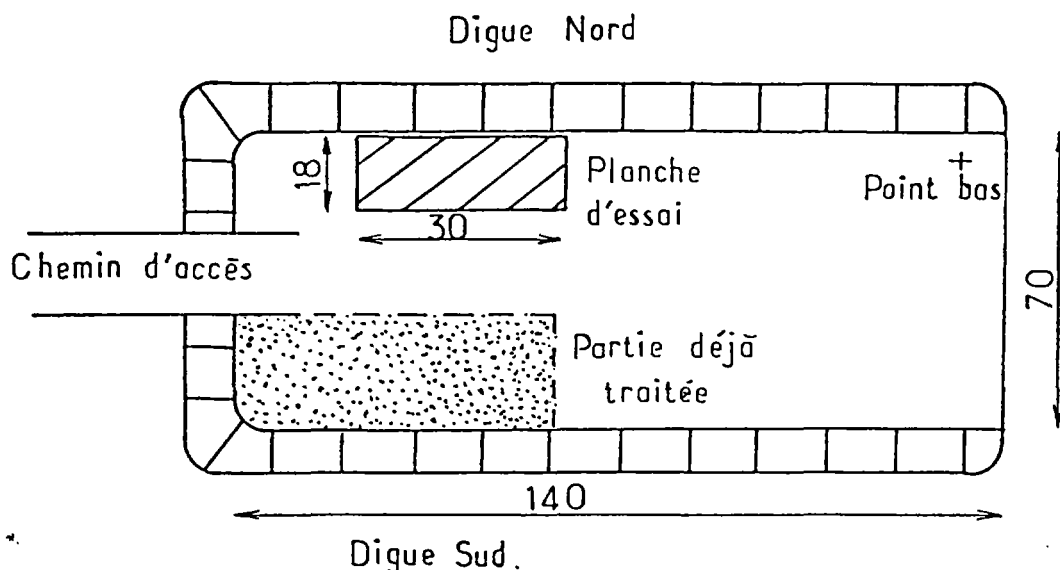


Figure 2 : Implantation de la planche d'essai

Une première implantation de la planche avait été effectuée dans le quart Sud-Est de la cellule mais il s'est avéré que le terrain étant resté à cet endroit dans son état naturel, une épaisse couche de gravelluches affleurerait.

De plus, il n'a pas été possible d'implanter la planche d'essai dans le quart Nord-Est car il y avait accumulation d'eau (point bas).

Des photographies des travaux sont données en annexe III.

Le matériel de mise en oeuvre utilisé était constitué par :

- un bulldozer Fiat muni de trois dents de ripper,
- un compacteur tamping Hanomag C66C,
- une pelle Poclain (P 75),
- un malaxeur Rex,
- un rouleau vibrant Bomag 217 D (un problème de planning de la Screg ne nous a pas permis d'obtenir un compacteur mixte).

Les travaux ont débuté par la phase de broyage de la craie :

- dessolage de la craie sur une épaisseur de 30 cm grâce à trois passages successifs du ripper (selon deux directions perpendiculaires) ;
- prébroyage sur une profondeur de 30 cm à l'aide d'un passage du malaxeur qui a permis de diminuer considérablement la granulométrie en cassant une grande partie des blocs ;
- broyage final à l'aide du compacteur tamping ; un seul passage a suffi pour obtenir la granulométrie désirée ( $d^{\max} = 20$  mm).

Après un léger nivelage à l'aide de la lame du bulldozer, la planche a été découpée en quatre tronçons selon l'implantation suivante :

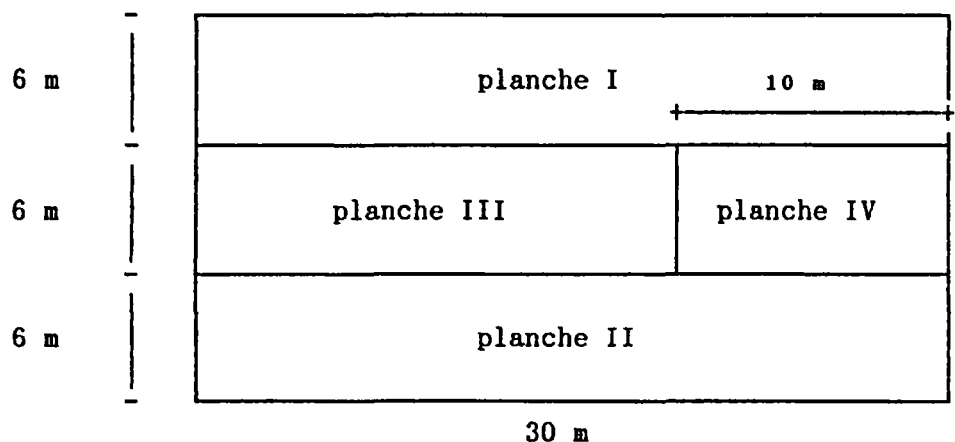


Figure 3 : Planche d'essai

- Planche I : mélange craie + 30 % d'argile de Soulaines.
- Planche II : mélange craie + 50 % d'argile de Courlandon.
- Planche III : mélange craie + 30 % d'argile de Courlandon.
- Planche IV : craie broyée seule.

Remarque : la réalisation de la planche IV, décidée sur le terrain, servira de référence pour les résultats de perméabilité.

Chaque argile a ensuite été épandue à l'aide de la pelle. Les épaisseurs mises en place sont les suivantes :

- 10 cm pour les planches I et III,
- 15 cm pour la planche II.

Bien que très sèche, l'argile de Soulaines a été relativement facile à mettre en oeuvre par rapport à celle de Courlandon, très humide, qui restait "collée" au godet de la pelle.

Pour chaque planche, le malaxage a été effectué en trois passages successifs sur une profondeur d'action de 30 cm ce qui a permis d'obtenir un mélange suffisamment homogène pour commencer le compactage.

Pour les planches I et II, le compactage a été effectué de deux passes en deux passes (une passe = un passage) d'abord à faible puis à forte amplitude de vibration.

Entre chaque série de passes, nous avons réalisé des mesures au nucléodensimètre TROXLER qui nous ont permis de tracer une courbe donnant la densité sèche en fonction du nombre de passes (voir courbes en annexe IV).

Ceci nous a conduit à déterminer un nombre de passes optimal correspondant à la valeur maximale de la densité. Ainsi, pour les planches III et IV, nous avons fait passer le compacteur directement au nombre de passes optimal.

Remarque : Chaque point de mesure au nucléodensimètre a été effectué à deux profondeurs différentes, 15 cm et 30 cm, selon l'implantation suivante.



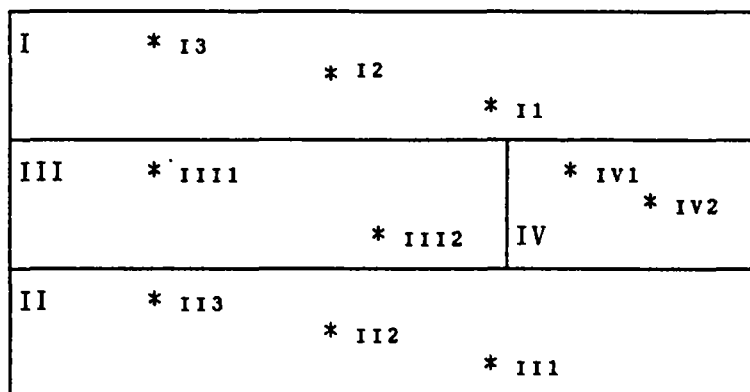


Figure 4 : \* implantation des points de mesures

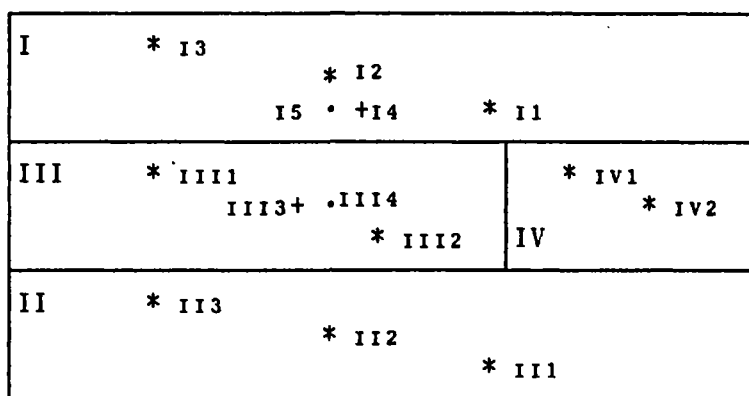
Dès la fin du compactage, les sites de mesure de perméabilité ont pu être mis en saturation. Les points sont identiques à ceux choisis pour les mesures au nucléodensimètre.

Les essais ont été réalisés à l'aide du perméamètre à double anneau (dispositif PANDA) développé au BRGM.

Une première série d'essais a été effectuée à l'eau ; ceux-ci ont duré trois jours et ont été entrepris dès la fin du compactage c'est-à-dire fin mai 1989.

D'autres essais ont été réalisés avec des jus de percolation provenant d'une décharge en exploitation dans l'Aisne suivant le processus chronologique ci-après :

- début août, mise en place des anneaux de saturation de grand diamètre (1.6 m) en deux points de la planche ;
- fin août, réception et mise en place des lixiviats dans les deux anneaux : début de la saturation ;
- début octobre, mise en place des dispositifs PANDA et mesure de la perméabilité ; simultanément aux mesures avec lixiviats et à proximité des points d'essai, deux essais à l'eau ont été entrepris.



**Figure 5** : \* points de mesures Troxler  
 + points de perméabilité au jus  
 • points de perméabilité à l'eau

### 3.3 - RESULTATS ET ANALYSES

Dans ce paragraphe, nous présentons tout d'abord les résultats des mesures de perméabilité à l'eau, réalisées immédiatement après le compactage, suivies d'un premier commentaire.

Ensuite nous analyserons ces résultats comparativement aux mesures de densité in situ effectuées au Troxler ; viendront enfin les résultats de perméabilité aux jus de décharge et les commentaires les accompagnant.

#### 3.3.1. Mesures de perméabilité in situ à l'eau

	Durée de saturation préalable	Durée de mesure	Température moyenne de l'eau (°C)	Perméabilité mesurée (m/s)
<b>Planche I</b> Soulaines 30 %				
- point I.1	20 h	6h 30'	21	1.10 <sup>-8</sup>
- point I.2	24 h	2h 30'	27	2.10 <sup>-8</sup>
<b>Planche II</b> Courlandon 50 %				
- point II.1	114 h	2h 40'	19	7.10 <sup>-9</sup>
- point II.2 (zone fissurée)	120 h	2h	25	4.10 <sup>-8</sup>
<b>Planche III</b> Courlandon 30 %				
- point III.1	90 h	3h	20	3.10 <sup>-8</sup>
- point III.2	96 h	2h 10'	25	2.10 <sup>-8</sup>
<b>Planche IV</b> Craie broyée compactée				
- point IV.2	94 h	1h 30'	26	2.10 <sup>-7</sup>

Plusieurs remarques peuvent être établies dès la lecture de ces résultats :

- la mise en oeuvre sur chantier n'a pas permis d'obtenir la perméabilité mesurée en laboratoire pour les mélanges, à savoir  $10^{-9}$  m/s. Cependant, on a pu s'approcher de cette valeur avec les différents mélanges (k de l'ordre de  $10^{-8}$  m/s) et en particulier avec la craie +50 % d'argile de Courlandon avec laquelle nous avons obtenu une valeur de  $7.10^{-9}$  m/s au point II.1 ;
- les essais sur la craie broyée compactée seule ont donné, par contre, de bons résultats puisqu'on obtient une valeur identique à celle mesurée en laboratoire sur la craie de Saint-Germain-la-Ville ;
- le fait d'avoir pratiquement doublé la concentration d'argile de Courlandon améliore les valeurs d'une puissance de 10. Dans cette comparaison, nous ne considérons pas le point II.2 situé sur une zone très fissurée ;
- pour les mélanges avec les argiles de Soulaines et de Courlandon, à concentration égale, les coefficients de perméabilité sont identiques.  
Ceci est en contradiction avec les résultats des études de laboratoire, en particulier avec les analyses diffractométriques qui semblaient montrer, en théorie, que l'argile de Courlandon serait meilleure pour l'étanchéité à cause de sa forte composition en éléments gonflants.

Nous allons tenter d'expliquer ces différentes remarques en utilisant les contrôles effectués au nucléodensimètre et les mesures de laboratoire réalisées sur des échantillons prélevés sur le site après traitement (Essai Proctor, teneur en eau et poids spécifique).

Un point essentiel pour obtenir la perméabilité souhaitée, in situ, était de réaliser un compactage aussi efficace qu'en laboratoire. Il faut effectuer cette vérification sur les deux profondeurs de mesures au nucléodensimètre (15 et 30 cm).

La valeur de  $d$  donnée par l'appareil est calculée à partir de la relation :

$$d = h/(1+w)$$

avec  $h$  = densité humide  
et  $w$  = teneur en eau naturelle.

On corrige habituellement les valeurs de  $w$  par un étalonnage. Cette correction n'ayant pas pu être réalisée sur l'appareil de mesure par manque d'information "a priori", nous avons corrigé  $w$  grâce aux prélèvements qui ont été effectués au droit de chaque essai in situ et testé dès le retour au laboratoire c'est-à-dire "a posteriori".

**Planche I** : Craie broyée + 30 % d'argile de Soullaines.

	gamma humide t/m <sup>3</sup>	teneur en eau %	gamma sec t/m <sup>3</sup>	gamma sec corrigé t/m <sup>3</sup>
moyenne des mesures à 15 cm	2,1	17,8	1,8	1,78
moyenne des mesures à 30 cm	2,2	17,7	1,9	1,84
mesures en laboratoire	2,2	18,3	1,9	

. d labo > d 30 > d 15

Le compactage in situ est inférieur au compactage Proctor modifié de laboratoire malgré un nombre de passes supérieur au nombre de passes optimal (voir courbe en annexe). On peut donc émettre l'hypothèse qu'un autre type de compactage permettrait d'obtenir une compacité plus forte (soit une perméabilité plus faible) in situ notamment en surface.

**Planche II** : Craie broyée + 50 % d'argile de Courlandon.

	gamma humide t/m <sup>3</sup>	teneur en eau %	gamma sec t/m <sup>3</sup>	gamma sec corrigé t/m <sup>3</sup>
moyenne des mesures à 15 cm	2	21,4	1,7	1,71
moyenne des mesures à 30 cm	2,1	20,3	1,8	1,75
mesures en laboratoire	2	20,8	1,7	

. d 30 > d 15 > d labo

Dans ce cas, nous avons donc dépassé l'énergie Proctor Modifié de laboratoire. Les perméabilités obtenues étant très proches de 10<sup>-9</sup>m/s, on peut supposer qu'en protégeant la zone traitée (lit de sablon, par exemple) dès la fin de la mise en oeuvre, il est possible d'avoir de meilleurs résultats. Il reste à vérifier que sur le mélange de chantier la perméabilité serait du même ordre de grandeur tant en laboratoire que in situ.

*Etude du confortement de l'imperméabilité de formations crayeuses  
SRETIE*

**Planche III** : Craie broyée + 30 % d'argile de Courlandon.

	gamma humide t/m <sup>3</sup>	teneur en eau %	gamma sec t/m <sup>3</sup>	gamma sec corrigé t/m <sup>3</sup>
moyenne des mesures à 15 cm	2,1	21	1,7	1,74
moyenne des mesures à 30 cm	2,1	20	1,75	1,77
mesures en laboratoire	2,2	18,4	1,9	

. d labo > d 30 > d 15

Le compactage est donc insuffisant. La remarque de la planche I reste valable dans ce cas.

**Planche IV** : Craie broyée seule.

	gamma humide t/m <sup>3</sup>	teneur en eau %	gamma sec t/m <sup>3</sup>	gamma sec corrigé t/m <sup>3</sup>
moyenne des mesures à 15 cm	2,1	16	1,8	1,83
moyenne des mesures à 30 cm	2,2	14,8	1,9	1,92
mesures en laboratoire	2,1	14,8	1,8	

. d 30 > d 15 > d labo

Le compactage est donc satisfaisant.

**Remarques**

- pour chaque planche, on peut noter que d 30 cm est toujours supérieur à d 15 cm. Ce type de compactage (rouleau vibrant) ne permet donc pas d'assurer une homogénéité de la densité du mélange en surface.

On peut supposer qu'un rouleau mixte à pneus aurait augmenté la valeur de la densité en surface ;

- on constate sur les courbes de compactage (annexe II) que :
  - . le passage de la vibration du compacteur de faible à forte amplitude semble agir plus fortement en profondeur qu'en surface,
  - . dans le cas de la planche I, on obtient rapidement un maximum de densité en profondeur avec la vibration à faible amplitude. Le compactage à forte amplitude est nécessaire pour atteindre les densités désirées.

### 3.3.2. Mesures de perméabilité au jus de décharge

Dans le tableau ci-dessous nous donnons les résultats obtenus sur les deux zones saturées par des jus de décharge et sur lesquelles des essais au double anneau ont été effectués ; dans le même tableau nous donnons les valeurs des essais de perméabilité d'étalonnage.

	Durée de saturation préalable	Durée de mesure	Température moyenne de l'eau (°C)	Perméabilité mesurée (m/s)
<b>Planche I Soulaines 30 %</b>				
point I.4 (*)	24 h	1h 50'	19	1.10 <sup>-8</sup>
point I.5 (.)	24 h	0h 40'	20	4.10 <sup>-8</sup>
<b>Planche III Courlandon 30 %</b>				
point III.3 (*)	48 h	2h 20'	11	1.10 <sup>-8</sup>
point III.4 (.)	48 h	0h 50'	14	2.10 <sup>-8</sup>

(\*) mesure faite au jus de décharge

(.) mesure faite à l'eau

Les différences observées dans ces résultats ne sont pas significatives pour que l'on puisse en tirer des conclusions quant à l'influence du contact avec les jus de décharge. Par ailleurs si l'on compare ces résultats avec ceux obtenus lors des opérations du mois de mai, on peut dire dans un premier temps que sur le strict plan perméabilité aucune (ou quasiment aucune) différence n'a été mise en évidence ; de cette réflexion nous excluons bien entendu tout les aspects chimiques (modification du fond de la décharge, de la composition du jus...) ou hydrogéochimiques (diffusion-dispersion, adsorption...).

## 4. Conclusions

Les résultats globaux de cette planche d'essai sont à considérer sur deux plans, compactage et perméabilité.

L'aspect compactage, dans lequel nous incluons toutes les phases de la réalisation de la planche d'essai, a été assez satisfaisant. Les points positifs majeurs que nous pouvons retenir sont d'une part l'adéquation des engins aux matériaux travaillés, d'autre part l'aisance avec laquelle les conducteurs d'engins maîtrise la technique. Ceci nous conforte dans notre position qui consiste à faire le parallèle entre la réalisation d'étanchéité et le traitement des sols en place ou plus généralement les travaux de terrassement. On ne peut que regretter de ne pas avoir pu disposer d'un compacteur mixte qui nous aurait permis, selon toute vraisemblance, d'obtenir des résultats plus favorables en compacité notamment dans la frange 0/15 cm.

Sur le plan perméabilité nous n'avons pas noté, durant la période d'observation et de mesure, de variation en fonction des conditions d'expérimentation.

Une approche plus détaillée semble cependant nécessaire afin d'intégrer tous les facteurs dont dépend la pérennité de la perméabilité ; ce n'était pas l'objet de cette expérimentation mais peut en constituer un prolongement intéressant.



Annexe Ia

Plan de situation générale (échelle 1/150 000)

BEINE NAUROY

MARNE

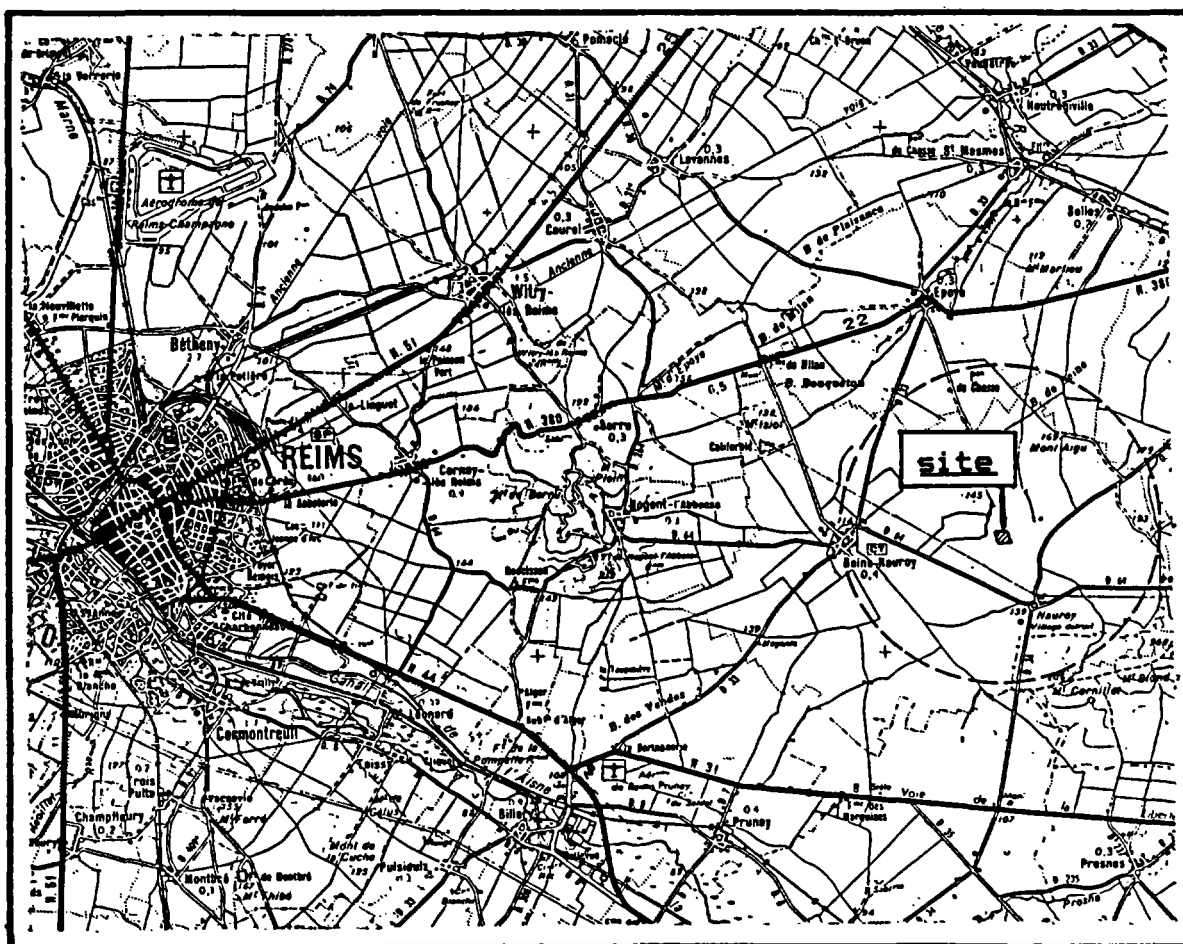
REALISATION D'UNE PLANCHE D'ESSAI

POUR L'ETANCHEITE D'UN FOND DE DECHARGE

17 - 19 MAI 1989

# PLAN DE SITUATION GENERALE

echelle 1/150000



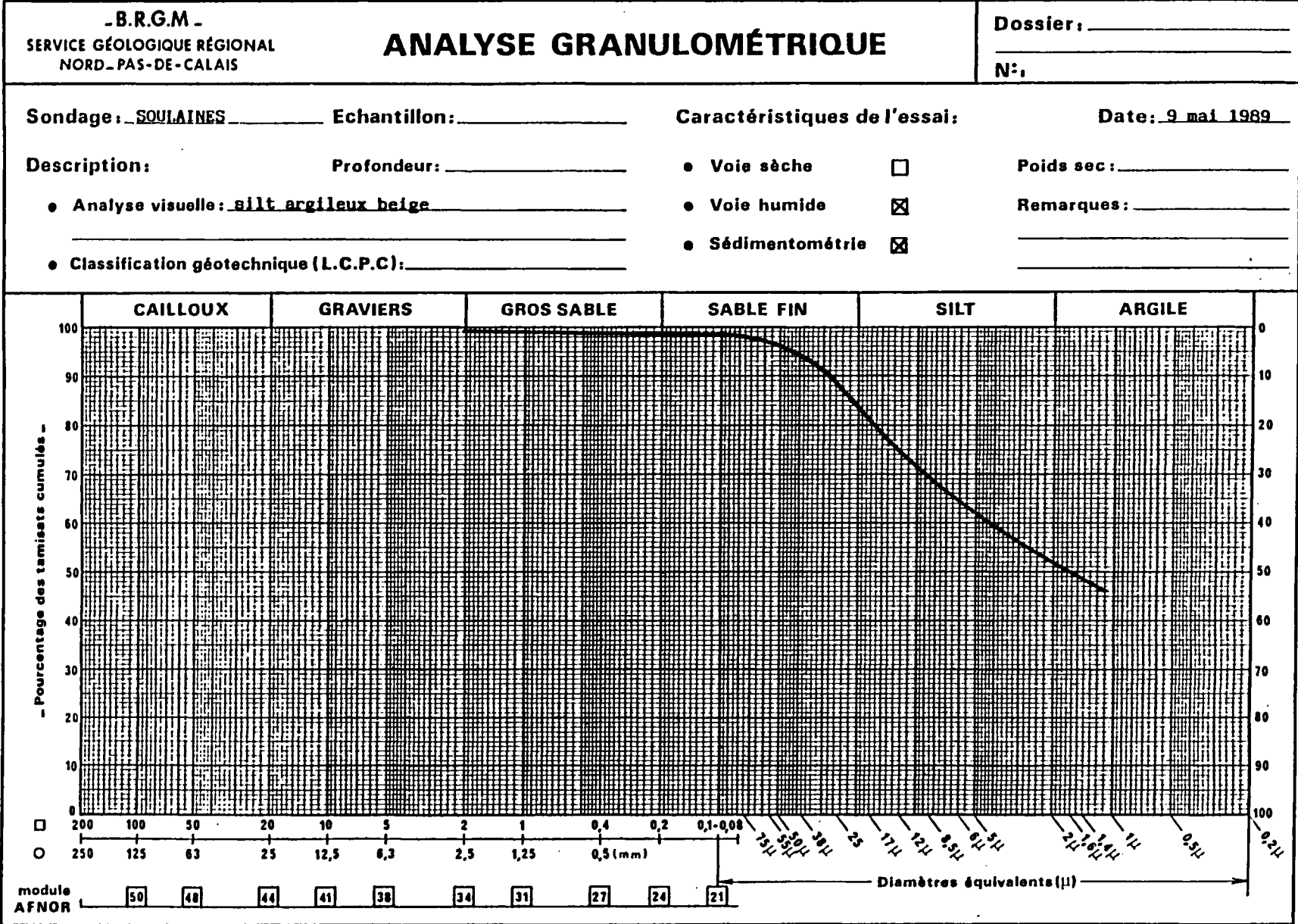
Annexe Ib.

