

# VALORISATION DES BOUES RESULTANT DE L'ALCALINISATION DES EAUX D'EXHAURE ACIDES DE CARRIERES PAR INCORPORATION DANS DES MATERIAUX COMMERCIALISABLES

Programme 1999 - 2002

2ème étape :  
Réalisation d'un pilote de terrain.  
Modélisation du comportement à long terme.



## SOMMAIRE GENERAL

Les partenaires de l'opération	c
Les intervenants	d
Les professionnels impliqués	e
Le comité de pilotage	f

### **Etude sur la valorisation des boues résiduares de l'alcalinisation des eaux d'exhaure acides de carrières**

#### **Incorporation dans des matériaux commercialisables**

#### **2<sup>ème</sup> étape : pilote de terrain et modélisation du comportement à long terme**

<b>I – Présentation et contexte de l'étude</b>	<b>1</b>
Rappels sur les eaux acides de carrière	1
La première étape de l'étude sur la valorisation des boues résiduares	2
<b>II – Objectifs et programme d'étude</b>	<b>4</b>
<b>III – Déroulement de l'étude et résultats préliminaires</b>	<b>8</b>
A. Déroulement de l'étude	9
B. Choix du matériau et de son utilisation – scénario	9
C. L'homogénéité des boues	11
D. Affinage de la formulation	13
E. Comportement au gel / dégel	16

<b>IV – Le pilote, la modélisation du comportement à long terme</b>	16
A. Le choix du chantier et la fabrication du pilote	17
B. Les tests paramétriques	20
C. Les tests de simulation	24
D. Modélisation et prédiction du comportement en scénario spécifié	31
<b>Conclusion générale</b>	34
<b>Illustration de la mise en place du pilote et de son suivi</b>	I
<b>Annexes</b>	IX

Annexe 1 : Caractérisation du comportement à la lixiviation des boues résiduaire de l'alcalinisation des eaux acides des carrières en scénario spécifié – caractérisation de la boue

Annexe 2 : Formulation de la grave-ciment et comportement mécanique

Annexe 3 : Comportement au gel des matériaux élaborés

Annexe 4 : Incorporation de la boue dans une grave-ciment et réalisation du pilote

Annexe 5 : Caractérisation du comportement à la lixiviation des boues résiduaire de l'alcalinisation des eaux acides des carrières en scénario spécifié – tests paramétriques

Annexe 6 : Caractérisation du comportement à la lixiviation des boues résiduaire de l'alcalinisation des eaux acides des carrières en scénario spécifié – rapport final

## LES PARTENAIRES DE L'OPERATION

**Comité National de la Charte Professionnelle des Producteurs de Granulats**

**Comités Régionaux de la Charte Professionnelle des Producteurs de Granulats**

*Région Basse Normandie*

*Région Pays de la Loire*

*Région Poitou – Charentes*

**Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie – ADEME**

*Délégation Régionale Bretagne*

**Communauté Européenne**

*Programme FEDER (objectifs 2 et 5b)*

**Conseil Régional de Bretagne**

*Délégation à l'Environnement*

**Conseil Général d'Ille-et-Vilaine** – *Direction des Routes, Infrastructures et Environnement,*  
pour le choix et la mise à disposition du chantier routier.

## LES INTERVENANTS

**Maître d'ouvrage** : **Comité Régional de la Charte Professionnelle des Producteurs de Granulats – Région Bretagne**  
2, allée du Bâtiment – 35 000 RENNES  
Tél. : 02 99 38 76 38 Fax : 02 99 38 33 47  
*Président* : M. Y. GAINCHE  
*Secrétaire Général* : M. C. CORLAY

**Maître d'œuvre** : **ENCEM – ENvironnement Carrières Et Matériaux**  
3, rue Alfred Roll – 75 849 PARIS cedex 17  
Tél. : 01 44 01 47 01 Fax : 01 40 54 03 28  
*Président* : M. C. GUIZOL  
*Directeur* : M. O. VERDIER

**Opérateurs** : **ENCEM – Antenne de NANTES**  
25, rue Jules Verne – 44 700 NANTES  
*Responsable d'antenne* : M. D. DEVAUX  
*Chargé de l'étude* : M. Ch. VANNIER

**INSAVALOR SA – Division POLDEN**  
Bât. CEI – 27, Bd du 11 novembre 1918  
B.P. 2132 – 69 603 VILLEURBANNE cedex  
Tél. : 04 78 89 51 65 Fax : 04 72 43 98 66  
*Responsables* : MM. J. MEHU et Y. PERRODIN  
*Suivi de l'étude* : Mme S. SEITZ CLERJON

**Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées – LRPC**  
Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de l'Ouest  
5, rue Jules Vallès – 22 015 SAINT BRIEUC cedex  
Tél. : 02 96 75 93 00 Fax : 02 96 75 93 10  
- « Matériaux et modélisations des chaussées »  
*Chef de section* : M. O. HAMEURY  
- « Matériels et construction des chaussées »  
*Chef de section* : M. G. HAMON

**Laboratoire des Transferts et Réactivité dans les Milieux Condensés**  
Université de Picardie Jules Verne  
IUT – Département Génie Civil  
Avenue des Facultés – 80 025 AMIENS cedex 01  
Tél./Fax : 03 22 53 40 16  
*Professeur* : Mme M. QUENEUDEC-T'KINT

## LES PROFESSIONNELS IMPLIQUES

**Ets A. BEAUCE**

35 – La Chapelle Janson

Fourniture de la boue

**Sté HENRY Frères**

35 – LA CHAPELLE SAINT AUBERT

Fourniture des granulats  
Fabrication de la grave-ciment

**Sté RENNAISE DE DRAGAGES – SRD**

35 – LE RHEU

Fourniture d'un bac agitateur

**Sté TPR**

*Agence de Rennes* – 35 – MONGERMONT

Mise ne œuvre du pilote de la  
VC n° 12

## LE COMITE DE PILOTAGE

Ce comité est réuni à l'initiative de l'UNICEM Bretagne.

- Monsieur le Président du Comité Régional de la Charte Granulats de Bretagne, responsable de l'opération
- Monsieur le Président de l'UNICEM Bretagne
- Monsieur le Président du Comité National de la Charte Granulats ou son représentant
- Messieurs les Présidents des Comités Régionaux de la Charte Granulats Basse-Normandie, Pays de la Loire et Poitou-Charentes ou leurs représentants
- Représentants des opérateurs :
  - ⇒ ENCEM
  - ⇒ INSAVALOR-POLDEN
  - ⇒ LRPC de Saint Briec
  - ⇒ IUT Génie Civil d'Amiens
- Représentants des partenaires financiers tiers :
  - ⇒ Conseil Régional de Bretagne
  - ⇒ Union Européenne (DRIRE Bretagne)
  - ⇒ ADEME Bretagne

## ETUDE SUR LA VALORISATION DES BOUES RESIDUAIRES DE L'ALCALINISATION DES EAUX D'EXHAURE ACIDES DE CARRIERES

### Incorporation dans des matériaux commercialisables

### 2<sup>ème</sup> étape : pilote de terrain et modélisation du comportement à long terme

## I - PRESENTATION ET CONTEXTE DE L'ETUDE

### *RAPPELS SUR LES EAUX ACIDES DE CARRIERES*

Depuis une dizaine d'années, les producteurs de granulats du Massif Armoricaïn sont confrontés, sur un certain nombre de sites, à des **rejets d'eaux d'exhaure présentant un caractère particulièrement acide** et de très fortes teneurs en éléments métalliques dissous (fer, aluminium, manganèse, cuivre, nickel, zinc,...).

Un recensement rapide à l'échelle du bassin breton a permis de mettre en évidence que ce phénomène touche, dans les quatre départements, une vingtaine de sites de production de granulats concassés de roches massives.

Devant les conséquences de tels rejets et l'ampleur du phénomène, les **professionnels** se sont immédiatement mobilisés pour mener, **à partir de 1991**, avec la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement de Bretagne et le BRGM, **des études** permettant d'acquérir un certain nombre de données sur le développement de ce phénomène (origine, processus en jeu,...) et sur le bilan des actions curatives engagées.

Les **cinq principales conclusions** de ces études sont les suivantes :

- le phénomène connaît un **développement** dans les unités géologiques, principalement **métamorphiques**, du Massif Armoricaïn ;
- **l'oxydation des minéralisations sulfurées** (pyrite, ...) contenues dans la roche joue un rôle prédominant dans le développement de ce phénomène ;

- **les traitements chimiques de l'eau par alcalinisation** (apport de calcaire ou de chaux, ...) mis en place par les professionnels, donnent des résultats intéressants pour la remontée du pH et la précipitation de la plupart des éléments métalliques ; ce qui autorise le rejet des eaux traitées vers le milieu extérieur ;
- ces traitements nécessitent la mise en place d'une infrastructure le plus souvent difficile à gérer (surveillance constante, coûts onéreux, ...) ;
- les **boues résultant de ces traitements**, plus ou moins liquides en fonction du type de traitement mis en œuvre, **concentrées en métaux** et **chimiquement instables en milieu acide**, nécessitent une gestion particulière du fait de leurs caractéristiques, pour répondre aux exigences environnementales et réglementaires.

## ***LA PREMIERE ETAPE DE L'ETUDE SUR LA VALORISATION DES BOUES RESIDUAIRES***

Après la maîtrise des traitements des eaux acides, la résolution du problème spécifique posé par l'instabilité des boues résiduelles a constitué le second volet des études menées par la profession dans ce domaine.

En effet, le stockage sur site présentant un risque de redissolution des métaux contenus dans les boues par les eaux acides ruisselant sur la carrière, les différentes possibilités de gestion de ces boues pouvant être envisagées sont :

- un stockage sur site selon une procédure technique particulière (après stabilisation, mise en alvéole spécifique et contrôle des lixiviats,...), solution qui, a priori, semble onéreuse et susceptible de créer des difficultés d'ordre réglementaire, en particulier par le fait que ce type de stockage rentrerait dans la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement et devrait faire l'objet d'une autorisation et de garanties financières ;

- un stockage en centre d'enfouissement technique qui nécessiterait également une stabilisation préalable des résidus. Cette solution entraînerait des coûts supplémentaires liés à cette stabilisation, au transport et à la mise en décharge ;
- une valorisation de ces produits en particulier dans des matériaux commercialisés à partir des centres de production des granulats, notamment dans le domaine de la viabilité. Cette solution semblerait la mieux adaptée sous réserve qu'elle réponde aux exigences géotechniques et chimiques des produits susceptibles de contenir ces résidus.

**Un stockage sur site ou en centre d'enfouissement technique apparaissant comme des solutions difficiles à mettre en place et onéreuses, la valorisation de ces boues est rapidement apparue comme une voie intéressante. Depuis 1997, la profession a donc orienté ses efforts sur cet objectif.**

Une première étude, menée en 1997 – 1998 avec le concours du Conseil Régional de Bretagne, de la Communauté Européenne (programme FEDER) et de l'ADEME, a consisté à **vérifier la faisabilité technique de l'incorporation des boues** dans différents produits tels que des matériaux de viabilité (grave-ciment, grave-bitume) et des bétons (plus ou moins riches en ciment).

Pour cela, les boues de quatre carrières différentes ont été choisies en fonction de la nature de la roche exploitée et du type de traitement des eaux en place. Après caractérisation, elles ont été incorporées (3% de la fraction fine) dans différents types de matériaux reformulés pour tenir compte de cet apport supplémentaire.

Des essais mécaniques (Optimum Proctor, tests de résistance à la compression et à la traction, ...) et de comportement à la lixiviation (test de percolixiviation en colonne, test de sensibilité chimique...), ont été réalisés.

Les résultats de ces différents essais font apparaître que l'incorporation de boue dans les matériaux contenant un liant (ciment, bitume, ...), ne modifie pas sensiblement leur comportement mécanique et chimique :

- en règle générale (le béton type parpaing fait exception) l'adjonction de boue dans les matériaux n'entraîne **pas de dérive significative des propriétés mécaniques** par rapport aux matériaux témoins (sans boue) ;
- le **comportement à la lixiviation à moyen terme est très proche de celui des témoins** car les liants utilisés créent une rétention,
- la **sensibilité chimique des matériaux reste également comparable à celle des témoins**. Le comportement des produits formulés est très bon en conditions neutres et basiques. Le relargage devient plus important en milieu acide en particulier à des pH très bas. Il s'agit d'une caractéristique intrinsèque des matériaux puisque les témoins ont le même comportement. Les quantités relarguées restent cependant extrêmement faibles.

Dans ces conditions, **l'incorporation de boue** dans les matériaux contenant un liant **pouvait être envisagée**.

## II. – OBJECTIFS ET PROGRAMME D'ETUDE

Les résultats de laboratoire obtenus lors de la première phase sont importants mais ils ne permettent toutefois pas de conclure définitivement. En effet, pour **valider une procédure complète de valorisation des boues** pouvant être mise en œuvre individuellement par les exploitants de carrière, il convenait de passer à **l'échelle du pilote de terrain** permettant de déterminer et de **modéliser le comportement à long terme des matériaux**. C'est le but de la **seconde étude** lancée en février 1999.

Cette étude repose sur des **tests paramétriques similaires** à ceux déjà réalisés et surtout sur des **simulations au laboratoire et sur le terrain**.

Vu le coût et la complexité de la démarche entreprise, il a été décidé de ne réaliser cette étude que sur un type de matériau, la **procédure à valider étant la même pour tous**.

Ce programme comprend sept étapes successives :

**1) Choisir le matériau** à tester et son utilisation.

Il s'agit de la confection d'une grave-ciment en vue d'une utilisation en technique routière.

**2) Elaborer un scénario** qui consiste à définir très précisément les conditions futures de mise en oeuvre et le contexte (contraintes particulières, situation hydrogéologique, durée de vie, conditions météorologiques,...) qui seront fonction du chantier où le pilote sera installé. La définition de ce scénario est une condition sine qua non à la modélisation du comportement à long terme du matériau.

**3) Etudier l'homogénéité des boues** en carrière (granulométrie, teneur en eau, âge de maturation, composition chimique) qui est un critère nécessaire pour envisager leur utilisation.

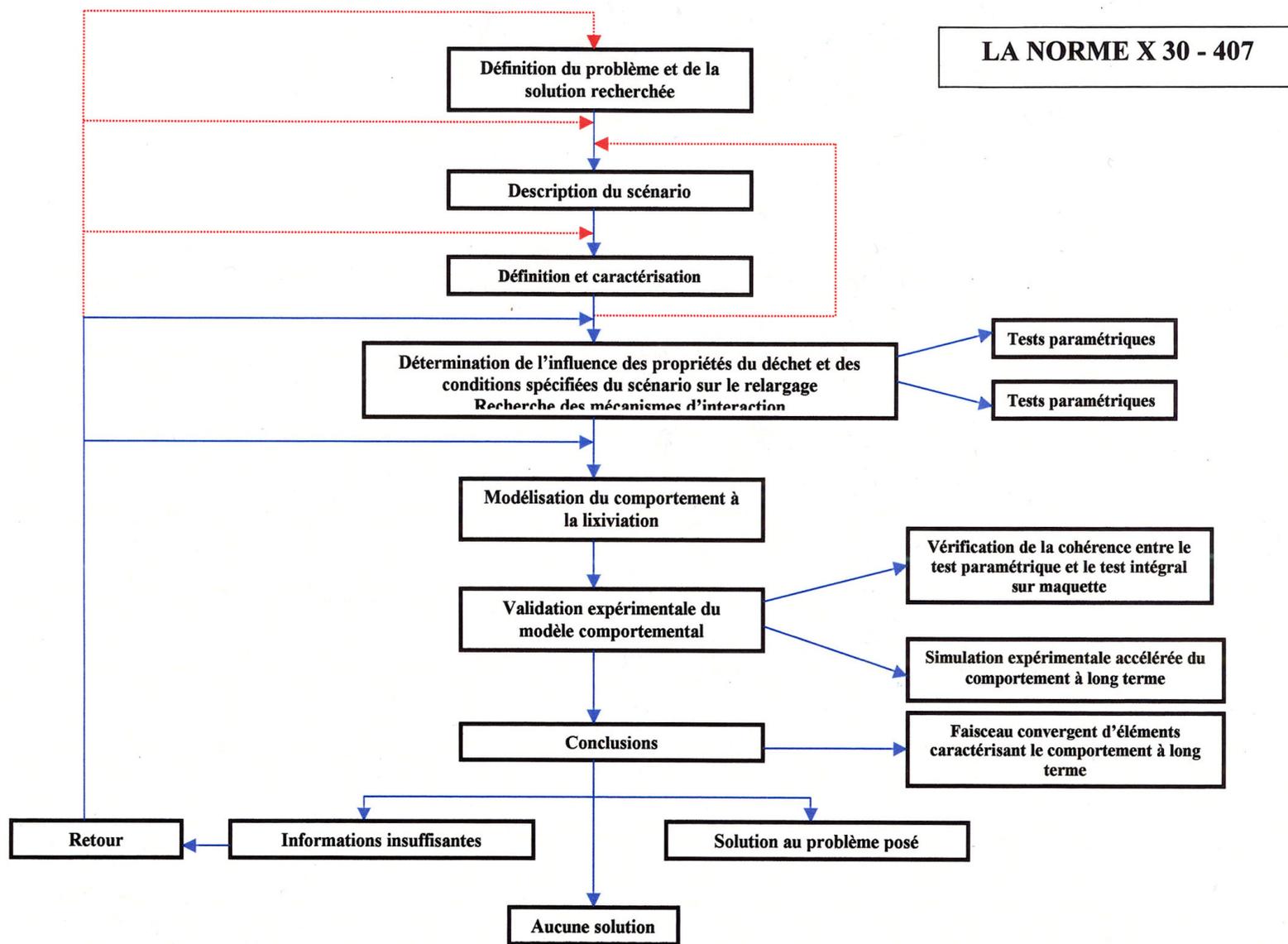
**4) Affiner la formulation** afin de déterminer le pourcentage optimal en liant et de suivre, sur des éprouvettes, l'évolution des performances mécaniques sur une année.

**5) Comportement au gel-dégel** du matériau

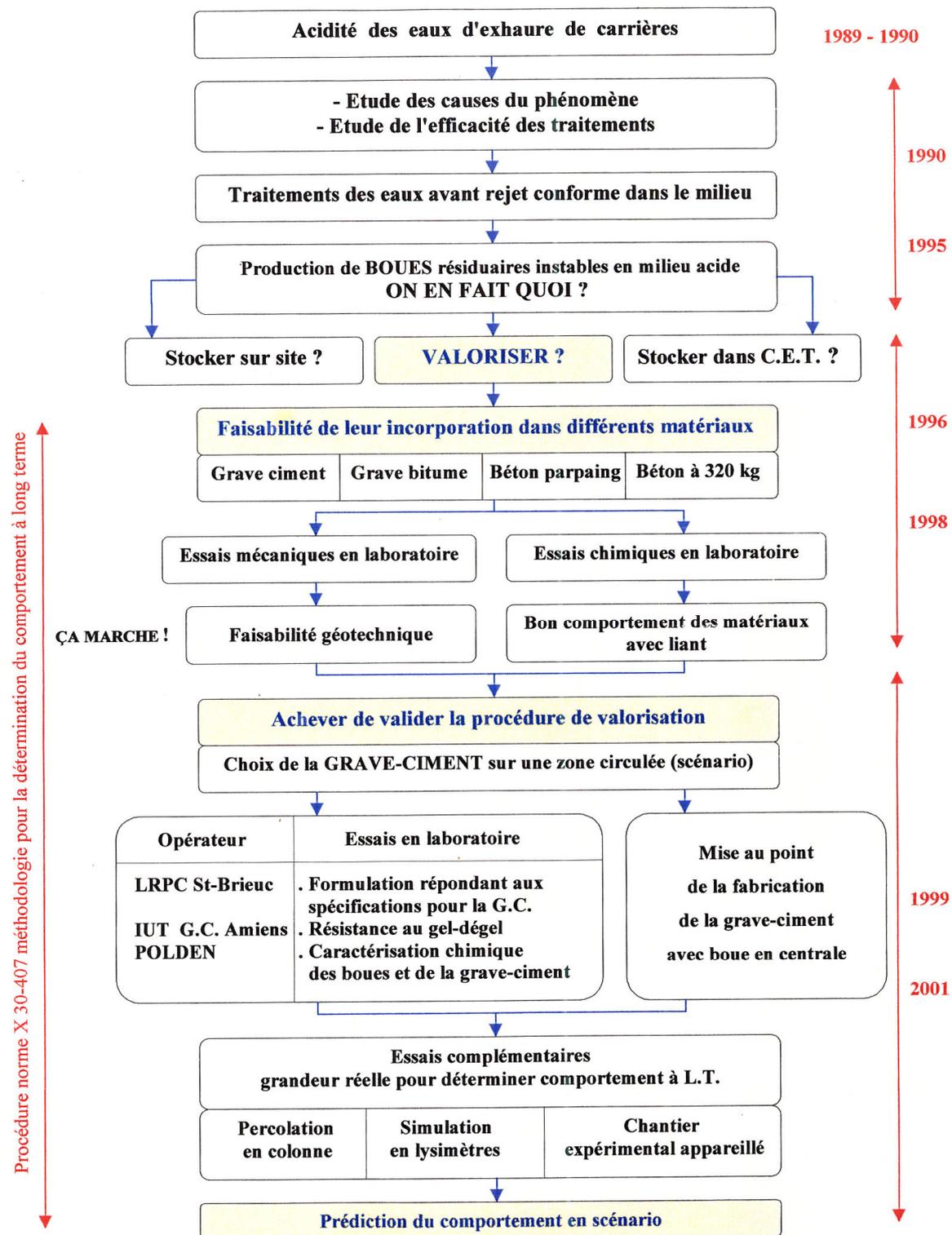
Cette donnée semble importante à intégrer dans les informations nécessaires à la construction du modèle.

Après maturation de 28 jours des éprouvettes, ces dernières sont mises en immersion. Elles subissent ensuite 20 cycles de froid (jusqu'à - 15°C) . A l'issue de ce traitement, leur résistance mécanique est comparée au témoin, la perte de masse est mesurée.

**6) Déterminer la méthode d'incorporation des boues** en centrale de façon à s'assurer de l'homogénéité et de la dispersion des boues dans le mélange.



UNICEM Bretagne



Déroulement de l'étude - Intégration de la démarche normalisée

## 7) Modéliser le comportement à long terme.

Cette étape est composée de **deux parties principales** :

- l'établissement d'un **modèle de comportement sur la base des tests paramétriques** précédemment réalisés et de l'acquisition précise des données du scénario de valorisation choisi ;

- la **validation / calibration du modèle** établi précédemment grâce à la mise en oeuvre de **tests de simulation (au laboratoire et sur le terrain)**. Ces essais consistent à reproduire le plus fidèlement possible (au laboratoire et sur le terrain) les conditions du scénario de manière à suivre le relargage réel des polluants potentiels pendant une certaine durée (plusieurs mois au moins). L'intérêt de la réalisation d'essais de simulation au laboratoire et sur le terrain réside dans leur complémentarité :

- \* les essais de laboratoire permettent une première validation du modèle de comportement dans des conditions de maîtrise parfaite des paramètres qui agissent sur le relargage des polluants ;
- \* les essais de laboratoire permettent de préparer les essais à grande échelle et de mettre en évidence les éventuels problèmes rencontrés ;
- \* les essais de terrain permettent une validation du modèle de comportement à grande échelle dans des conditions réelles ;
- \* les essais de terrain permettent de mettre en évidence d'éventuels paramètres secondaires à prendre en compte dans le modèle de comportement à long terme.

A noter que le modèle théorique établi a pour but d'étendre l'interprétation des résultats :

- \* sur le long terme qui n'est pas simulable expérimentalement,
- \* à une fluctuation des conditions d'environnement (ex. : variation du pH des eaux qui atteindront les matériaux).

Le déroulement prévu de cette caractérisation du comportement d'un matériau dans des conditions données de façon à juger de la compatibilité avec l'environnement d'un couple matériau – scénario de mise en oeuvre entre totalement dans **le contexte normatif français et européen** (norme X 30 – 407) qui détermine le déroulement des études de ce type (voir

schémas p.6, « la norme X 30 – 407 » et « déroulement de l'étude et intégration de la démarche normalisée ».

Les résultats obtenus, en particulier les tests paramétriques, offrent par ailleurs la possibilité de tester **une solution de repli** en cas d'incompatibilité des matériaux contenant de la boue avec une utilisation normale. Ils permettent en effet d'explorer un **scénario « classe III »** déjà entièrement défini par ailleurs qui consisterait à stocker les matériaux en carrière ou en installation de stockage de déchets inertes.

**8) Contrôle de la fabrication** et de la mise en œuvre des matériaux et suivi de la planche d'essai

Pour réaliser l'expérimentation dans des conditions optimales, il conviendra de s'assurer du respect des dosages, des épaisseurs et des compacités.

### **III. – DEROULEMENT DE L'ETUDE ET RESULTATS PRELIMINAIRES**

Les résultats présentés ci-dessous font l'objet de rapports spécifiques établis par les différents opérateurs qui sont intervenus dans la réalisation des essais et des analyses. Ces rapports sont joints en annexe à ce dossier :

- Annexe 1 : Caractérisation du comportement à la lixiviation des boues résiduelles de l'alcalinisation des eaux acides des carrières en scénario spécifié – caractérisation de la boue
- Annexe 2 : Formulation de la grave-ciment et comportement mécanique
- Annexe 3 : Comportement au gel des matériaux élaborés
- Annexe 4 : Incorporation de la boue dans une grave-ciment et réalisation du pilote
- Annexe 5 : Caractérisation du comportement à la lixiviation des boues résiduelles de l'alcalinisation des eaux acides des carrières en scénario spécifié – tests paramétriques
- Annexe 6 : Caractérisation du comportement à la lixiviation des boues résiduelles de l'alcalinisation des eaux acides des carrières en scénario spécifié – rapport final

### ***A - Déroulement de l'étude***

L'étude a été lancée le 9 février 1999 lors d'une réunion du comité de pilotage qui s'est tenue à RENNES.

Les étapes 3, 4 et 5 ont été réalisées entre juin 1999 et mars 2000.