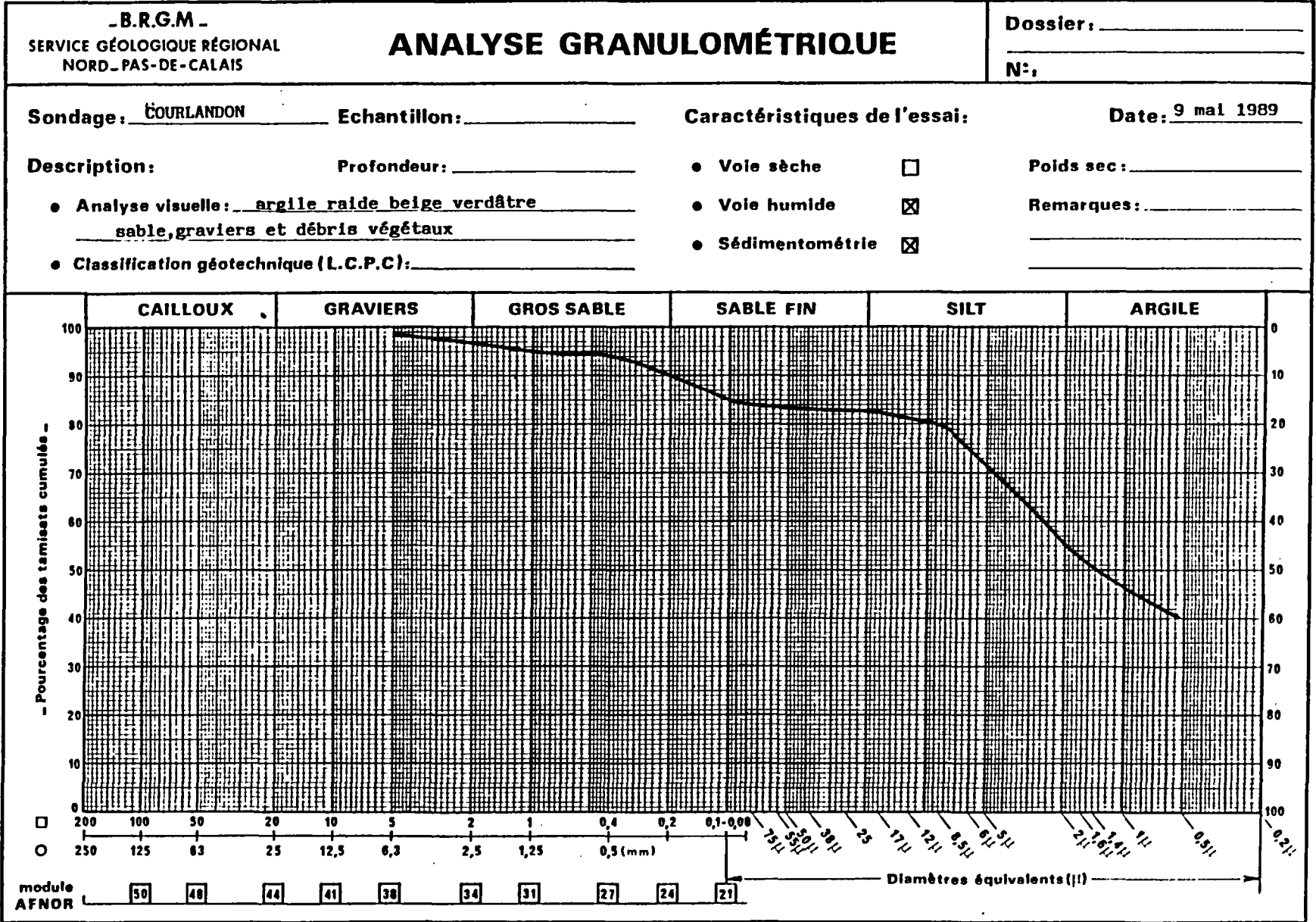
Plan de situation générale (échelle 1/12 500)



## Annexe II

### Courbes granulométriques et de compactage des argiles

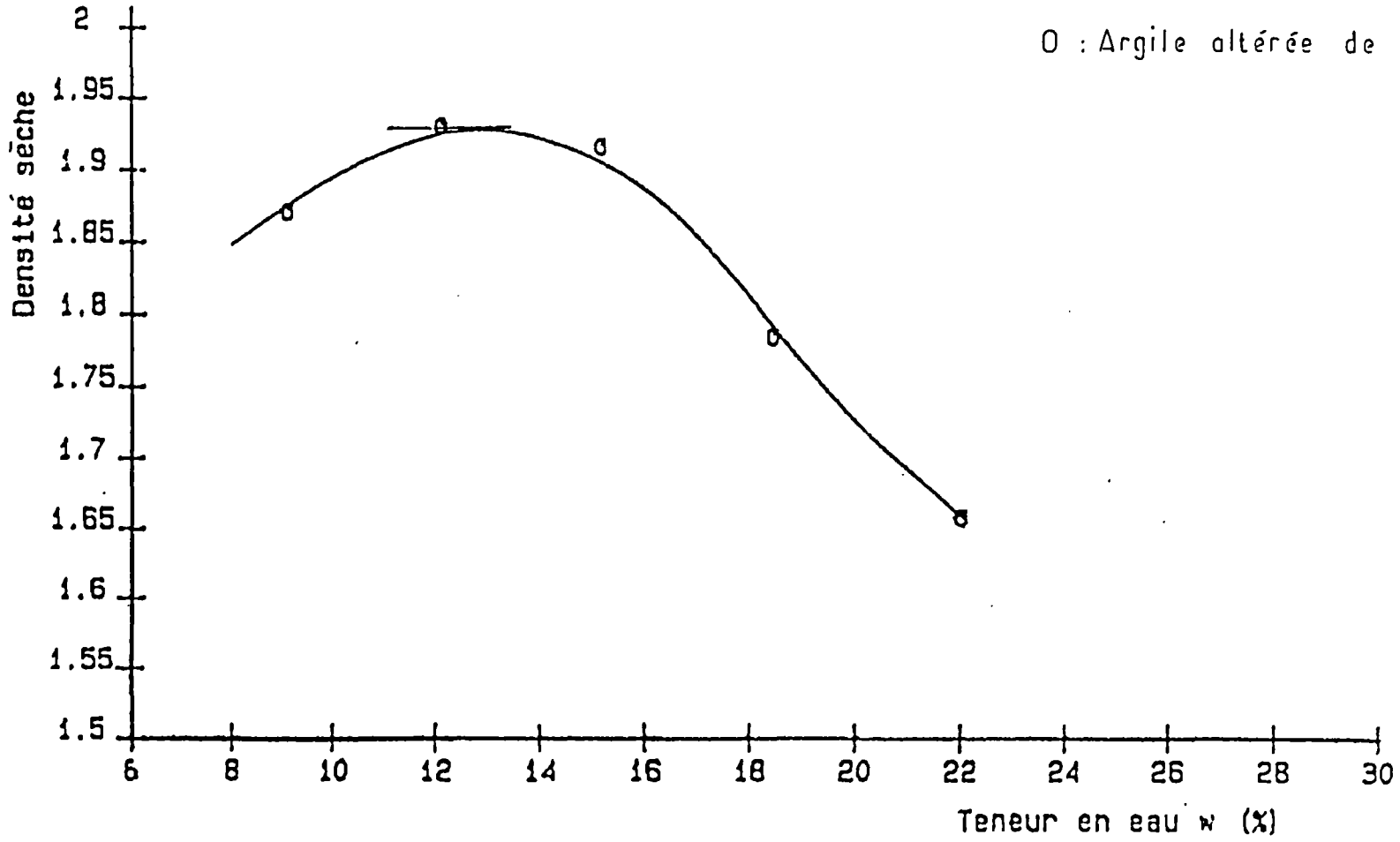




Etude du confortement de l'imperméabilité de formations crayeuses SRETTIE

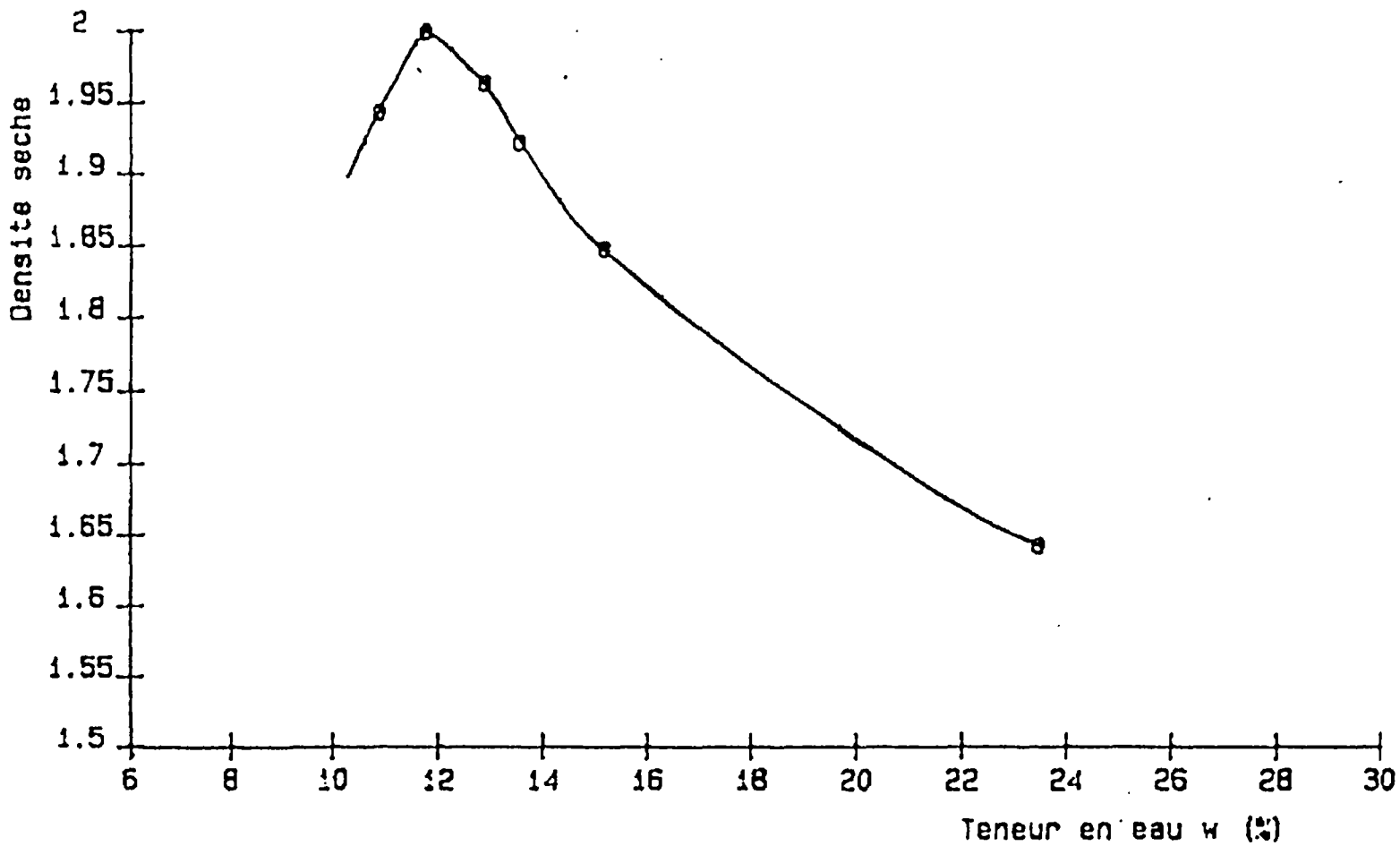
PROCTOR MODIFIE.

O : Argile altérée de SOULAINES.





PROCTOR MODIFIE DE L'ARGILE DE COURLANDON



### Annexe III

#### Photographies de la planche d'essai

- 1 : vue d'ensemble au moment du dessolage
- 2 : dessolage de la craie au Ripper
- 3 : état du sol après rippage et avant broyage
- 4 : état du sol après broyage ( $d_{\max} < 20$  mm)
- 5 : broyage au Tamping
- 6 : épandage de l'argile
- 7 : malaxage du Pulvimixer
- 8 : détail du malaxage
- 9 : état du sol après un passage du malaxeur
- 10 : état du sol après plusieurs passages
- 11 : détail du Pulvimixer
- 12 : compacteur en début de planche I
- 13 : mesure de densité au Troxler
- 14 : vue de la planche I, mesure de densité



1



2



4



3



**5**



**6**



**7**



**8**



**9**



**10**



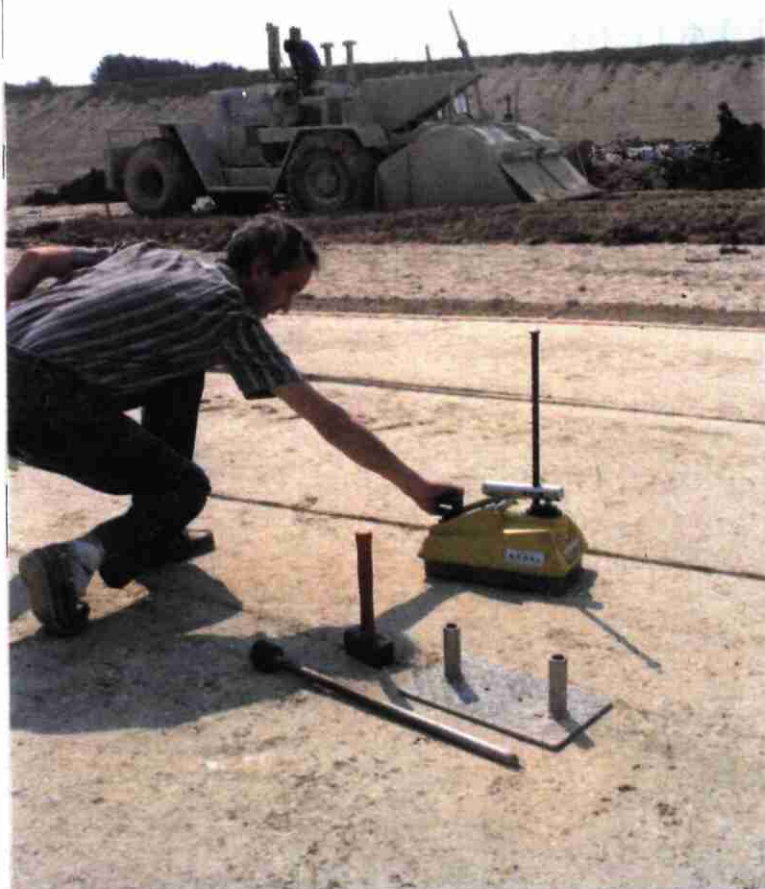
**11**



**12**



13



14



Annexe IV

Courbes de densité sèche en fonction du nombre de passes

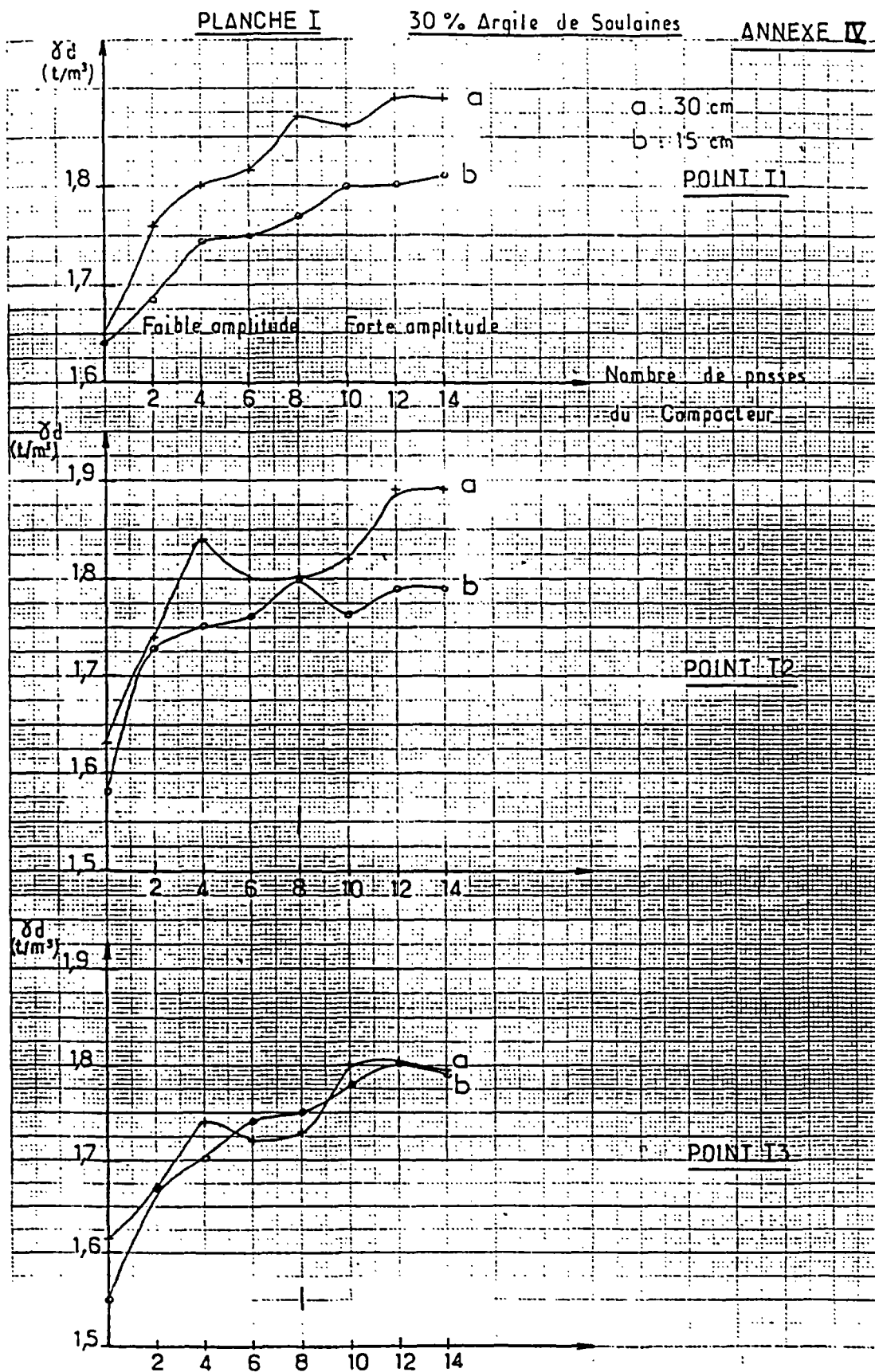
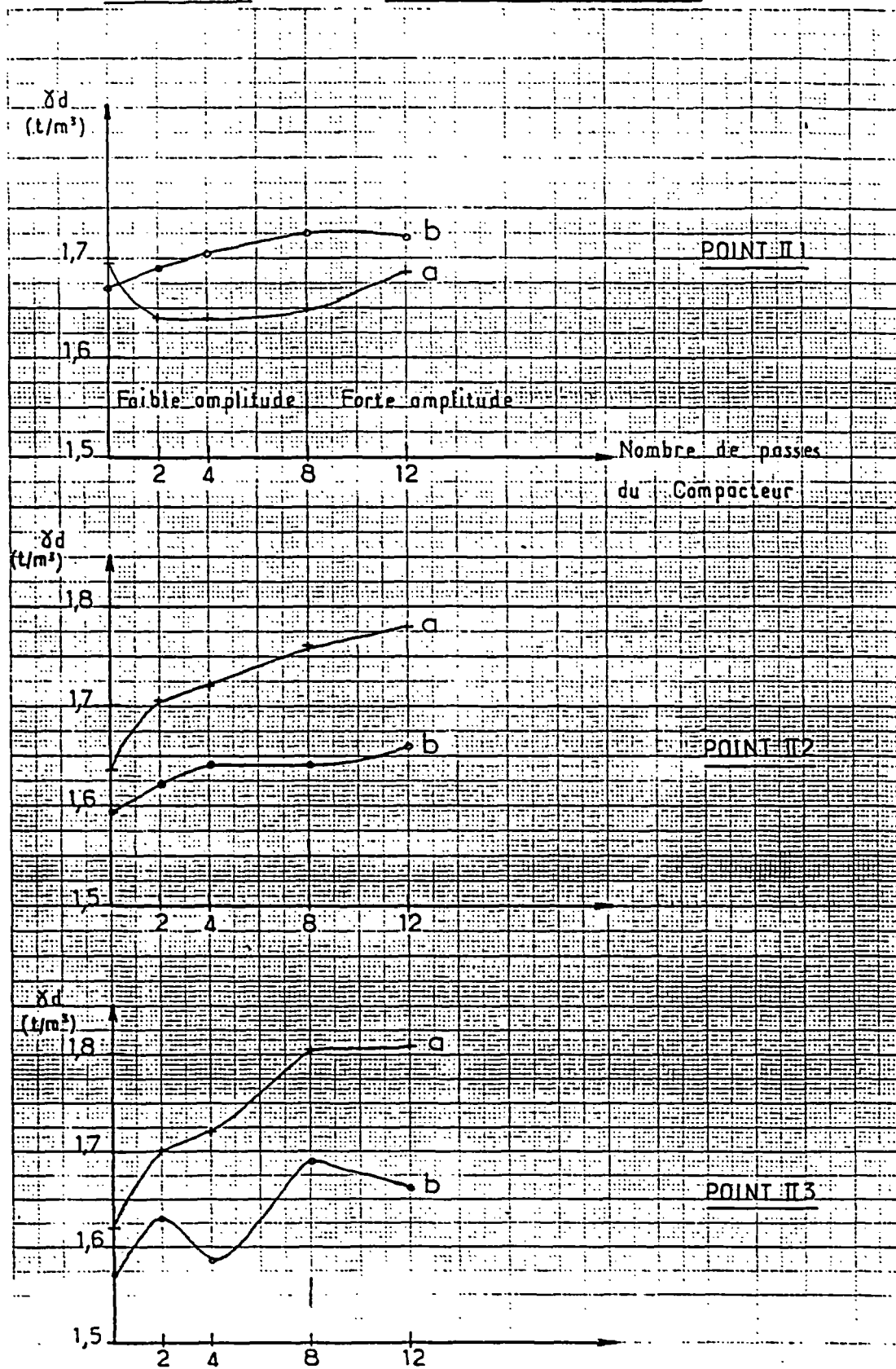


PLANCHE II

50% Argile de Courlandon



## DEUXIEME PARTIE

Résultats obtenus sur la planche d'essai expérimentale  
réalisée en NORMANDIE (site d'Anneville, 76)

C.MATHON  
M.SAUTER  
BRGM - Normandie

Coordination : M.BARRES  
BRGM - 4S/ENV

## **1. Description du protocole expérimental**

### **1.1 - LOCALISATION DU SITE**

La parcelle utilisée pour l'expérimentation est située sur la commune d'Anneville-Ambourville (76), dans une boucle de la Seine, sur un site précédemment exploité en carrière (cf. figure 1).

Cette parcelle a été mise gracieusement à la disposition du BRGM par M. LIEGEARD que nous tenons à remercier également pour son concours matériel dans la mise en oeuvre du site.

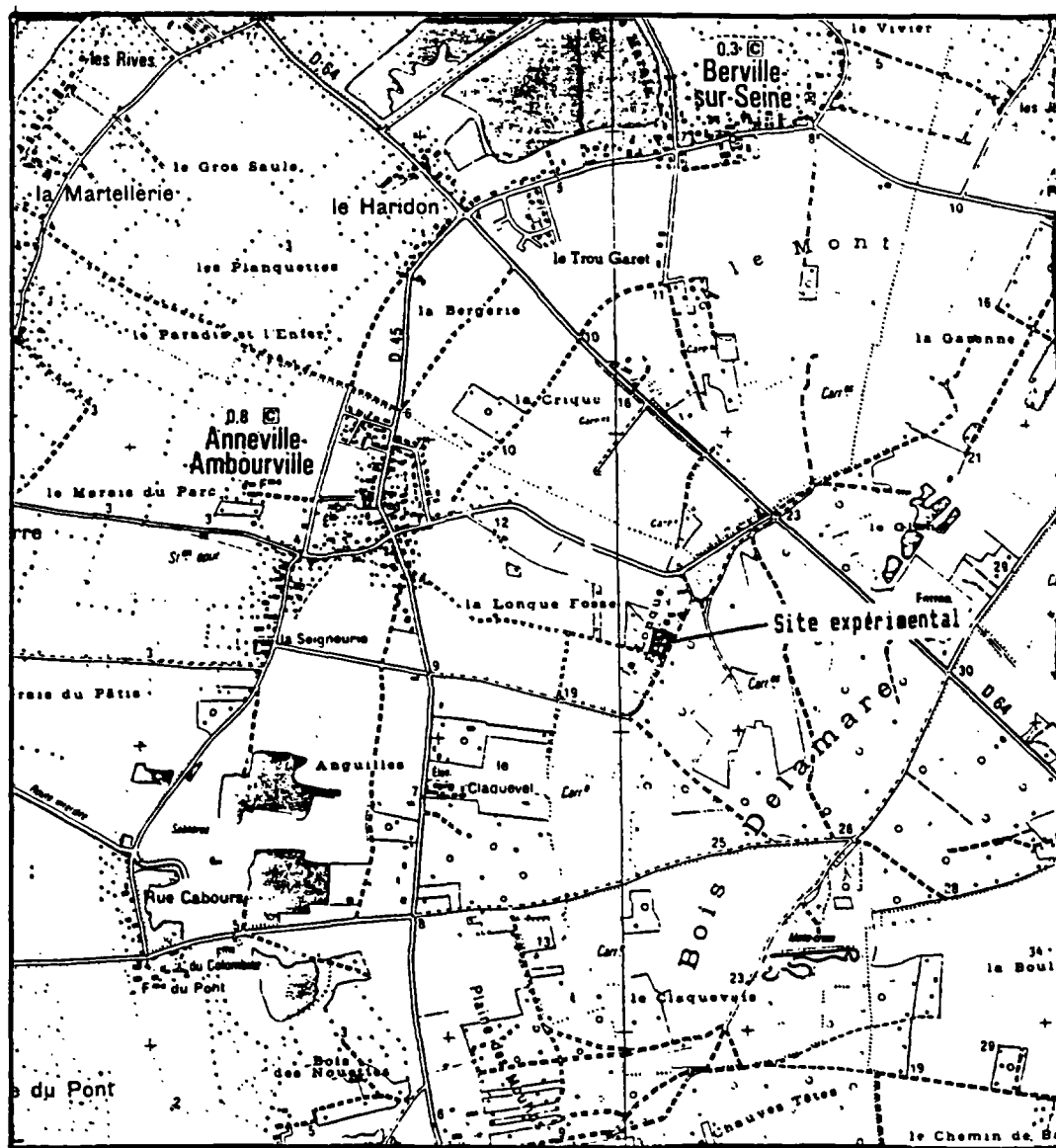
L'extraction en carrière a concerné les alluvions anciennes quaternaires, laissant la craie du Coniacien subaffleurante en fond de fouille.

L'altitude du site est d'environ 15 m NGF avec une nappe à 11-12 m de profondeur.

### **1.2 - PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE**

L'étude avait pour but de tester deux techniques différentes, d'une part le compactage de la craie seule, d'autre part le compactage de la craie après ajout de bentonite.

L'expérimentation in situ a été précédée de tests en laboratoire destinés à vérifier l'aptitude de la craie du site au compactage et à préciser le pourcentage de bentonite à mettre en oeuvre.



Echelle 1/25000

Figure 1 : Situation géographique

Trois parcelles expérimentales ont été confectionnées :

- une parcelle témoin sur laquelle la craie n'a subi aucun traitement particulier ;
- une parcelle sur laquelle la craie a été broyée puis compactée ;
- une parcelle sur laquelle la craie a été broyée puis compactée après ajout de bentonite.

Les trois parcelles ont fait l'objet de mesures préalables (densité, perméabilité) puis ont été exposées pendant treize mois à du jus de décharge.

Un suivi de la qualité des eaux interstitielles sous les parcelles a été fait à l'aide de bougies poreuses.

L'expérimentation s'est achevée par des mesures de perméabilité et des prélèvements de craie pour analyse.

## 2. Essais en laboratoire

Des échantillons de craie ont été prélevés en fouille à trois emplacements sur le site.

La craie a été broyée et le tamisat 0/2 mm a fait l'objet d'essais Proctor modifié.

Le mélange des trois échantillons a été traité avec de la bentonite (\*), avec des pourcentages de 1, 2 et 4% et soumis aux mêmes essais.

Les échantillons ont fait l'objet de mesures de perméabilité avec un perméamètre à charge variable.

Les résultats de ces essais figurent dans le tableau n° 1 ci-après et sur les courbes en annexe 1.

---

(\*) Bentonite Clarsol FB2 - voir caractéristiques en annexe 2.



**TABLEAU 1 - RESULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE**

CRAIE N°	1		2		3	
Energie Proctor Modifié	100%	90%	100%	80%	100%	70%
W% optimale	18.5	19.5	18.5	19.5	20.0	21.5
$\gamma_d$ maxi	1.65	1.63	1.67	1.64	1.63	1.63
Perméabilité en m/s sous 0.5 bar	$3.1 \cdot 10^{-8}$	$3.8 \cdot 10^{-8}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$	$4.5 \cdot 10^{-8}$	$4.5 \cdot 10^{-8}$	$7.0 \cdot 10^{-8}$

MELANGE CRAIE 1-2-3	TRAITEMENT A LA BENTONITE			
Energie Proctor Modifié	100%	100%	70%	100%
W% optimale	18.0	18.5	20.0	20.5
$\gamma_d$ maxi	1.65	1.64	1.61	1.60
Perméabilité en m/s sous 0.5 bar	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$6.4 \cdot 10^{-9}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$	$1.8 \cdot 10^{-9}$
% de bentonite	1%	2%		4%

**COMMENTAIRES DES RESULTATS**

**Caractérisation de la craie**

Les essais de compactage réalisés sur un échantillon de chaque prélèvement montrent que pour une même énergie de compactage - 100% de l'énergie Proctor modifié - les densités sèches maximales obtenues sont peu dispersées :

- moyenne  $16,5 \text{ KN/m}^3$ ,
- maxi  $16,7 \text{ KN/m}^3$ ,
- mini  $16,3 \text{ KN/m}^3$ ,

de même que les teneurs en eau naturelles optimales 18,5% à 20%. Tout en étant "classiques" ces dernières ne sont pas aisées à obtenir dans notre région sans aération préalable pendant une période sèche.

Lorsque l'énergie de compactage décroît, les densités sèches maximales font de même tout en restant supérieures à  $16,1 \text{ KN/m}^3$  (70% de l'énergie maximale), par contre les teneurs en eau naturelle optimales augmentent de 1 à 2 points ce qui n'est pas sans intérêt.

Les essais de perméabilité montrent des résultats assez homogènes variant de 3 à  $7 \times 10^{-8}$  m/s, quelle que soit l'énergie de compactage considérée.

### Mélanges craie-bentonite

On note une décroissance régulière de la perméabilité avec l'augmentation du pourcentage de bentonite, et des teneurs en eau naturelles optimales identiques à celles caractérisant la craie seule. Les résultats ont conduit à retenir pour l'expérimentation un pourcentage de 2%, qui permet un gain d'un facteur 10 par rapport à la craie seule compactée et qui constitue à priori un bon compromis entre les performances d'étanchéité et le coût économique.

## 3. Mise en oeuvre des parcelles et déroulement de l'expérimentation

### 3.1 - REALISATION DES PARCELLES

Une surface plane d'environ 15 m x 40 m a été réalisée par décapage au bull et régalage de la craie. Trois parcelles de 10 m x 10 m ont été constituées avec un traitement spécifique pour chacune.

#### Parcelle 1

C'est la parcelle témoin, laissée en l'état. La craie n'a donc subi qu'un décapage et un régalage et le compactage résulte du passage normal d'engins de chantier.

#### Parcelle 2

C'est la parcelle de craie compactée qui a subi les opérations suivantes :

- fragmentation par passage d'un ripper ;
- broyage à l'aide d'un rotovateur jusqu'à obtention d'une granulométrie inférieure à 20-30 mm ;
- compactage par un compacteur à rouleau vibrant (DYNAPAC CC10) avec environ 10 passages croisés.

### Parcelle 3

C'est la parcelle avec ajout de bentonite. Après broyage identique à la parcelle 2, un ajout de bentonite a été réalisé par épandage manuel à raison de 10 kg au m<sup>2</sup> correspondant au pourcentage de 2% sur 30 cm de profondeur. Après épandage le mélange a été réalisé à l'aide d'un rotovateur puis compacté.

### Remarque

Des difficultés sont apparues lors du compactage du mélange en raison de la trop forte humidité du matériau.

Après une première tentative de compactage en septembre 1987, le terrain a été recouvert par une bâche placée à environ 1 m du sol pour aérer et sécher le mélange pendant une dizaine de jours.

Le compactage a été réalisé, mais sans utiliser la vibration, celle-ci provoquant l'enlisement de l'engin.

Il apparaît donc que la mise en oeuvre du mélange in situ est très délicate et nécessite impérativement des conditions météorologiques sèches.

### **3.2 - CONFECTION DES CASIERS**

Des casiers de 4 m x 4 m ont été constitués suivant le schéma de la figure 2.

Les casiers ont été délimités par un merlon recouvert d'une membrane polyane ancrée dans le terrain pour assurer l'étanchéité.

Les casiers ont été remplis par du sable lavé destiné à contenir les jus de décharge.

Les prélèvements d'eau interstitielle ont été réalisés à l'aide de bougies poreuses. Deux bougies poreuses ont été implantées sous chaque casier, à 2 m de profondeur, à partir de forages inclinés à 45%.

# COUPE D'UNE PARCELLE EXPERIMENTALE

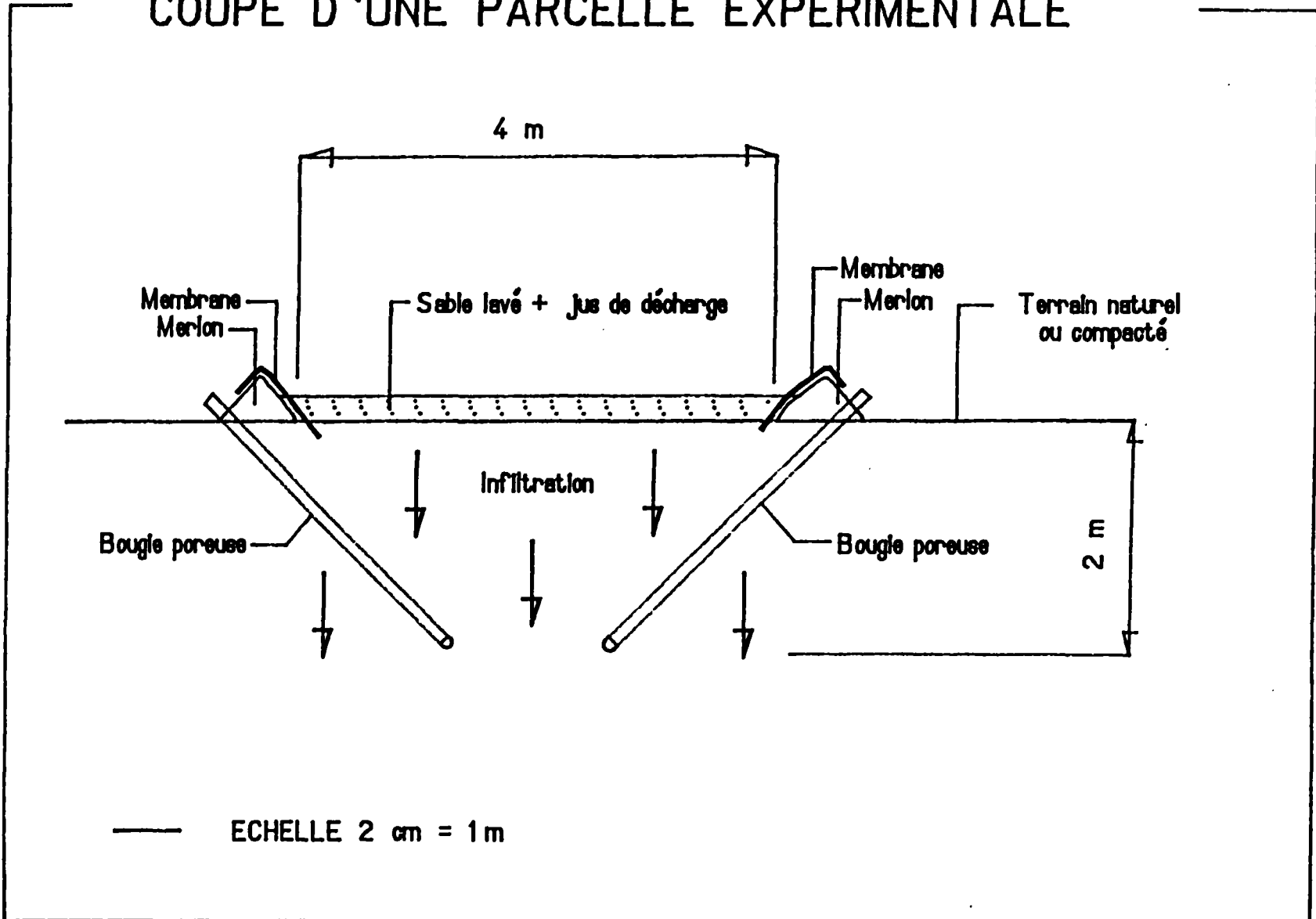


Figure 2

### 3.3 - DEROULEMENT DE L'EXPERIMENTATION

Les mesures suivantes ont été réalisées pour caractériser l'état initial des casiers :

- mesures de densité au gamma densimètre TROXLER ;
- mesures de perméabilité au PANDA (Perméamètre à Affichage Numérique méthode Double Anneau) ;
- prélèvement d'eau interstitielle dans les bougies poreuses.

Une première livraison de jus de décharge est intervenue le 23 novembre 1987 avec environ 1,5 m<sup>3</sup> par casier.

Un remplissage complémentaire des casiers a eu lieu le 10 juin 1988 pour compenser les pertes par infiltration.

Les prélèvements d'eau pour analyse chimique dans les bougies poreuses ont été réalisés aux dates suivantes, après environ une semaine de mise en dépression :

- 27 janvier 1988, soit après 65 jours ;
- 22 mars 1988, soit après 120 jours,
- 22 juin 1988, soit après 212 jours et 12 jours après la deuxième livraison,
- 12 octobre 1988, soit après 324 jours,
- 27 décembre 1988, soit après 400 jours.

En fin d'expérimentation ont été réalisés des mesures de perméabilité au PANDA et des prélèvements d'échantillons de craie pour analyse chimique, bactériologique et minéralogique.

## 4. Efficacité du compactage

### 4.1 - MESURES DE DENSITE

Le contrôle de la mise en oeuvre du compactage a été réalisé par mesure des densités au gamma densimètre TROXLER qui permet de mesurer la teneur en eau et les densités humides et sèches des sols.

Les mesures ont été réalisées sur les matériaux suivants :

- craie "naturelle" (parcelle 1) ;
- craie broyée avant compactage (parcelle 2) ;
- craie broyée après compactage (parcelle 2) ;
- craie broyée + bentonite après compactage partiel.

Les résultats figurent dans le tableau 2 et les densités sèches obtenues sont reportées sur les figures 3 à 6.

**TABLEAU 2 - MESURES DE DENSITE IN-SITU  
CRAIE NATURELLE**

POSITION	1		
PROFONDEUR cm	30	20	10
DH T/m <sup>3</sup>	1.94	1.90	1.96
DS T/m <sup>3</sup>	1.62	1.58	1.63
W %	19.8	20.2	19.9

**TABLEAU 2 - MESURES DE DENSITE IN SITU  
CRAIE BROYEE NON COMPACTEE**

POSITION	2D		
PROFONDEUR cm	30	20	10
DH T/m <sup>3</sup>	2.03	2.08	2.11
DS T/m <sup>3</sup>	1.72	1.77	1.79
W %	17.8	17.4	17.6

POSITION	2E		
PROFONDEUR cm	30	20	10
DH T/m <sup>3</sup>	2.01	2.08	2.10
DS T/m <sup>3</sup>	1.70	1.78	1.78
W%	17.9	16.9	18.0

**TABLEAU 2 (suite) - CRAIE BROYEE COMPACTEE**

POSITION		2A					
PROFONDEUR (cm)		30	25	20	15	10	5
DH T/m <sup>3</sup>		2.13	2.17	2.19	2.17	2.22	2.23
DS T/m <sup>3</sup>		1.85	1.88	1.87	1.88	1.91	1.91
W%		15.6	15.9	17.3	15.4	15.8	16.5

POSITION		2B					
PROFONDEUR (cm)		30	25	20	15	10	5
DH T/m <sup>3</sup>		2.17	2.18	2.17	2.18	2.26	2.23
DS T/m <sup>3</sup>		1.87	1.90	1.87	1.90	1.91	1.96
W%		15.8	14.9	16.6	14.6	16.8	14.0

POSITION		2C					
PROFONDEUR (cm)		30	25	20	15	10	5
DH T/m <sup>3</sup>		2.15	2.15	2.19	2.22	2.21	2.20
DS T/m <sup>3</sup>		1.84	1.86	1.90	1.92	1.94	1.90
W%		17.0	16.0	15.4	16.0	13.9	16.2

POSITION		2D					
PROFONDEUR (cm)		30	25	20	15	10	5
DH T/m <sup>3</sup>		2.10	2.08	2.13	2.15	2.17	2.19
DS T/m <sup>3</sup>		1.79	1.78	1.84	1.86	1.88	1.89
W%		16.9	17.0	16.1	15.5	16.0	15.5

*Etude du confortement de l'imperméabilité de formations crayeuses  
SRETIE*

POSITION		2E				
PROFONDEUR (cm)	30	25	20	15	10	5
DH T/m <sup>3</sup>	2.10	2.12	2.14	2.14	2.20	2.22
DS T/m <sup>3</sup>	1.81	1.84	1.85	1.86	1.92	1.94
W%	16.0	15.2	15.6	15.2	14.6	14.6

**CRAIE BROYEE AVEC BENTONITE**

POSITION		3A				
PROFONDEUR (cm)	30	25	20	15	10	5
DH T/m <sup>3</sup>	2.00	2.01	2.06	2.07	2.03	2.03
DS T/m <sup>3</sup>	1.63	1.63	1.69	1.70	1.68	1.67
W%	22.2	23.1	21.6	21.8	21.3	21.5

POSITION		3B				
PROFONDEUR (cm)	30	25	20	15	10	5
DH T/m <sup>3</sup>	1.98	1.97	2.00	2.01	2.01	2.03
DS T/m <sup>3</sup>	1.57	1.57	1.62	1.64	1.62	1.65
W%	25.0	25.3	23.7	22.6	24.1	23.0

POSITION		3C			
PROFONDEUR (cm)	25	20	15	10	5
DH T/m <sup>3</sup>	2.07	2.05	2.05	2.05	2.07
DS T/m <sup>3</sup>	1.71	1.67	1.66	1.66	1.67
W%	21.1	22.6	23.4	23.6	23.7



**TABLEAU 2 (suite) - CRAIE BROYEE AVEC BENTONITE**

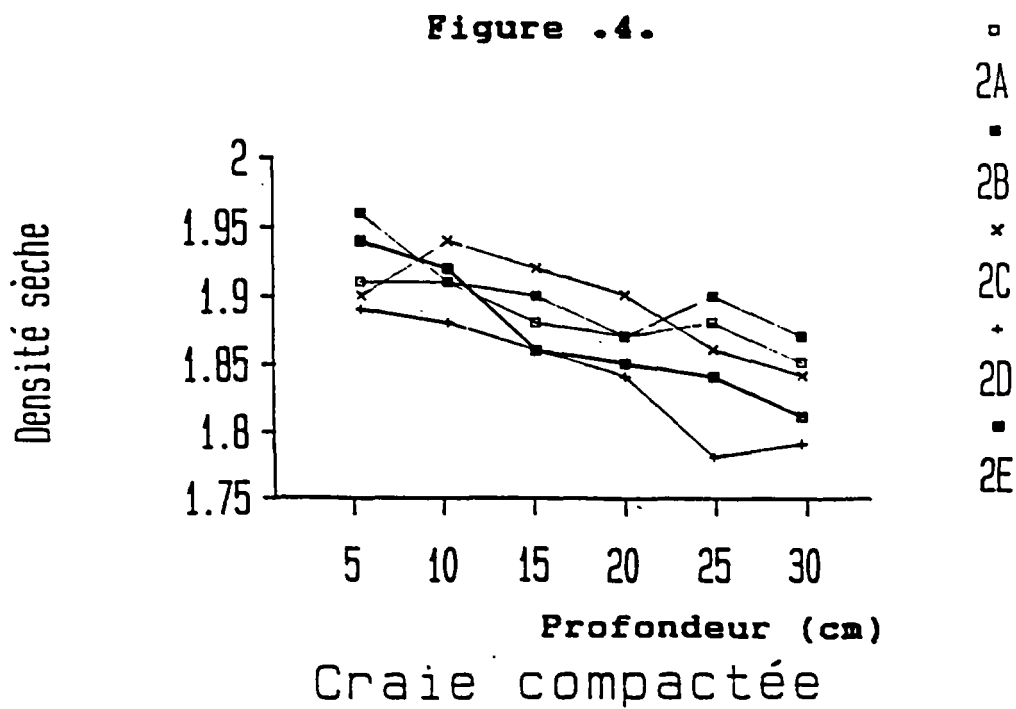
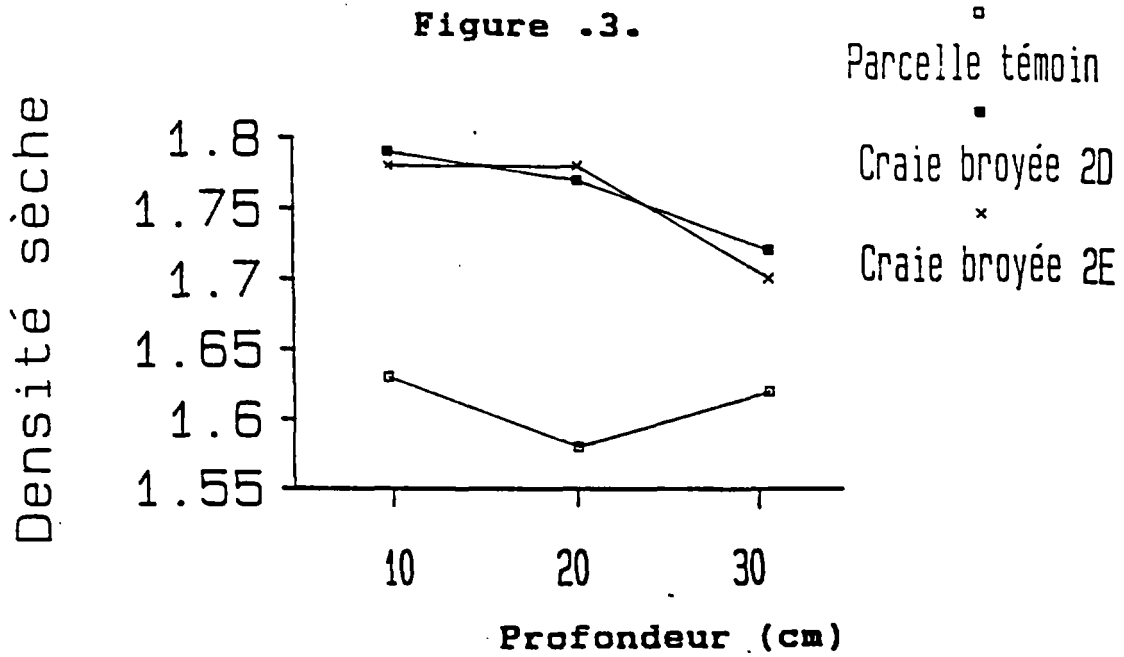
POSITION		3D				
PROFONDEUR (cm)	30	25	20	15	10	5
DH T/m <sup>3</sup>	1.97	2.03	2.03	2.00	1.98	1.99
DS T/m <sup>3</sup>	1.51	1.59	1.57	1.54	1.56	1.53
W%	30.0	28.0	29.4	29.9	27.6	30.4