Par la suite, la recherche du chantier expérimental répondant aux critères de faisabilité : configuration adaptée, matériaux utilisés, proximité par rapport à la centrale de grave-ciment, accord du maître d'ouvrage,... a pris du temps. De surcroît, les mauvaises conditions météorologiques ont conduit au report du chantier. Le pilote a été mis en place les 11 et 12 juin 2001. Le suivi de ce pilote (prélèvements des percolats sur le pilote et le témoin pour analyses chez INSAVALOR – Polden) a ensuite été effectué régulièrement par ENCEM avec un pas de temps variable adapté à l'évolution du pilote (échantillonnage plus resserré en début de suivi,...) et des conditions météorologiques.

Parallèlement, les essais au laboratoire et sur les lysimètres ont été menés à leur terme.

### ***B – Choix du matériau et de son utilisation - Scénario***

#### Le matériau

Même s'il s'agit d'une technique actuellement peu utilisée, le choix du matériau s'est porté sur la fabrication d'une **grave-ciment** car elle permet de s'affranchir d'un certain nombre de paramètres techniques difficiles à régler dans le cadre de la réalisation d'un pilote visant à l'étude du comportement mécanique et chimique.

Par exemple, la grave-ciment, contrairement à une grave-bitume, ne nécessite pas de traitement particulier de la boue en terme d'humidité (tant que la teneur en eau de cette dernière n'entraîne pas un excès d'eau dans la grave).

Par ailleurs, une centrale de grave-ciment est un matériel fréquemment rencontré sur les carrières contrairement aux centrales à béton ou aux centrales d'enrobage.

L'étude ne pouvant porter également que sur un produit, le type de boue a donc également fait l'objet d'un choix. Dans un souci de représentativité, la **boue** retenue est issue d'un gisement de **roche métamorphique** (une cornéenne) et d'un **traitement au calcaire avec appoint de chaux**, traitement largement rencontré en carrière. Ce type de boue présente par ailleurs l'avantage d'être plus facilement manipulable que des boues plus hydrophiles issues de traitement à la chaux ou à la soude.

Compte tenu des résultats des essais pratiqués lors de la première étude sur ce type de boue, le **pourcentage d'incorporation** dans la grave-ciment retenu a été de **3% de la fraction 0/4 en masse sèche**.

### L'utilisation

Cette grave-ciment sera utilisée en **technique routière**. Il a été décidé de choisir une **zone circulée** (parking ou route) pour assurer des conditions de vieillissement normales de la structure et vérifier que les matériaux réalisés seront utilisables en conditions réelles.

### Le scénario

Il s'agit ici de définir très précisément les conditions futures de mise en œuvre et le contexte.

Ce scénario, bâti au moment de la modélisation en fonction du chantier retenu pour l'implantation du pilote, prendra notamment en compte : le type de structure (route, parking,...), l'épaisseur, le recouvrement, la circulation, la durée de vie, les conditions météorologiques,...

### ***C – L’homogénéité des boues***

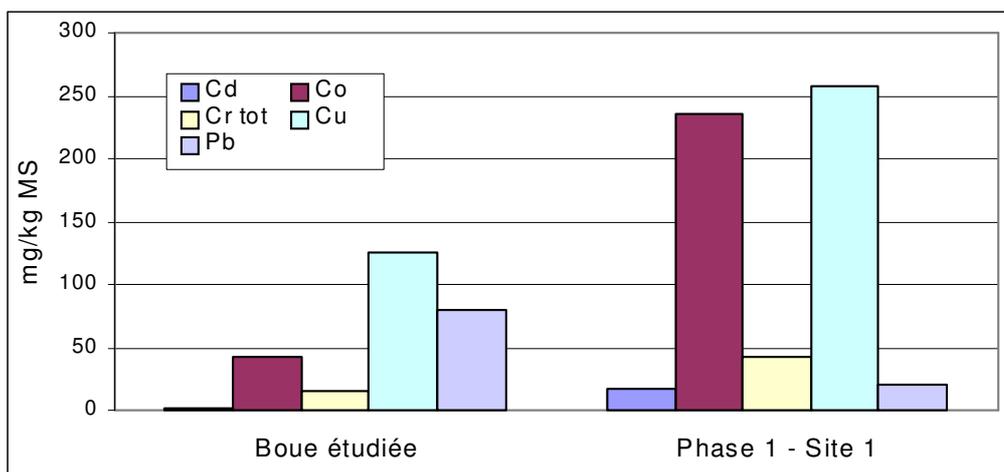
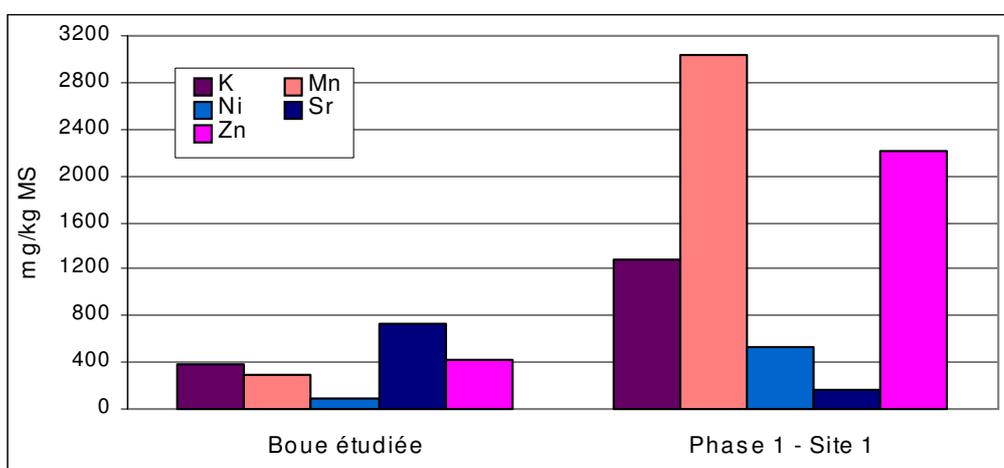
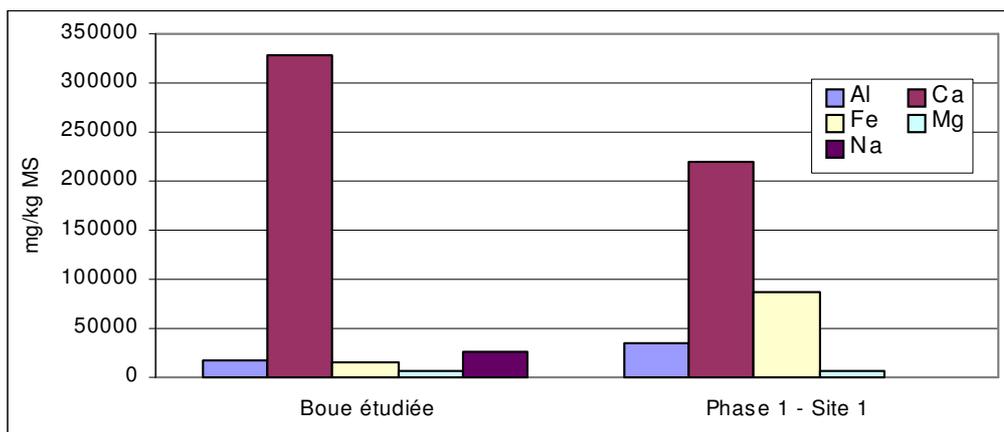
La caractérisation des boues utilisées est indispensable pour envisager leur utilisation. On doit également vérifier leur homogénéité physico-chimique.

Pour cela, un échantillon représentatif de boue (mélange de plusieurs prélèvements réalisés de façon aléatoire sur la zone de stockage) a été prélevé le 8 juin 1999. Il s’agissait d’une boue comparable (même site de carrière : même gisement, même traitement,...) à celle utilisée plus tard pour la fabrication du pilote .

La caractérisation de cette boue a été réalisée par Polden. Les analyses et commentaires figurent à l’annexe 1 du présent document.

Les principaux résultats sont les suivants :

- la teneur en eau est de 161 % ce qui représente un pourcentage de matière sèche de 38 %. Cette valeur permet d’envisager l’incorporation de la boue dans la grave sans séchage préalable. On verra par la suite les difficultés pratiques rencontrées pour sa manipulation et son mélange.
- en terme de granulométrie, 97 % du matériau sont de dimension inférieure à 80 µm.
- les principales caractéristiques physico-chimiques sont un pH égal à 7,7, une conductivité élevée de 1265 µS/cm et un potentiel d’oxydo-réduction de 175 mV / ENH.
- les teneurs en métaux sont reportées sur les graphes ci-contre.



**Composition chimique de la boue issue d'un traitement au calcaire avec appoint de chaux**

La comparaison avec les résultats des analyses pratiquées sur les boues du même site lors de la première étape de l'étude fait apparaître des différences de concentration pour certains éléments métalliques. Le complément de traitement par apport de chaux qui n'était pas pratiqué auparavant conduit à une réduction importante des teneurs en cadmium (facteur 10), manganèse (facteur 10), cobalt (facteur 5), nickel (facteur 5), zinc (facteur 5), et dans une moindre mesure des teneurs en chrome total, potassium et cuivre. Au contraire, les concentrations en plomb et strontium sont plus fortes.

Comme on le verra dans les paragraphes suivants, ces variations sont cependant sans conséquence importante sur le comportement de la boue.

Il convient de noter qu'une caractérisation a également été réalisée sur les granulats (granulométrie, coefficient d'aplatissement, Los Angelès,...) et le ciment (chaleur d'hydratation, teneur en sulfures,...) entrant dans la composition de la grave-ciment. Ces résultats sont présentés en détail dans le rapport du LRPC joint en annexe 2.

#### ***D – Affinage de la formulation***

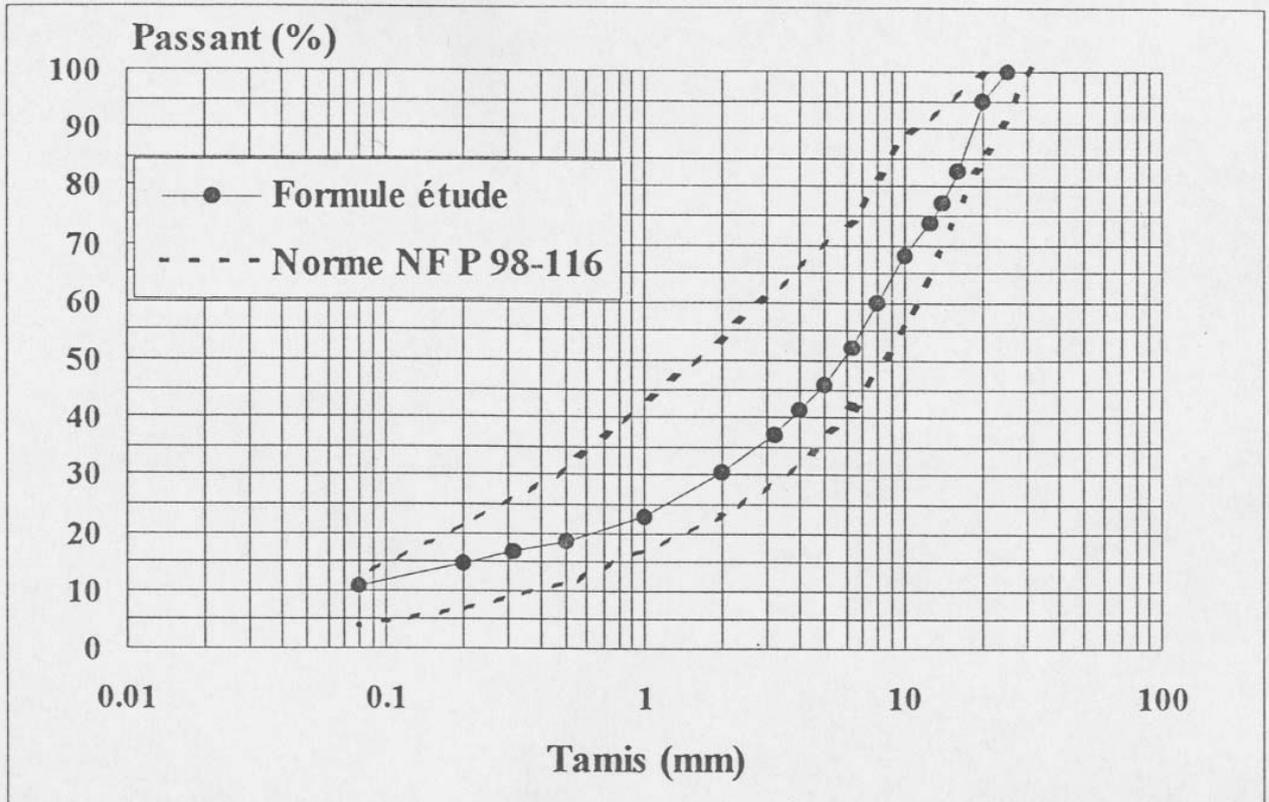
Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint Briec a effectué les essais mécaniques permettant de déterminer la formulation précise à mettre en œuvre sur le pilote et qui respecte les spécifications concernant ce type de chantier (normes NF P 98-116 et NF P 98-114-1 relatives à l'étude des graves traitées).

Ces spécifications sont les suivantes :

- Compacité minimale à l'Optimum Proctor Modifié : 80 %
- Dosage en liant de 3 à 4 %
- Délai de maniabilité minimal de 6 heures
- IQE<sup>1</sup> à 1 an de 20 à 25 cm (classe G3)

---

<sup>1</sup> IQE = Indice de Qualité Elastique



Courbe granulométrique du mélange

Après maturation de 28 jours des éprouvettes normalisées, les essais suivants ont donc été réalisés :

- essais Proctor modifié (NF P 98-231-1) : teneur en eau optimale de compactage et densité sèche correspondante,
- détermination du délai de maniabilité (NF P 98-231-5)
- essais de traction directe (NF P 98-232-2) : évaluation des propriétés mécaniques de la grave-ciment et déduction du pourcentage de liant optimal pour la classe de performance choisie.

Les résultats de ces différents essais sont détaillés en annexe 2 du présent document. Ils ont permis de définir la formulation suivante pour obtenir une grave-ciment de classe G3 :

• Granulats	:	fraction 0/4 = 39,5%
		fraction 4/10 = 22%
		fraction 10/20 = 34,3%
• Boues	:	1,2% en masse sèche (soit 3,13%)
• Ciment	:	3% (CPJ CEM II/A 42,5 (L) CP2)
• Retardateur	:	1% (Sika Plastiroute)
• Masse volumique réelle du mélange	:	2,736 Mg/m <sup>3</sup>
• Teneur en eau à l'OPM	:	5,7 %
• Masse volumique apparente à l'OPM	:	2,31 g/cm <sup>3</sup>
		(compacité de 84 %)

### ***E – Comportement au gel / dégel***

Les essais ont porté sur 20 cycles de 24 heures. **La grave-ciment fabriquée avec de la boue présente un très bon comportement à l’alternance gel / dégel** (cf. rapport de l’IUT Génie Civil d’Amiens annexe 3).

La résistance est même légèrement plus élevée que pour le témoin (grave-ciment sans boue).

L’étape suivante du programme d’étude relative à l’incorporation des boues dans la grave-ciment est présentée dans le cadre du chapitre IV.A concernant la fabrication de cette dernière.

## **IV. – LE PILOTE, LA MODELISATION DU COMPORTEMENT A LONG TERME**

L’établissement d’un modèle de comportement permet d’étendre la simulation au long terme qui ne peut être approché expérimentalement. Le modèle permet également de prendre en compte les variations des conditions d’environnement (variation du pH baignant les matériaux,...).

Pour cela, on s’appuie sur les tests paramétriques identiques à ceux réalisés lors de la première étape de l’étude et sur l’acquisition précise des données du scénario.

Une fois établi, ce modèle doit être validé et calibré par le biais de tests de simulation.

Ces tests, réalisés au laboratoire et sur le terrain visent à reproduire fidèlement les conditions du scénario pour suivre le relargage réel des polluants potentiels.

### ***A – Le choix du chantier et la fabrication du pilote***

La fabrication de la grave-ciment et du pilote ainsi que le suivi de ce dernier sont illustrés par les planches photographiques présentées à la fin du rapport.

#### **Le chantier**

Le chantier retenu se trouve à Saint Brice en Coglès. Il correspond à la réalisation de la Voie Communale n° 12 dans le cadre de la déviation Saint Etienne en Coglès / Saint Brice en Coglès.

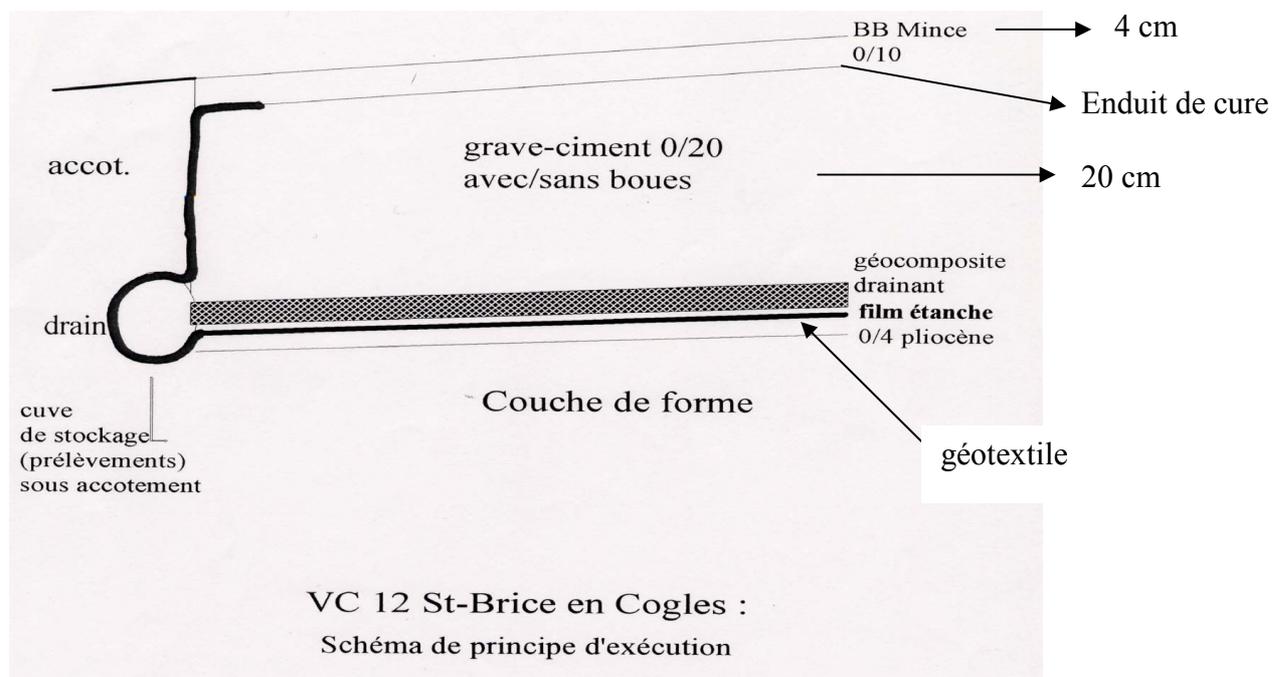
Il s'agit d'une route circulée (estimation à 100 véhicules par jour) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- chaussée de 4 m de largeur en dévers unique vers la gauche,
- pentes longitudinales et latérales de 2,5 %,
- structure de la chaussée en Grave Non Traitée (GNT) et couche de roulement en enrobé.

Les planches d'essai ont été implantées au Sud-Ouest du Pont des Corbinières.

### La configuration du pilote

Au niveau de cette route, la configuration du pilote et de son témoin est présentée sur le schéma ci-dessous :



Le pilote et le témoin ont chacun une **superficie de 100 m<sup>2</sup>**. Le géotextile et le géocomposite sont destinés à éviter le poinçonnement du film polyane étanche. L'enduit de cure est léger pour permettre l'infiltration de l'eau dans la structure. Les cuves de stockage des eaux percolant au travers de la grave-ciment ont une capacité de 3 m<sup>3</sup> et sont équipées de seau à prélèvement (récupération séparée pilote / témoin).

### La fabrication de la grave-ciment

La fabrication de la grave-ciment a été réalisée dans une centrale à béton à pilotage entièrement manuel spécialement reconditionnée pour le chantier et contrôlée par le LRPC de Saint Briec.

Les gâchées étaient de 1 m<sup>3</sup>.

La principale difficulté lors de la fabrication de la grave-ciment a été le transport de la boue de la carrière jusqu'à la centrale et son intégration dans la formulation.

En effet, sa consistance et sa teneur en eau n'ont pas permis son transport ni son mélange direct dans le produit (soit on ne pompait que de l'eau, soit les pesons de la centrale étaient rapidement colmatés). Une solution de secours a donc été mise en œuvre qui a consisté à mettre la boue en sacs de masse connue (32 kg, nécessité de connaître la teneur en eau et de peser chaque sac) et à vider ces derniers directement dans le malaxeur (2 sacs par gâchée).

Cette solution « rudimentaire » a été choisie pour limiter les investissements compte tenu de la quantité réduite de grave-ciment à fabriquer. Il est clair que dans le cadre d'un développement « industriel » de cette pratique, des modalités de transfert et de mélange mieux adaptées et moins contraignantes devront être mises en place. Plusieurs pistes pourraient être explorées :

- le séchage préalable des boues (lit de séchage, presse à boue,...) pourrait être une solution intéressante pour incorporer les boues sous forme solide ;
- l'incorporation par mélange de la boue à l'eau d'ajout nécessaire à la fabrication de la grave-ciment à partir d'un bassin tampon d'homogénéisation. Le schéma et le choix du type de pompe devront être adaptés au mode de fonctionnement de la centrale utilisée (centrale continue pour grave hydraulique ou centrale à béton de type discontinu). Les pompes utilisées pourraient être des pompes à tube Bredel ou des pompes à rotor excentré.

#### La mise en place du pilote

Cette mise en place s'est déroulée sur deux jours.

Le 11 juin 2001, l'appareillage du pilote (géotextiles, membranes étanches et drains) a été installé pour que la grave-ciment puisse être mise en œuvre, compactée et nivelée le 12 juin 2001.

Après nivelage, la densité sèche était de 2,2 soit 95 % de l'Optimum Proctor Modifié (100 % de l'OPM pour une densité de 2,31).

Un lysimètre a été construit simultanément au pilote avec le même compactage. Il a été enlevé après une période de durcissement de 10 jours au minimum. Ses dimensions sont de 1,2 m x 1,2 m pour permettre une découpe ultérieure à 1 m x 1 m et éviter les effets de bord.

L'enduit de cure et l'enrobé ont été posés respectivement le 13 et le 22 juin 2001.

L'ajustement de la formule de reconstitution aux contraintes pratiques de terrain, le suivi de la fabrication de la grave-ciment et du pilote sont présentés en détail à l'annexe 4 du présent rapport.

### ***B – Les tests paramétriques***

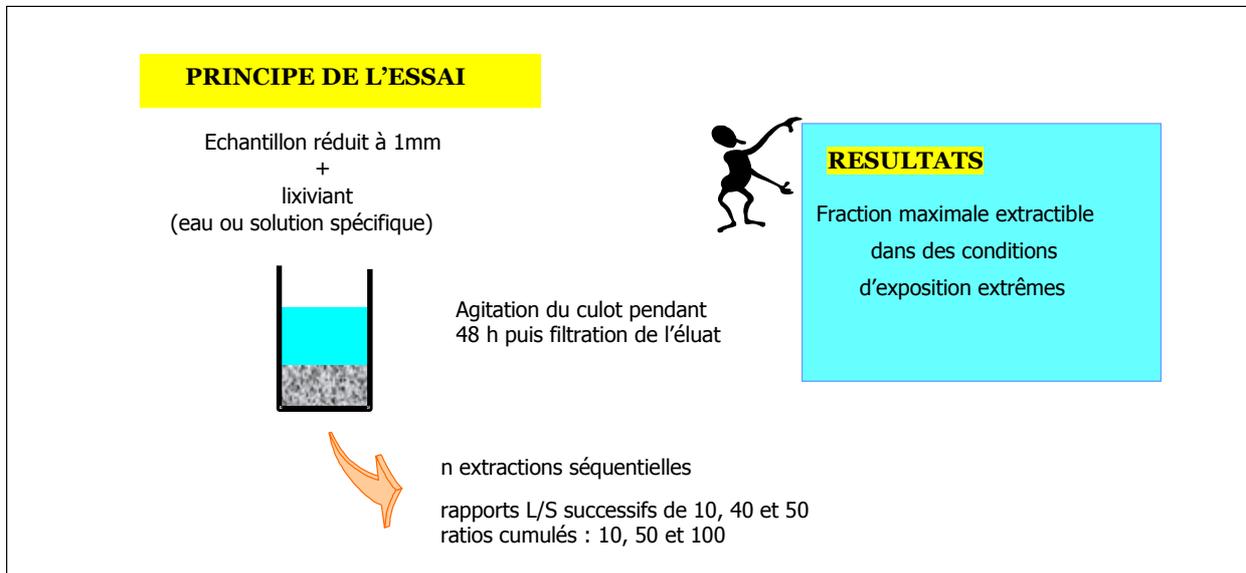
Les tests paramétriques, indispensables pour caractériser le comportement du matériau, ont dû être réactualisés par rapport aux tests pratiqués lors de la première étape de l'étude en raison de la modification du procédé de traitement intervenue entre les deux phases.

Deux types de tests ont été réalisés :

- La détermination de la **fraction mobilisable**. Il s'agit de déterminer le maximum extractible pour une espèce donnée dans les conditions physico-chimiques du scénario de lixiviation. Dans le cas présent, trois contextes chimiques fixés par le pH ont été retenus :
  - ➔ Contexte imposé par le matériau lui-même : l'échantillon est mis en contact avec de l'eau déminéralisée,
  - ➔ pH = 4
  - ➔ pH = 12

Le protocole de l'essai consiste en une extraction séquentielle : le même échantillon est mis en contact avec la solution en utilisant des rapports masse de liquide / masse sèche de plus en plus importants.

Il est présenté de façon schématique sur la figure ci-dessous.



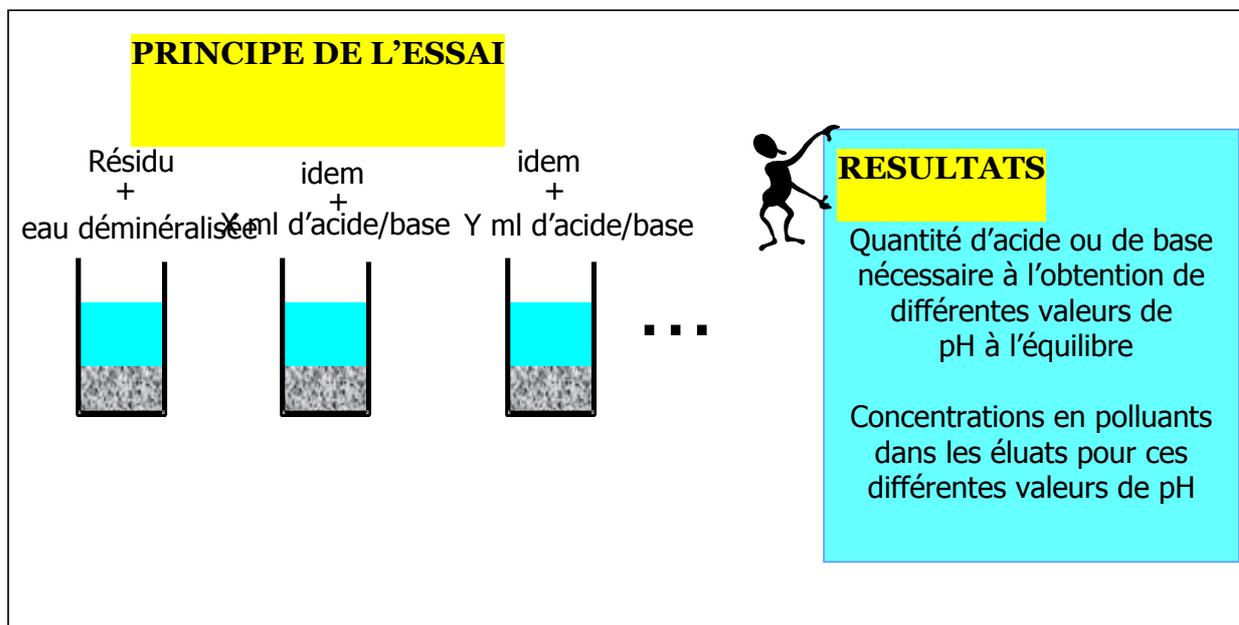
### Fraction maximale mobilisable

- **Influence du pH en conditions stationnaires**

Ce test a pour but d'étudier le comportement d'un matériau face à des agressions acido-basiques. Il permet de caractériser deux paramètres du comportement : la capacité de neutralisation acido-basique (stabilité physico-chimique et résistance à l'agression) et la disponibilité des polluants.

L'essai se déroule en parallèle sur plusieurs échantillons chacun d'eux étant immergé dans une solution avec un rapport masse de liquide / masse sèche de 10. La solution est composée d'eau déminéralisée seule ou additionnée d'une quantité connue d'acide ou de base.

Le protocole expérimental de ce test est présenté sur la figure ci-dessous.



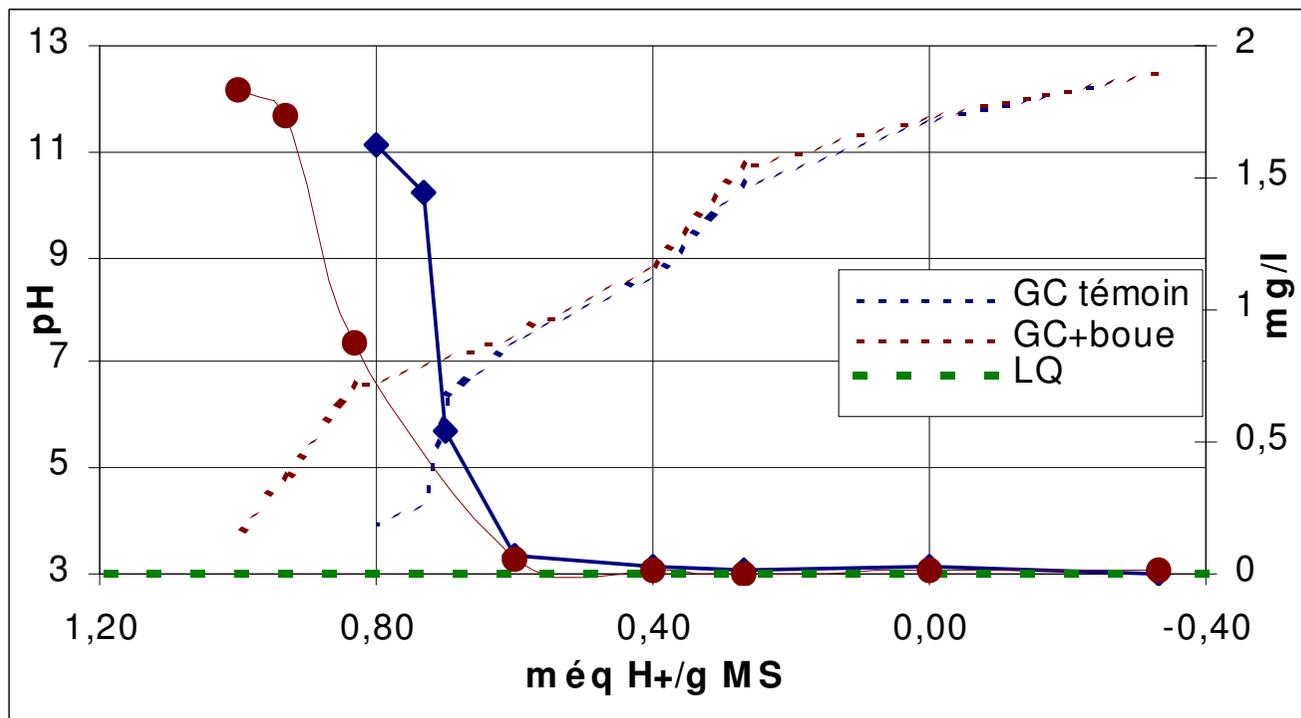
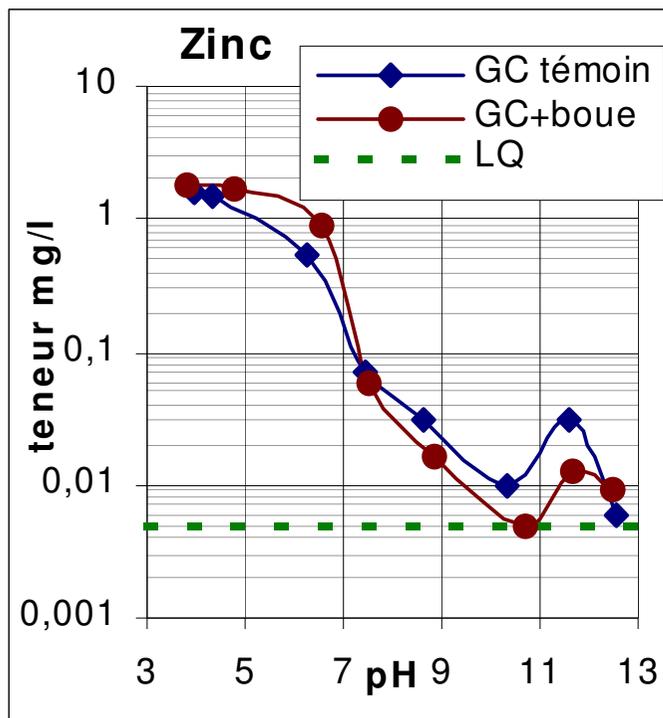
### Influence du pH en conditions stationnaires

Les résultats détaillés de ces deux types de tests sont présentés dans le rapport de POLDEN figurant en annexes 5 et 6 du présent document.

La figure ci-après illustre, à titre d'exemple, ces résultats pour le zinc.

Le premier graphe montre le comportement du zinc, c'est-à-dire son relargage, en fonction de l'évolution du pH. La grave-ciment avec boue et le témoin ont un comportement strictement comparable et le relargage n'est significatif qu'à des pH très bas.

Le second graphe présente la concentration dans le lixiviat et le pH de la solution en fonction de la quantité d'acide/base ajoutée exprimée en milli-équivalent de proton par gramme de matière sèche. Il permet de rapprocher les concentrations relarguées au niveau d'agression chimique et d'illustrer la réponse du matériau en terme de pH. On constate que le témoin répond moins bien à l'agression que la grave-ciment avec boue : à quantité d'acide ajoutée égale, la teneur en zinc relarguée est plus importante et le pH du matériau est plus bas.



*Disponibilité du Zinc – Acide nitrique*

Les résultats des tests pour les autres éléments (calcium, chrome, plomb, strontium ,...) sont présentés dans le rapport POLDEN.

D'une façon générale, les principales conclusions de ces tests paramétriques sont les suivantes :

- La grave-ciment avec boue a un comportement similaire au témoin ;
- Le relargage est très légèrement supérieur mais reste très faible (remobilisation seulement à pH inférieur à 4) ;
- La capacité de résistance aux agressions acides est plus importante pour la grave-ciment avec boue que pour le témoin.

### *C – Les tests de simulation*

Les tests de simulation sont de deux types :

- Les **essais en laboratoire** qui permettent une maîtrise parfaite des paramètres qui agissent sur le relargage des polluants. Il s'agit de tests de percolation sur colonnes et du suivi des percolats des lysimètres. Deux lysimètres différents sont réalisés :
  - ➔ Un **lysimètre « phase chantier »** qui correspond à la phase critique pour la structure en terme de relargage car pendant cette période la grave-ciment n'est pas protégée. Ce lysimètre a été suivi pendant 15 jours avec une alimentation en eau maîtrisée. Un témoin sans boue a été fabriqué.
  - ➔ Un **lysimètre fabriqué dans les mêmes conditions et en même temps que le pilote** de terrain (mais sans recouvrement d'enrobé). Il a été prélevé après une période de durcissement d'une dizaine de jour. Ce lysimètre a permis un suivi du relargage en « conditions naturelles ». Aucun témoin n'a été nécessaire car les essais réalisés sur les éprouvettes permettent de quantifier les effets liés aux granulats.

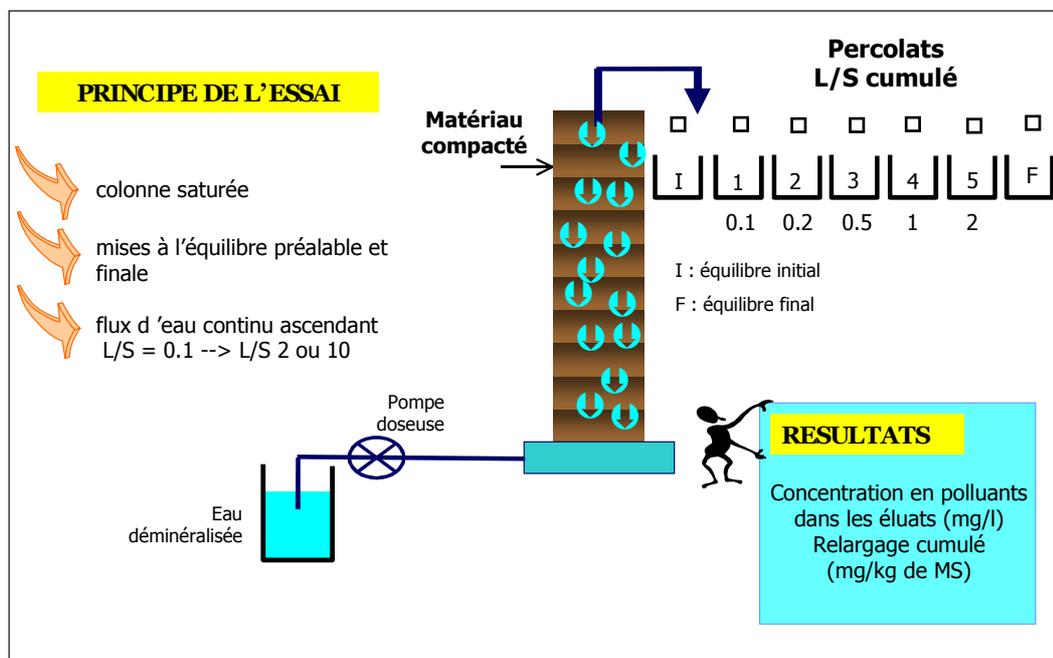
- Des **essais de terrains** qui ont consisté à **suivre le pilote** en récoltant les percolats. Ils ont permis de suivre le comportement en conditions réelles et de mettre en évidence d'éventuels paramètres secondaires.

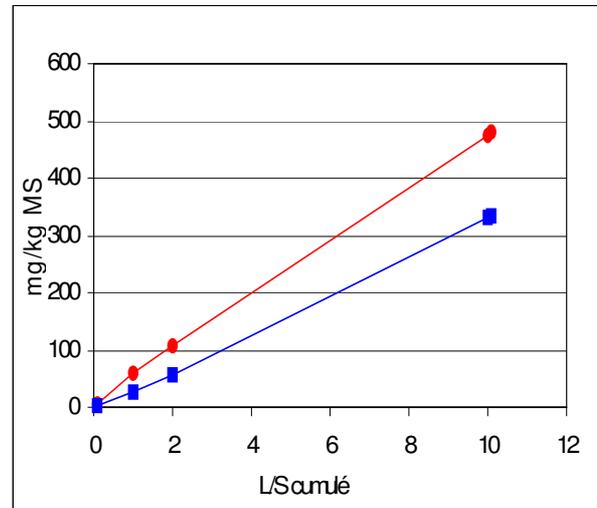
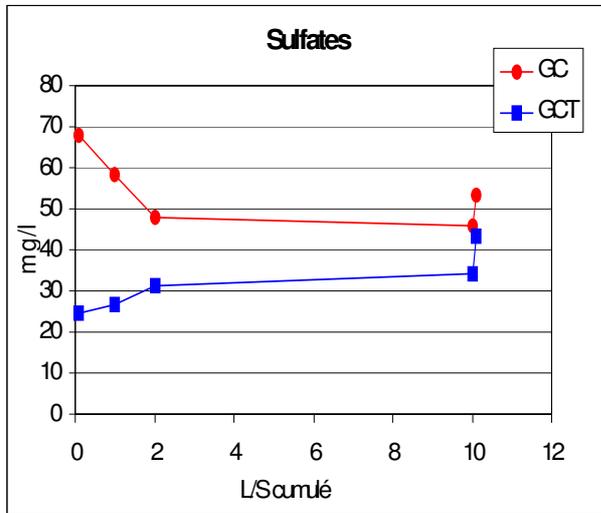
Les colonnes et les lysimètres ont été fabriquée en octobre 2001 avec les mêmes caractéristiques (même formulation, mêmes granulats, liant,...) que le pilote.

### 1) Essais de percolation en colonne

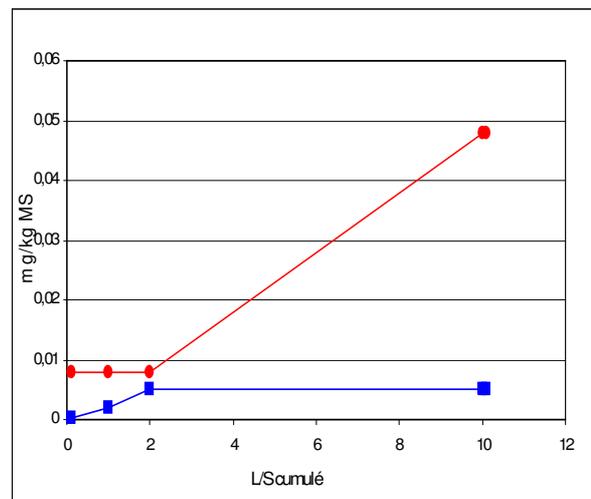
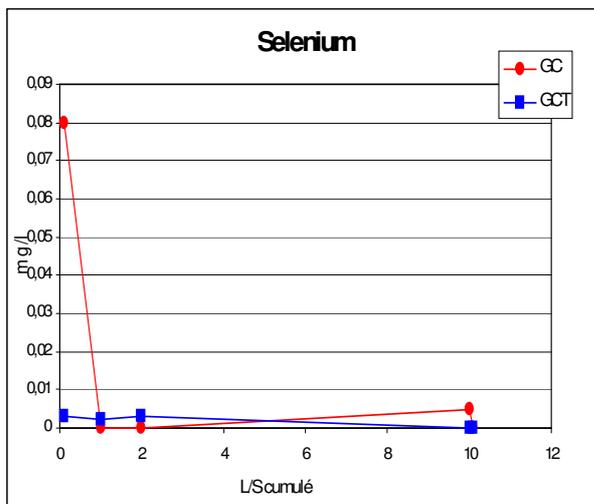
Le protocole des essais de percolation ascendant en colonne est celui de la norme prEN 14405 préconisée dans le projet de dispositions relatives aux installations de stockage de déchets inertes du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable ainsi que dans l'annexe II de la Directive Décharge.

Il est basé sur le passage successif de volumes d'eau correspondant à des ratio liquide / solide de plus en plus élevés et le recueil des éluats correspondants. Le principe détaillé est présenté en annexe 6 du rapport.





**Essais de percolation : cas des sulfates**



**Essais de percolation : cas du sélénium**

Les résultats obtenus portent d'une part sur le relargage cumulé maximal (mg/kg) en fin d'essai pour un ratio liquide / solide de 10 l/kg et d'autre part sur la concentration maximale (mg/l) dans le premier éluat.

**Cet essai est considéré au niveau européen comme l'essai de référence pour la caractérisation du comportement des déchets en stockage.**

Sur les différents éluats recueillis, les paramètres les paramètres suivants ont été mesurés :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Ca, K, Cr tot., Cr VI, Zn, Pb, As, Cd, Se et Ba conformément à l'instruction technique relative aux installations de stockage de déchets inertes. L'ensemble de ces données est présenté à l'annexe 6 du rapport.

Les principales conclusions que l'on peut tirer de la réalisation de cet essai de percolation en colonne sur la grave-ciment contenant de la boue et de la grave-ciment témoin, sont les suivantes :

- **Les éléments les plus polluants** comme l'arsenic, le cadmium, le chrome total et le chrome hexavalent, le plomb et le zinc **n'ont jamais été détectés dans les éluats**,
- Pour les autres éléments exceptés les sulfates (cf. graphes ci-contre), les **concentrations et dynamiques de relargage sont très similaires** pour la grave-ciment avec boue et le témoin,
- Les quantités relarguées sont faibles et **seul le premier percolat issu de la grave-ciment avec boue présente une concentration en sélénium** (cf. graphes ci-contre) **supérieure au seuil** (0,04 mg/l) fixant le caractère inerte du matériau<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> on peut noter qu'un même matériau fabriqué avec une boue provenant d'un autre site ne présenterait pas forcément une concentration en Se trop forte à l'issue de l'essai de percolation en colonne. Inversement un relargage d'autres d'éléments ne peut pas être écarté.

## 2) Essais en lysimètres et pilote

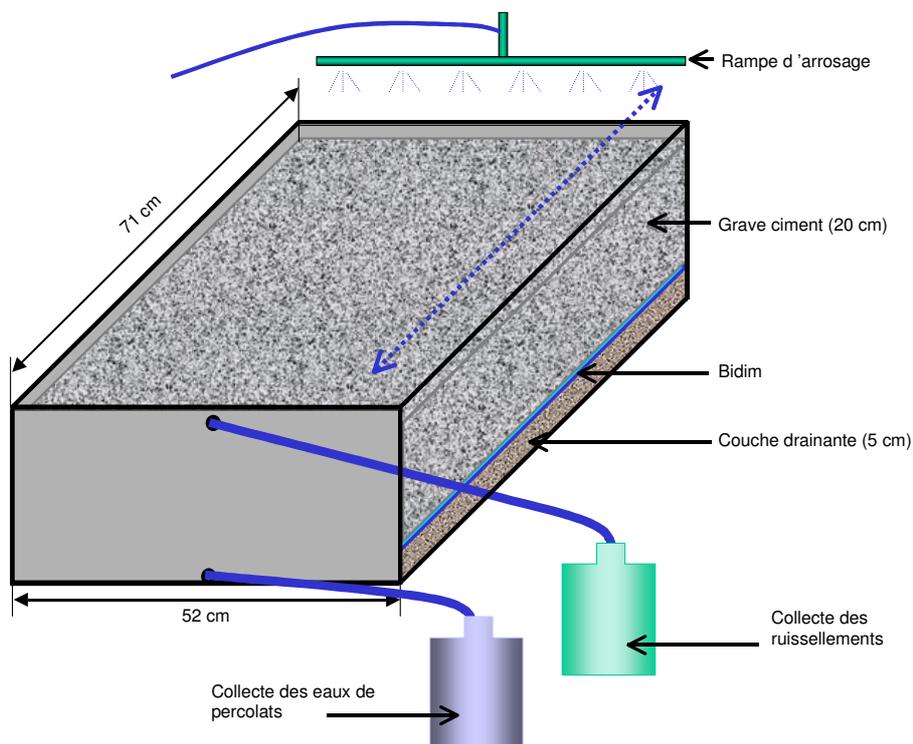
Deux types de lysimètres ont été fabriqués. Les objectifs de ces essais sont rappelés à la page 24 du présent document.

Le principe de l'essai est extrêmement simple. Il consiste à récolter les eaux de ruissellement et de percolation qui traversent les lysimètres.

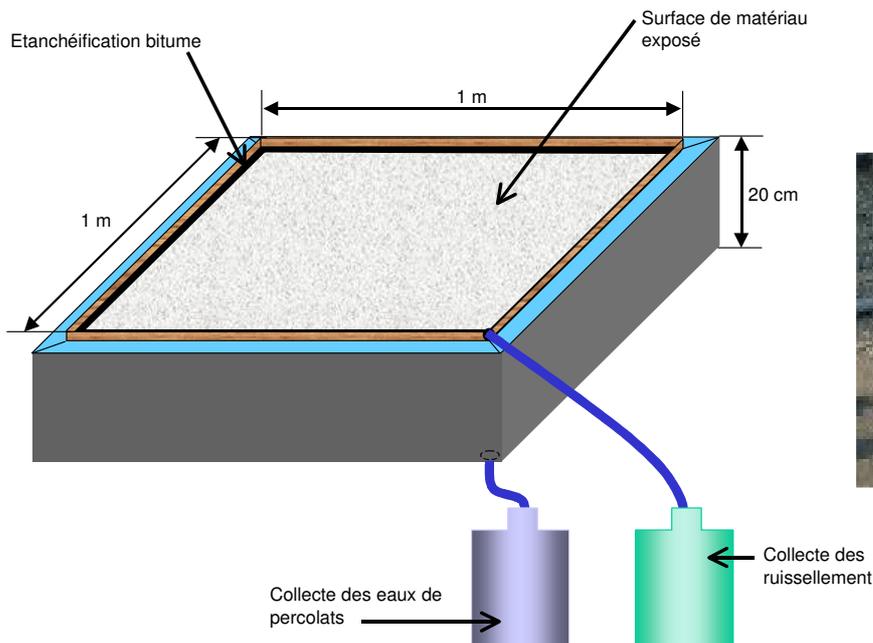
Pour les lysimètres « phase chantier », les apports sont contrôlés (6 l d'eau le premier jour puis 4 litres quotidiennement pendant deux semaines).

Le lysimètre issu du pilote a quant à lui été exposé aux précipitations naturelles.

Les dispositifs de prélèvement sont décrits sur les schémas ci-dessous.



### **Simulation de la phase chantier**



### Simulation du comportement de la grave ciment en place

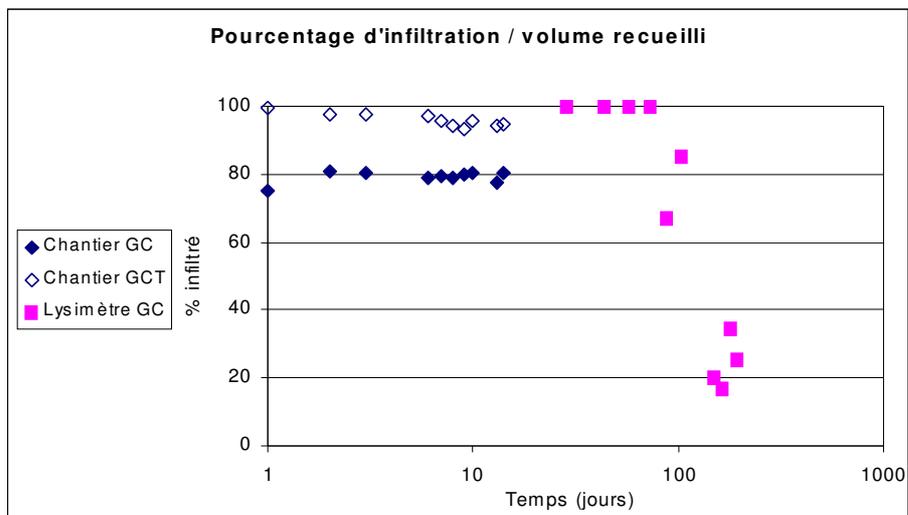
La description du pilote et du témoin est donnée à la page 19 et suivantes du rapport. Le suivi s'est déroulé de juin 2001 à juin 2002. Onze prélèvements ont été réalisés sur les eaux recueillies dans les cuves de stockage. Parallèlement, la pluviométrie a été suivie sur la même période (station Météo France de Saint Germain en Coglès à environ 7 km du pilote).

Les résultats expérimentaux de ces différents essais (lysimètres, routes,...) sont présentés à l'annexe 6 du présent rapport. Les principaux résultats sont les suivants :

- Comme le montre la figure ci-dessous, les **matériaux** fabriqués sont **extrêmement perméables** : les volumes d'eau percolant à travers les graves-ciment sont importants puisque le pourcentage d'infiltration est toujours supérieur à 75%.

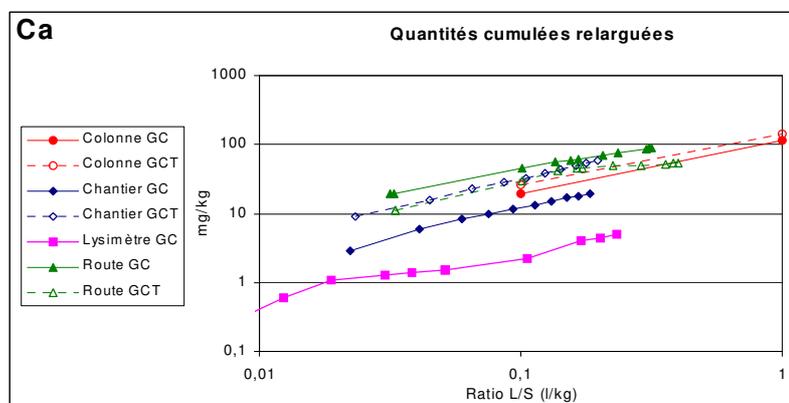
Cependant, la grave-ciment contenant de la boue semble un peu moins perméable.