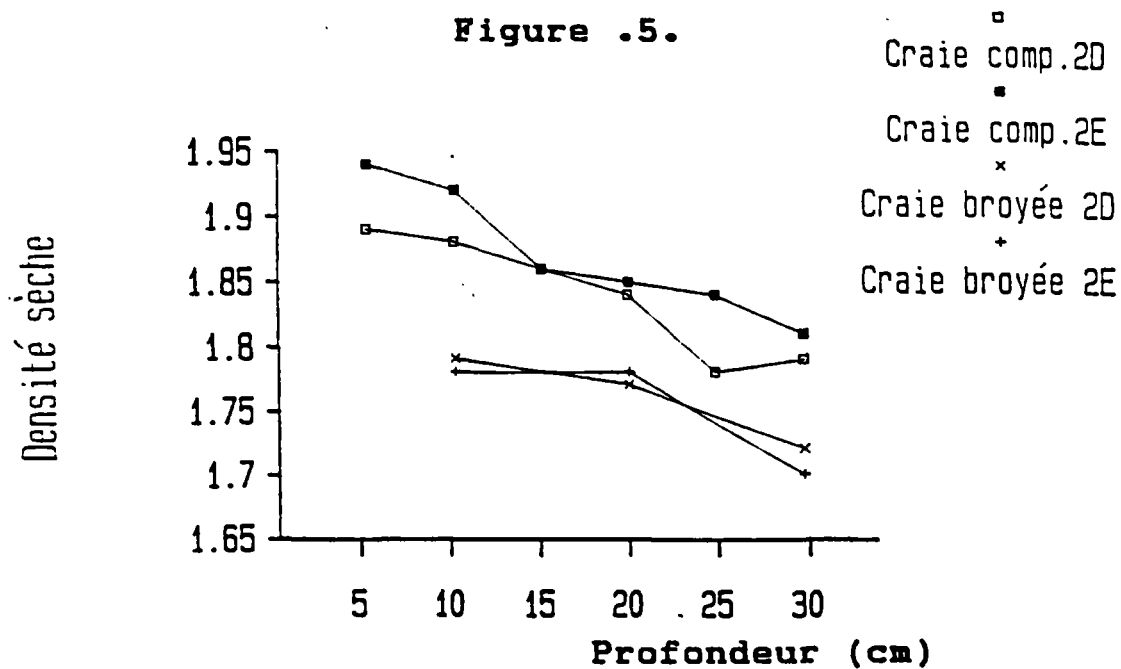
POSITION		3E				
PROFONDEUR (cm)	30	25	20	15	10	5
DH T/m <sup>3</sup>	2.02	2.03	2.02	2.05	2.12	2.14
DS T/m <sup>3</sup>	1.66	1.69	1.67	1.73	1.79	1.78
W%	21.1	20.0	20.9	18.5	18.6	20.5

**COMMENTAIRES DES RESULTATS**

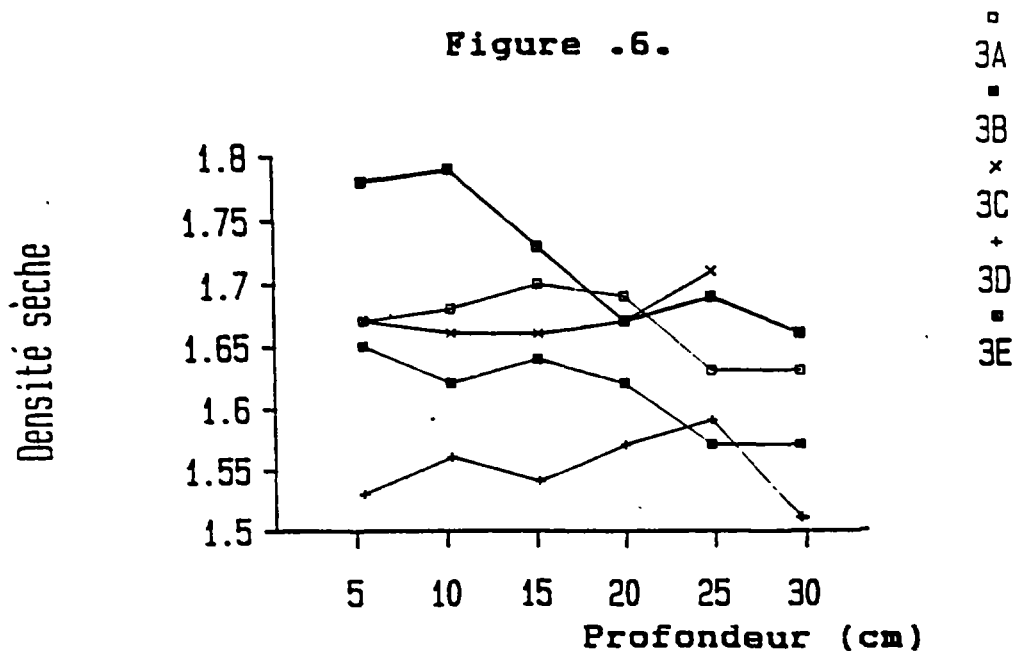
Le compactage de la craie broyée permet d'obtenir, semble-t-il, des densités sèches très importantes, puisque le plus souvent supérieures à 19 KN/m<sup>3</sup>, ne décroissant que légèrement avec la profondeur (1 couche de 30 centimètres). De telles valeurs de densités sèches s'expliquent à la fois par la mise en oeuvre, in situ, d'une énergie de compactage supérieure à celle standardisée des essais en laboratoire, et par un léger décalage entre la teneur en eau naturelle effective de la craie et celle mesurée par le gamma densimètre (problème d'étalonnage).

Pour le mélange craie-bentonite les densités sont plus dispersées et traduisent les difficultés rencontrées lors du compactage et consécutives à la pluviosité du moment. Malgré cela elles restent en moyenne supérieures à celles obtenues en laboratoire, pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment.





Influence du compactage



Craie + bentonite

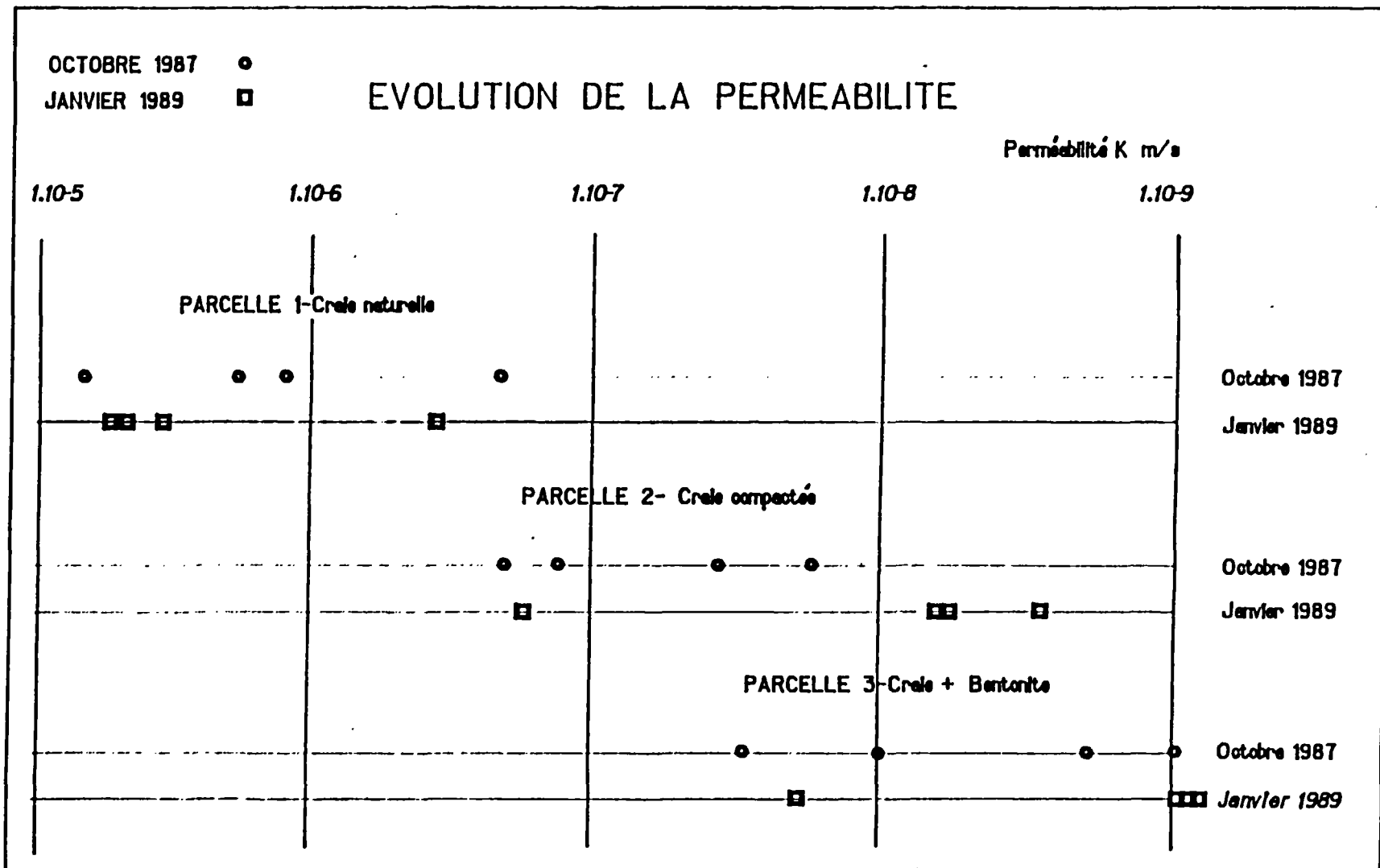
**4.2 - EVOLUTION DE LA PERMEABILITE DANS LE TEMPS**

Quatre mesures de perméabilité ont été réalisées dans chaque casier avant mise en place des jus et après treize mois d'exposition.

Les résultats figurent dans le tableau 3 ci-dessous et sont reproduits sur la figure 7.

**TABLEAU 3 - MESURES DE PERMEABILITE K (m/s)**

					Moyenne géométrique
<b>Parcelle 1 : craie naturelle</b>					
Etat initial	7,7.10 <sup>-6</sup>	1,8.10 <sup>-6</sup>	1,2.10 <sup>-6</sup>	2,1.10 <sup>-7</sup>	1,4.10 <sup>-6</sup>
Etat final	5,1.10 <sup>-6</sup>	4,5.10 <sup>-6</sup>	3,3.10 <sup>-6</sup>	3,4.10 <sup>-7</sup>	2,2.10 <sup>-6</sup>
<b>Parcelle 2 : craie compactée</b>					
Etat initial	2,0.10 <sup>-7</sup>	1,3.10 <sup>-7</sup>	3,6.10 <sup>-8</sup>	1,7.10 <sup>-8</sup>	6,3.10 <sup>-8</sup>
Etat final	1,6.10 <sup>-7</sup>	6,0.10 <sup>-9</sup>	5,8.10 <sup>-9</sup>	2,6.10 <sup>-9</sup>	1,1.10 <sup>-8</sup>
<b>Parcelle 3 : craie + bentonite</b>					
Etat initial	3,0.10 <sup>-8</sup>	1,0.10 <sup>-8</sup>	1,9.10 <sup>-9</sup>	≤ 1.10 <sup>-9</sup>	≤ 4,9.10 <sup>-9</sup>
Etat final	2,2.10 <sup>-8</sup>	≤ 1.10 <sup>-9</sup>	≤ 1.10 <sup>-9</sup>	≤ 1.10 <sup>-9</sup>	non significative



Etude du confortement de l'imperméabilité de formations crayeuses  
SRETEIE

Figure .7.

## COMMENTAIRES DES RESULTATS

### Craie naturelle (Parcelle témoin)

Les valeurs de perméabilité mesurées sur la craie en Haute-Normandie sont dans une fourchette de l'ordre de  $1.10^{-7}$  à  $1.10^{-3}$  m/s, suivant la composition de la craie, sa compacité, sa fissuration et son degré d'altération.

Avec des valeurs de  $2,1.10^{-7}$  à  $7,7.10^{-6}$  m/s on se trouve sur le site expérimental, dans la partie basse de la fourchette.

L'exposition au jus n'a pas modifié de façon significative la perméabilité.

### Craie compactée

La perméabilité moyenne de  $6,3.10^{-8}$  m/s après compactage se rapproche des valeurs obtenues en laboratoire. Les valeurs mesurées restent dans une fourchette de 1 à 10 ( $1,7.10^{-8}$  à  $2.10^{-7}$  m/s).

Après exposition au jus, on observe une diminution de la perméabilité qui semble significative : trois des quatre mesures sont en dessous de  $1.10^{-8}$  m/s.

On en déduit que non seulement l'exposition à un jus de pH neutre pendant plus d'un an n'a pas diminué les performances de la couche de craie compactée, mais que l'hypothèse d'un colmatage de la porosité peut être avancée.

### Craie + bentonite

Le gain de perméabilité est de l'ordre d'un facteur 10, malgré le compactage qui n'a pu être poussé.

Les mesures après exposition au jus montrent une diminution de la perméabilité avec trois mesures sur quatre inférieures ou égales à  $1.10^{-9}$  m/s.

Les tranchées réalisées en fin d'expérimentation ont cependant montré que la répartition de la bentonite n'était pas régulière sur la profondeur. On a observé en particulier une accumulation de bentonite dans les 6-8 premiers centimètres (observation visuelle).

La répartition et le pourcentage de bentonite ont été dosés par analyse minéralogique (voir annexe 3).

Les résultats montrent qu'il existe déjà un certain pourcentage d'argile à l'état naturel dans le craie.

La répartition déduite de cette analyse semble en contradiction avec les observations visuelles, puisque la bentonite se répartit uniformément dans les vingt premiers centimètres.

## 5. Analyse de la qualité de l'eau interstitielle

### 5.1 - COMPORTEMENT DES JUS DANS LES CASIERS

L'interprétation des résultats d'analyses chimiques doit se faire en considérant l'infiltration observée des jus dans chaque casier.

Le rôle du sable était de servir de support au jus afin d'éviter une infiltration trop rapide.

Ce sable a été saturé par les jus lors du remplissage des casiers et sa capacité de rétention avait pour but de réguler l'infiltration, notamment dans la parcelle témoin.

Un calcul du bilan en eau de chaque parcelle peut être réalisé à partir de l'évaluation de quantités de jus apportées et du bilan pluie-évaporation.

Les données de pluie et d'ETP de Rouen-Boos ont été utilisées. Durant l'expérimentation la pluviométrie s'est élevée à 949 mm et l'ETP Thornthwaite à 658 mm. Compte tenu de la saturation des parcelles 2 et 3, on considère que  $ETR = ETP$ , la pluie efficace est donc de :  
 $949 - 658 = 291$  mm.

Pour la parcelle témoin, l'hypothèse d'une RFU de 100 mm conduit à une pluie efficace de 334 mm.

#### Parcelle témoin

La quantité de jus à chaque apport correspondait à une lame d'eau d'environ 100 mm soit 200 mm au total auxquels il faut ajouter la pluie efficace sur le site entre fin novembre 1987 et fin décembre 1988, soit 334 mm.

On aboutit donc à 534 mm infiltrés, ce qui est très inférieur à la capacité d'infiltration ( $2 \cdot 10^{-6}$  m/s correspond en effet à 63 m/an).

#### Parcelle 2 : craie compactée

Environ 100 mm de jus ont été apportés à la première livraison et 50 mm à la deuxième.

Avec 291 mm de pluie efficace et un stock résiduel de l'ordre de 50 mm d'eau libre en fin d'expérimentation, il s'est infiltré 391 mm pendant l'expérimentation (13 mois).

En considérant une saturation permanente du casier, cela conduit à une infiltration constante de  $1,1 \cdot 10^{-8}$  m/s. Cette valeur est une bonne approche de la perméabilité et est similaire aux mesures de perméabilité en fin d'expérimentation.

### Parcelle 3 : craie + bentonite

Un seul apport de 100 mm a été réalisé auquel il faut ajouter 291 mm de pluie efficace.

La montée du niveau d'environ 100 mm et l'évacuation d'une certaine quantité de jus (100 mm ?) au printemps pour éviter le débordement ne permettent pas de faire un bilan précis, mais montrent que l'infiltration est certainement inférieure à 100 mm.

## 5.2 - EVOLUTION DE LA QUALITE DE L'EAU INTERSTITIELLE

### Composition du jus

Les jus ont été prélevés à la sortie des anciens casiers de la décharge de Tourville-la-Rivière (Fosse Marmitaine). La composition du jus livré figure dans le tableau 4. La couleur de l'échantillon n'a pas permis au laboratoire de réaliser une analyse complète. On trouvera donc également à titre indicatif une analyse antérieure de ce jus.



**TABLEAU 4 - COMPOSITION DU JUS DE DECHARGE**

	Jus livré 23/11/1987	22/06/1987
pH	7,3	8,5
Cond. µS/cm	3215	7800
DCO mg/l O <sub>2</sub>	618	4000
DBO <sub>5</sub> mg/l O <sub>2</sub>	240	1800
Ca mg/l		740
Mg mg/l		65
Na mg/l	215	700
K mg/l	125	280
Fe mg/l		48
Mn mg/l	4,300	8,400
Zn mg/l	0,010	0,360
Pb mg/l	0,003	0,035
Cu mg/l	0,010	0,024
Cr mg/l	0,010	0,100
Cd mg/l	0	0,008
Phénols mg/l	1,00	1,50
GT37 /ml	370000	
GT20 /ml	600000	
Col. tot /100 ml	64000	85000
Col. féc /100 ml	23000	19000
Str. féc /100 ml	4300	3300
Clostr. /100 ml	6500	

**Evolution comparée des différents paramètres**

Le résultat des analyses figure dans les tableaux en annexe 4. L'évolution des principaux paramètres a été représentée graphiquement. Dans l'interprétation de ces graphiques on gardera en mémoire la deuxième livraison de jus le 10/06/1988 (200 jours).

**pH (figure 8)**

Les valeurs de pH restent peu dispersées et confirment le pouvoir tampon de la craie. Aucune différence notable n'existe entre les trois parcelles.

**Conductivité et résidu sec (figures 9 et 10)**

Ces paramètres sont à priori des traceurs de la contamination par le jus.

L'examen des graphiques montre que les valeurs les plus faibles sont observées sous la parcelle témoin.

Les valeurs de conductivité les plus fortes sont sous la parcelle avec craie + bentonite.

Pour le résidu sec à 105°, les valeurs sous les parcelles craie + bentonite et craie compactée sont du même ordre de grandeur et significativement plus élevées que sous la parcelle témoin.

D.C.O. (figure 11)

Les valeurs les plus fortes sont mesurées sous la parcelle avec craie compactée, mais ne dépassent pas 20 à 40 mg/l.

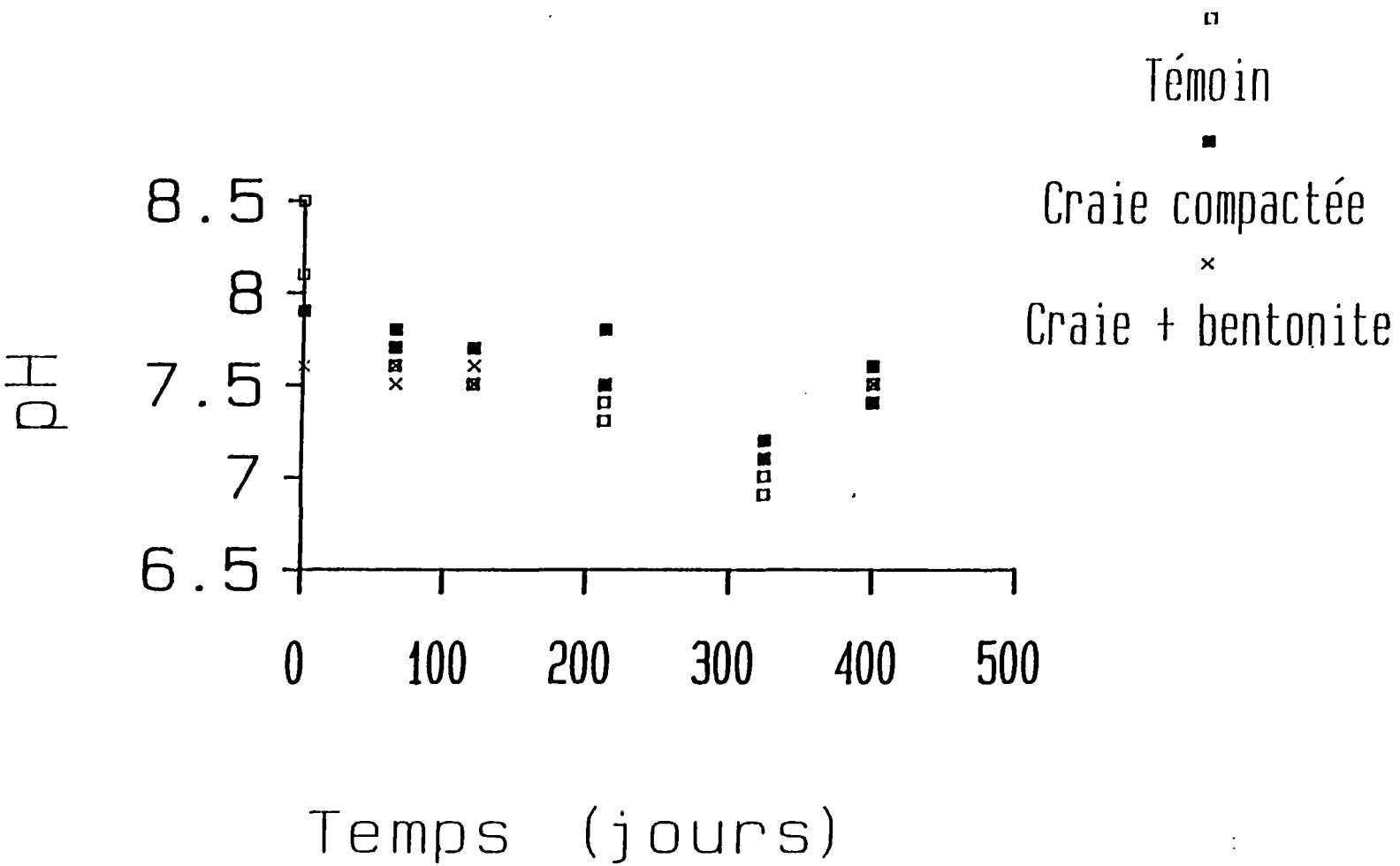
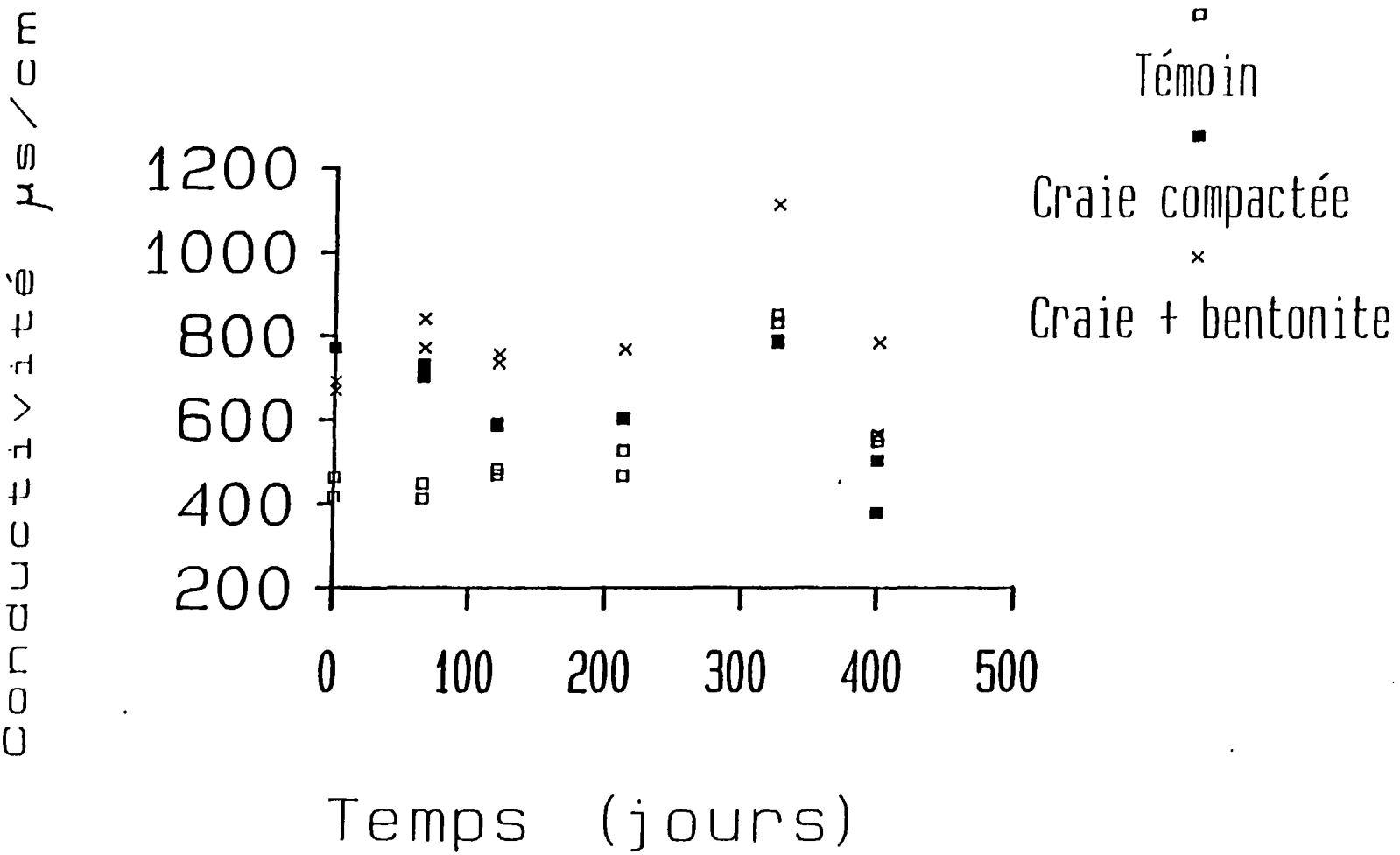


Figure .8.