Il convient de noter que les conditions météorologiques constituent un élément important dans le cadre de la modélisation du comportement à long terme car les résultats obtenus sur le pilote lors des premiers mois suivant la mise en oeuvre correspondent à une pluviométrie supérieure à la moyenne et donc à des conditions plutôt défavorables en terme de lixiviation des matériaux.

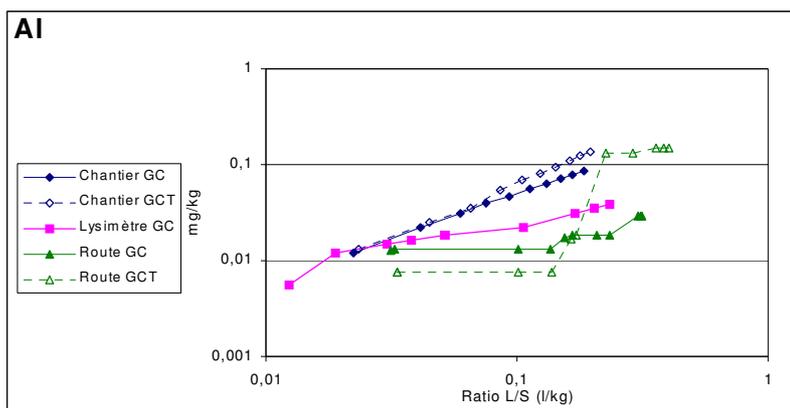


• Les **concentrations en éléments métalliques** sont très faibles voire nulles (pour le plomb).

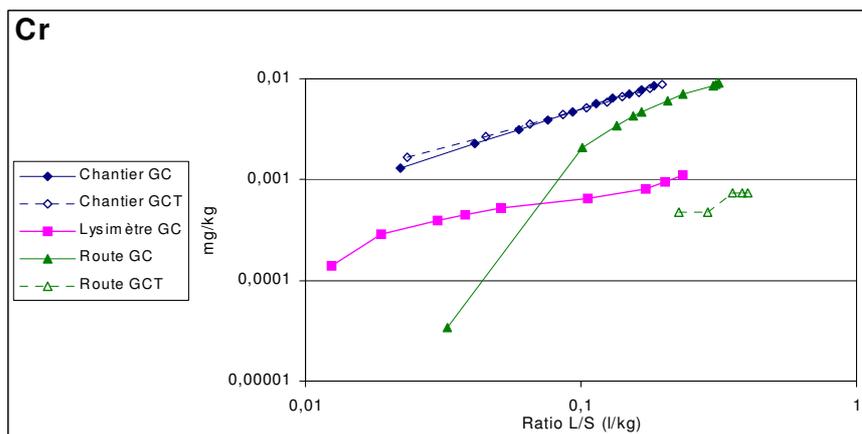
• Les **intensités de relargage d'éléments** sont globalement faibles et similaires pour les lysimètres comme pour les routes avec ou sans boue. Les graphes ci-dessous relatifs au chrome et à l'aluminium montrent cependant que la « **phase chantier** » est une phase un peu plus critique dans la mesure où ces éléments sont mobilisés (courbes bleues). Ceci se produit aussi bien pour la grave-ciment avec boue que pour le témoin. L'ajout de boue ne semble donc pas en cause. Par ailleurs, les **quantités relarguées restent très faibles** (0,01 mg/kg pour le Chrome).



cas du calcium



**cas de l'aluminium**



**cas du chrome**

Les relargages cumulés sont ici exprimés en fonction du ratio L/S qui permet de tenir compte de la quantité d'eau vue par le matériau plutôt que du temps d'exposition.

### ***D – Modélisation et prédiction du comportement en scénario***

L'objectif est ici de proposer pour chaque élément une tendance de comportement pour pouvoir prédire le relargage sur une période de temps donnée en se basant sur les différents essais effectués.

Le modèle utilisé pour cela est celui mis en œuvre au niveau européen pour décrire le relargage des polluants issus d'un dépôt de matériaux inertes stockés en « décharge de classe III ».

Les relargages de la plupart des éléments peuvent être décrits par un pic de concentration initial dans le premier percolat ( $C_0$ ) suivi d'une diminution exponentielle des concentrations avec le temps liée au ration L/S cumulé. La formule mathématique utilisée est donc :

$$C = C_0 \times \exp[-(L/S) \times \kappa]$$

$C$  = concentration de l'élément dans le lixiviat en fonction du ratio L/S (mg/l),

$C_0$  = pic de concentration initial de l'élément dans le premier lixiviat (mg/l)

L/S = ratio liquide / solide correspondant à la concentration  $C$  (l/kg)

$\kappa$  = constante cinétique décrivant la diminution de relargage pour un matériau et un élément donnés (kg/l)

Cette formule permet de connaître la quantité cumulée de l'élément relargué pour un ratio L/S et donc une période de temps donnés.

Dans le cas présent, **la période de temps considérée est de 100 ans**. Cette durée peut paraître au premier abord trop importante si l'on considère que la durée de vie d'une chaussée est de 15 à 20 ans au maximum. Toutefois, si les quantités cumulées de polluants relargués en 100 ans sont compatibles avec ce type d'utilisation, celles correspondant à une utilisation sur 20 ans, plus faibles, seront donc également compatibles avec une utilisation en technique routière.

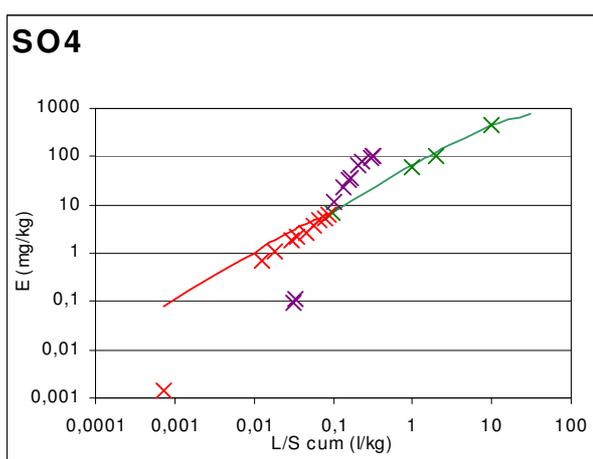
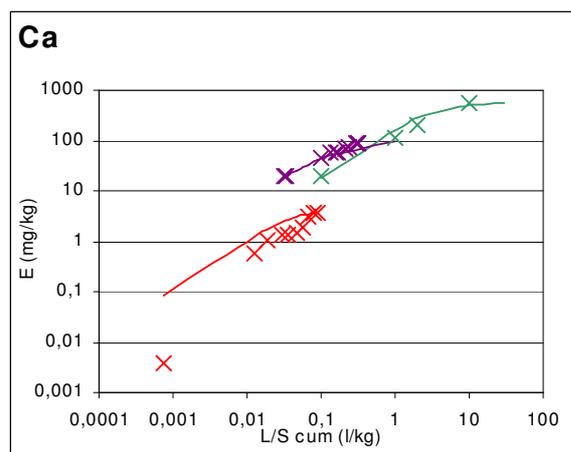
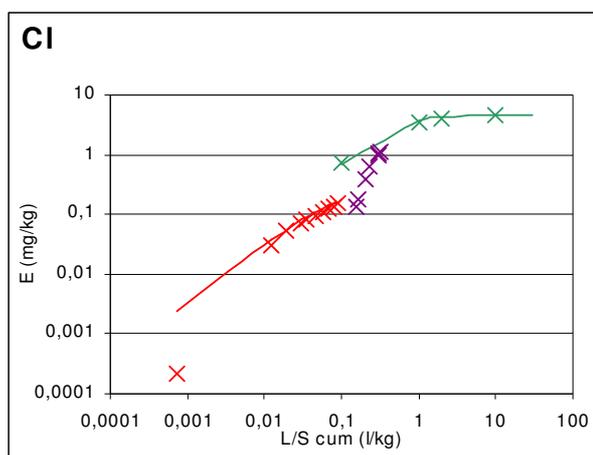
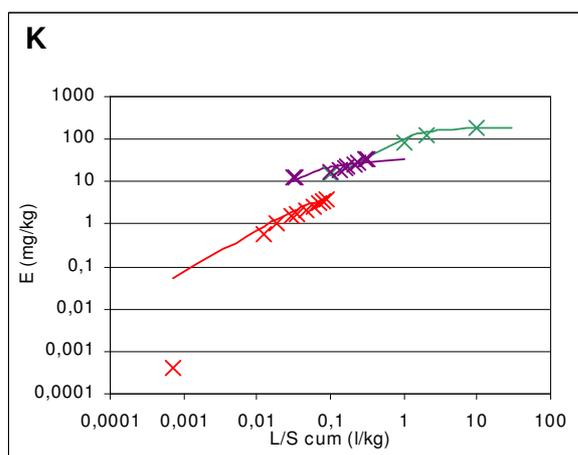
Cette période de 100 ans correspond à un ratio L/S cumulé de 30 l/kg (cf. annexe 6 du rapport). Pour connaître le relargage cumulé sur 100 ans, il faut donc extrapoler les résultats obtenus expérimentalement pour un rapport L/S de 30 l/kg.

Les simulations ont été réalisées pour la grave-ciment avec boue. L'ensemble des résultats est présenté à l'annexe 6 du présent document. Les principaux éléments à retenir de

ces simulations apparaissent sur les graphes ci-joints présentés à titre d'exemple et sont les suivants :

- Il y a une **bonne concordance** entre les dynamiques observées au cours des essais en lysimètres et en colonnes d'une part et entre les résultats expérimentaux et les simulations d'autre part.

- **Pour une durée d'exposition de 100 ans, les relargages cumulés des différents éléments sont faibles.** Pour la plupart des éléments (sauf les sulfates), les courbes atteignent une asymptote c'est-à-dire que **le relargage cumulé maximal est atteint au bout de 100 ans** : il n'y a plus rien à relarguer.



### Simulation des différents essais pilotes :

#### cas du potassium, des chlorures, du calcium et des sulfates

Les flèches correspondent aux résultats expérimentaux et les traits aux simulations prolongées jusqu'à L/S = 30 l/kg. En rouge sont représentés les résultats concernant le lysimètre « pilote », en vert les résultats de l'essai de percolation en colonne et en violet les résultats du suivi du chantier.

## CONCLUSION GENERALE

Les principaux enseignements de l'étude sont les suivants :

- l'intégration de boue dans la formulation de la grave-ciment n'altère pas les propriétés mécaniques de cette dernière,
- la mise en œuvre pratique de l'incorporation de la boue est délicate du fait de la consistance de celle-ci,
- la grave-ciment avec boue a un comportement similaire à la grave-ciment témoin aussi bien en terme de concentrations d'éléments relargués que de dynamiques de relargage. Elle développe même une meilleure résistance aux agressions faiblement acides,
- les relargages en différents éléments sont faibles quel que soit l'essai pratiqué (percolation en colonne, lysimètre, route expérimentale). Les éléments tels que l'arsenic, le cadmium, le chrome total et le chrome hexavalent, le plomb et le zinc n'ont même jamais été détectés dans les essais en colonne,
- les simulations effectuées pour une durée de vie de la structure de 100 ans montrent pour la plupart des éléments des relargages cumulés faibles et qui ont atteint leur maximum au bout de ces 100 années.

Ces différents éléments conduisent à conclure que **la valorisation des boues résultant de l'alcalinisation des eaux d'exhaure acides de carrières par incorporation dans des matériaux commercialisables est tout à fait envisageable** au moins pour la boue et le matériau testé.

La généralisation de la démarche de valorisation à l'ensemble des boues et des matériaux est évidemment du ressort de l'autorité administrative compétente, en l'occurrence le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et la DRIRE pour la gestion de déchets provenant d'installations classées.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Dans le cas de la mise en stock en centre de déchets inertes, l'autorisation est municipale et l'admissibilité du matériau est basée sur le seul test de percolation en colonne. Pour les travaux publics, il n'y a pas de

Dans le cadre de la valorisation des résidus de procédés thermiques (RPT), une circulaire guide est en cours de finalisation qui prévoit trois niveaux de procédure pour les matériaux candidats à la valorisation :

- une caractérisation de base pour les matériaux potentiellement acceptables (produit connu, scénarios d'utilisation classique,...). Elle comprend deux essais :
  - ➔ la fraction maximale mobilisable (FMM) : si les résultats sont très bons alors le matériau devient un matériau de construction, si les résultats sont très mauvais, le matériau est définitivement exclu et si les résultats sont moyens, alors on applique le deuxième essai,
  - ➔ le test de percolation en colonne
- une procédure de conformité qui consiste en une vérification régulière de la qualité des produits déjà caractérisés (vérification de la continuité dans le temps). Elle comprend uniquement une simple lixiviation à l'eau,
- une procédure d'évaluation approfondie qui concerne les matériaux originaux (produit innovant, scénario d'utilisation particulier,...). Elle s'appuie sur la définition d'objectifs environnementaux, le test de l'influence du pH, la FMM, le test de percolation en colonne, une caractérisation minéralogique si nécessaire et une étude écotoxicologique facultative.

Pour les RPT, le Ministère prévoit que dans le cas d'un changement de producteur ou de produit, une caractérisation de base (FMM + test de percolation en colonne) est suffisante si les résultats obtenus ne sont pas trop divergents par rapport à l'étude de référence (dans le cas contraire, une nouvelle procédure approfondie peut être demandée).

L'étude réalisée sur la grave-ciment correspond précisément à la procédure d'évaluation approfondie.

---

réglementation. Les avis techniques du CSTB sont actuellement facultatifs et correspondent à une démarche volontaire même si c'est très recommandé dans le cadre des appels d'offre. Au niveau des maîtres d'ouvrage potentiels, la décision sera d'ordre contractuelle.

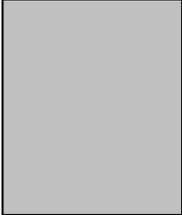
Sous réserve que les règles s'appliquant au RPT soient étendues aux boues de traitement des eaux acides, un exploitant désirant s'engager dans une telle démarche de valorisation n'aurait donc à soumettre le produit fabriqué (après mise au point de la formulation) qu'à une procédure de caractérisation de base.

Cette procédure présente également l'avantage de permettre de vérifier en même temps l'admissibilité du produit en centre de stockage de déchets inertes (voire en carrière) car elle inclut le test de percolation en colonne prévu à l'annexe II de la directive « Décharge »<sup>4</sup>.

Pour la profession, la dernière étape de la démarche d'incorporation des boues dans des matériaux commercialisables sera donc d'approcher le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable pour que les règles prévues pour les RPT puissent être étendues aux boues de traitement des eaux acides.

---

<sup>4</sup> Dans le cas où les résultats à ce test sont négatifs, la directive européenne en cours d'adoption par les Etats membres prévoit des possibilités de dérogation sous réserve d'une étude de modélisation et d'évaluation de l'impact réel sur l'environnement.



**ILLUSTRATION DE LA  
MISE EN PLACE DU PILOTE  
ET DE SON SUIVI**



**Lieu d'implantation du pilote sur  
la voie communale n° 12**



**La centrale à béton**



**L'incorporation de la boue dans le malaxeur**

**Le premier géotextile et la couche de sable plicène**



**La pose de la membrane étanche**



**La membrane étanche**



**le géocomposite**





**La mise en place du drain dans la tranchée latérale**

**Les cuves de collecte des percolats**



**Les drains sont placés dans la membrane étanche et donc isolés des terrains extérieurs**

**La cuve de collecte des percolats du pilote une fois installée**



### La pose de la grave-ciment



### Le compactage de la grave-ciment



## La grave-ciment compactée et nivelée



### Le contrôle des caractéristiques de la grave-ciment avec un gammadensimètre



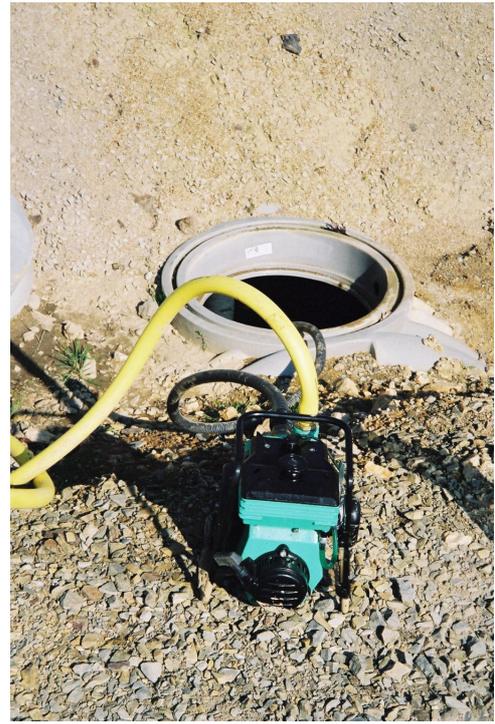
**Le pilote et le témoin  
une fois l'enduit de cure  
posé**

### La fabrication du lysimètre dans son cadre





**Le pompage des eaux de percolation  
recueillies dans les cuves**

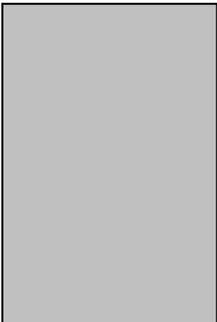


**La pompe utilisée pour la vidange  
des cuves**

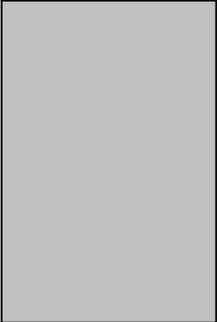


**Les eaux pompées sont rejetées dans  
le fossé de la VC n° 12**

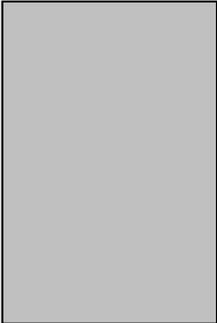
	<h1><b>ANNEXES</b></h1>
--	-------------------------



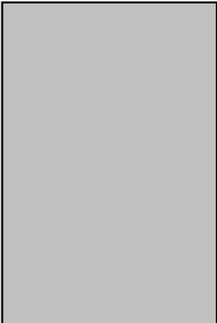
**ANNEXE 1 : Caractérisation du comportement à la lixiviation des boues résiduelles de l'alcalinisation des eaux acides des carrières en scénario spécifié – caractérisation de la boue**



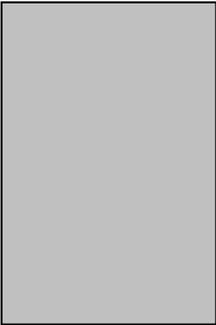
**ANNEXE 2 :**  
**Formulation de la grave-ciment et**  
**comportement mécanique**



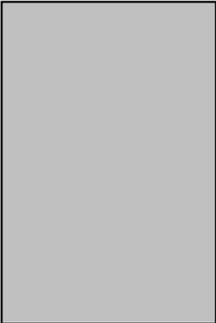
**ANNEXE 3 :**  
**Comportement au gel des matériaux**  
**élaborés**



**ANNEXE 4 :**  
**Incorporation de la boue dans une**  
**grave-ciment et réalisation du pilote**



**ANNEXE 5 : Caractérisation du  
comportement à la lixiviation des boues  
résiduelles de l'alcalinisation des eaux  
acides des carrières en scénario spécifié  
– tests paramétriques**



**ANNEXE 6 : Caractérisation du  
comportement à la lixiviation des boues  
résiduelles de l'alcalinisation des eaux  
acides des carrières en scénario spécifié  
– rapport final**



**Caractérisation du comportement à la lixiviation  
des boues résiduaire de l'alcalinisation  
des eaux acides des carrières  
en scénario spécifié**

**Étude effectuée à la demande  
de l'UNICEM Bretagne**

**Rapport d'analyse  
Caractérisation de la boue**

**Septembre 1999**



**INSAVALOR SA  
Division POLDEN**

*Expertises, Études et Recherche*

## Analyse d'une boue résultant de l'alcalinisation d'eaux acides de carrière

Environ 6 kg de boue, conditionnée dans 3 sacs en plastique superposés, ont été reçus au laboratoire.

Les paramètres suivants ont été immédiatement mesurés sur la boue :

pH : 7,69

Conductivité : 1265  $\mu\text{S}/\text{cm}$

Potentiel d'oxydo-réduction : 175 mV/ENH

La totalité de l'échantillon a été pesée puis séchée à l'étuve (105°C) afin de déterminer le taux de matière sèche de la boue.

Le taux de matière sèche MS a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$MS = m_s / m_{\text{tot}}$$

avec :

$m_s$  : masse de boue séchée (après passage à l'étuve)

$m_{\text{tot}}$  : masse de boue brute

On obtient :

$$MS = 45,5\%$$

La teneur en eau  $w$  de la boue est calculée de la façon suivante :

$$w = (m_{\text{tot}} - m_s) / m_s$$

en conservant les mêmes notations que précédemment, ce qui conduit à :

$$w = 119,8\%$$

La teneur en eau obtenue correspond à la teneur en eau généralement observée dans le cas de la vase (environ 120%).

La boue séchée a ensuite été soumise à une minéralisation acide avant analyse de sa composition chimique.

Les résultats de l'analyse figurent dans le tableau page suivante.

Les éléments majeurs sont le calcium, le sodium, l'aluminium, le fer et le magnésium.

On constate que le strontium et le plomb sont présents en quantité relativement importante (respectivement 725 et 79 mg/kg de matière sèche), les teneurs en autres métaux étant relativement faibles (cf. comparaisons ci-après).

**Composition de la boue :**

Elément	Teneur dans la boue séchée (mg/kg de matière sèche)	Teneur dans la boue brute (mg/kg)
Aluminium	18 176	8 270
Calcium	327 266	148 906
Fer total	16 251	7 394
Magnésium	6 575	2 992
Sodium	27 076	12 320
Cadmium	1,3	0,6
Cobalt	43	19
Chrome total	15	7
Chrome hexavalent	<5,0	<2,3
Cuivre	125	57
Potassium	375	171
Manganèse	295	134
Molybdène	<1,3	<0,6
Nickel	100	46
Plomb	79	36
Soufre total	2 900	1 320
Strontium	725	330
Zinc	425	193

**Comparaison avec les boues étudiées lors de la 1<sup>ère</sup> phase de l'étude**

La boue étudiée en phase 1 correspondant à celle de l'échantillon prélevé est celle du site 1. Cependant le traitement au calcaire concassé a été complété par un apport de chaux.

Composition des boues séchées en mg/kg de matière sèche

Elément	Boues étudiées en phase 1				Nouvel échantillon
	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	
Al	35 760	70 974	24 746	25 400	18 176
Ca	220 557	59 642	160 647	26 500	327 266
Fe total	87 794	63 618	224 506	59 800	16 251
Mg	6 531	86 879	5 747	14 500	6 575
Cd	17	14	4	<10	1,3
Co	236	974	738	130	43
Cr total	43	40	40	60	15
Cu	257	517	60	165	125
K	1 285	1 789	998	2 700	375
Mn	3 041	11 889	8 701	1 100	295
Na	236	775	319	400	27 076
Ni	535	1 869	639	235	100
Pb	21	<4	20	95	79
Sr	171	179	419	30	725
Zn	2 206	3 718	4 151	880	425

Composition des boues brutes en mg/kg de matière brute

Elément	Boues étudiées en phase 1				Nouvel échantillon
	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	
Al	10 646	1 313	918	7 945	8 270
Ca	65 660	1 103	5 960	8 289	148 906
Fe total	26 136	1 177	8 329	1 705	7 394
Mg	1 944	1 607	213	4 536	2 992
Co	70	18	27	41	19
Cu	77	10	2	52	57
Mn	905	220	323	344	134
Ni	159	25	24	74	46
Sr	51	3	16	9	330
Zn	657	69	154	275	193

***Comparaison avec des échantillons en provenance du même site***

A titre de comparaison, le tableau suivant présente tous les résultats d'analyses disponibles en provenance du même site.

Une première étude a porté sur 3 prélèvements (désignés ci-après par série 1, série 2 et série 3).

Les autres résultats indiqués sont relatifs à la boue correspondant au site 1 et au nouvel échantillon étudié.

Composition de boue en provenance du même site en mg/kg de matière sèche

Elément	Série 1	Série 2	Série 3	Phase 1	Nouvel échantillon
Al	44455	47101	39692	35760	18176
Fe	63649	70293	57704	87794	16251
As	0	0	25		
Cd	0	9	4	17	1,3
Cr	41	38	36	43	15
Cu	500	544	522	257	125
Mn	646	702	674	3041	295
Ni	800	815	570	535	100
Pb	113	115	91	21	79
Sb	0	0	10		
Zn	2150	2340	1640	2206	193

**ANNEXE 2 :**  
**Formulation de la grave-ciment et**  
**comportement mécanique**

21 OCT. 1999



Ministère  
de l'Équipement,  
des Transports  
et du Logement

Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest



Centre d'Études  
Techniques  
de l'Équipement  
de l'Ouest

992691

n° de Dossier : 990255

Titre de l'affaire : Valorisation des boues de carrières  
Grave-Ciment-Boue  
Carrière de Moulin de Thouru  
UNICEM Bretagne

Date : Octobre 1999

Chargé d'Études : O. Hameury

**Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest**

**Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint Briec**

# SOMMAIRE

<b>NOTATIONS</b> .....	<b>3</b>
<b>I - PRESENTATION</b> .....	<b>4</b>
<b>II - CONSTITUANTS - FORMULE</b> .....	<b>4</b>
II.1 GRANULATS .....	4
II.2 BOUE .....	5
II.3 LIANT .....	5
II.4 FORMULE RETENUE POUR L'ÉTUDE .....	5
<b>III - ESSAIS RÉALISÉS</b> .....	<b>6</b>
III.1 RAPPEL DES SPÉCIFICATIONS .....	6
III.2 ESSAI PROCTOR MODIFIÉ (NORME NF P 98-231-1) .....	6
III.3 DÉTERMINATION DU DÉLAI DE MANIABILITÉ (NORME NF P 98-231-5).....	7
III.4 ESSAIS DE TRACTION DIRECTE (NORME NF P 98-232-2) .....	7
III.4 FORMULE RETENUE .....	8
<b>IV - CONCLUSIONS</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>10</b>

## NOTATIONS

d/D	Fraction (d : dimension minimale, D dimension maximale, en mm)
dm	Délai de maniabilité (en heures)
DVC	Dosage volumétrique en ciment ( $DVC = V_{\text{ciment}} / (V_{\text{ciment}} + V_{\text{granulats}})$ )
c	Dosage en liant (en %)
$R_t$	Résistance à la traction directe
$E_t$	Module sécant à 30% de la résistance à la rupture en traction directe
IQE	Indice de Qualité Elastique (en cm)
MPa	MégaPascal
MVA	Masse Volumique Apparente
MVR	Masse Volumique Réelle
OPM	Optimum Proctor Modifié
w	Teneur en eau (en %)
$\rho_d$	Densité sèche (en $Mg/m^3$ )
$\rho_{dOPM}$	Densité sèche à l'OPM (en $Mg/m^3$ )

## I - PRESENTATION

A la demande de l'UNICEM Bretagne, le Laboratoire de St Brieuc a réalisé une étude de formulation sur une grave-ciment additionnée de boue, dans le but de valoriser les boues résiduelles de l'alcalinisation des eaux acides de carrière.