Figure .9.



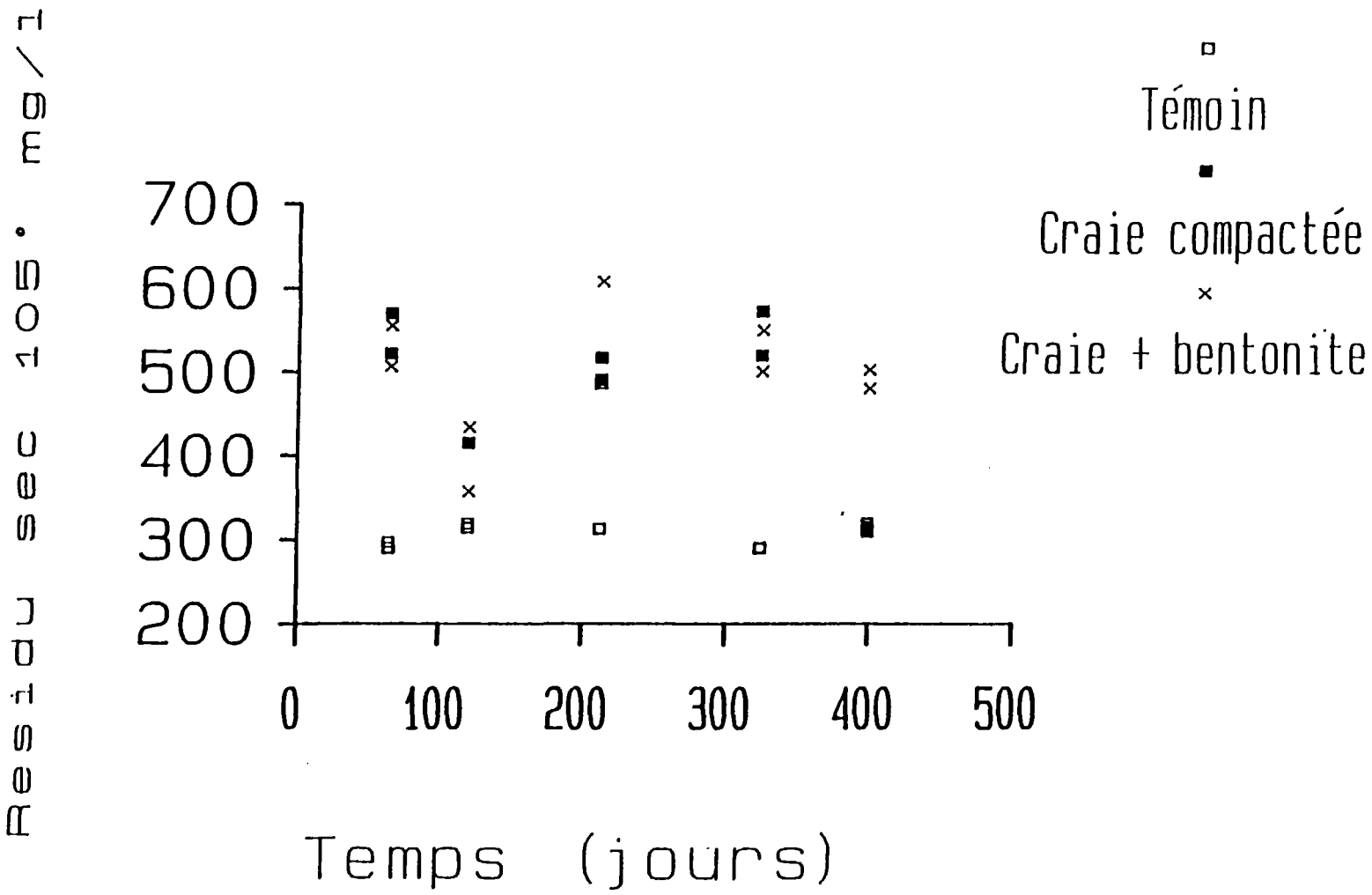


Figure .10.

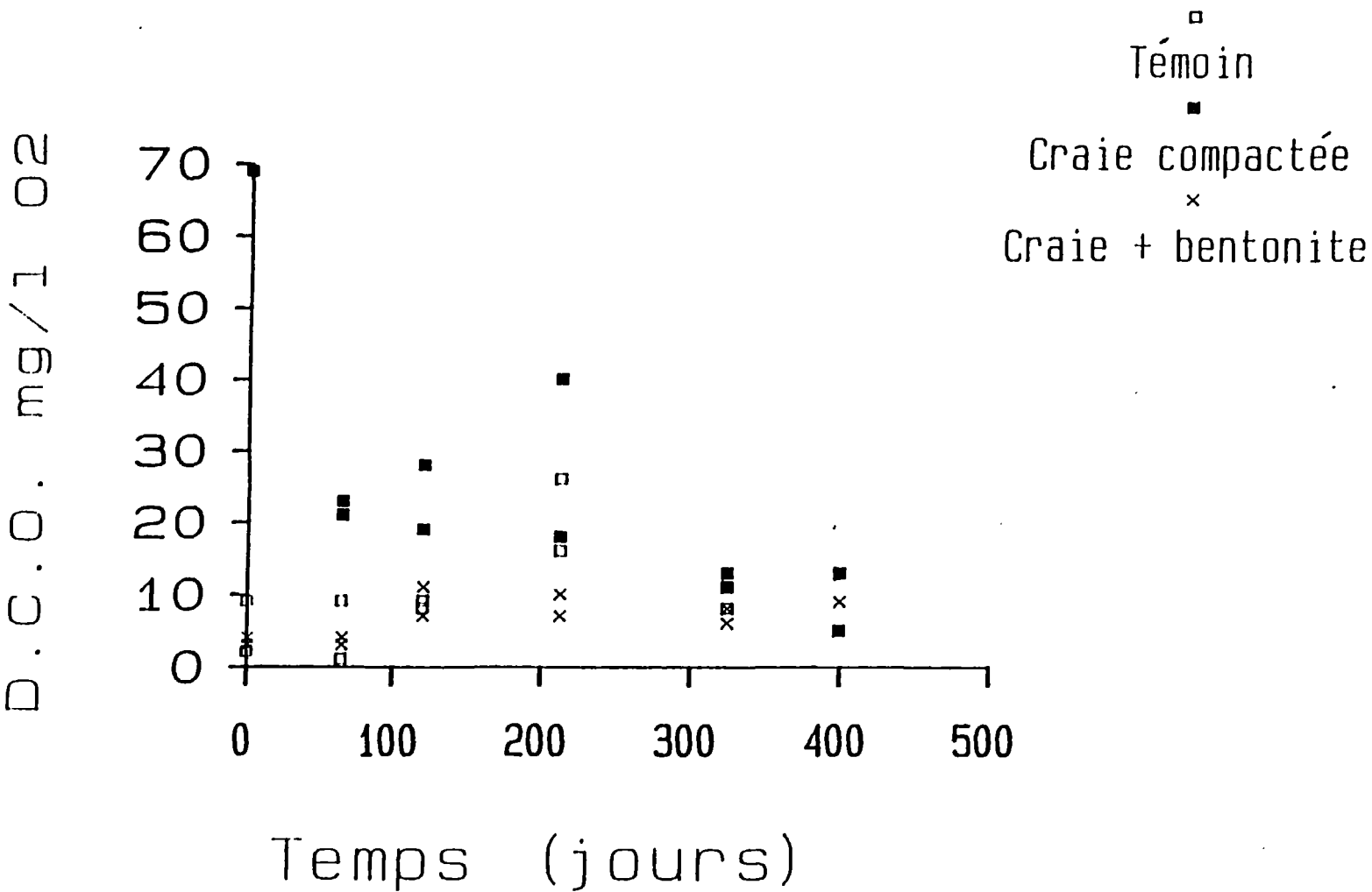


Figure .11.

Chlorure (figure 12)

Les concentrations sous la parcelle craie + bentonite sont plus fortes que sous les deux autres parcelles sauf en juin où l'on observe un pic sous la parcelle témoin. On peut attribuer ce pic à la deuxième livraison de jus, douze jours avant le prélèvement.

Sulfate (figure 13)

Dans un premier temps les teneurs les plus élevées sont observées sous les parcelles craie + bentonite et craie compactée puis les valeurs sous la parcelle témoin augmentent pour finir avec des ordres de grandeur équivalents sous les trois parcelles.

Nitrate (figure 14)

Les concentrations n'évoluent pas de façon significative sous les parcelles craie compactée et craie + bentonite, alors qu'elles augmentent régulièrement sous la parcelle témoin tout au long de l'expérimentation.

Sodium (figure 15)

Les concentrations les plus faibles sont observées sous la parcelle témoin, mais elles croissent en fin d'expérimentation.

Les concentrations les plus fortes sont mesurées sous la parcelle craie + bentonite. Les teneurs observées, supérieures à 200 mg/l peuvent provenir d'un phénomène d'échange d'ions entre la bentonite sodique et la craie.

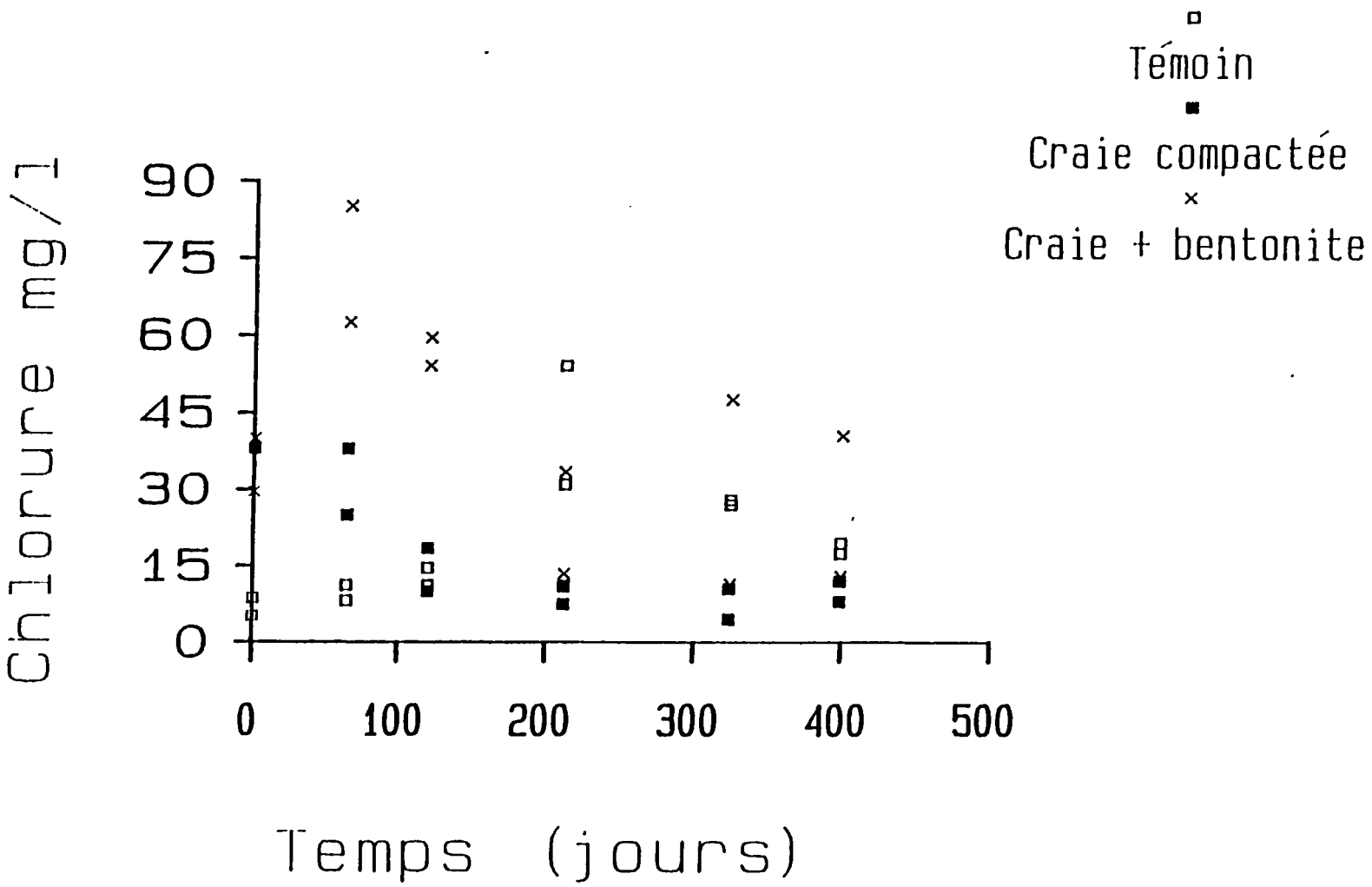
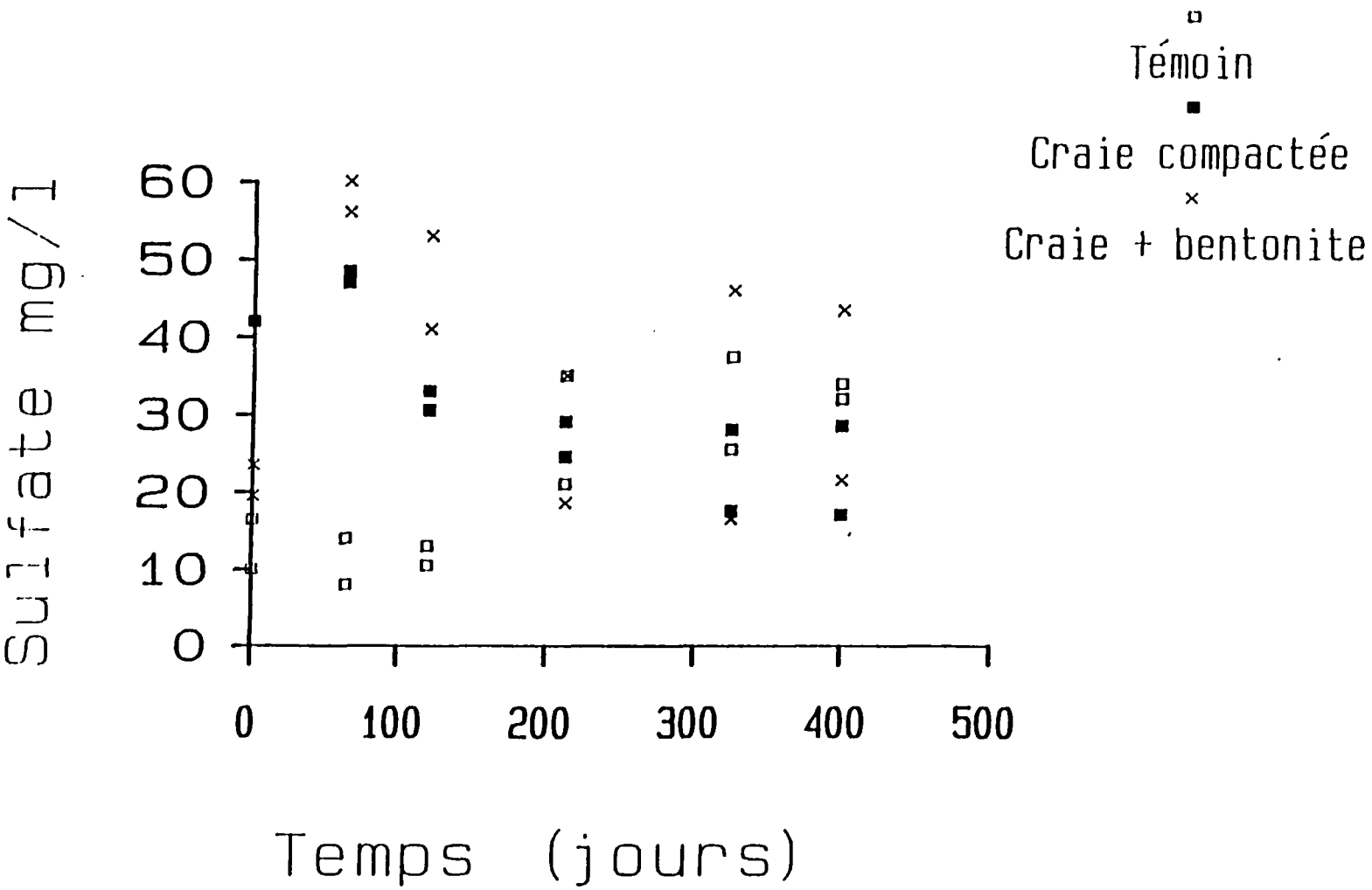


Figure .12.



Figure .13.



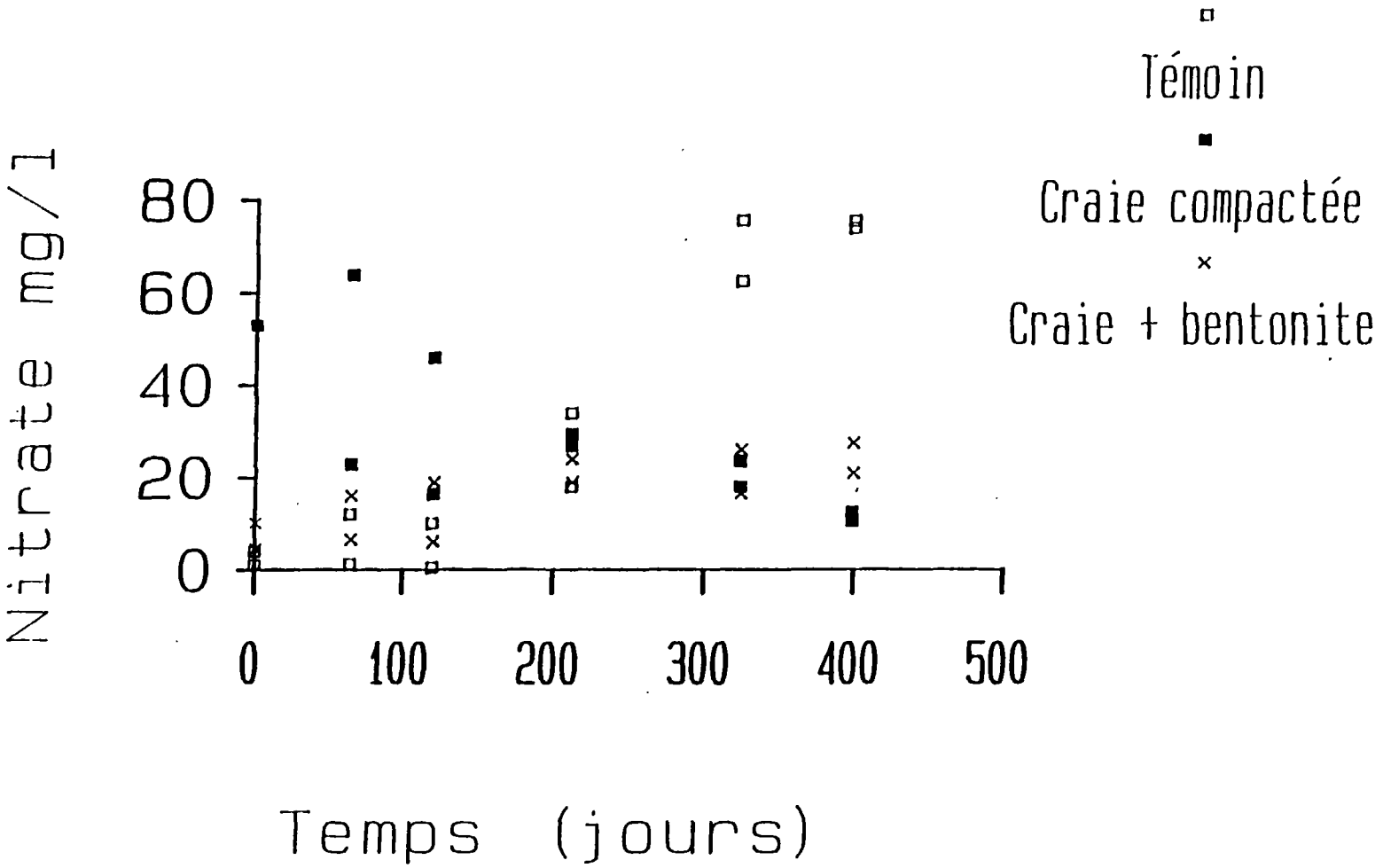


Figure .14.