Cette intervention du LRPC se situe après que des études de faisabilité entreprises pour le compte de l'UNICEM par l'IUT de Rennes pour la partie mécanique et l'INSA de Lyon (POLDEN) pour la partie chimique. Elles ont montré que l'incorporation de ces boues à de faibles dosages (3% de la fraction sableuse) n'altérerait pas sensiblement les propriétés du matériau.

Cette étude a eu pour objet de préciser la formulation de ce type de mélange, appliquée aux matériaux de la carrière de Moulin de Thouru pour les granulats, de la Chapelle Janson pour la boue et en utilisant un CPJ 42.5 des ciments Lafarge comme liant hydraulique. Il s'agissait de dégager les paramètres de chantier : teneur en eau et densité de compactage, dosages en granulats et en ciment, et de vérifier que les spécifications relatives à l'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques sont satisfaites.

## II - CONSTITUANTS - FORMULE

### II.1 Granulats

Ils proviennent de la carrière de Moulin de Thouru (La Chapelle St Aubert, Ille et Vilaine). Ces matériaux ont été prélevés sur stocks par le LRPC de St Brieuc, sous la forme de trois fractions, 0/4, 4/10 et 10/20.

Le tableau I donne les résultats des analyses granulométriques par tamisage des échantillons, granulométries réalisées au Laboratoire de St Brieuc selon la norme P18-560. Les courbes correspondantes sont représentées en figure I.

Tamis (mm)	25	20	16	14	12.5	10	8	6.3	5	4	3.15	2	1	0.5	0.315	0.2	0.08
0/4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.4	90.4	80.1	64.2	45.4	34.6	29.5	24.7	15.7
4/10	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	96.2	70.3	36.4	9.5	3.9	2.6	2.0		1.4			1.1
10/20	99.3	85.5	49.5	33.3	22.8	9.4	2.3	1.4						0.7			0.6

Tableau I : Granulométries des fractions étudiées.

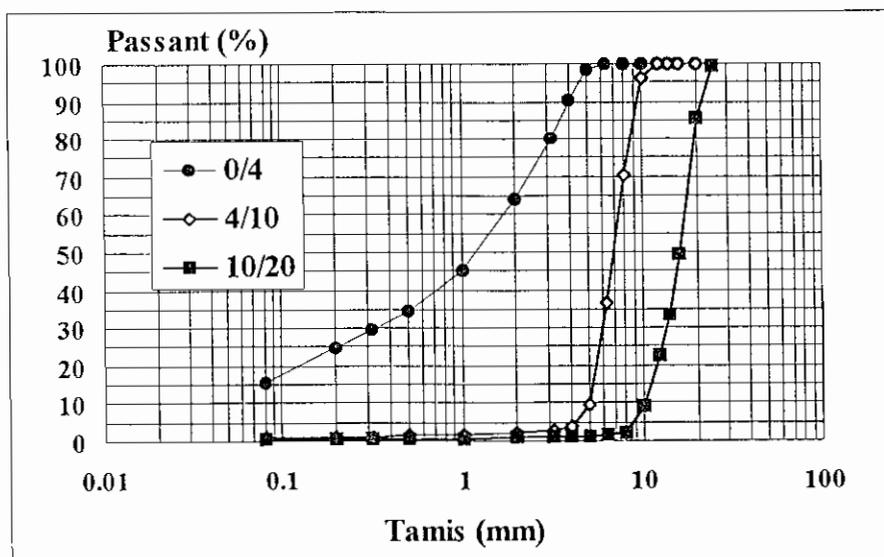


Figure I : Courbes granulométriques des fractions.

Le sable 0/4 est de catégorie "a" selon l'article 7 de la norme XP P 18-540 (valeur au bleu de méthylène de 1.4 g), les gravillons 4/10 se classant en catégorie "C", avec des coefficients Los Angeles de 19 et micro Deval de 21.8.

Le coefficient d'aplatissement de la fraction 4/10 est de 24%, et de 13.4% pour le gravillon 10/20.

## II.2 Boue

Elle a été prélevée par C. Vannier de l'ENCEM sur le site de la Chapelle Janson (carrière Beaucé). Les bidons livrés au LRPC de St Brieuc ont été homogénéisés et filtrés de leurs débris végétaux.

Une granulométrie réalisée sur la matière sèche montre que 97% du matériau est de dimension inférieure à 80 µm (tableau II).

Tamis (mm)	0.5	0.315	0.2	0.080	0.063	0.050
Passant (%)	99.9	99.9	99.7	96.9	92.0	88.7

Tableau II : Analyse granulométrique de la boue.

La teneur en eau de la boue mesurée en laboratoire s'établit à 161%, ce qui signifie que la boue présente un pourcentage de matière sèche de 38%.

## II.3 Liant

Le liant utilisé dans l'étude est un ciment normalisé, approvisionné au LRPC par les cimenteries Lafarge de St Pierre La Cour. Il s'agit du CPJ CEM II/A 42.5 (L) CP2, avec moins de 20% d'ajouts (d'origine calcaire), une faible chaleur d'hydratation et une teneur en sulfures limitée, et une résistance minimale à 28 jours de 42.5 MPa. D'après les résultats du contrôle interne du fournisseur, les résistances moyennes à 28 jours sont généralement de l'ordre de 50 à 52 MPa.

## II.4 Formule retenue pour l'étude

Le choix de l'UNICEM s'est porté sur un dosage de la boue représentant en matière sèche 3% de la fraction 0/4 utilisée dans la Grave-Ciment, soit pour une formule à 40% de sable un pourcentage en matière sèche de 1.2%.

Le dosage en liant retenu pour le démarrage de l'étude est de 3.5%.

A partir de ces deux paramètres, une formule de base a été établie, dont la granulométrie est présentée dans le tableau III et sur la figure II :

Tamis mm	Formule de base %	Norme NF P 98-116	
		minimum	maximum
20	95.0	85	100
16	82.7		
14	77.1		
12.5	73.5		
10	68.1	55	88
8	60.0		
6.3	52.2	42	74
5	45.6		
4	41.2	32	66
2	30.5	23	54
1	23.1		
0.5	18.7	11	31
0.315	16.7		
0.2	14.8	7	21
0.08	10.9	4	12

Tableau III : Granulométrie de la formule retenue et spécifications de la norme Graves-Ciment.

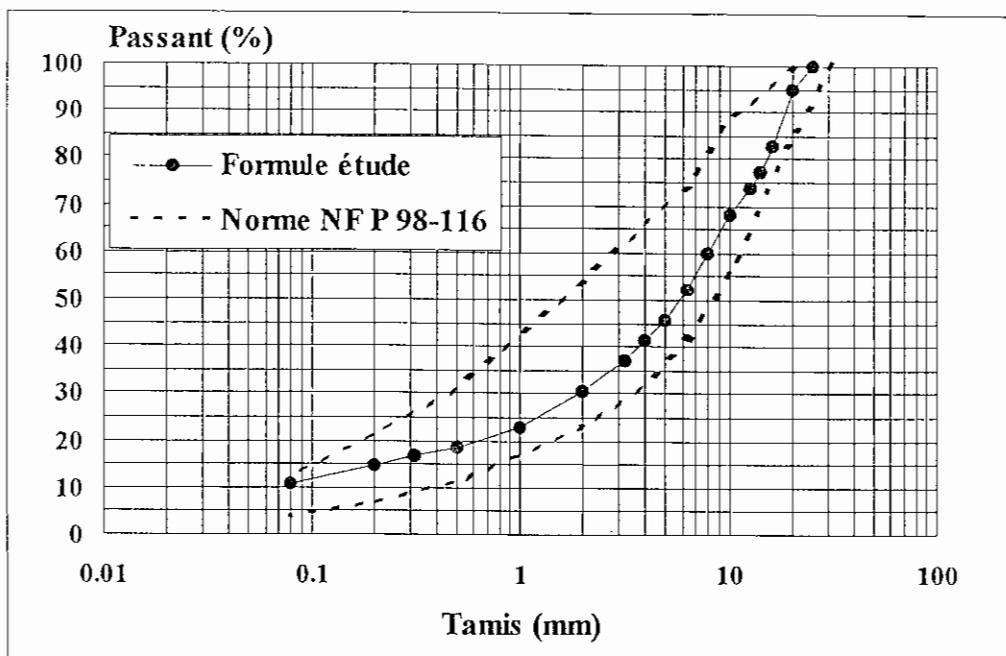


Figure II : Courbe granulométrique du mélange.

La formule de base retenue est ainsi :

0/4	Moulin de Thouru	39.0%
4/10	Moulin de Thouru	22.0%
10/20	Moulin de Thouru	34.3%
Boue	La Chapelle Janson	1.2%
Ciment	CPJ CEM II/A 42.5 (L) CP2	3.5%

Le pourcentage de 1.2% de matière sèche se traduit par un dosage en boue de 3.13%. Par la suite, nous avons directement incorporé la boue à la grave-ciment, sans séchage. La teneur en eau apportée par la boue est alors de 1.93%.

### III - ESSAIS REALISES

#### III.1 Rappel des spécifications

On rappelle ci-dessous (tableau IV) les spécifications concernant ce cas de chantier et tirées des normes NF P 98-116 et NF P 98-114-1 relatives à l'étude des graves traitées.

Compacité OPM minimale	80%
Dosage en liant	de 3 à 4%
Délai de maniabilité minimum	6 heures
IQE à 1 an	de 20 à 25 cm (classe G3)

Tableau IV : Spécifications pour la Grave-Ciment.

#### III.2 Essai Proctor Modifié (Norme NF P 98-231-1)

L'essai Proctor Modifié a pour objet de déterminer la teneur en eau optimale de compactage de la grave-ciment et la densité sèche correspondante. Les résultats de l'essai sont reportés dans le tableau V et sur la figure III, d'où l'on tire :

- Teneur en eau à l'OPM	5.7 %
- $\rho_{dOPM}$ (MVA à l'optimum)	2.31 Mg/m <sup>3</sup>

soit une compacité à l'optimum de 84.4% pour une Masse Volumique Réelle du mélange granulaire (MVRg) mesurée au White Spirit de 2.736 Mg/m<sup>3</sup>.

Teneur en eau (%)	MVA sèche (Mg/m <sup>3</sup> )	IPI
4.6	2.252	213
5.3	2.295	312
5.9	2.300	140
6.0	2.313	93
6.4	2.320	90

Tableau V : Résultats obtenus à l'essai Proctor modifié.

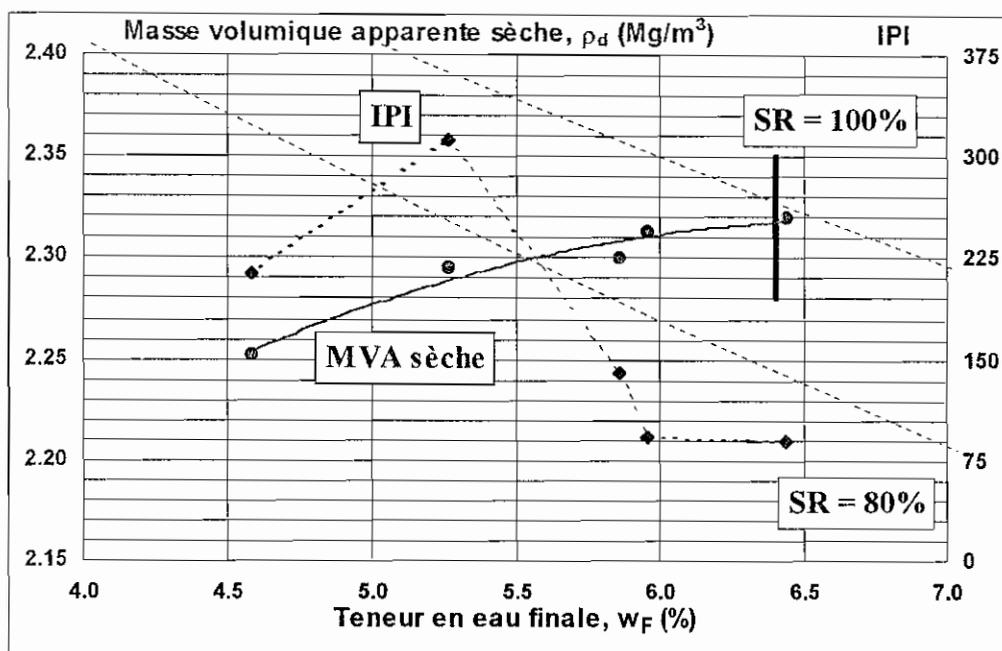


Figure III : Essai Proctor modifié.

### III.3 Détermination du délai de maniabilité (norme NF P 98-231-5)

Le délai de maniabilité a été déterminé par auscultation dynamique au BAUME, conformément à la norme NF P 98-231-5, et à une température d'essai de 20°C.

Le retardateur de prise adopté pour cette étude est le Sika Plastiroute, pour lequel nous avons testé trois dosages : 0.5, 1 et 1.5%. Les délais de maniabilité correspondants ont été respectivement de 3, 6 et 11 heures. Le dosage retenu est donc de 1% pour une température de fabrication et de mise en œuvre de 20°C.

### III.4 Essais de traction directe (norme NF P 98-232-2)

Ils sont destinés à évaluer les propriétés mécaniques de la grave-ciment, et à en déduire le dosage en liant optimal pour la classe de performance choisie.

Dans un premier temps, des éprouvettes témoins sans boue ont été testées suivant la formule de l'étude (100% de  $\rho_{dOPM}$ , 3.5% de ciment et une teneur en eau égale à  $w_{OPM}$ ). Peu de différences apparaissent entre les résultats avec et sans boue, à la précision des essais près (tableau VI).

	Avec boue	Sans boue
R <sub>t</sub> (MPa)	1.16	1.12
E <sub>t</sub> (MPa)	19 600	19 800

Tableau VI : Performances mécaniques à 28 jours avec et sans adjonction de boue.

Le tableau VII présente les résultats des essais de traction directe à 28 jours, réalisés suivant les modalités d'étude définies par la norme NF P 98-114-1 : les éprouvettes ont été confectionnées à des MVA correspondant à 95, 100, et 102% de  $\rho_{\text{OPM}}$ , à des teneurs en liant de 80, 100 et 120% de la teneur en liant de base, et à des teneurs en eau de  $w_{\text{OPM}} - 1$ ,  $w_{\text{OPM}}$  et  $w_{\text{OPM}} + 0.5$ .

MVA (Mg/m <sup>3</sup> )	2.31	2.31	2.31	2.19	2.36	2.31	2.31
w (%)	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	4.7	6.2
Dosage en ciment (%)	3.5	2.8	4.2	3.5	3.5	3.5	3.5
R <sub>t</sub> moyen (MPa)	1.16	0.99	1.14	0.78	1.24	0.89	1.13
E <sub>t</sub> moyen (MPa)	19 600	21 000	20 900	18700	21 200	20 900	19 000

Tableau VII : Résultats des essais de traction directe à 28 jours.

#### III.4 Formule retenue

La formule doit répondre aux spécifications indiquées au paragraphe III.1. Concernant les caractéristiques mécaniques, elle doit permettre d'obtenir une Grave-Ciment de classe G3 définie par ses performances à 360 jours.

Des coefficients indiqués dans la norme NF P 98-114-1 permettent d'estimer les performances mécaniques (R<sub>t</sub> et E<sub>t</sub>) à 360 jours à partir des résultats obtenus à 28 jours :

$$R_{t\ 360j} = R_{t\ 28j} / 0.60$$

$$E_{t\ 360j} = E_{t\ 28j} / 0.65$$

Nous avons adopté comme valeur de référence la limite inférieure de la classe G3 (IQE = 25 cm). Compte-tenu de la qualité de compactage demandée (q2) et des dispersions normales sur chantier (0.3% sur les teneurs en liant et 0.03 Mg/m<sup>3</sup> sur les densités), nous avons retenu une densité de référence de 2.26 Mg/m<sup>3</sup>, soit 98% de l'OPM, valeur généralement atteinte sur chantier. En fonction de ces hypothèses, le dosage en ciment sera de 3.0% pour les coefficients de calage précédents (cf. annexe 6).

#### IV - CONCLUSIONS

L'incorporation d'un faible pourcentage de boue en provenance de la carrière de la Chapelle Janson ne modifie pas sensiblement les performances mécaniques à 28 jours de la grave-ciment de Moulin de Thouru.

Cette boue a été dosée à 1.2% de la grave-ciment en matière sèche, soit 3.1% en matière humide pour une teneur en eau étudiée de 161%.

Les différents essais mécaniques réalisés en laboratoire dans le cadre de cette étude ont permis de mettre en évidence le très comportement du matériau, ce qui se traduit par l'adoption d'un dosage en liant minimal de 3%.

**Formule retenue :**

- Boue	La Chapelle Janson	1.2%
- 0/4	Moulin de Thouru	39.5%
- 4/10	Moulin de Thouru	22.0%
- 10/20	Moulin de Thouru	34.3%
- Ciment	CPJ CEM II/A 42.5 (L) CP2	3.0%
- Retardateur	Sika Plastiroute	1.0%
- Masse volumique réelle du mélange	2.736 Mg/m <sup>3</sup>	
- Teneur en eau à l'OPM	5.7%	
- MVA OPM	2.31 g/cm <sup>3</sup> (compacité de 84%)	

**Remarques :**

L'étude est fondée sur la granulométrie des échantillons utilisés. Toute modification de granulométrie des stocks de granulats devra entraîner un réajustement de la formule ci-dessus de manière à se rapprocher le plus possible de la courbe d'étude. Une dérive de la production par rapport aux matériaux analysés remettrait en cause les conclusions précédentes et conduiraient à la réalisation d'essais complémentaires.

Enfin, l'attention est portée sur le fait que les résultats de l'étude n'ont un sens, aussi bien en termes de performances mécaniques qu'en termes de délai de maniabilité, que si le même liant est réellement utilisé sur chantier.

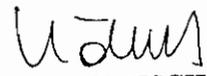
Le chef de l'Unité FMCC

  
O. Hanneury

Le Directeur du Laboratoire

Y. Bideau

p.o. Le Directeur-Adjoint

  
Edouard KOBISCH

## **ANNEXE 1 : LISTE DES NORMES UTILISEES**

- NF P 15-301 : Liants hydrauliques – Définitions, classifications et spécifications des ciments.
  
- XPP 18-540 : Granulats. Définitions, conformité, spécifications.
  
- P 18-560 : Analyse granulométrique par tamisage.
  
- NF P 98-114-1 : Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques.  
Partie 1 : Graves traitées aux liants hydrauliques.
  
- NF P 98-115 : Exécution des corps de chaussée.
  
- NF P 98-116 : Graves – Ciment – Définitions, composition, classification.
  
- NF P 98-230-1 : Fabrication des éprouvettes par vibrocompression.
  
- NF P 98-231-1 : Essai Proctor Modifié adapté aux graves et sables utilisés en assises de chaussées.
  
- NF P 98-231-5 : Comportement au compactage des matériaux d'assises autres que traités aux liants hydrocarbonés. Partie 5 : détermination par auscultation dynamique du délai de maniabilité des graves traitées aux liants hydrauliques.
  
- NF P 98-232-2 : Essai de traction directe sur graves et sables.

## ***LISTE DES ANNEXES***

**1 : Liste des normes utilisées**

**2 : Rapport d'essais de l'étude**

**3 : Identification des composants, formule d'étude et résultats de l'essai Proctor modifié**

**4 : Essais de maniabilité par mesures soniques**

**5 - Résultats des essais de traction directe**

**6 - Détermination du dosage en ciment**

## **ANNEXE 2 : RAPPORT D'ESSAIS DE L'ETUDE**



Ministère  
de l'Équipement,  
des Transports  
et du Logement



Centre d'Études  
Techniques  
de l'Équipement  
de l'Ouest

Laboratoire  
Régional  
des Ponts  
et Chaussées  
de Saint-Brieuc

# RAPPORT D'ESSAIS n° 24-99/ 2

Demandeur: **UNICEM** Chantier: **Etude de Grave-Ciment-Boue**  
 Dossier n°: **990255**  
 Prélèvement effectué par: **UNICEM (boue) - Pellon (granulats)** le: **23/06/99**  
 Essai effectué le: **27/08/99** au: **Laboratoire de St-BRIEUC**  
 Technique utilisée: **Grave - Ciment 0/20**  
 Respect de la norme d'essai: oui  non   
 Si non, pourquoi:

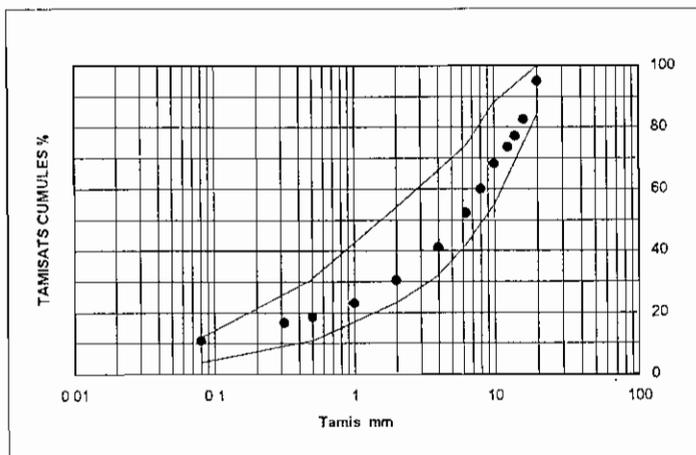
## Etude de Grave - Ciment

Directive LCPC - SETRA (Juin 1983)

Normes NF P 98-116 (Juillet 1991) - NF P 98-114-1 (Décembre 1992)

### 1 - GRANULATS

Nature							
Provenance	1	Boue	Beaucé	99-72	%	1.2	
par	2	0/4	Moulin de Thouru	99-69	%	39.0	
fraction	3	4/10	Moulin de Thouru	99-69	%	22.0	
N° de reception	4	10/20	Moulin de Thouru	99-69	%	34.3	
	5	Ciment	St Pierre la Cour	992	%	3.5	
Masse Volumique Réelle (MVR) du mélange						T/m3	2.736



Granulométrie - Tamisats en %			
Tamis mm	Formule	min-max de NFP98-116	
20	95.0	85	100
16	82.7		
14	77.1		
12.5	73.5		
10	68.1	55	88
8	60.0		
6.3	52.2	42	74
4	41.2	32	66
2	30.5	23	54
1	23.1		
0.5	18.7	11	31
0.315	16.7		
0.08	10.9	4	12

#### SABLE

No	0/d	PS	BLEU	MVR
2	0/4		1.4	

#### GRAVILLONS

No	d/D	LA	MDE	MVR
1				
3	4/10	19	21.8	
4				

**2 - LIANT** Nature: CPJ CEM II/A 42.5 ( L ) CP2 992 Provenance: St Pierre la Cour

Surface Blaine: MVR: 3.04

Prise : début: fin: Essai sur mortier ISO: Rf(28j): MPA Rc(28j):

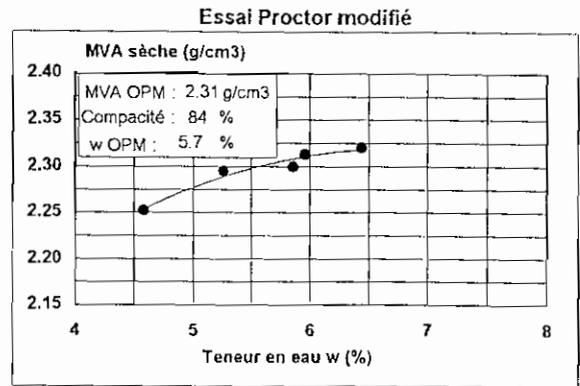
L'attention est attirée sur le fait que les résultats mentionnés par le présent rapport d'essai ont été obtenus avec l'échantillon défini ci-dessus mais que la portée et les conclusions à tirer de ces résultats.

- sont indiquées en application du texte de référence suivant fixé par le demandeur:
- font l'objet du document suivant: *rapport d'étude*
- n'ont pas été demandées
- ce rapport d'essai est établi en 1 exemplaire(s)

La reproduction de ce procès-verbal n'est autorisée que sous la forme de fax-similé photographique intégral  
 Il compte 2 pages et annexe(s)

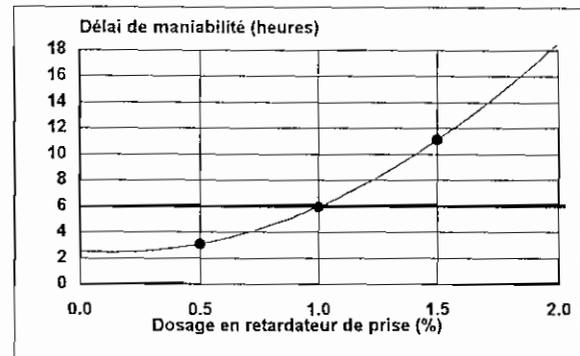
St Brieuc, le 27/08/99  
  
**O. HAMEURY**  
 Chef de l'unité FMFC  
 (Formulation des Matériaux  
 et Modélisation des Chaussées)

<b>Directives NF P 98-116</b>	
<b>Compacité OPM ≥ 80%</b>	
<b>3% ≤ c ≤ 4%</b>	
<b>Classe G3 (20 cm ≤ IQE 1 an ≤ 25 cm)</b>	
<b>Délai de maniabilité :</b>	<b>6 heures</b>



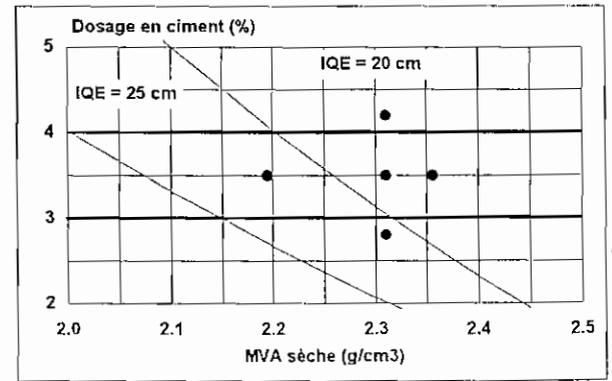
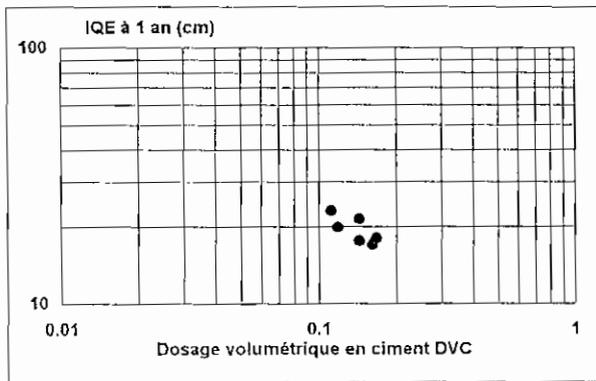
**Délai de maniabilité par auscultation dynamique :**

T (°C)	Retardateur (*)	w (%)	Délai maniabilité (heures)
20	0.5	5.7	3.1
20	1.0	5.7	6.0
20	1.5	5.7	11.1
<b>20</b>	<b>1</b>	<b>5.7</b>	<b>6.0</b>



Retardateur de prise: Sika 981

	Dosage en ciment c (%)	MVA sèche (g/cm3)	Dosage volumétrique en ciment DVC	w (%)	Dosage en retardateur de prise (%)	Performances à 28 jours			Performances estimées à 1 an		
						Rt (MPa)	Et (MPa)	IQE (cm)	Rt (MPa)	Et (MPa)	IQE (cm)
Formules étudiées	3.5	2.31	0.144	5.7	1	1.16	19577	23.6	1.94	30118	17.6
	2.8	2.31	0.119	5.7	1	0.99	20977	26.6	1.65	32272	19.9
	4.2	2.31	0.167	5.7	1	1.14	20883	24.1	1.90	32128	18.0
	3.5	2.19	0.112	5.7	1	0.78	18662	30.7	1.30	28711	23.1
	3.5	2.36	0.161	5.7	1	1.24	21177	22.9	2.06	32580	17.0
	3.5	2.31	0.144	4.7	1	0.89	20865	28.5	1.49	32100	21.4
	3.5	2.31	0.144	6.2	1	1.13	19005	24.0	1.88	29238	17.9
<b>Retenue</b>	<b>3.0</b>	<b>2.2638</b>	<b>0.113</b>	<b>5.7</b>	<b>1</b>						<b>21.5</b>



$$IQE (cm) = 5.66 DVC^{-0.61}$$

- Nota :
- OPM : Optimum Proctor modifié
  - (\*) Pourcentage exprimé par rapport au poids de ciment
  - MVA : Masse Volumique apparente
  - Rt : Résistance à la traction
  - Et : Module sécant à 30% de la résistance à la rupture
  - IQE : Indice de qualité élastique

St Brieuc, le 11/10/99

*O. HAMEURY*

**O. HAMEURY**  
 Chef de Unité FMMC  
 (Formulation des Matériaux et Modélisation des Chaussées)

**ANNEXE 3 : IDENTIFICATION DES COMPOSANTS  
FORMULE D'ETUDE  
ET ESSAI PROCTOR MODIFIE**

Carrière BEAUCE

imprimé le 17 juin 1999

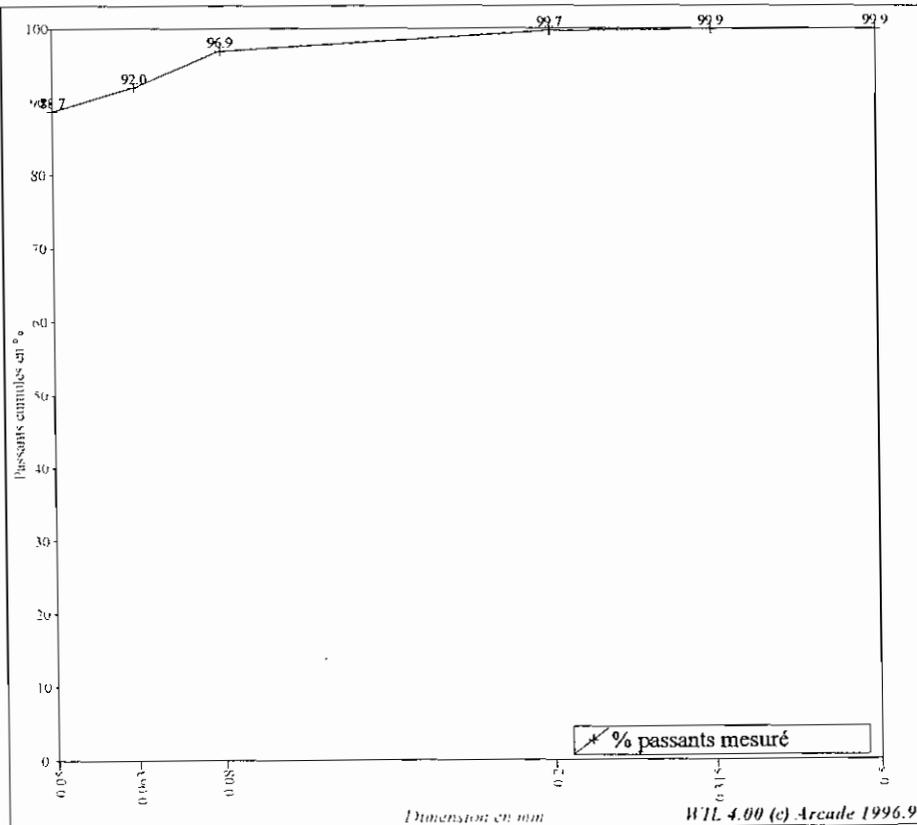
Granulats Boue : Boue de décantation (0/0.08 mm)      Utilisateur : 99/0255  
 Valorisation des Boues

Contrôleur Labo01	Laboratoire PC ST BRIEUC
N° prélèvement n° 99168003	25000 g prélevés le 11/06/1999
Mode	Inconnue
Lieu de stockage	Stock de carrière
Origine	Divers
Fait par	Client
Observations internes	

ESSAIS	minimum	Valeur	maximum	Norme
Valeur de bleu sur le 0-2mm (VB)		0.2 g		EN 933-9
Chaleur en eau (W)		161.0 %		P 18-554/5

AMIS mini	%tamisat	maxi	cumul refus
0.500	99.94		0.30 g
0.315	99.85		0.80 g
0.200	99.68		1.70 g
0.150	96.92		16.50 g
0.125	92.00		42.90 g
0.100	88.71		60.50 g

A. PELLON



Carrière MOULIN DE THOURU

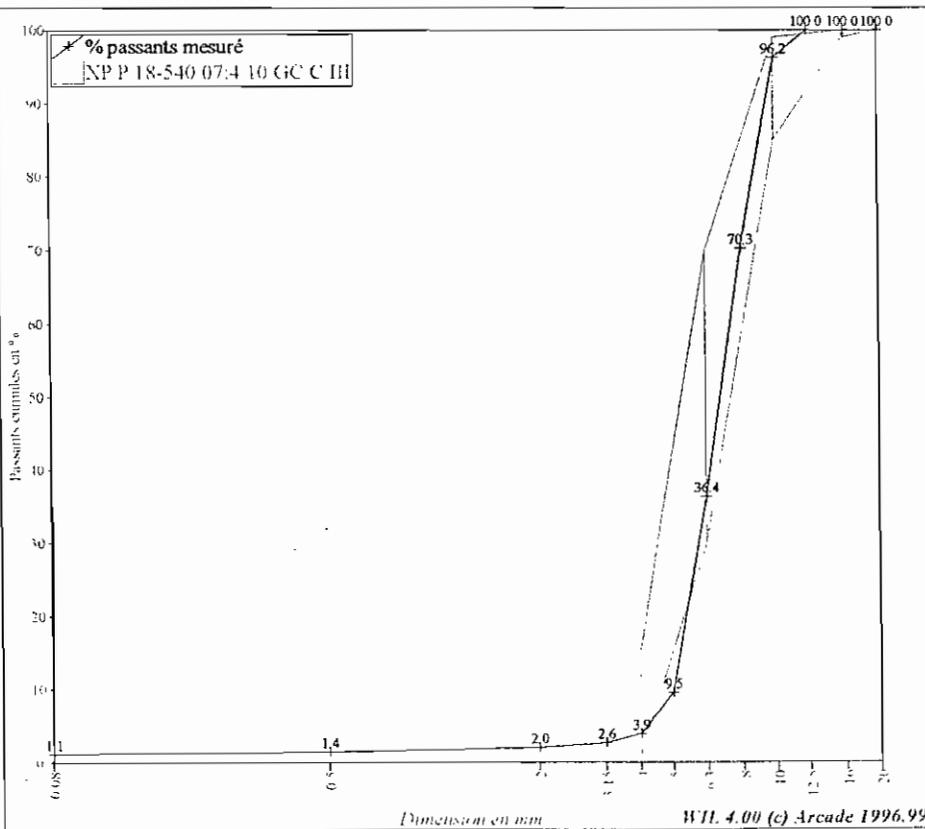
imprimé le 02 juillet 1999

Granulats 4/10GC : Gravillon 4/10      Utilisateur : 99/0255  
 usage : Grave Ciment      Valorisation des Boues

Contrôle Labo01	Laboratoire PC ST BRIEUC
N° prélèvement n° 99174003	25000 g prélevés le 25/06/1999
Mode	Main de fer
Lieu de stockage	Stock de carrière
Adresse	Aire stockage sur gerbé
Fait par	AP
Observations internes	99-69

SAIS	minimum	Valeur	maximum	Norme
Applatissage (A)		24.0 %	25.0	P 18-561
Essai-Angles (Résist.Fragment.) (LA)		19	30	P 18-573
+ MDE (LAMDE=LA+MDE)		40.88	45.00	
Micro Deval (Résistance usure) (MDE)		21.8	25.0	P 18-572
Imprégnation superficielle des gravillons (P=%0.5)		1.37 %	2.00	P 18-591
Imprégnation en eau (W)		0.1 %		P 18-554/5

PANNS	mini	%tamisat	maxi	cumul refus
7.000	100.0	100.0		0.0 g
5.000	99.0	100.0		0.0 g
12.500		100.0		0.0 g
9.000	85.0	96.2	99.0	75.0 g
7.000		70.3		585.0 g
6.300	30.0	36.4	70.0	1253.0 g
5.000		9.5		1782.0 g
4.000	1.0	3.9	15.0	1893.0 g
3.150		2.6		1917.0 g
2.000		2.0		1929.0 g
1.500		1.4		1942.0 g
0.080		1.1		1947.0 g



PELLON

*(Signature)*

Carrière MOULIN DE THOURU

imprimé le 02 juillet 1999

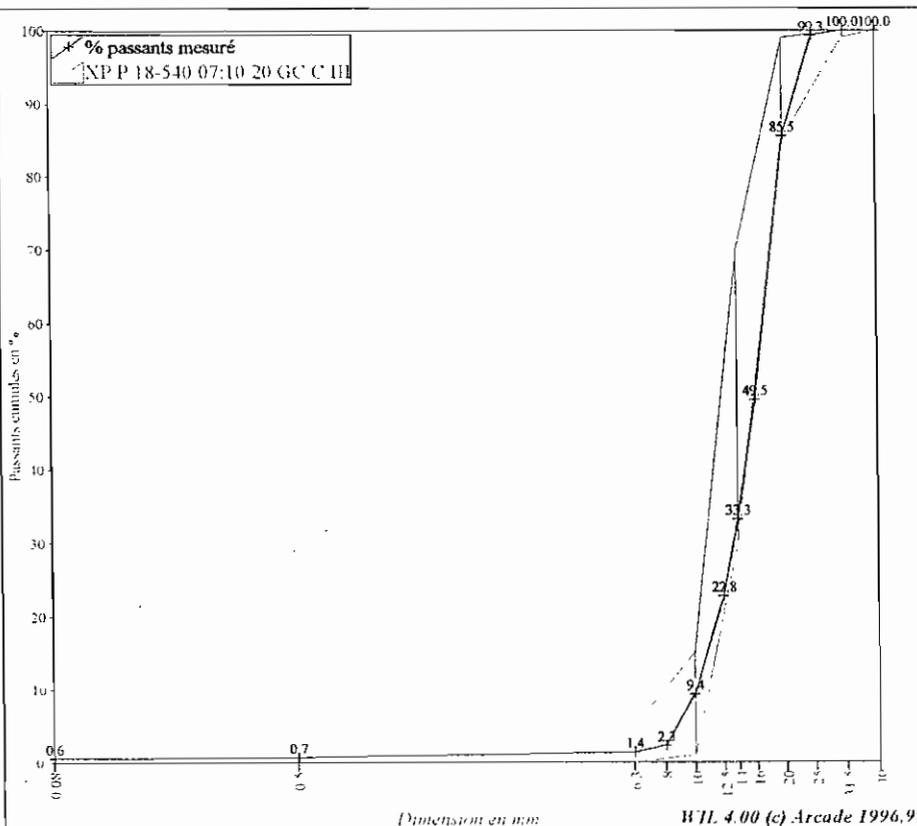
Canulats 10/20GC : Gravillon 10/20  
 Age : Grave Ciment

Utilisateur : 99/0255  
 Valorisation des Boues

Contrôleur Labo01	Laboratoire PC ST BRIEUC
Prélèvement n° 99174004	25000 g prélevés le 25/06/1999
Mode	Main de fer
Lieu de stockage	Stock de carrière
Catégorie	Aire stockage sur gerbé
Fait par	AP
Observations internes	99-69

INDICIS	minimum	Valeur	maximum	Norme
Aplatissement (A)		13.4 %	20.0	P 18-561
Indice d'Anges (Résist.Fragment.) (LA)			30	P 18-573
Indice + MDE (LAMDE=LA+MDE)			45.00	
Micro Deval (Résistance usure) (MDE)			25.0	P 18-572
Préparté superficielle des gravillons (P=%0.5)		0.72 %	2.00	P 18-591
Teneur en eau (W)		0.1 %		P 18-554/5

TAMIS	mini	%tamisat	maxi	cumul refus
0.075	100.0	100.0		0.0 g
0.150	99.0	100.0		0.0 g
25.000		99.3		15.0 g
0.300	85.0	85.5	99.0	320.0 g
0.600		49.5		1118.0 g
1.180	30.0	33.3	70.0	1477.0 g
2.500		22.8		1708.0 g
5.000	1.0	9.4	15.0	2006.0 g
6.000		2.3		2162.0 g
6.300		1.4	5.0	2181.0 g
6.500		0.7		2197.0 g
6.080		0.6		2200.0 g



PELLON

(35)	Traitement des boues												
COURBE GRANULOMETRIQUE DE													
GC 0/20													
Tamis mm	Boue Beaucé %	0/4 Moulin de Thouru %	4/10 Moulin de Thouru %	10/20 Moulin de Thouru %	ciment CPJ 42.5 %							Mélange %	
20	100.00	100.00	100.00	85.50	100.00					0.00	0.00	95.0	
16	100.00	100.00	100.00	49.50	100.00					0.00	0.00	82.7	
14	100.00	100.00	100.00	33.30	100.00					0.00	0.00	77.1	
12.5	100.00	100.00	100.00	22.80	100.00					0.00	0.00	73.5	
10	100.00	100.00	96.20	9.40	100.00					0.00	0.00	68.1	
8	100.00	100.00	70.30	2.30	100.00					0.00	0.00	60.0	
6.3	100.00	100.00	36.40	1.40	100.00					0.00	0.00	52.2	
5	100.00	98.40	9.50	1.20	100.00					0.00	0.00	45.6	
4	100.00	90.40	3.90	1.10	100.00					0.00	0.00	41.2	
3.15	100.00	80.10	2.60	1.00	100.00					0.00	0.00	36.9	
2	100.00	64.20	2.00	0.90	100.00					0.00	0.00	30.5	
1	100.00	45.40	1.70	0.80	100.00					0.00	0.00	23.1	
0.5	99.94	34.60	1.40	0.70	100.00					0.00	0.00	18.7	
0.315	99.85	29.50	1.30	0.70	100.00					0.00	0.00	16.7	
0.2	99.68	24.70	1.20	0.60	100.00					0.00	0.00	14.8	
0.08	96.92	15.70	1.10	0.60	90.00					0.00	0.00	10.9	
Formule	GC 0/20	99-72	Boue Beaucé	1.2	(masse sèche)	MVRg				2.75		à vérifier	
		99-69	0/4 Moulin de Thouru	39.0									
		99-69	4/10 Moulin de Thouru	22.0									
		99-69	10/20 Moulin de Thouru	34.3									
			ciment CPJ 42.5	3.5									
Dossier n°	990255	ETUDE :	- MVRg WS		<b>Dosage en boue : 3.13%</b>								
			- Proctor + délai de maniabilité		<b>Teneur en eau apportée par la boue : 1.93%</b>								
			- Etude complète de GC										

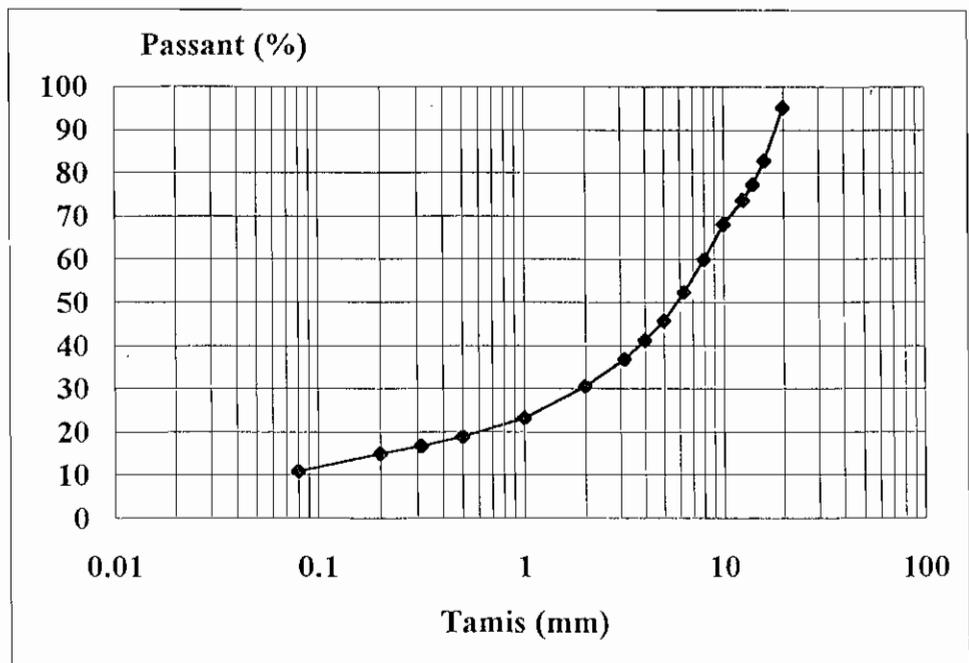
N° de dossier : 990255  
 Chantier : Traitement des boues  
 Type : GC 0/20  
 Date d'essai : 29/07/99

## Formule

N°	Fraction	Carrière	%
99-72	0/0	Beucé	1.2
99-69	0/4	Moulin de Thouru	39.0
99-69	4/10	Moulin de Thouru	22.0
99-69	10/20	Moulin de Thouru	34.3
971	Liant	CPJ 42.5	3.5

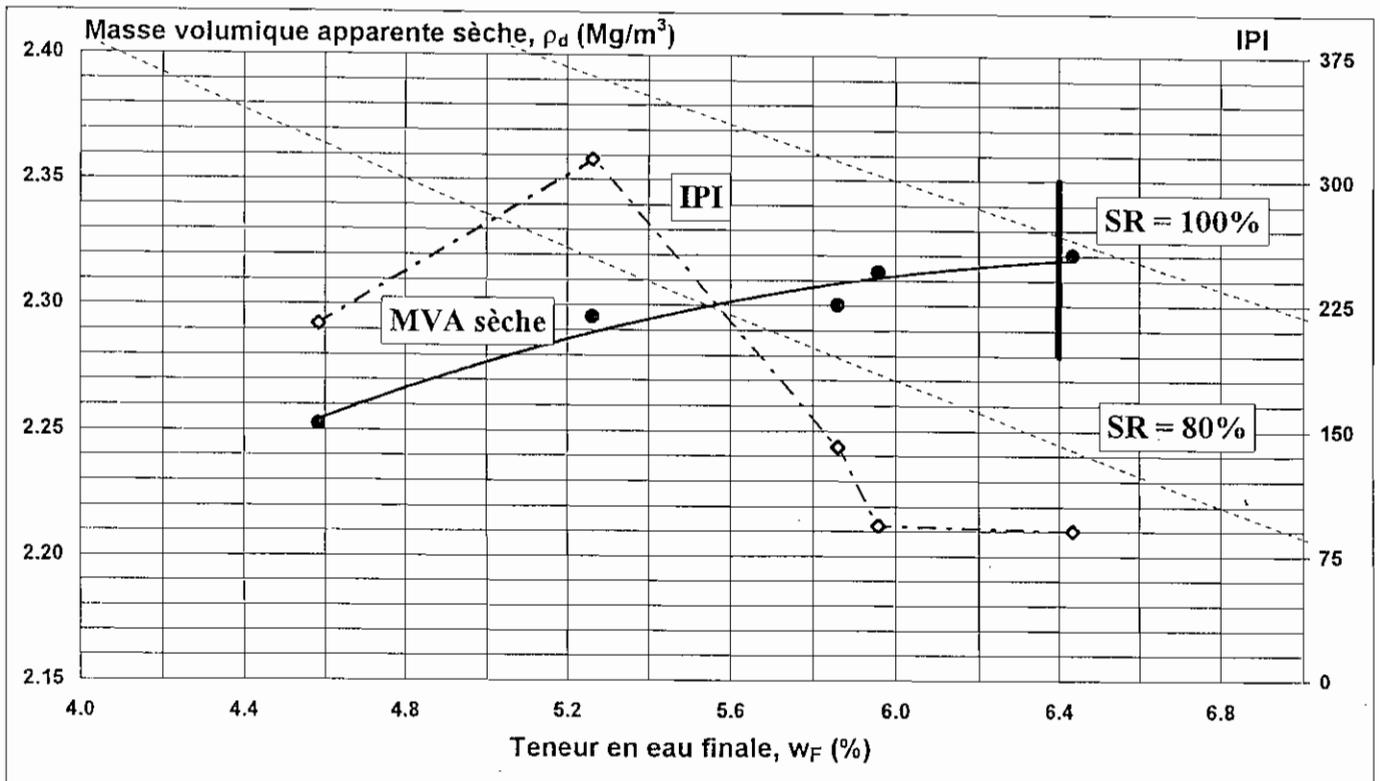
## Granulométrie

Tamis	Passant
20	95.0
16	82.7
14	77.1
12.5	73.5
10	68.1
8	60.0
6.3	52.2
5	45.6
4	41.2
3.15	36.9
2	30.5
1	23.1
0.5	18.7
0.315	16.7
0.2	14.8
0.08	10.9



# ESSAI PROCTOR MODIFIE N° 24/ 994

Teneurs en eau				MVA		IPI
Théorique	Initiale	Finale		Humide	Sèche	
%	$W_0$ %	$W_F$ %	$W_0 - W_F$ %	$\rho_h$ Mg/m <sup>3</sup>	$\rho_d$ Mg/m <sup>3</sup>	
4.50	4.52	4.58	-0.06	2.356	2.252	213
5.25	5.13	5.26	-0.13	2.416	2.295	312
6.00	5.90	5.86	0.04	2.435	2.300	140
6.40	6.13	5.96	0.17	2.451	2.313	93
6.75	6.74	6.44	0.30	2.470	2.320	90



MVR du mélange granulaire	MVRg	2.736	Mg / m <sup>3</sup>
	Ressuage	$w_r$	6.40 %
		$\rho_{dr}$	Mg / m <sup>3</sup>
OPM	$w$	5.70	%
	$\rho_d$	2.31	Mg / m <sup>3</sup>
	compacité	84.4	%

## **ANNEXE 4 : MESURE DU DELAI DE MANIABILITE**



BAUME  
version 0.97

LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES  
SAINT BRIEUC

grave-ciment-boue UNICEM

Affaire : 990255

ESSAI MANIABILITE

Voie 1 - Eprouvette : 992171

Formulation

Coupure	Libellé	Dosage
0/4	Thouru 99-69	39.0 %
4/10	Thouru 99-69	22.0 %
10/20	Thouru 99-69	34.3 %
Boue	Henry 99-72	1.2 %
ciment992	cpj 42.5 CEM II/A L	3.5 %
retard	plastiroute 981	0.5 %