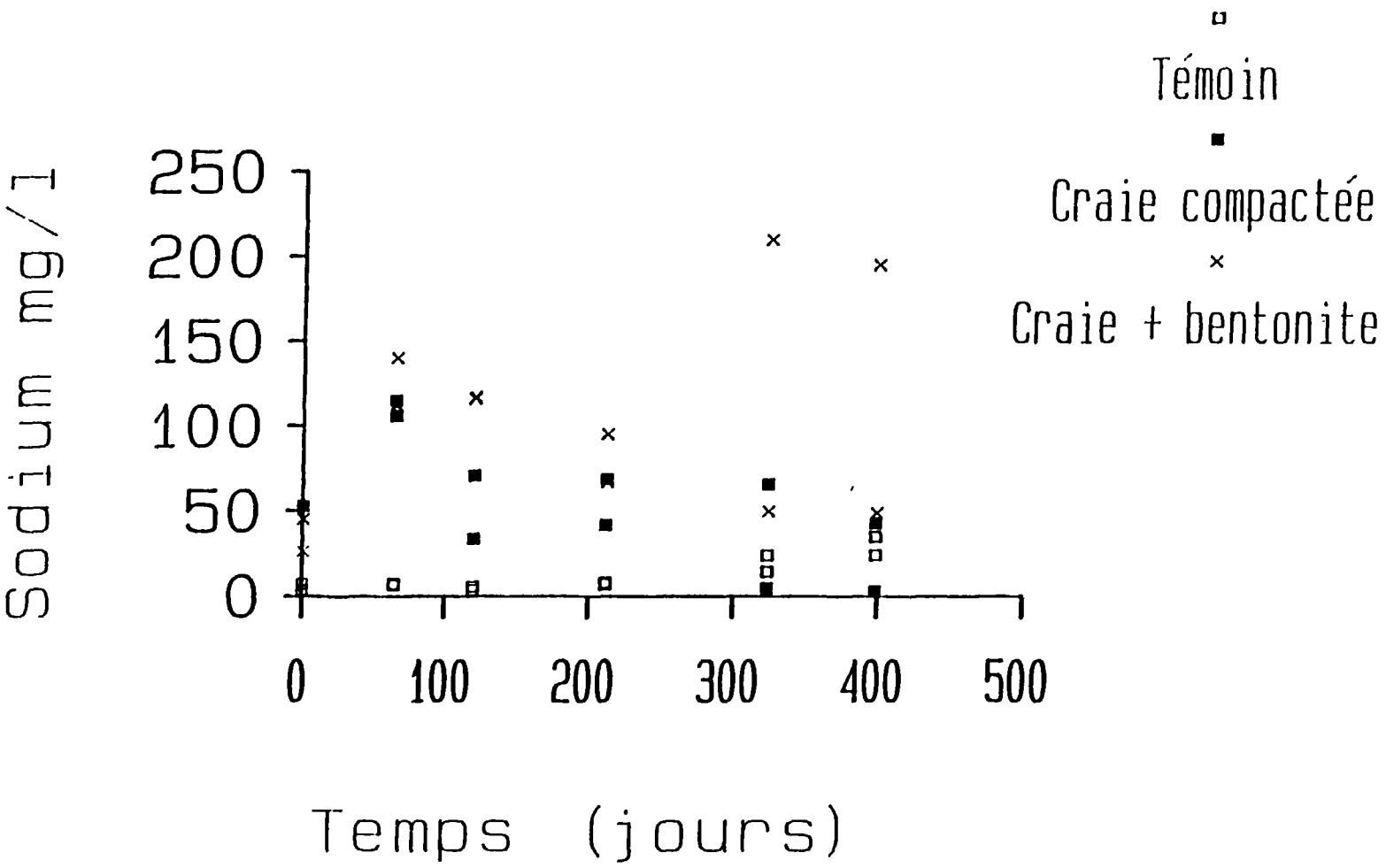


Figure .15.

Potassium (figure 16)

Aucune variation significative de la concentration n'est observée, malgré la concentration importante dans le jus.

Métaux lourds (figures 17, 18 et 19)

Les graphiques sont représentés pour le zinc, plomb et cuivre dont les valeurs sont au-dessus du seuil de détection.

L'examen de ces concentrations, qui se répartissent de façon aléatoire, ne permet pas de distinguer une évolution dans le temps ou une différence entre les parcelles.

Autres paramètres physico-chimiques

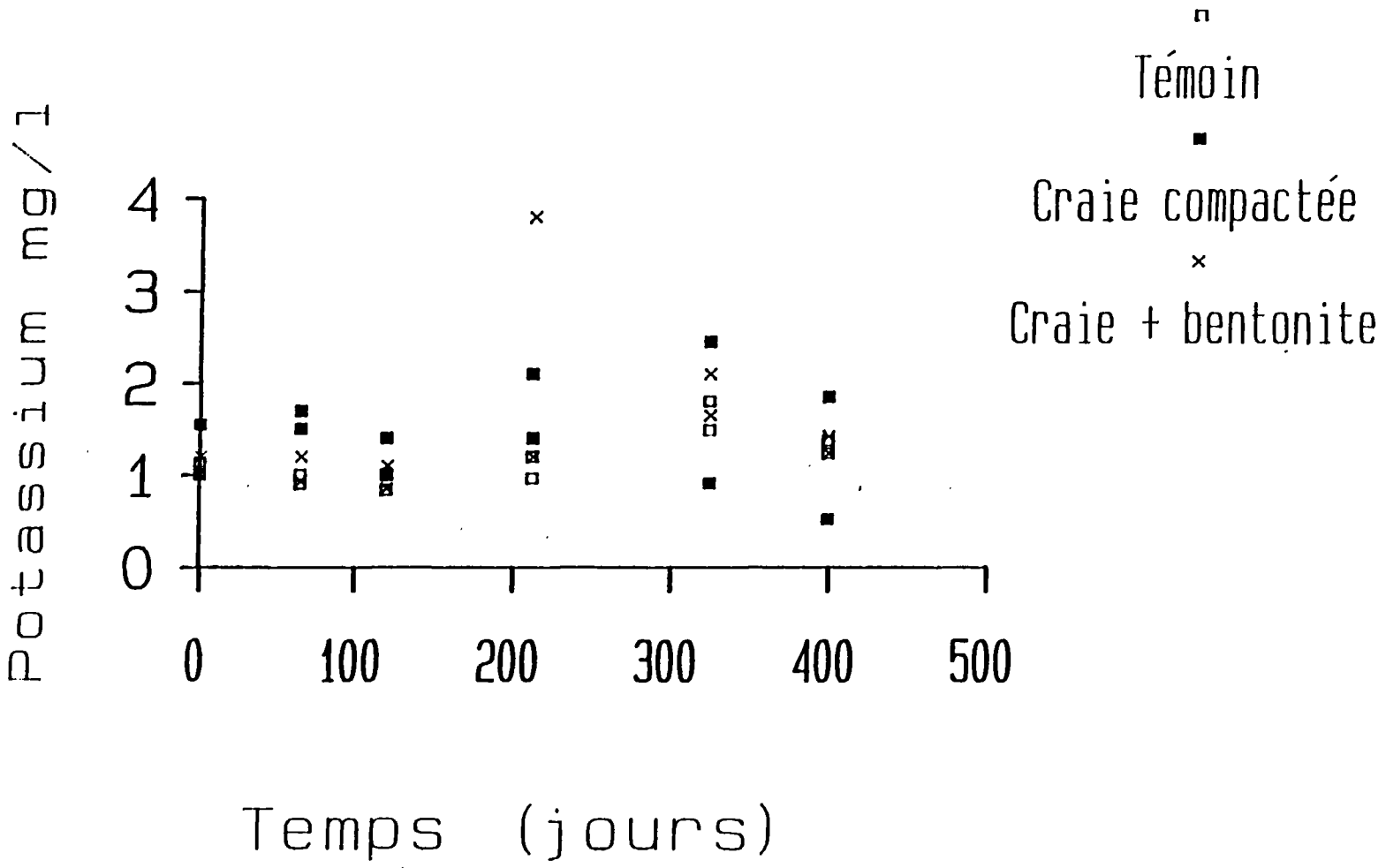
Un certain nombre d'éléments ont été dosés mais n'ont pas été représentés car les valeurs sont soit inférieures aux seuils, soit ne montrent aucune différence entre les parcelles ou d'évolution dans le temps (voir tableau en annexe 4). Ce sont : Ca, Mg, NH<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, Fe, Mn, Cr, Cd, Phénols.

Paramètres bactériologiques (voir tableau en annexe 4)

La recherche et la numération des germes a été réalisée, bien que le mode de prélèvement par bougie ne convienne pas pour ces analyses en raison des perturbations dues à la bougies et au temps de séjour.

Les analyses montrent des germes totaux parfois abondants (la valeur 10000 signifiant innombrables), mais peu ou pas de germes témoins de contamination fécale alors que ces derniers sont très abondants dans le jus.

Figure .16.



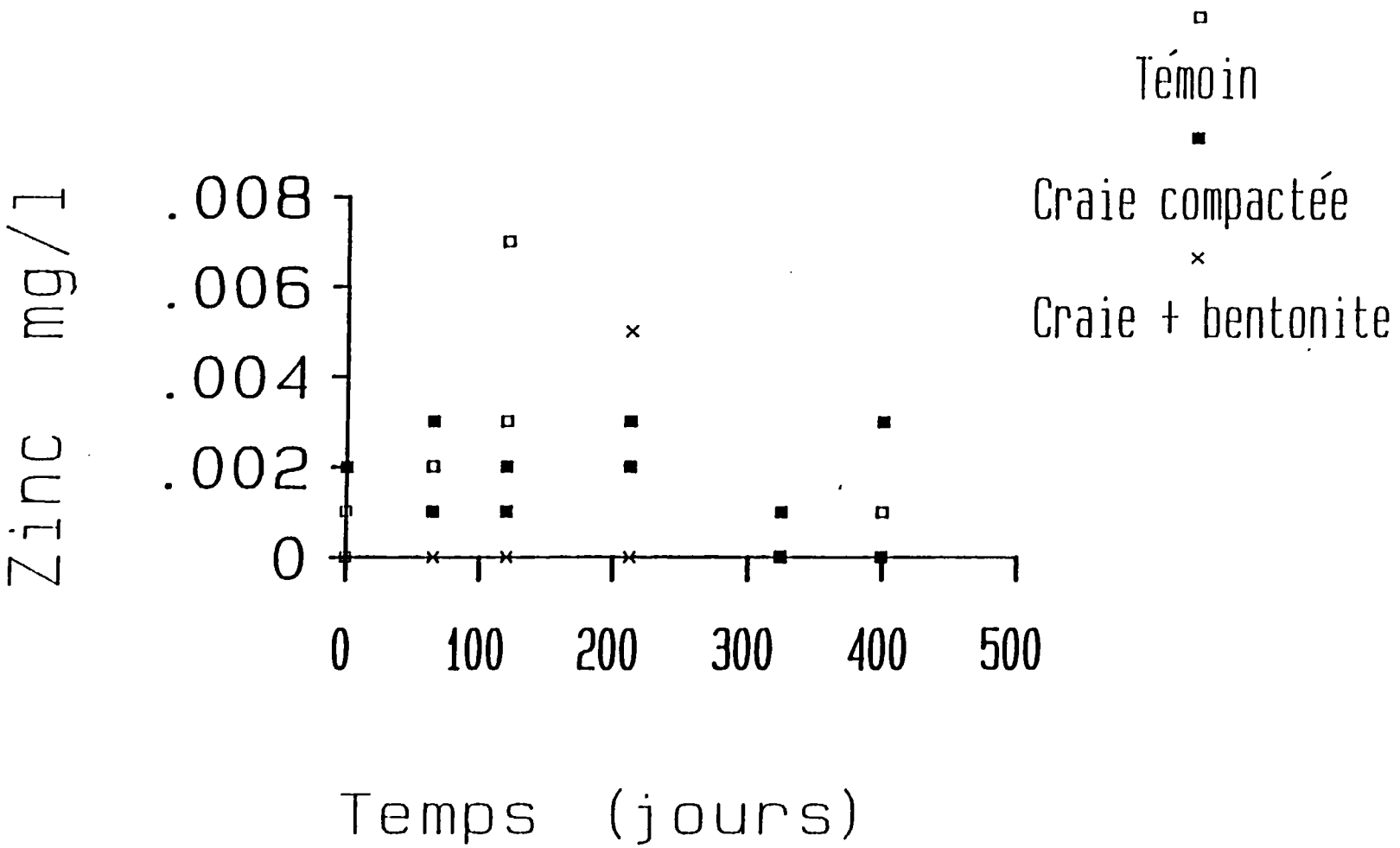
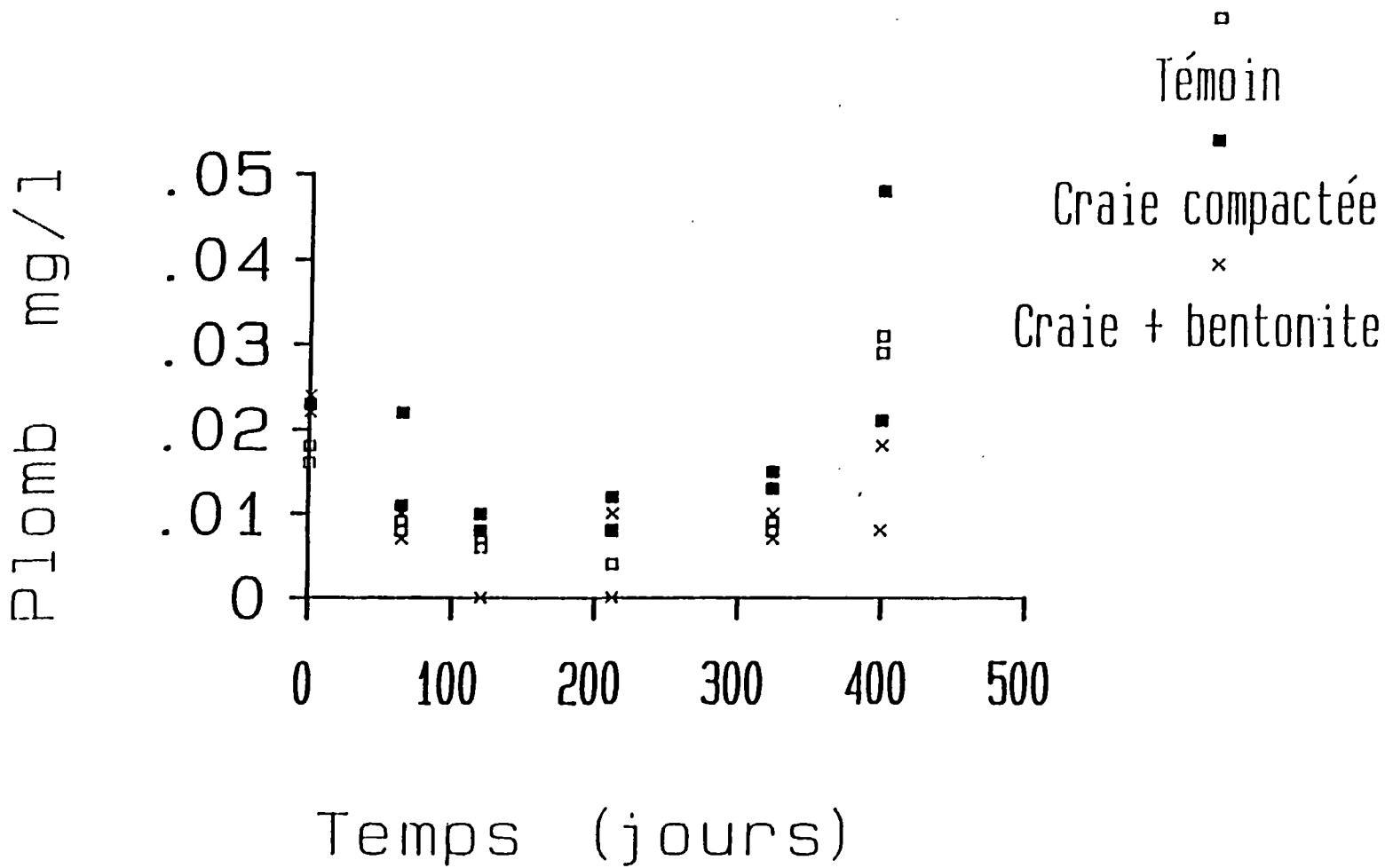


Figure .17.

Figure .18.



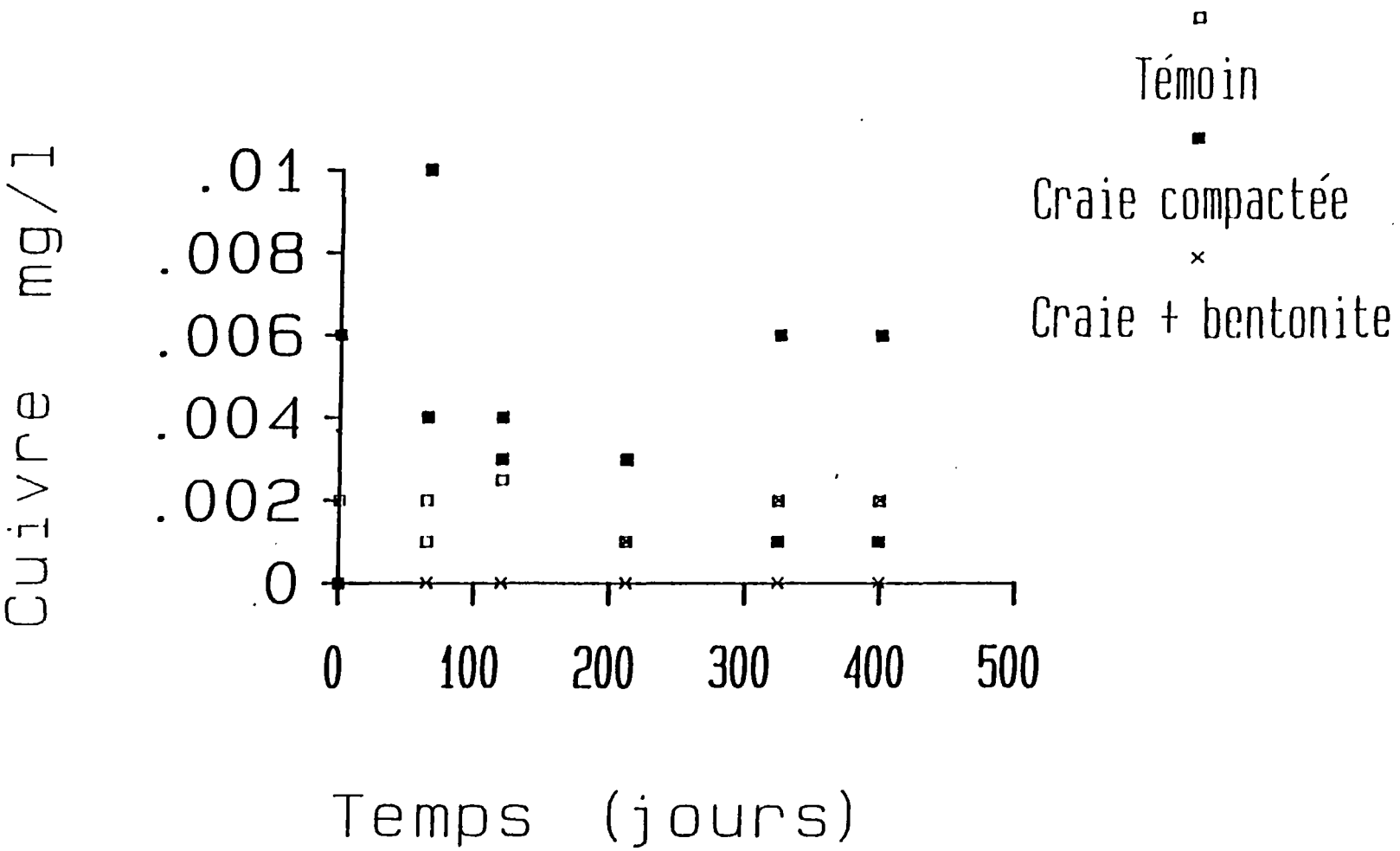


Figure .19.



### 5.3 - ANALYSE DU SOL EN FIN D'EXPERIMENTATION

Des tranchées ont été réalisées en fin d'expérimentation pour prélever des échantillons de sol.

Les résultats figurent dans les tableaux en annexe 3.

Les dosages ont été faits sur la base du sable et dans la craie à différentes profondeurs jusqu'à 50 cm.

#### Analyses chimiques

Un certain nombre d'éléments ou composés ont été dosés par différentes méthodes d'extraction.

Certains n'ont pas été détectés : le carbone organique, les chlorures, les phénols, les sulfures.

Les teneurs en sulfates et le pH ne montrent pas de variation significative.

Les différentes formes d'azote ont été représentées sur la figure 20.

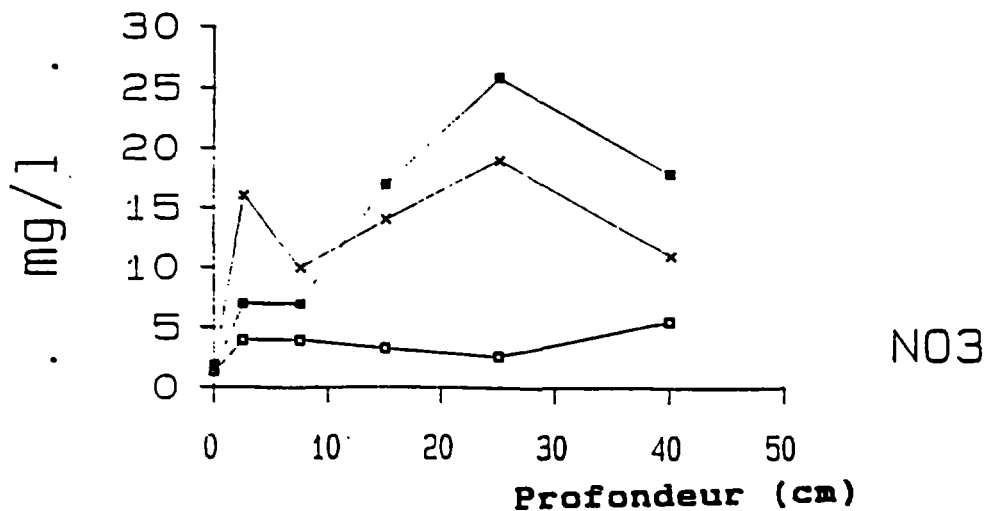
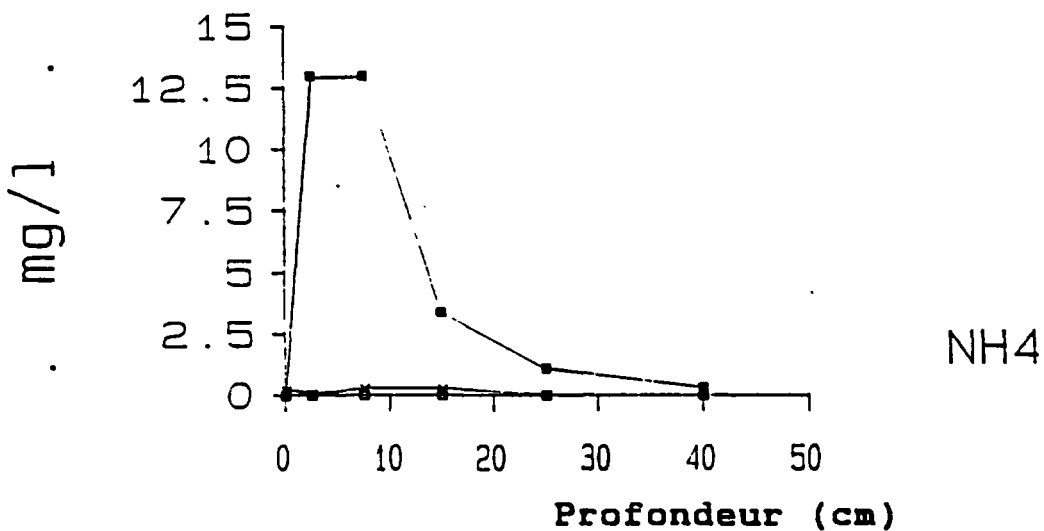
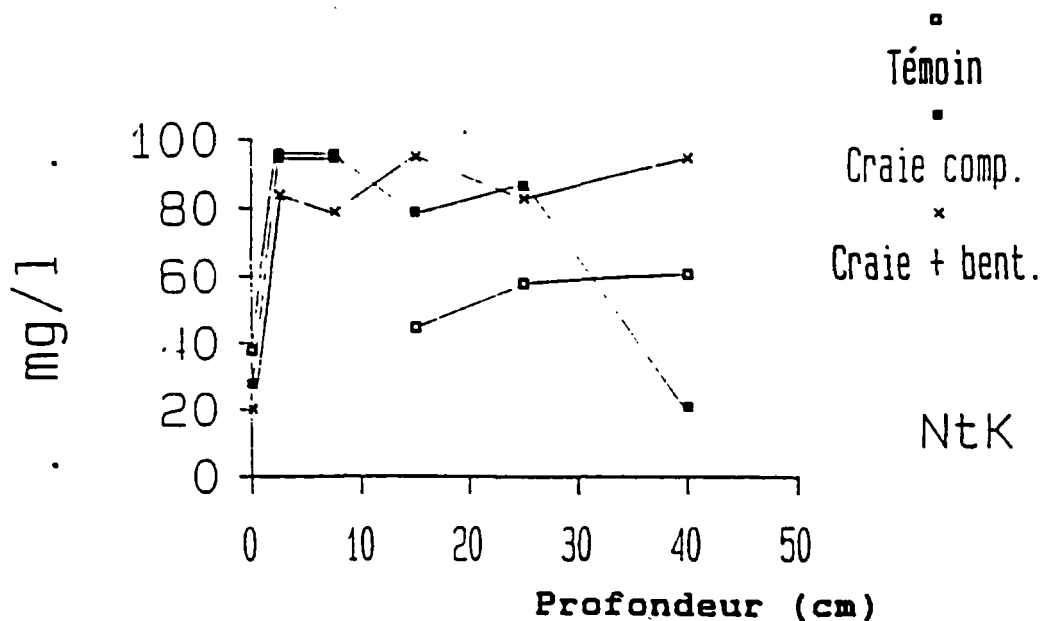
Des concentrations plus importantes en azote ammoniacal sont mesurées sous la parcelle craie compactée, entre 0 et 10 cm de profondeur.

Le pic d'azote nitrique à 25 cm et la diminution de l'azote Kjeldhal sous cette même parcelle montrent l'existence de phénomènes de minéralisation et de nitrification.