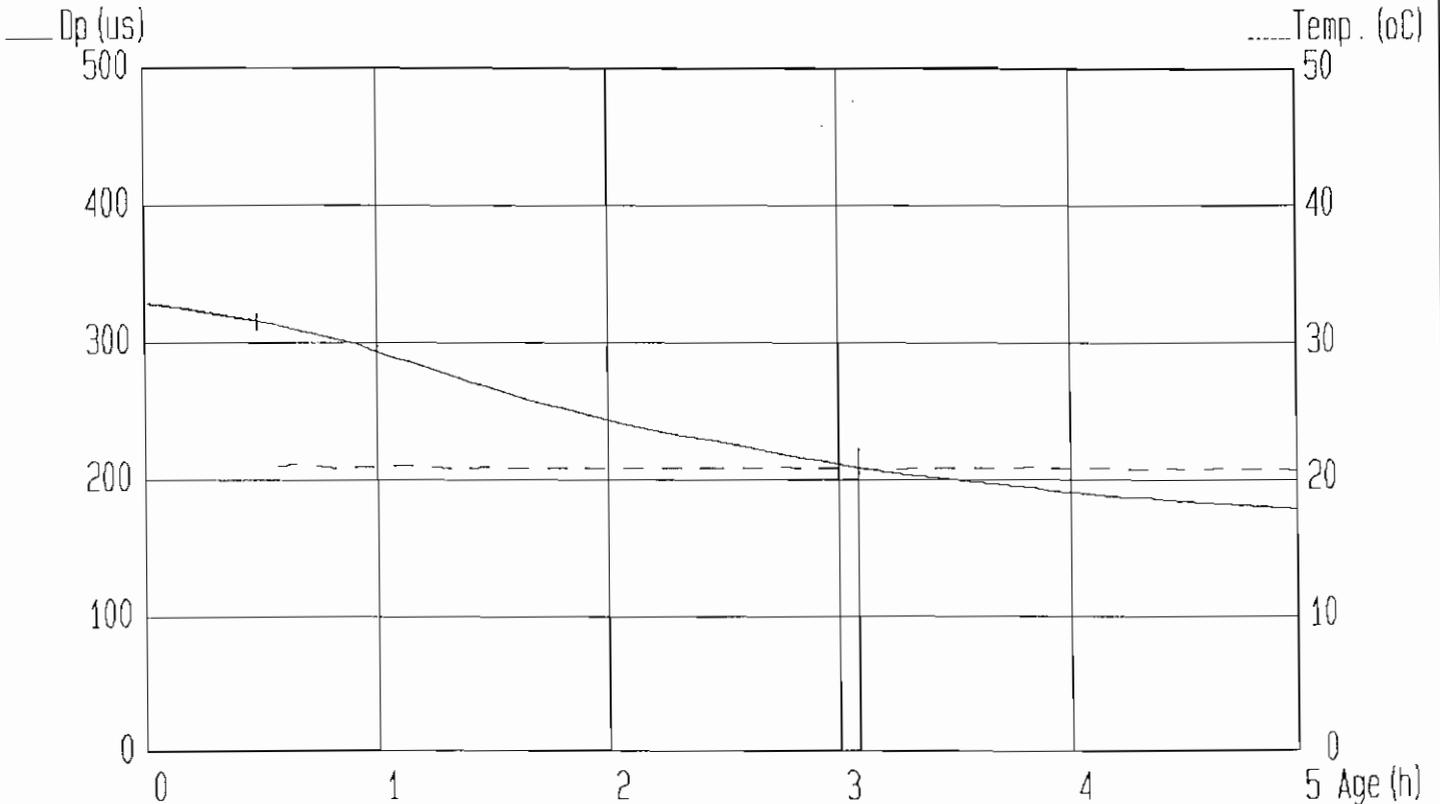
Compactage

Masse Volumique : 2.31 g/cm<sup>3</sup>  
W% : 5.7 %

Mesures

Date essai : 05.08.1999  
Dpo : 329 us  
Dpo \* 0.65 : 213 us  
Dm : 3:05  
Temp. moyenne : 20.9 oC

M





BAUME  
version 0.97

LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES  
SAINT BRIEUC

grave-ciment-boue UNICEM

Affaire : 990255

ESSAI MANIABILITE

Voie 2 - Eprouvette : 992172

Formulation

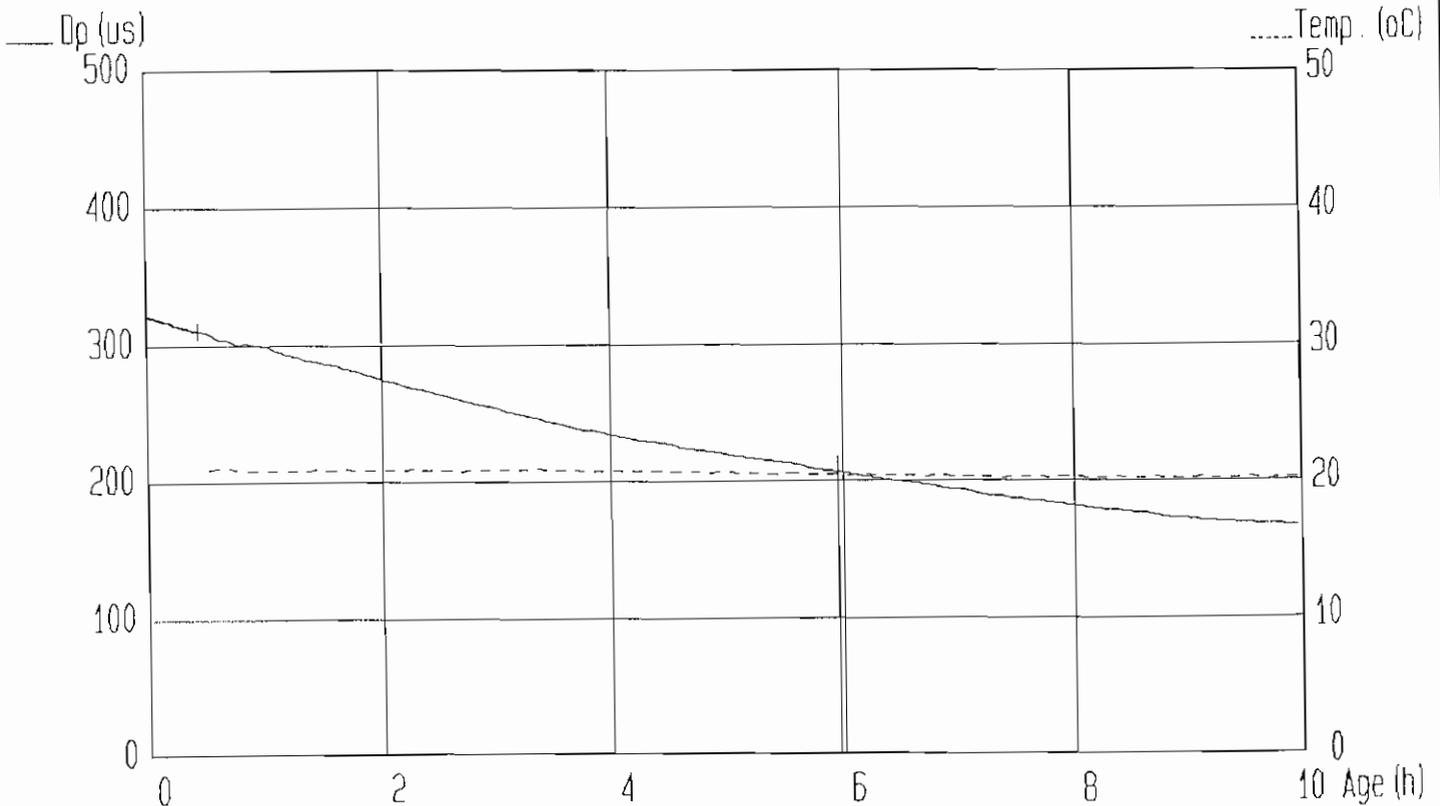
Coupure	Libellé	Dosage
0/4	Thouru 99-69	39.0 %
4/10	Thouru 99-69	22.0 %
10/20	Thouru 99-69	34.3 %
Boue	Henry 99-72	1.2 %
ciment992	cpj 42.5 CEM II/A L	3.5 %
retard	plastiroute 981	1.0 %

Compactage

Masse Volumique : 2.31 g/cm<sup>3</sup>  
W% : 5.7 %

Mesures

Date essai : 05.08.1999  
Dpo : 321 us  
Dpo \* 0.65 : 208 us  
Dm : 5:57  
Temp. moyenne : 20.8 oC  
M





BAUME  
version 0.97

LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES  
SAINT BRIEUC

grave-ciment-boue UNICEM

Affaire : 990255

ESSAI MANIABILITE

Voie 3 - Eprouvette : 992173

Formulation

Coupure	Libellé	Dosage
0/4	Thouru 99-69	39.0 %
4/10	Thouru 99-69	22.0 %
10/20	Thouru 99-69	34.3 %
Boue	Henry 99-72	1.2 %
ciment992	cpj 42.5 CEM II/A L	3.5 %
retard	plastiroute 981	1.5 %

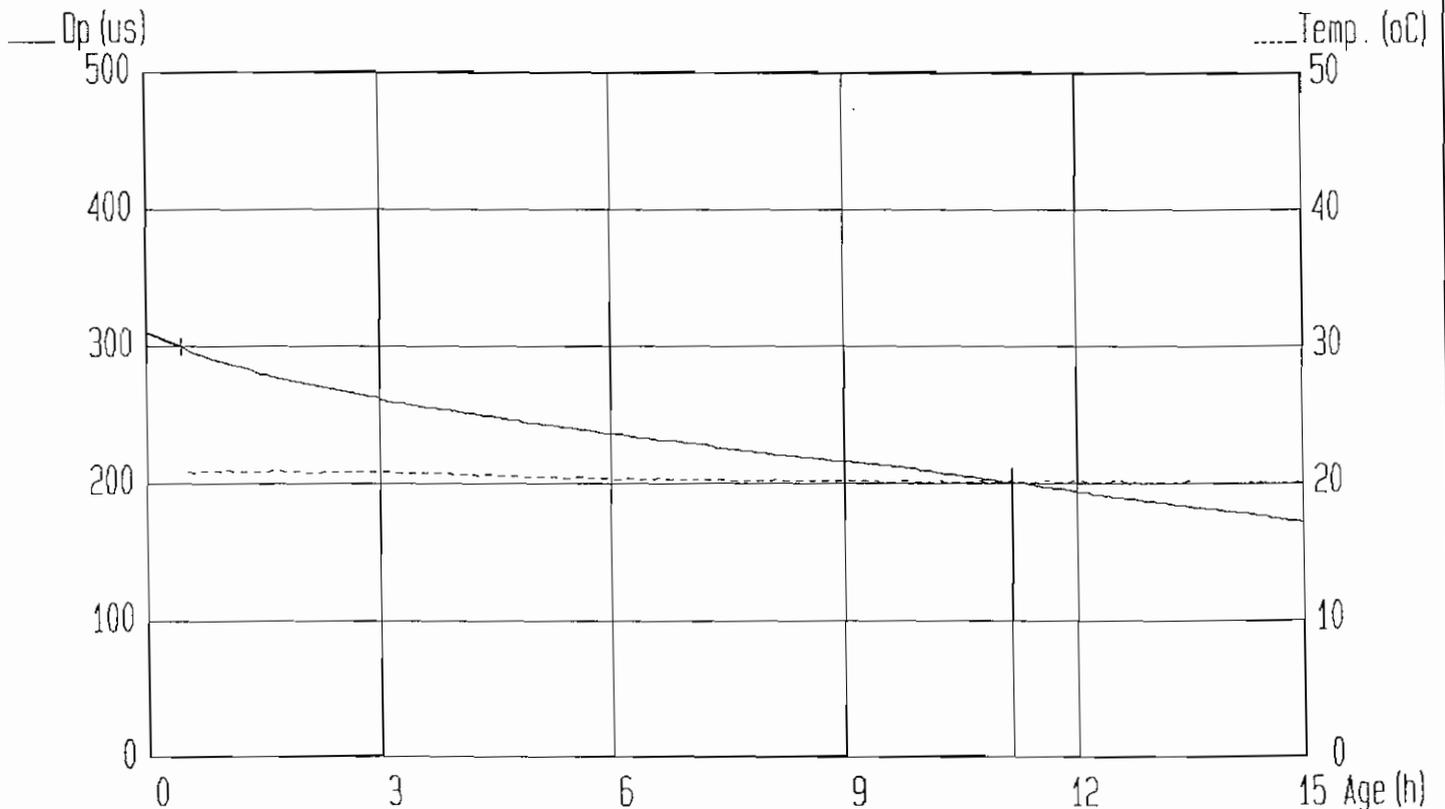
Compactage

Masse Volumique : 2.31 g/cm<sup>3</sup>  
W% : 5.7 %

Mesures

Date essai : 05.08.1999  
Dpo : 310 us  
Dpo \* 0.65 : 201 us  
Dm : 11:08  
Temp. moyenne : 20.5 oC

M

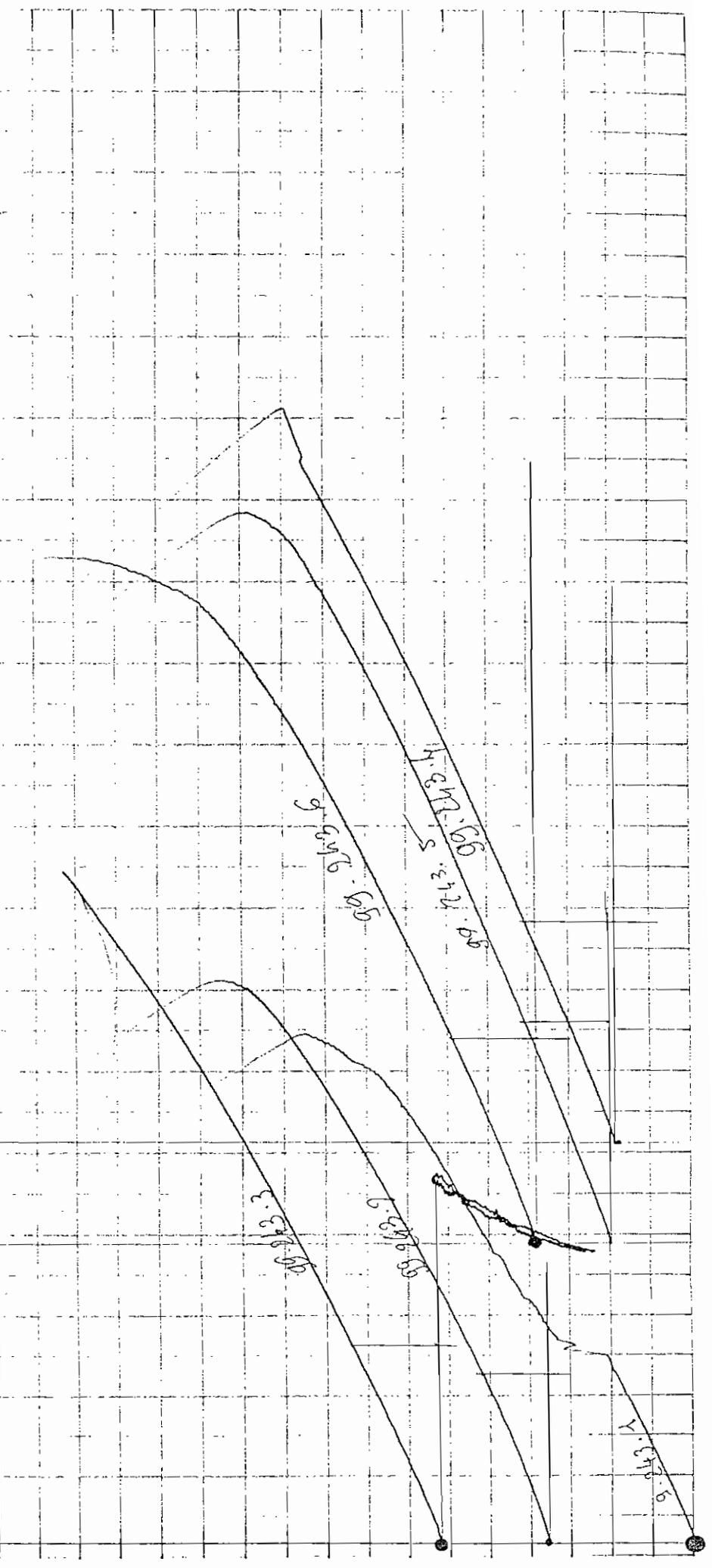


**ANNEXE 5 : RESULTATS DES ESSAIS DE TRACTION DIRECTE**

RANGES: 7.960V 10.00V 766.8mV  
 OFFSETS: 8.5V 0.0V 0.10V

TOTAL TIME: 1.00S  
 POST-TRIG: 0.0S  
 TRIGGER: MAN

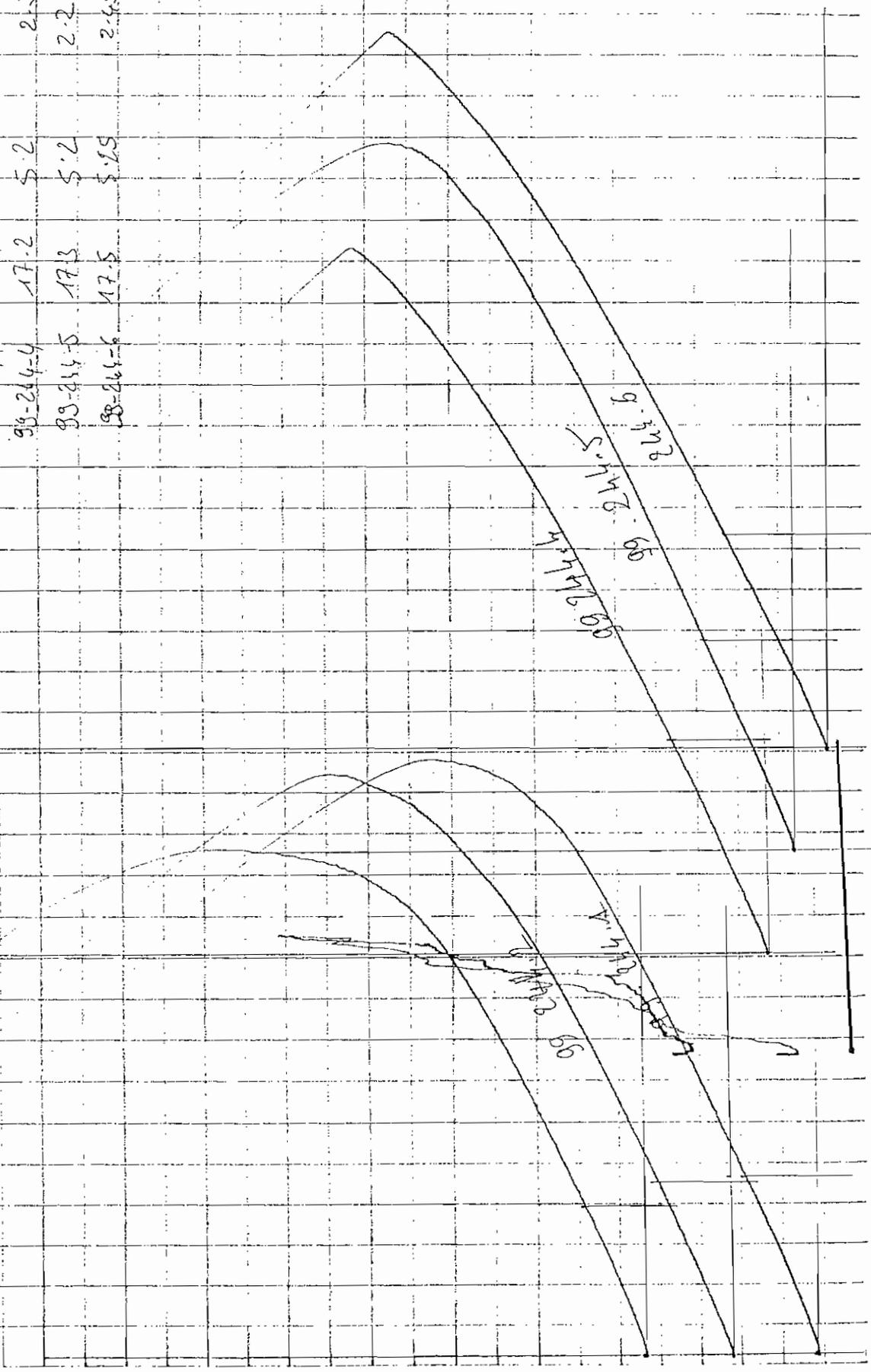
Exp. Sample No.	Rt (Sec)	a.s. (Rt)	S (Sec)
99-243-1	12.6	4.2	1.6
99-243-2	13.9	4.85	2.1
99-243-3	16.5	5.4	2.2
99-243-4	18.0	5.4	2.1
99-243-5	17.5	5.0	2.1
99-243-6	16.8	5.0	2.1



9.943.1

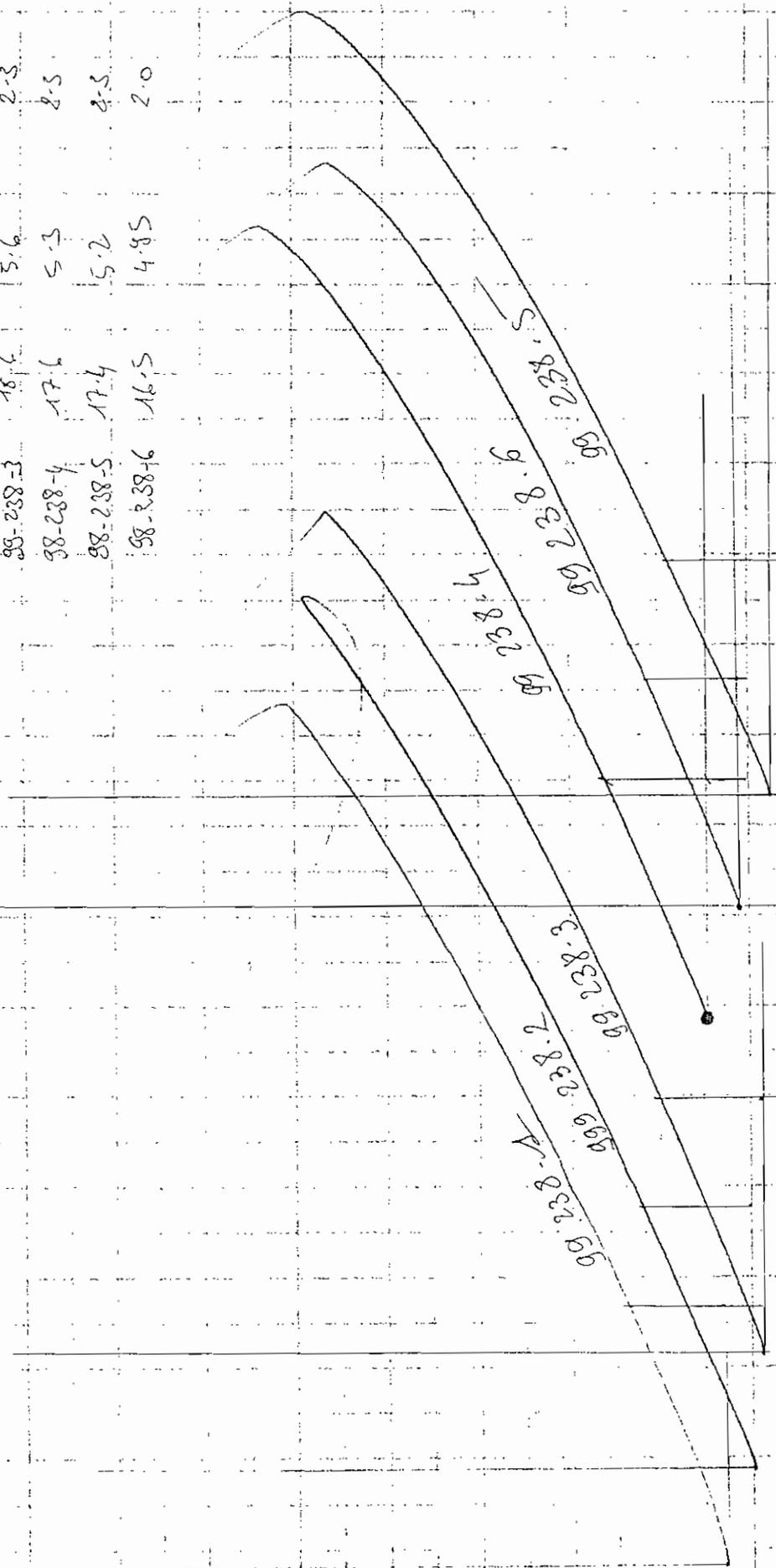
RANGES: 7.960V 10.00V 766.8mV  
 OFFSETS: 8.5V 0.0V 0.10V  
 TOTAL TIME: 1.00S  
 POST-TRIG: 0.0S  
 TRIGGER: MAN

Epworth	R <sub>g</sub> (ms)	0.3 R <sub>g</sub> (ms)	d (µm)
99-244-1	16.5	4.9	1.7
99-244-2	16.2	4.8	1.8
99-244-3	12.4	3.7	1.5
99-244-4	17.2	5.2	2.3
99-244-5	17.3	5.2	2.2
99-244-6	17.5	5.25	2.45



RANGES: 7.960V 10.00V 766.8mV  
 OFFSETS: 8.5V 0.0V 0.10V  
 TOTAL TIME: 1.00S  
 POST-TRIG: 0.0S  
 TRIGGER: MAN

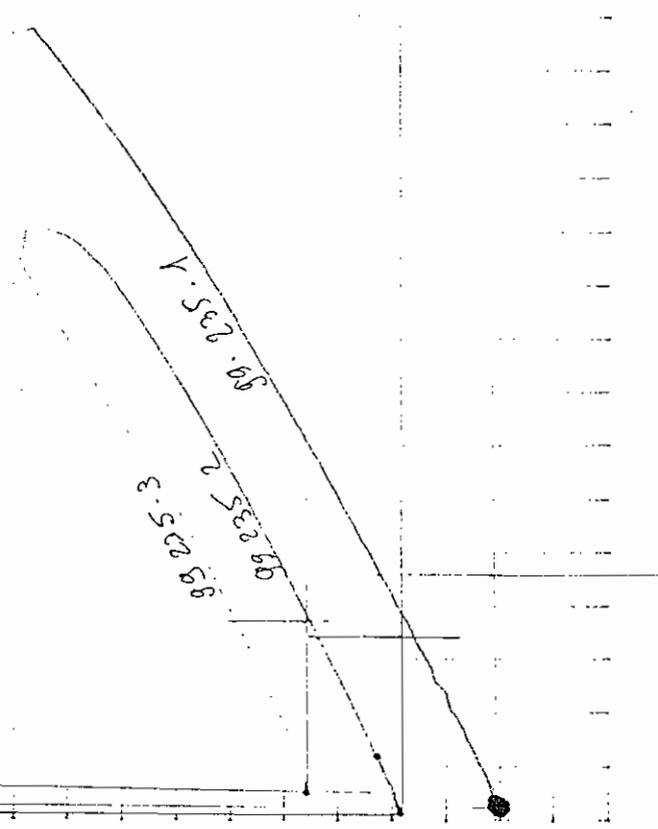
Epravit	R <sub>t</sub> ( $\mu$ )	0.3R <sub>t</sub> ( $\mu$ )	d( $\mu$ )
99-238-1	19.4	5.7	2.15
99-238-2	19.4	5.8	2.4
99-238-3	18.6	5.6	2.3
98-238-4	17.6	5.3	2.5
98-238-5	17.4	5.2	2.5
98-238-6	16.5	4.95	2.0