Des dosages par ICP sur la fraction solide ont été réalisés. Les résultats reflètent la composition minéralogique des échantillons.

Aucune modification significative qui pourrait être attribuée à une contamination par le jus de décharge ne peut être mise en évidence.

Figure .20.



### Analyse bactériologique (voir annexe 3)

En ce qui concerne les germes aérobies et les germes fécaux, les échantillons prélevés sous les parcelles expérimentales ont des numérations du même ordre que l'échantillon témoin.

Par contre, sous les trois parcelles on retrouve jusqu'à 50 cm de profondeur des germes anaérobies, absents dans l'échantillon témoin et qui proviennent donc des jus.

### 5.4 - CONCLUSIONS SUR LES ANALYSES CHIMIQUES

L'examen des résultats des analyses d'eau interstitielle et de sol montre que dans l'ensemble la contamination par les jus reste modérée et que les concentrations sont globalement similaires sous les trois parcelles expérimentales.

L'examen de détail de certains éléments et l'évolution dans le temps donnent cependant quelques indices d'un comportement différent sous les trois parcelles.

Schématiquement cela se traduit pour la parcelle témoin, non compactée, par une infiltration rapide de l'effluent à travers les fissures de la craie, et donc par des cheminements préférentiels. Ces cheminements préférentiels ont contourné les bougies de prélèvements, ce qui explique les faibles concentrations qui augmentent légèrement en fin d'expérimentation par suite d'un phénomène de diffusion.

Par contre, sous les parcelles de craie compactée et craie + bentonite, un flux d'infiltration faible et régulier existe, avec écoulement en milieu non saturé dans la porosité matricielle. Du fait de l'écoulement en milieu non saturé imposé par l'étanchéité superficielle, le flux se propage en dehors de la fissuration, avec un comportement voisin de l'effet "piston".

## 6. Conclusion

Le traitement de la craie par broyage et compactage avec une mise en oeuvre par des engins de chantier courants aboutit à la constitution d'une couche de faible perméabilité ( $K$  de l'ordre de  $1.10^{-7}$  à  $1.10^{-8}$  m/s).

La faible perméabilité de cette couche limite de façon significative l'infiltration potentielle dans le substratum et assure par ailleurs une répartition homogène du flux, supprimant ainsi les circulations préférentielles rapides dans la fissuration de la craie.

L'exposition pendant treize mois à un jus de décharge n'a pas amené de détérioration de cette couche d'étanchéification, et une diminution de perméabilité, pouvant être attribuée à un phénomène de colmatage, a été mesurée en fin d'expérimentation.

L'ajout de 2% de bentonite (10 kg/m<sup>2</sup>) diminue significativement la perméabilité de la couche traitée. Les coefficients ainsi obtenus sont inférieurs à 1 x 10<sup>-8</sup> m/s, voire 1 x 10<sup>-9</sup> m/s.

La mise en oeuvre du mélange et son compactage sont cependant très délicats du fait de la sensibilité à l'eau de ses deux composants. Des précautions spécifiques en rapport avec les conditions climatiques habituelles du lieu de réalisation sont donc à prendre en compte (traitement par petites surfaces qu'il est possible de protéger en cas de pluies persistantes...).

Annexe 1

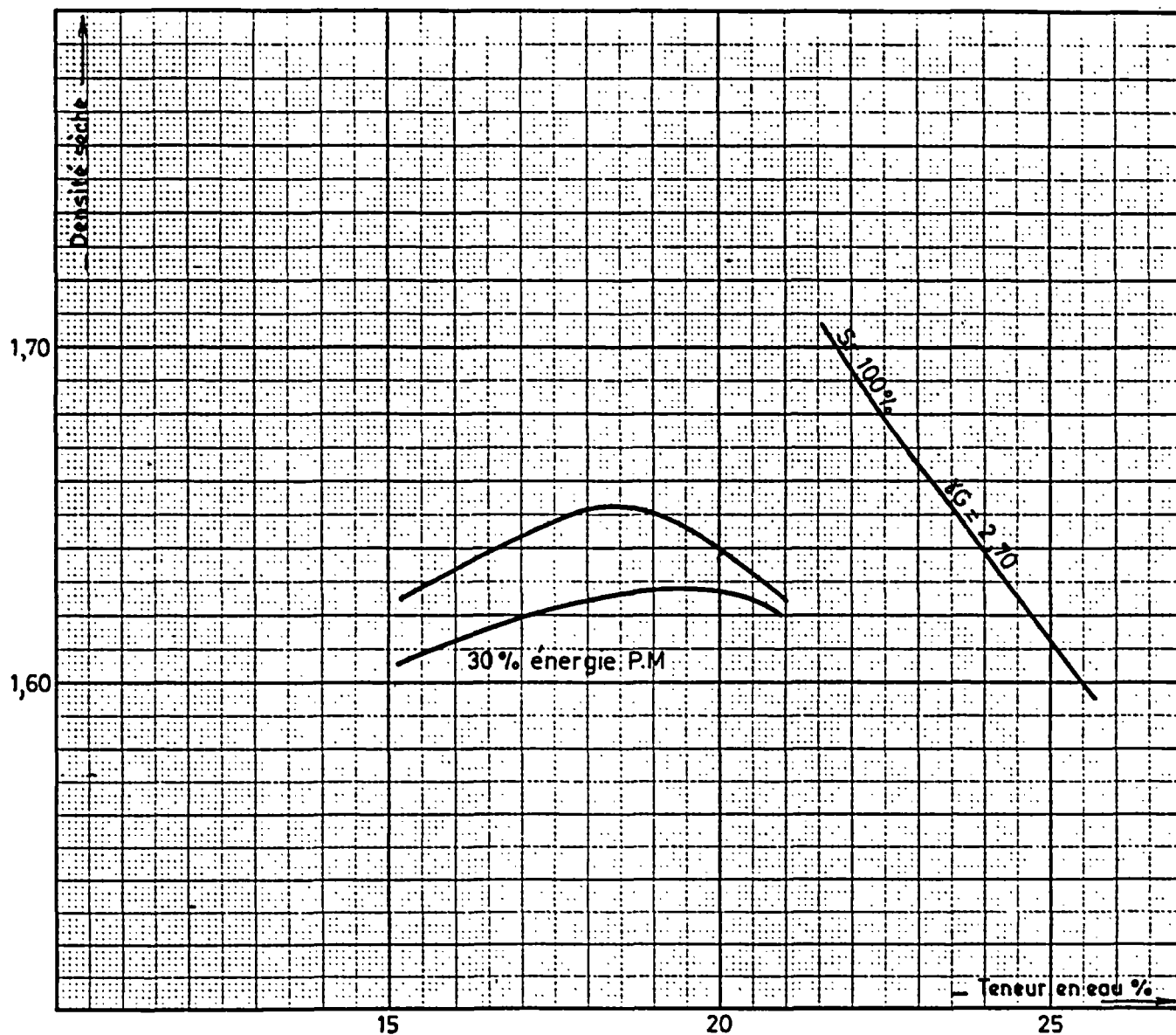
Essais Proctor modifié

- ESSAI PROCTOR -  
MODIFIÉ

Matériau: Craie n°1

$\omega$  optimale =

$\gamma_d$  maximum =

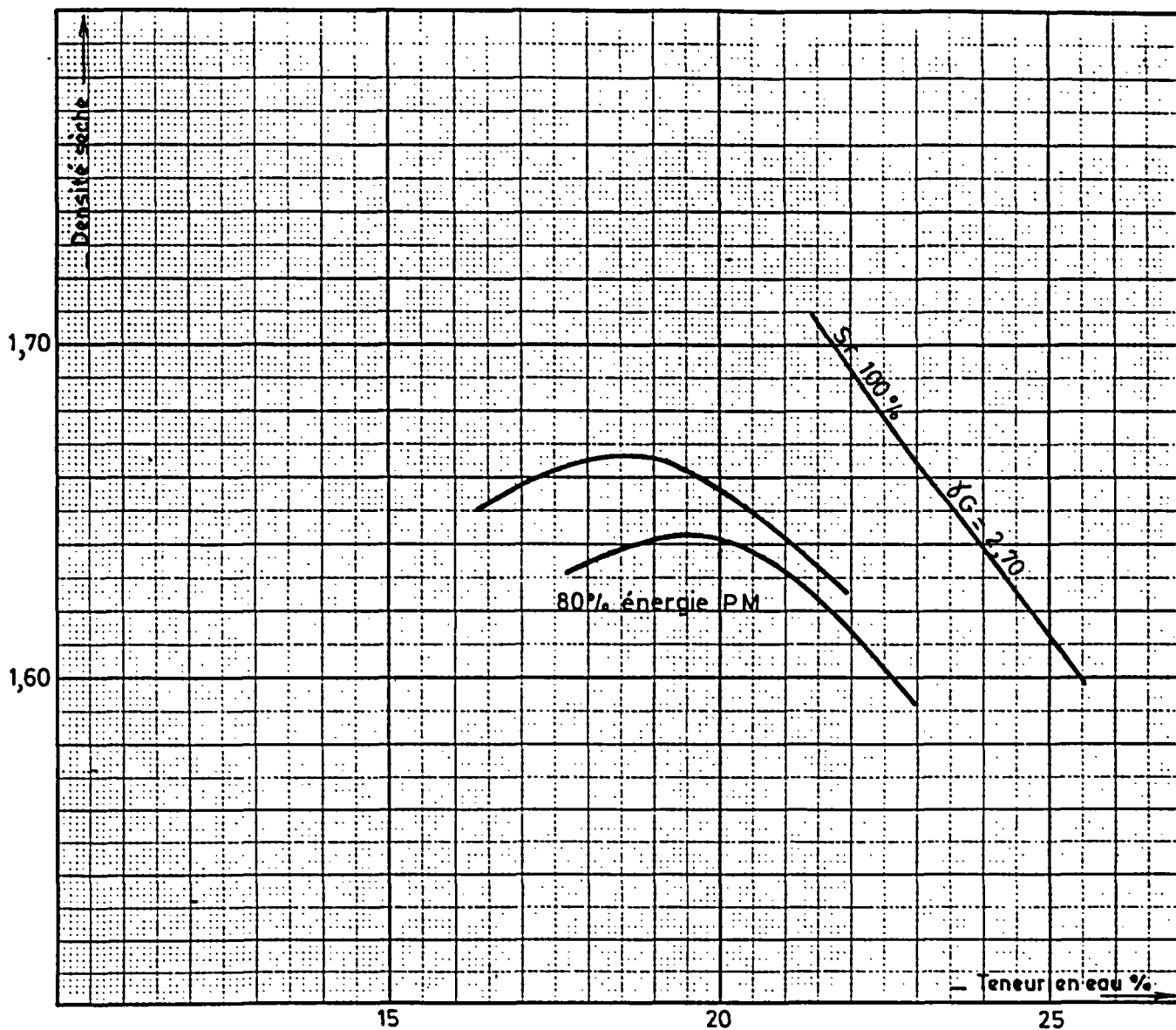


- ESSAI PROCTOR -  
MODIFIÉ

Matériau: Craie n°2

$\omega$  optimale =

$\gamma_d$  maximum =

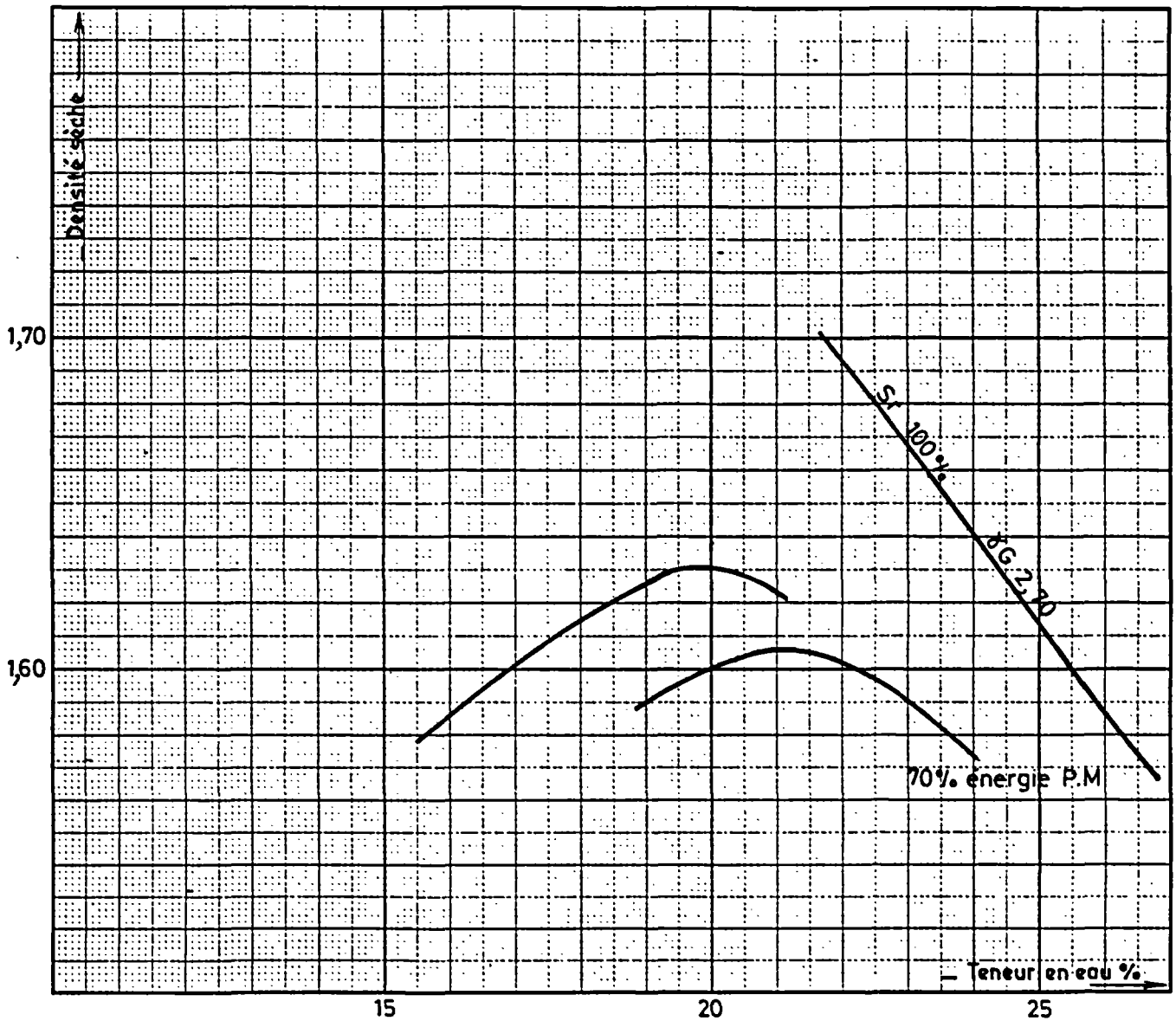


ESSAI PROCTOR  
MODIFIÉ

Matériau : Craie n°3

$\omega$  optimale =

$\gamma_d$  maximum =



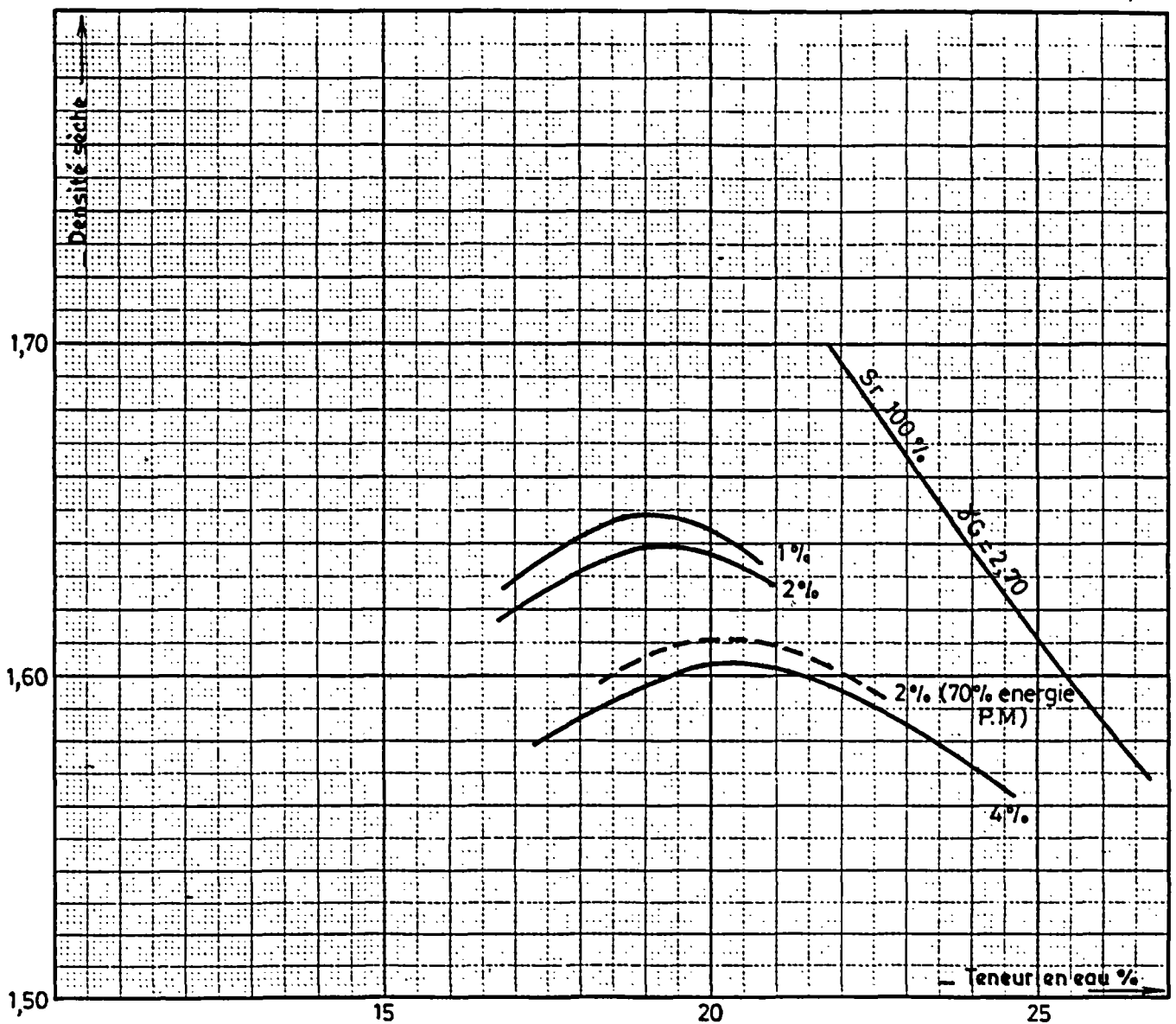


- ESSAI PROCTOR -  
MODIFIÉ

Matériau: Craie 1-2-3 + bentonite

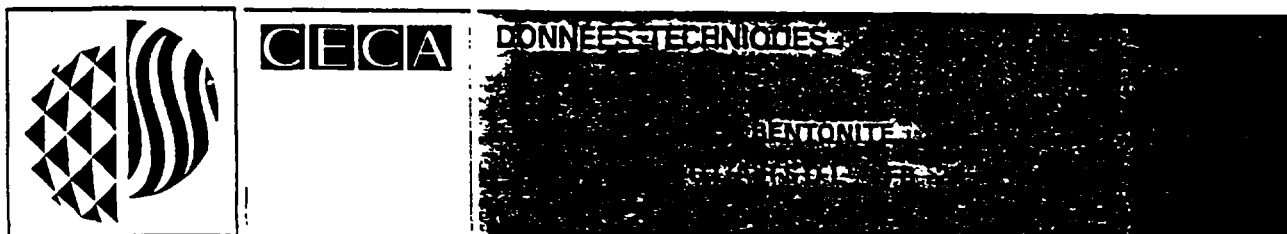
$\omega$  optimale =

$\gamma_d$  maximum = ---



**Annexe 2**

**Caractéristiques de la bentonite CLARSOL FB2**



- I. ORIGINE : Divers gisements en FRANCE, AFRIQUE du NORD, GRECE, etc...
- II. CONSTITUANTS : Silicate d'alumine hydraté à structure feuilletée, activé par échange de cation.
- III. CARACTERISTIQUES
- Aspect : Poucre : la teinte dépend du gisement.
- Granulométrie : Refus au tamis de 80  $\mu\text{m}$  - < 15%.
- Dispersibilité : Le CLARSOL FB 2 gonfle dans l'eau peu ou faiblement saline ou dure et donne une suspension colloïdale de moyen rendement à filtrat relativement faible.
- Toxicité : Nulle
- IV. APPLICATIONS : Principales utilisations :
- En suspension colloïdale dans presque tous les types de boues à l'eau :
- comme produit de base, lorsque l'on désire un fluide de caractéristiques rhéologiques répondant aux normes CCMA,
  - comme support de produits colmatants,
  - comme agent épaisissant pour pertes de circulation,
  - comme additif au ciment dans la préparation de gels-ciments.
- V. QUALITE VOISINE : FB 5

*Etude du confortement de l'imperméabilité de formations crayeuses  
SRETIE*

CL	CRITERE	CARACTERISTIQUES		SPECIFICATIONS D'APRES NORMES			
		UNITES		CECA	OCMA	API	
		Métriques	U.S.			FORAGE	CIMENTS
I N T R I N S E Q U E S	Humidité	%	%	12 - 15	15 max.	10 max.	10 max.
	Granulométrie	mm	ASTM				
	- Voie sèche refus	0,42	No 40				0
	- Voie sèche refus	0,074	No 200	10 max.			
	- Voie humide	0,074	No 200		2,5 max.	2,5 max.	2,5 max.
	Densité apparente (tassé)	-	-	1,0			
	Rendement Viscosimétrique	m <sup>3</sup> /t.m	bbt/2000 lbs	18 - 21 105-120	90 min.	90 min.	-
	Filtrat API 75 g/l	ml.	ml.		15 max.	15 max.	15 max.
B O U E S	Mesures à 60 g/l en eau distillée						
	Stormer	V	cPo	20 - 40			
		Gel 0'	g	50-100			
		Gel 10'	g	80-160			
	Fann	V.A.	cPo				
		V.P.	cPo				
		Y.V.	lbs/100 sqft				
Gel 0'		lbs/100 sqft					
Gel 10'	lbs/100 sqft						
Filtrat	ml.	ml.	15 - 18				
pH Boue	-	-	9 - 10			9,5 max.	
N O R M E S	CECA	CAHIER DES CHARGES					
	OCMA	OIL COMPANIES MATERIALS ASSOCIATIONS : Spécif. n° DFCP 4.					
	API	AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE : API STD 13. A OIL WELL DRILLING API STD 10 A. CEMENTS					



10 dépôts en France



Bureaux :  
12-16 allée des Vosges - La Défense 5 - CEDEX 54 - 92062 PARIS LA DEFENSE  
Tél. (1) 49.04.10.40 à 54 - Télex SOBREP 613123 F

Courbevoie, le

FICHE TECHNIQUE N° 55

DE LA BENTONITE FB 2

dans les travaux d'étanchement

Retenues d'eau

Sous cette désignation on regroupe des plans d'eau d'importance moyenne, comme par exemple, bassins de parcs, combes, petits lacs dolinaires ou collinaires, canaux, étangs, dont certains peuvent avoir plusieurs hectares de superficie.

Qu'est-ce que la BENTONITE ?

C'est un produit naturel du type silicate hydraté à base d'alumine appartenant au groupe minéral des montmorillonites.

Les premiers gisements de bentonites, d'ailleurs inexploitablement furent identifiés en France à Montmorillon (Vienne). Aux U.S.A. existaient d'énormes réserves de ces argiles bentonitiques dans les montagnes rocheuses, aux environs de Fort-Benton (Wyoming) et ce sont ces gisements qui retinrent l'attention.

Le nom de BENTONITES donné à l'origine aux argiles de cette contrée ne tarda pas à couvrir les produits de même type exploités en divers points du globe, en particulier au Canada, en Italie, en Allemagne et en France.

La Bentonite est constituée comme le mica d'un empilement de feuillets élémentaires, pouvant s'écarter les uns des autres sous l'effet de l'absorption d'eau. Réduite en poudre, elle forme en s'humectant une masse gélatineuse qui obstrue les interstices du sol. Ce gel manifeste le phénomène de thixotropie, c'est-à-dire qu'il épaisse au repos prolongé. Ce phénomène qui a fait l'objet de nombreuses recherches est attribué aux propriétés électriques des particules colloïdales et correspond à un équilibre des forces d'attraction et de répulsion entre les ions du cristal d'argile et les ions du milieu dispersant.

Imperméabilité

Elle découle de la plasticité de la Bentonite; pour un indice donné de vide, l'imperméabilité croît avec la plasticité et il suffit d'une addition de quelques pourcents de Bentonite pour abaisser dans d'énormes proportions la perméabilité d'un matériau.

Le coefficient de perméabilité K, selon DARCY, d'un corroi à la Bentonite est de  $10^{-8}$  à  $10^{-7}$ .

Pour obtenir le maximum d'imperméabilité, il y a intérêt à employer la Bentonite FB 2 afin de réaliser un matériau dense et, de plus, susceptible d'être compacté.

Siège social : 12-16, allée des Vosges, COURBEVOIE - Hauts-de-Seine (FRANCE)  
Société Anonyme au capital de 251 100 F - R.C.S. Nanterre 622 058 335 - SIRET 622 059 335 00050 - APE 5908

Aux emplacements où l'on aura détecté un léger courant ou tourbillon, qui est l'indice d'une fuite préférentielle par le fond, il y aura lieu d'augmenter la dose de Bentonite FB 2 pour aveugler plus rapidement la fissure.

**Remarque particulière**

La Bentonite est un produit naturel ne présentant aucun danger pour les animaux, ni pour les poissons, comme l'ont attesté diverses expériences, réalisées avant cette forme d'emploi, par les Services du Génie Rural et des Eaux et Forêts.

De plus, la Bentonite est insensible aux variations de température, gel ou chaleur, elle assure une étanchéité complète et pratiquement définitive durant de nombreuses années.

-----

### Applications industrielles

Les Bentonites sont utilisées en Fonderie, forages, céramique, émaillerie, traitement des vins, traitement des bières, papeterie, caoutchouc, pharmacie et cosmétiques, produits d'entretien, travaux publics, travaux d'étanchement.

### Etanchéité des retenues d'eau

Pendant des années diverses formules ont été essayées, y compris les matières plastiques, sans grand succès pour enrayer les fuites permanentes menaçant de disparition certaines retenues d'eau, qu'elles soient artificielles ou naturelles.

Après que divers essais de produits aient été effectués, seule la Bentonite put donner l'indispensable effet d'étanchéité que l'on recherchait.

### Techniques d'utilisation

Le revêtement du fond d'une retenue d'eau, par une couche continue de Bentonites FB 2 s'effectue très simplement.

La première opération consiste à extraire dans la calotte et sur les bords de la dépression la végétation herbacée et arbustive; au cours de ce travail, il est nécessaire de repérer et de combler les failles et crevasses à l'aide d'une argile spéciale, compactée, se présentant sous forme de petits cylindres de 6 m/m de diamètre et appelée SOBRANITE.

Par la suite, les bords et le fond devront être compactés c'est-à-dire tassés à la pelle pour obtenir une surface aussi lisse que possible, de façon à économiser la BENTONITE FB 2.

S'il s'agit de grandes surfaces, cette opération peut être effectuée à l'aide d'un rouleau lisse de type agricole.

Avant de procéder à l'épandage de la BENTONITE FB 2 à raison de 3 à 6 kg/m<sup>2</sup>, il est nécessaire d'arroser pour faciliter la fixation de la Bentonite, et éviter l'action des vents sur la Bentonite, l'humidité du sol ainsi créée suffit à assurer le gonflement de la Bentonite.

La mise en place de la Bentonite FB 2 est chose simple: elle peut être épandue soit à la pelle, soit au moyen d'un pulvérisateur à poudre.

Après cette opération, on recouvre d'une couche protectrice de 10 à 15 cm de sable ou de graviers.

### Colmatage de retenues ou d'ouvrages en service

Bien souvent, pour diverses raisons il n'est pas possible de procéder à l'arrêt d'exploitation par vidange de la retenue (étangs, lacs artificiels, canaux etc..) pour colmater les fissures et failles qui sont à l'origine d'un abaissement du niveau d'eau, parfois rapide, et pouvant provoquer dans certains cas la perte pure et simple du plan d'eau.

Là encore la Bentonite FB 2 intervient et permet par des aménagements simples et économiques d'apporter la solution du problème; en effet, il suffit d'épandre à la surface du plan d'eau 4 à 6 kg/m<sup>2</sup> de Bentonite FB 2 jusqu'à constituer sur le fond la couche étanche nécessaire.

.../...

### Annexe 3

## Analyses minéralogiques, chimiques et bactériologiques du sol



Références des échantillons de sol

Parcelle témoin

B1-0	base du sable
B1-1	craie 0-10 cm
B1-2	craie 10-20 cm
B1-3	craie 20-30 cm
B1-4	craie 30-50 cm

Craie compactée

B2-0	base du sable
B2-1	craie 0-10 cm
B2-2	craie 10-20 cm
B2-3	craie 20-30 cm
B2-4	craie 30-50 cm

Craie + bentonite

B3-0	base du sable
B3-1	craie 0- 5 cm
B3-2	craie 5-10 cm
B3-3	craie 10-20 cm
B3-4	craie 20-30 cm
B3-5	craie 30-50 cm

Témoin : craie non contaminée

BRGM

DIRECTION DE LA TECHNOLOGIE

Département analyse

RÉSULTATS D'ÉTUDES

ETUDE M 2155 B

Orléans, le 16 mai 1989

Demandeur : M. SAUTER SGR/HNO

Détermination minéralogiques d'échantillons

(roches totales et argiles)

Provenance : Anneville

Méthode employée : Diffractométrie de rayons X (appareillage Philips)  
- rayonnement  $\text{CoK}\alpha$ , monochromateur arrière en graphite  
- sensibilité : 2000 c/s pour les roches totales et  
5000 c/s pour les argiles,  
- domaine d'exploration du spectre : 4 à  $84^\circ 2\theta$  et 2 à  
 $36^\circ 2\theta$ , respectivement.  
- échelle d'importance : TA très abondant - A abondant -  
P présent - F faible - Tr traces • sur base 10 pour les  
argiles.

Préparation :

Broyage en mortier pour les roches totales.  
Extraction de la fraction inférieure à  $2 \mu\text{m}$  par mise en  
suspension aux ultrasons et sédimentation par centrifugation  
(1200 t/min 15 min.), pour les argiles puis :  
confection de lames orientées  
- normale  
- glycolée,  
- chauffée à  $490^\circ\text{C}$  pendant 4 h.

Complément d'étude : Quantification de la calcite par élimination à HCl  
50 % - rinçage du résidu argileux à l'eau distillée, séchage à  $60^\circ\text{C}$  et  
pesée.

Résultats obtenus

Anneville B 3-1

Calcite 72 %  
Bentonite 18 %  
Kaolinite 2,5 %  
Illite 2,5 %  
Quartz ~ 5 %

Anneville B 3-2

Calcite 73 %  
Bentonite 20 %  
Kaolinite 1 %  
Illite 1 %  
Quartz ~ 5 %

Anneville B 3-3

Calcite 70 %  
Bentonite 19 %  
Kaolinite 2,5 %  
Illite 2,5 %  
Quartz ~ 6 %

Anneville B 3-4

Calcite 80 %  
Bentonite 12 %  
Kaolinite 1,5 %  
Illite 1,5 %  
Quartz ~ 5 %

Anneville Témoin

Calcite 90 %  
Bentonite 8 %  
Kaolinite 1 %  
Illite 1 %  
Quartz infra Tr (inchiffable - < 0,5 %)

F. PILLARD

P. 0  
*[Signature]*

LABORATOIRE MUNICIPAL DE ROUEN

ROUEN, le 7 MARS 1989

N° 2440 D

RESULTATS ANALYSES

=====

OBJET : Analyses sur échantillons de sols  
remis par le B.R.G.M

DATE REMISE ECHANTILLONS : 16 FEVRIER 1989

MODE OPERATOIRE :

=====

Matières sèches : passage à l'étuve à 105°C de l'échantillon jusqu'à poids constant.

Ntk : Dosage de l'azote organique et ammoniacal par la méthode de Kjeldahl sur les échantillons à l'état brut. Les résultats sont ensuite exprimés en mg/kg par rapport à la matière sèche.

NO<sub>3</sub> - NO<sub>2</sub> - NH<sub>4</sub> : Extraction des échantillons par une solution de KCl 1M suivant les conditions opératoires définies dans la norme X31 - 104 : mesure du pH (KCl). Les résultats sont exprimés en mg de chaque élément extrait dans les conditions de l'essai par kg de matière sèche.

pH (H<sub>2</sub>O) : Suivant norme AFNOR X 31-103

Carbone : Méthode par oxydation sulfo-chromique

Chlorure : Mise en solution nitrique et dosage par argentimétrie

Indice-Phénols : Dosage par absorption moléculaire après mise en solution et distillation.

Sulfures : Entraînement par l'azote et dosage par oxydo-réduction

Sulfates : Dosage par gravimétrie.

LABORATOIRE MUNICIPAL DE ROUEN

ROUEN, le 7 MARS 1989

	I	B1-0	B1-1	B1-2	B1-3	B1-4	B2-0	B2-1	B2-2	B2-3	B2-4	B3-0	B3-1	B3-2	B3-3	B3-4	B3-5
Matière sèche (%) :	82,6	94,3	83,9	83,0	80,7	80,7	88,5	88,5	87,7	85,1	81,9	87,6	87,6	83,7	85,2	83,1	81,1
pH (H <sub>2</sub> O) :	8,90	8,42	8,90	8,80	8,92	8,88	8,45	8,86	8,70	8,61	8,64	8,64	8,95	8,94	9,05	9,02	8,95
NH <sub>4</sub> (mg/kg) :	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	13	3,4	1,1	0,31	0,17	< 0,1	0,24	0,23	< 0,1	< 0,1
NO <sub>3</sub> (mg/kg) :	2,1	1,4	4,0	3,3	2,7	5,6	1,9	7,0	17	26	18	1,7	16	10	14	19	11
NO <sub>2</sub> (mg/kg) :	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Ntk (mg/kg) :	86	38	96	45	58	61	28	95	79	87	21	< 20	84	79	95	83	95
C (%) :	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Cl <sup>-</sup> (mg/kg) :	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (%) :	0,11	< 0,05	0,093	0,098	0,097	0,093	< 0,05	0,096	0,084	< 0,05	0,089	< 0,05	0,074	0,089	0,076	0,067	0,081
S <sup>2-</sup> (mg/kg) :	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Indice-Phénols (mg/kg) :	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2

NOTE : les résultats sont exprimés par rapport à la matière sèche à 105°C

- LABORATOIRE MUNICIPAL DE ROUEN -

- LE 9 MARS 1989 -

RESULTATS D'ANALYSES

ORIGINE ECHANTILLON : TERRE ANNEVILLE

REMIS PAR : et pour le compte du B.R.G.M. 10, rue Mazurier - 76130 - MONT-SAINI-AIGNAN -

	ANNEVILLE	B1.0	B1.1	B1.2	B1.3	B1.4	B2.0	B2.1	B2.2	B2.3	B2.4	B3.0	B3.1	B3.2	B3.3	B3.4	B3.5
	TEMOIN																
Germes aérobies mésophiles 72H - 20°/g	400 000	17000	4000	21000	220000	150000	80000	47000	4000	120000	140000	140000	270000	64000	57 000	103000	234000
Germes aérobies mésophiles 24H - 37°/g	2 000	220	200	40	2160	1180	700	30	1080	1000	840	7800	8200	1040	520	1190	1170
Coliformes totaux / g	$9.2 \cdot 10^1$	$3.6 \cdot 10^1$	<3	<3	$9.2 \cdot 10^1$	<3	<3	<3	<3	<3	$3.6 \cdot 10^1$	<3	$3.6 \cdot 10^1$	$3.6 \cdot 10^1$	<3	<3	$3.6 \cdot 10^1$
Escherichia coli / g	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	$3.6 \cdot 10^1$	$3.6 \cdot 10^1$	<3	<3	<3
Streptocoques fécaux/g	$2.3 \cdot 10^2$	$9.3 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^2$	<3	$3.6 \cdot 10^1$	$2.3 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^2$	$2.1 \cdot 10^2$	<3	$9.2 \cdot 10^1$	$4.3 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^3$	$2.3 \cdot 20^2$	$4.3 \cdot 10^2$	<3
Clostridium sulfito-réduc- teurs /100 g	< 50	3000	150	50	< 50	100	1000	300	5000	1000	1000	50	3000	500	200	500	1000
Anaérobies totales/g	< 10	3000	150	50	< 10	100	1000	300	5000	1000	1000	50	3000	500	200	500	1000

Etude du confortement de l'imperméabilité de formations crayeuses  
SRETIE

Refer. Ech.	No	SI02	AL2X	FE2X	CAO	MGO	K2O	MNO	TI02	FE05	LI	EE	B	V	CR	CD	NI	CU
Refer. Ech.	UNIT	%	%	%	%	%	%	%	%	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM
	BINF	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.50	0.01	0.01	100.	10.	2.	10.	10.	10.	5.	10.	5.
	BSUP	100.0	100.0	100.0	100.0	50.0	20.00	20.00	35.00	80000.	40000.	2500.	18000.	40000.	13000.	25000.	18000.	3000.
B1-0	0001	94.0	1.4	-1.0	-1.0	-1.0	-0.50	0.02	0.11	152.	-10.	-2.	42.	10.	36.	8.	23.	-5.
B1-1	0002	13.6	1.3	-1.0	44.9	-1.0	-0.50	0.03	0.05	870.	-10.	-2.	10.	13.	18.	6.	18.	10.
B1-2	0003	5.7	1.0	-1.0	52.5	-1.0	-0.50	0.03	0.03	926.	-10.	-2.	-10.	12.	17.	7.	13.	14.
B1-3	0004	6.4	1.0	-1.0	50.6	-1.0	-0.50	0.03	0.03	881.	-10.	-2.	-10.	12.	18.	8.	16.	10.
B1-4	0005	8.2	1.1	-1.0	51.5	-1.0	-0.50	0.03	0.03	953.	-10.	-2.	-10.	15.	17.	8.	25.	11.
B2-0	0006	91.1	1.3	-1.0	1.6	-1.0	-0.50	0.02	0.09	146.	-10.	-2.	38.	-10.	34.	7.	21.	-5.
B2-1	0007	16.9	1.5	-1.0	44.8	-1.0	-0.50	0.03	0.06	920.	-10.	-2.	12.	15.	24.	7.	18.	9.
B2-2	0008	17.4	1.6	-1.0	47.4	-1.0	-0.50	0.03	0.06	975.	-10.	-2.	10.	16.	23.	8.	19.	10.
B2-3	0009	16.8	1.4	-1.0	48.8	-1.0	-0.50	0.04	0.05	1337.	-10.	-2.	11.	14.	25.	7.	39.	9.
B2-4	0010	12.4	1.9	-1.0	50.0	-1.0	-0.50	0.04	0.06	1043.	-10.	-2.	10.	19.	21.	9.	20.	11.
B3-0	0011	90.6	1.4	-1.0	-1.0	-1.0	-0.50	0.02	0.09	135.	-10.	-2.	40.	10.	30.	8.	20.	-5.
B3-1	0012	25.2	1.9	-1.0	39.7	-1.0	-0.50	0.03	0.07	568.	-10.	-2.	17.	16.	18.	8.	17.	8.
B3-2	0013	16.8	1.9	-1.0	46.2	-1.0	-0.50	0.03	0.07	1002.	-10.	-2.	13.	16.	20.	8.	19.	9.
B3-3	0014	21.6	2.4	-1.0	45.5	-1.0	-0.50	0.04	0.09	1162.	-10.	-2.	19.	21.	27.	9.	24.	10.
B3-4	0015	17.9	1.8	-1.0	46.7	-1.0	-0.50	0.03	0.07	978.	-10.	-2.	29.	18.	21.	9.	19.	10.
B3-5	0016	16.6	1.6	-1.0	48.0	-1.0	-0.50	0.03	0.06	1109.	-10.	-2.	14.	17.	22.	12.	20.	10.
TEMOIN	0017	5.2	1.4	-1.0	53.1	-1.0	-0.50	0.03	0.05	1003.	-10.	-2.	-10.	15.	18.	8.	17.	10.

Refer. Ech.	No	ZN	AS	SR	Y	NB	MO	AG	CD	SN	SB	BA	LA	CE	W	FB	BI	ZR
Refer. Ech.	UNIT	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM
	BINF	5.	20.	5.	20.	20.	5.	0.2	2.	10.	10.	10.	20.	10.	10.	10.	10.	20.
	BSUP	20000.	50000.	10000.	5000.	15000.	7500.	300.0	5000.	20000.	25000.	3500.	15000.	5500.	15000.	6000.	10000.	13000.
B1-0	0001	67.	-20.	27.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	73.	-20.	-10.	-10.	11.	-10.	618.
B1-1	0002	39.	-20.	304.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	23.	100.	-10.	-10.	17.	-10.	790.
B1-2	0003	36.	-20.	332.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	15.	118.	-10.	-10.	-10.	-10.	736.
B1-3	0004	33.	22.	308.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	13.	119.	-10.	-10.	13.	-10.	756.
B1-4	0005	37.	-20.	324.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	18.	118.	-10.	-10.	12.	-10.	133.
B2-0	0006	25.	-20.	31.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	76.	-20.	-10.	-10.	12.	-10.	354.
B2-1	0007	85.	-20.	319.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	30.	94.	-10.	-10.	14.	-10.	337.
B2-2	0008	68.	-20.	342.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	32.	105.	-10.	-10.	19.	-10.	256.
B2-3	0009	190.	-20.	327.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	31.	99.	-10.	-10.	15.	-10.	1207.
B2-4	0010	76.	-20.	365.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	88.	108.	-10.	-10.	14.	-10.	772.
B3-0	0011	14.	-20.	26.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	81.	-20.	-10.	-10.	12.	-10.	216.
B3-1	0012	32.	-20.	285.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	48.	96.	12.	-10.	12.	-10.	185.
B3-2	0013	39.	-20.	348.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	44.	110.	13.	-10.	11.	-10.	1505.
B3-3	0014	43.	-20.	334.	24.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	46.	110.	18.	-10.	-10.	-10.	938.
B3-4	0015	35.	20.	323.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-16.	-10.	33.	112.	13.	-10.	15.	-10.	927.
B3-5	0016	37.	22.	344.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	33.	108.	12.	-10.	13.	-10.	796.
TEMOIN	0017	34.	-20.	362.	-20.	-20.	-5.	-0.2	-2.	-10.	-10.	22.	125.	-10.	-10.	14.	-10.	1723.

Annexe 4

Analyses chimiques et bactériologiques de l'eau  
interstitielle



*Etude du confortement de l'imperméabilité de formations crayeuses  
SRETIE*

	parcelle	13.11.1987		27.01.1988		22.03.1988		22.06.1988		12.10.1988		27.12.1988	
		B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
pH	1	8,5	8,1	7,7	7,6	7,5	7,5	7,4	7,3	6,9	7	7,5	7,4
	2	7,9		7,7	7,8	7,7	7,7	7,5	7,8	7,1	7,2	7,4	7,6
	3	7,6	7,9	7,6	7,5	7,6	7,5	7,5	7,5	7,1	7,1	7,5	7,4
Cond. µS/cm	1	416	463	447	412	481	468	467	526	851	831	561	549
	2	772		731	702	589	585	603	602	783	788	502	379
	3	691	669	771	840	734	755	768	602	1114	787	784	565
R.S.105 mg/l	1			297	290	319	314	313	486	290	291	319	314
	2			570	522	415	415	491	517	573	520	315	310
	3			506	555	357	434	608	486	500	550	502	480
R.S.500 mg/l	1			207	209	155	160	148	291	204	169	155	162
	2			349	349	217	300	304	324	351	344	177	170
	3			361	350	262	302	368	291	360	348	358	291
DCO mg/l O2	1	9	2	9	1	8	9	26	16	11	8	13	13
	2	69		23	21	19	28	40	18	11	13	13	5
	3	3	4	3	4	11	7	10	7	8	6	9	5
Ca mg/l	1	88	92	84	85,6	103,5	103	105	124,8	148	146	109,6	112
	2	126,5		73,6	74,4	78	101,5	90,4	108,8	122	146	91,2	86,4
	3	116,8	122,4	80	74,4	108	96,5	112	97,6	100	124	45,6	97,6
Mg mg/l	1	2,4	8,5	2,4	6,3	2,7	3	5,5	4,3	3,7	3,6	2,7	3,7
	2	11,8		5,2	2,4	6,1	2,7	7	8	2,4	3,6	4,1	3,4
	3	9,1	8,3	4,4	4,2	2,4	2,1	3,6	6,3	2,4	3,6	2,7	5,1
Na mg/l	1	3,4	7	7	6,4	5,5	3,5	8	6,8	24	14,4	35	24
	2	53		115	106	71	34	69	42	66	4,7	43	2,8
	3	26	45	112	140	116	117	95	67	210	50	195	49
K mg/l	1	1,1	1	1	,9	1	,8	1,2	1,0	1,8	1,5	1,4	1,2
	2	1,6		1,5	1,7	1,4	1	2,1	1,4	2,5	,9	1,9	,5
	3	1	1,2	,9	1,2	,9	1,1	3,8	1,2	2,1	1,7	1,4	1,2
NH4 mg/l	1	0	0	0	,07	0	0	0	0	0	,02	0	0
	2	0		,05	0	0	0	0	0	,01	,02	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	,2	0	0	0	0	0
BCO3 mg/l	1	256	311	256	274,5	268,5	293	201	317	396,5	396,5	262,5	256,5
	2	408,5		341,5	329,5	299	299	409	415	488	463,5	329,5	238
	3	384,5	433	354	390,5	390,5	390,5	494	433	659	488	707,5	390,5
Cl mg/l	1	5	8,5	11	8	14,5	11	54	31	28	27	17,5	19,5
	2	38		38	25	18,5	10	11	7,5	10,5	4,5	12	8
	3	29,5	40	62,5	85	54	59,5	33,5	13,5	47,5	11,5	40,5	13
SO4 mg/l	1	16,5	10	14	8	13	10,5	35	21	37,5	25,5	34	32
	2	42		47	48,5	33	30,5	29	24,5	28	17,5	28,5	17
	3	19,5	23,5	56	60	53	41	35	18,5	46	16,5	43,5	21,5
NO3 mg/l	1	4	1	12	1,2	10	,5	34	18	75,5	62,5	74	75,5
	2	53		64	23	46	16,5	29,5	27	18	23,5	12,5	10,5
	3	10	4,5	6,5	16	6	19	19	24	16,5	26	21	27,5
NO2 mg/l	1	,01	,01	0	0	0	0	,01	0	,01	,02	0	0
	2	,05		,02	,80	0	,04	0	,03	0	0	0	0
	3	,02	,10	,04	,08	0	0	,20	0	0	,03	0	0
Fe mg/l	1	,100	,130	0	,001	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0		,070	,070	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	,020	,020	,010	,008	0	0	0	0	0	,040	,003	0
Mn mg/l	1	0	,020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	,030		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	,090	0	,020	0	0	0	0	0	0	0
Zn mg/l	1	0	,001	,002	,002	,003	,007	,003	,003	0	0	,001	,001
	2	,002		,001	,003	,002	,001	,003	,002	0	,001	0	,003
	3	,002	,002	0	0	,001	0	0	,005	0	0	0	0
Pb mg/l	1	,016	,018	,009	,008	,007	,006	,008	,004	,008	,009	,029	,031
	2	,023		,011	,022	,008	,010	,008	,012	,013	,015	,021	,048
	3	,022	,024	,007	,010	0	0	0	,010	,007	,010	,008	,018
Cu mg/l	1	,002	0	,002	,001	,003	,003	,003	,001	,002	,001	,002	,001
	2	,006		,004	,010	,003	,004	,003	,003	,001	,006	,001	,006
	3	0	0	0	0	0	0	,001	0	,002	0	,002	0
Cr mg/l	1	0	0	0	0	0	0	0	0	,001	,001	0	0
	2	0		0	,002	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cd mg/l	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Phénols mg/l	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	,03	,02	0	0	0	0	0	0

parcelle	13.11.1987		27.01.1988		22.03.1988		22.06.1988		12.10.1988		27.12.1988		
	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2	
GT37 /ml	1	10000	10000	650	600	150	1	10000	10000	1320	24	10000	0
	2	10000		69	1000	125	5	10000	10000	0	36	10	5
	3	10000	10000	2500	80	3	150	10000	71	50	0	32	57
GT20 /ml	1	900	10000	2500	1000	452	452	10000	10000	10000	10000	10000	10000
	2	10000		1160	8400	1172	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
	3	10000	400	5800	1400	484	296	10000	1600	10000	10000	10000	10000
Col.tot/100ml	1	75	15000	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0
	2	0		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
Col.fec/100ml	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0
	2	0		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
Str.fec/100ml	1	0	23	0	0	0	0				13	0	0
	2	0		0	3,60	0	0			1	0	0	0
	3	0	0	9,30	15	0	0			0	0	17	0
Clostr./100ml	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0		0	0	0	0	0	0	200	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0