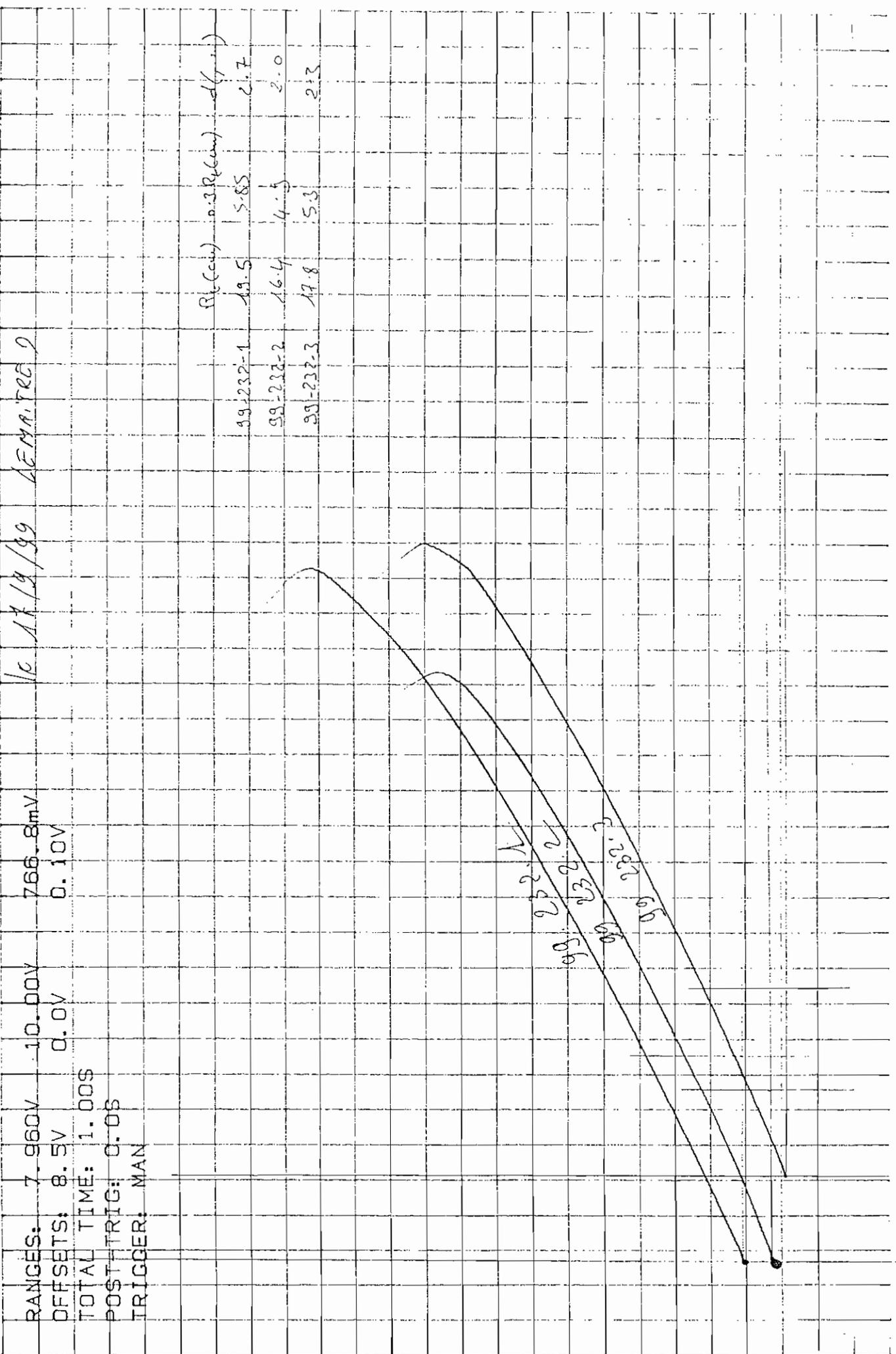


RANGES: 7.960V 10.00V 766.8mV  
 OFFSETS: 0.0V 0.0V 0.0V  
 TOTAL TIME: 1.00S  
 POST-TRIG: 0.0S  
 TRIGGER: MAN

RANGES: 7.960V 10.00V 766.8mV  
 OFFSETS: 8.5V 0.0V 0.10V  
 TOTAL TIME: 1.00S  
 POST-TRIG: 0.0S  
 TRIGGER: MAN

	Rt(cm)	0.5Rt(cm)	d(μm)
98-285-1	14.5	4.85	2.1
99-285-2	11	3.3	1.55
99-285-3	10.5	3.15	1.5





RANGES: 7.960V 10.00V 766.8mV  
 OFFSETS: 8.5V 0.0V 0.10V  
 TOTAL TIME: 1.00S  
 POST-TRIG: 0.0S  
 TRIGGER: MAN

10 17/9/99 4EMAR.FRE.D

	Rt (cm)	0.3R (cm)	d(7.1.)
99-232-1	19.5	5.85	2.7
99-232-2	16.4	4.5	2.0
99-232-3	17.8	5.3	2.3

99-232-1  
 99-232-2  
 99-232-3

## ANNEXE 6 : DETERMINATION DU DOSAGE EN LIANT

L'indice de Qualité Elastique (IQE) est relié, d'après les résultats des essais de traction précédents, au Dosage Volumétrique en Ciment (DVC) par la relation :

$$\text{IQE (cm)} = 5.66\text{DVC}^{-0.61}$$

En retenant une valeur de l'IQE correspondant à la limite inférieure de la classe G3 (IQE=25 cm), on déduit de la formule précédente un DVC de 0.089, soit pour une densité de  $2.26 \text{ Mg/cm}^3$  (98% de  $\rho_{\text{dOPM}}$ ) un dosage en ciment  $c=2.28\%$ .

En tenant compte des dispersions admissibles sur chantier ( $\sigma_c = 0.3\%$  pour le ciment et  $\sigma_{\text{pd}} = 0.03 \text{ g/cm}^3$  pour la densité), la variation du DVC s'établit à  $\sigma_{\text{DVC}} = 0.012$ .

On en déduit pour un risque statistique de 5% le DVC de référence :

$$\text{DVC} = 0.089 + 1.65 \times 0.012 = 0.109$$

Le dosage en ciment correspondant est alors de 3.0% pour une densité moyenne de 98% de  $\rho_{\text{dOPM}}$ .

	<p><b>ANNEXE 3 :</b> <b>Comportement au gel des matériaux</b> <b>élaborés</b></p>
--	---

# Valorisation des boues résultant de l'alcalinisation des eaux d'exhaure acides de carrières

## Comportement au gel des matériaux élaborés

Le présent travail avait pour but de compléter les études précédentes concernant l'influence d'une addition de boues sur les propriétés mécaniques de graves ciment.

Le comportement au gel des matériaux ainsi obtenus a été examiné à travers un essai de résistance au gel-dégel conformément à la norme NF P 98-234-1 .

L'essai consiste à déterminer le rapport des résistances en compression d'éprouvettes de matériau soumises et non soumises à des cycles de gel-dégel. La norme prévoit que l'essai est pratiqué sur deux séries de 3 éprouvettes 16/32 confectionnées suivant la norme NF P 98-230-1. Les éprouvettes ont été fournies par le LRPC de Saint Briec.

A l'issue d'une durée de conservation de 28 jours, les éprouvettes sont immergées à pression atmosphérique dans de l'eau à  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  pendant 24 heures. Elles sont ensuite égouttées, conformément à la norme, pendant 1 heure puis étanchées à l'aide d'un film thermorétractable thermosoudé. La série témoin est conservée à  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  jusqu'à l'essai de compression. La deuxième série de 3 éprouvettes est placée dans une enceinte climatique programmable où elle va subir 20 cycles de gel-dégel d'une durée de 24 heures chacun.

La norme NF P 98-234-1 prévoit que le cycle de 24 heures comporte une phase d'au moins 4 heures à  $+10\pm 1^{\circ}\text{C}$  et une phase d'au moins 14 heures à  $-10\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Dans le présent travail, la phase de gel a duré 16 heures et la phase de dégel 8 heures.

Après 20 cycles de gel-dégel, les éprouvettes sont sorties de l'enceinte climatique et mises à  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  pendant 24 heures.

Les 6 éprouvettes sont alors sorties de leur étui étanche et soumises à l'essai de compression conformément à la norme NF P 98-232-1

Soit  $R'_{c,moyen}$  la moyenne des résistances à la rupture des éprouvettes ayant subi des cycles de gel-dégel et  $R_{c,moyen}$  la moyenne des résistances à la rupture des éprouvettes conservées à température ambiante. On définit un coefficient de résistance au gel :  $G=R'_{c,moyen}/R_{c,moyen}$

Cet essai a été réalisé sur une série témoin d'éprouvettes de graves ciment dont la formulation a été établie par le LRPC de Saint Briec et sur une série d'éprouvettes contenant des boues. Les résultats sont reportés dans le tableau suivant ;

Eprouvettes témoins*		Eprouvettes avec boues	
$R'_c$ (MPa)	$R_c$ (MPa)	$R'_c$ (MPa)	$R_c$ (MPa)
7,81 7,77	7,11	9,17 9,87 9,99	9,87 9,17 9,84
$R'_{c \text{ moyen}}=7,79$	$R_{c \text{ moyen}}=7,11$	$R'_{c \text{ moyen}}=9,68$	$R_{c \text{ moyen}}=9,63$
<b>G=1,09</b>		<b>G=1,01</b>	

\* il ne nous a été fourni que 3 éprouvettes sans boues.

**En conclusion, on observe une très bonne résistance au gel-dégel.**

	<p><b>ANNEXE 4 :</b> <b>Incorporation de la boue dans une</b> <b>grave-ciment et réalisation du pilote</b></p>
--	--



ministère  
de l'Équipement  
des Transports  
et du Logement



centre d'Études techniques  
de l'Équipement

**CETE**  
de l'Ouest

L...re...n...  
C...  
:

n° de Dossier : 22/99/0255

Titre de l'affaire : Valorisation des boues résiduelles de  
carrière

Incorporation dans une Grave-Ciment

**Pilote VC 12 Saint-Brice en Coglès**

**UNICEM Bretagne**

Date : Novembre 2002



20...10...19

**cofrac**



accrédité COFRAC  
n° 1-0022  
portée communiquée  
sur commande

5 rue Jules Vallès  
22015 Saint-Brieuc Cedex

téléphone:

33 (0) 2 96 75 93 00

télécopie :

33 (0) 2 96 75 93 10

mél. : lrpc.saint-brieuc.cete-ouest

@equipement.gouv.fr



Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Ministère  
de l'Équipement,  
des Transports  
et du Logement



Centre d'Études  
Techniques  
de l'Équipement  
de l'Ouest

n° de Dossier : 22/99/0255

Titre de l'affaire : Valorisation des boues résiduelles de  
carrière

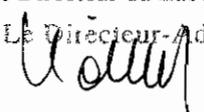
Incorporation dans une Grave-Ciment

**Pilote VC 12 Saint-Brice en Coglès**

**UNICEM Bretagne**

Date : Novembre 2002

Chargé d'Études : G. Hamon

<p>Rédigé par le chef de l'UT QTR</p>  <p>G. Hamon</p>	<p>Vérifié par le chef du Groupe Chaussées</p>  <p>R. Kobisch</p>	<p>Approuvé par le Directeur du Laboratoire p.o. Le Directeur-Adjoint</p>  <p>Paul Kobisch</p>
---	--	---

Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint Briec

## 1 - Présentation de l'étude et historique.

A la demande de l'UNICEM BRETAGNE, le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-BRIEUC est intervenu pour une mission d'assistance technique, en collaboration avec d'autres organismes, dont :

- ENCEM (Environnement Carrières et Matériaux – Nantes),
- POLDEN – INSAVALOR Lyon
- IUT Génie Civil d'Amiens
- Exploitants de carrières d'Ille et Vilaine : MM. Beaucé et Henry,

afin de participer à une étude globale sur **la valorisation des boues résiduelles de l'alcalinisation des eaux acides de carrières, par incorporation dans des matériaux commercialisables.**

Les différentes étapes de l'étude et la répartition des tâches entre les divers intervenants ont été arrêtées au cours d'une réunion technique à l'UNICEM - RENNES le 9 février 1999 (cf. pages 7 et 8 du CR de cette réunion, figurant en annexe 1).

Une étude de formulation de grave-ciment additionnée de boues a été lancée par le LRPC de Saint-BRIEUC dans le courant de juin 1999, à base des constituants suivants :

- granulats de la carrière HENRY – Moulin de Thouru, située à La Chapelle St-Aubert près de Fougères (35)
- boues de la carrière BEAUCE – La Chapelle Janson, située également près de Fougères
- ciment CPJ 42,5 LAFARGE St-Pierre La Cour (53)

Le choix de l'UNICEM s'est porté sur un dosage de la boue représentant en matière sèche 3% de la fraction 0/4 utilisée dans la grave-ciment, soit pour une formule à 40% de sable un pourcentage en matière sèche de 1,2 %.

L'étude de formulation de cette GC 0/20 a conduit à fixer le dosage en ciment à 3,00 % pour une teneur en eau à l'OPM de 5,7 %, avec un dosage en retardateur de prise SIKA Plastiroute de 1,0 % (cf. compte rendu d'étude n° 992691 du 21/10/1999 – Ollivier Hameury).

*Un résumé de cette étude de formulation figure en annexe 2.*

Disposant des résultats de cette étude de GC 0/20, il restait à trouver une installation de fabrication de la grave et un site susceptible d'accepter la mise en œuvre d'un pilote sur chantier, avec des moyens industriels classiques et disponibles localement (objet d'une réunion tenue à Vieux-Vy/Couesnon le 14/10/1999).

L'examen des différentes pistes possibles a enfin abouti au choix d'un site avec la Subdivision Etudes et Travaux n°3 du Conseil Général d'Ille et Vilaine, lors d'une réunion à Saint-Malo le 17/05/2000 : rétablissement de la VC 12 dans le cadre du chantier de déviation de la RD 155 à St-Brice en Coglès, au niveau du Pont des Corbinières.

*(cf. plan de localisation du pilote en annexe 3).*

L'avancement des travaux de cette déviation a permis une découverte du site susceptible d'accepter le pilote le 11/09/2000, et de fixer les conditions et les moyens d'exécution avec les entreprises concernées, à savoir :

- la centrale de fabrication de la carrière HENRY – Moulin de Thouru : centrale à béton vétuste, à pilotage entièrement manuel, nécessitant une remise en état des organes de dosage des constituants, avant toute tentative de démarrage de ce chantier,
- l'entreprise titulaire du marché de terrassements de la RD 155 : TPR – Rennes.

## **2 – Incorporation des boues en cours de fabrication de la GC.**

Une recherche sur la méthode d'incorporation des boues en centrale a été entamée par le LRPC de St-Brieuc, et plusieurs pistes ont été proposées et étudiées en liaison avec l'UNICEM et les carriers (MM. Beucé et Henry) entre le début d'année 1999 et le premier semestre 2001, à savoir :

- pompe à tube Bredel : à rotation très lente, aucune pièce mécanique en mouvement n'est en contact avec le liquide abrasif (recyclage des boues abrasives à une concentration de 20 %) ; pompe auto-amorçante à sec, sans étanchéité.  
Coût : environ 12000 € HT en fourniture (+ installation)
- pompe à rotor excentré : corps en fonte, rotor en inox chromé dur et stator en nitrile. Le coût de fonctionnement est élevé, en raison des besoins de remplacement des pièces, assez fréquents pour le stator.  
Coût : environ 6000 € HT en fourniture (+ installation + entretien)

Dans ces 2 cas, les boues seraient mélangées à l'eau d'ajout nécessaire à la fabrication de la grave-ciment, à partir d'un bassin tampon d'homogénéisation.

Le schéma de montage et le choix du type de pompe devront être adaptés au mode de fonctionnement de la centrale utilisée : centrale continue pour grave hydraulique ou centrale à béton de type discontinu.

Il a été décidé de ne pas investir dès le départ dans ces modèles de pompes, pour la fabrication de grave-ciment du pilote, tant que les résultats de l'étude ne sont pas connus.

### **Méthode retenue pour la fabrication du pilote :**

En définitive, nous avons convenu de conditionner des sacs de boues égoutées, facilement manutentionnables pour une incorporation directe dans le malaxeur de la centrale, par gâchée.

En raison de la teneur en eau encore très élevée de ces boues « égoutées » (teneur en eau moyenne de 170 %), le poids des sacs a été fixé à 32 kg, pour 2 sacs à la gâchée.

## **3 – Réalisation du pilote.**

### **3.1 – Constitution du pilote :**

Il a été convenu de le réaliser comme suit, sur une section incluse dans le chantier prévu en GNT recouverte d'un enduit, de largeur 4 m, à dévers unique et pente en long de 2,5 %:

- 2 planches comparatives : avec et sans boues, en épaisseur de 20 cm,
- surface d'environ 100 à 120 m<sup>2</sup> chacune,
- avec récupération séparée des eaux de ruissellement de surface en citerne de stockage,
- aucune contamination entre les 2 planches (la planche avec boues a été positionnée à un niveau inférieur, à la suite de l'autre, mais avant le point bas du profil en long).

### 3.2 – Préparation du pilote :

Les 2 planches sont situées au sud-ouest du Pont des Corbinières sur la VC 12.

*Le schéma de principe d'exécution adressé à l'UNICEM le 11/09/2000 figure en annexe 4.*

La préparation du support avant réalisation de la grave-ciment a bien été exécutée le 11/06/2001 dans le respect du schéma proposé, sous la surveillance du LRPC de St-Brieuc et de l'ENCEM, par l'entreprise de terrassements TPR de RENNES, dans l'ordre suivant :

- **application du sable 0/4 pliocène** en couche de fermeture de la couche de forme ; il joue en outre un rôle protecteur du film étanche,
- **mise en place du film étanche COEX SOUS-DALLAGE**, avec remontée latérale au point bas du dévers et sur l'ensemble du profil en travers séparatif de chacune des planches, afin de récupérer toutes les eaux de surface traversant l'assise de la chaussée en grave-ciment,
- **application du géocomposite drainant ENKADRAIN**, destiné au transit en fond de couche de GC et au recueil des eaux de surface, vers le **drain latéral en PVC**,
- **creusement des fosses et mise en station de 2 cuves de stockage en polyéthylène enterrées (capacité : 2 m<sup>3</sup> environ)**, au point bas de chaque planche, à l'extérieur de la chaussée, raccordées à la sortie du drain latéral en PVC.

Elles sont équipées d'un trou d'homme avec couvercle amovible, permettant les prélèvements d'eau recueillie pour chaque planche : elles disposent chacune d'un seau à prélèvement.

**Un lysimètre de 1 m<sup>2</sup> constitué de grave-ciment avec boues a été confectionné sur site**, en limite d'emprise du chantier, sur délaissé en terrain plat, avec les mêmes moyens matériels que ceux utilisés pour la réalisation du pilote.

Celui-ci étant destiné à un suivi par INSAVALOR-POLDEN Lyon devait être transportable, après un délai de durcissement minimal de 10 à 12 jours : il a été exécuté sur plaque métallique à 2 bords relevés, avec anneaux de levage, dans une zone excavée de l'épaisseur nécessaire à la couche de grave-ciment, à savoir 20 cm.

Un géotextile a été disposé sur le fond de la plaque métallique afin d'isoler la grave-ciment de la plaque et d'en faciliter le démoulage après transport à Lyon, avant d'effectuer les essais de suivi.

### 3.3 – Formule utilisée pour la grave-ciment avec incorporation des boues :

Les résultats de l'étude de formulation réalisée par le LRPC de St-Brieuc ont conduit à la formule suivante :

- |  |        |
|--|--------|
| - Boue - Beaucé (La Chapelle Janson)                     | 1.2 %  |
| - 0/4 - Moulin de Thouru (HENRY)                         | 39.5 % |
| - 4/10 - Moulin de Thouru (HENRY)                        | 22.0 % |
| - 10/20 - Moulin de Thouru (HENRY)                       | 34.3 % |
| - Ciment CPJ CEM II/A 42.5                               | 3.0 %  |
| - Retardateur SIKA Plastiroute :1.0 % du poids de ciment |        |

Pour la formulation de la grave-ciment sans boues, il est à noter que les boues sont remplacées par du sable et que le pourcentage de 0/4 est porté à 40,7 %.

### **3.4 – Conditions de fabrication de la grave-ciment avec incorporation des boues.**

#### ***Quantités et poids de gâchée***

Chaque planche a une surface de 100 m<sup>2</sup>. La quantité nécessaire de grave ciment par planche est d'environ 50 tonnes.

La fabrication est réalisée par HENRY S.A. à La Chapelle St-Aubert, au moyen d'une centrale à béton située en carrière Moulin de Thouru, dont le volume du malaxeur est de 1 m<sup>3</sup>.

Le poids sec fixé pour une gâchée est de 2000 kg, ce qui nécessite de doser 60 kg de ciment, 0.6 kg de retardateur et 24 kg de boues (sèches).

#### ***Conditionnement et dosage des boues de carrières***

Les boues prévues pour ce chantier pilote sont celles de la carrière de Beucé à la Chapelle Janson. La teneur en eau moyenne des boues est de 170 %.

La quantité de boues « humides » nécessaire par gâchée est donc de 65 kg.

La mise au point et surtout la volonté d'investir dans un système mécanique onéreux de dosage des boues n'ayant pas abouti, les boues ont alors été conditionnées en sacs.

L'ajout est effectué manuellement en déversant dans le malaxeur par gâchée 2 sacs de « boues humides » d'environ 32 kg chacun.

#### ***Mise au point du réglage de la fabrication***

Des analyses granulométriques ont été effectuées sur les constituants granulaires.

Le gravillon 10/20 prévu dans la formule de la grave ciment n'existait pas au moment de la réalisation du pilote. Le stock disponible était du 14/20 : on aura donc une discontinuité granulaire sur la fabrication de la grave ciment.

Afin de respecter au mieux la courbe d'étude, la formule de recombinaison a été révisée et se présente de la manière suivante :

- Boue - Beucé (La Chapelle Janson)	1.2 %
- 0/4 - Moulin de Thouru	42.0 %
- 4/10 - Moulin de Thouru	25.8 %
- 14/20 - Moulin de Thouru	28.0 %
- Ciment - St Pierre la Cour, CPJ 42.5	3.0 %

Les réglages retenus pour la fabrication d'une gâchée de 2000 kg secs de grave ciment sont les suivants :

		<b>Grave ciment avec boues</b>	<b>Grave ciment sans boues</b>
<b>0/4</b>	<b>Moulin de Thouru</b>	840 kg	860 kg
<b>4/10</b>	<b>Moulin de Thouru</b>	520	520
<b>14/20</b>	<b>Moulin de Thouru</b>	560	560
<b>CPJ 42.5</b>		60	60
<b>Boues</b>		2 sacs	
<b>Eau</b>		90	90

### 3.4 – Réalisation du pilote.

#### *Contrôle de fabrication*

##### - Grave ciment avec boues

Deux camions ont été fabriqués (23T700 + 29T850) et deux prélèvements ont été réalisés sur chacun. Les teneurs en eau sont proches de la teneur en eau visée (6.7 %).

Les dosages en ciment sont plus élevés que la consigne.

Les granulométries sont conformes. Par rapport à la courbe d'étude, la grave comporte un peu plus de sable et possède comme prévu une petite discontinuité 10/14, en l'absence de la fraction 10/20.

##### - Grave ciment sans boues

Deux camions ont été fabriqués (25T500 + 30T550). Deux prélèvements ont été effectués sur le 1<sup>er</sup> et un autre sur le 2<sup>ème</sup>. Les teneurs en eau sont variables (5,8 à 7,3 %) et elles sont plus fortes que pour la grave ciment avec boues.

Les dosages en ciment sont inférieurs à la consigne.

La courbe granulométrique moyenne est proche de la courbe d'étude : on observe encore la discontinuité 10/14.

#### *Contrôle de la mise en œuvre : couche compactée d'épaisseur 20 cm.*

Rappel des moyens matériels utilisés sur chantier par l'entreprise TPR :

- déversement de la grave-ciment par les camions semi-remorques en extrémité de la planche sans boues, au point le plus haut du site du pilote,
- régalaage de la grave-ciment à la pelle sur pneus,
- compactage au cylindre monobille Vibromax V4.

L'étude réalisée par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc donne les caractéristiques optimum Proctor Modifié du mélange.

$$\rho \text{ OPM} = 2.31 \text{ t/m}^3$$

$$\text{W\%OPM} = 5.7 \%$$

Aucun objectif de densification n'a été imposé.

Pour information, les seuils à 95 % et à 90 % de la densité sèche OPM sont précisés.

10 mesures de densités en place au gammadensimètre à pointe ont été effectuées sur chaque planche, à une profondeur de mesure de 12.5 cm, afin d'éviter d'endommager le film étanche avec la pointe de la tige porte-source de l'appareil.

Les résultats sont exprimés dans le procès-verbal d'essai (IMP22E24).

On obtient respectivement sur les planches « grave ciment + boues » et « grave ciment sans boues » les densités sèches moyennes égales à 95.2 % et 96.5 % de la densité sèche OPM.

La teneur en eau plus forte sur la 2<sup>ème</sup> planche permet d'atteindre une meilleure qualité de compactage mais aussi, saturé en eau, le matériau présente une stabilité moins bonne en fin de compactage (effet de matelas).

Un enduit de protection de la GC à l'émulsion de bitume a été exécuté quelques jours après la réalisation du pilote.

*Les résultats obtenus en contrôles du LRPC sont reportés en annexe 5.*

### ***Protection du pilote par une couche de roulement en enrobés.***

Une couche de roulement en Béton Bitumineux Mince 0/10 a été appliquée après les congés d'été 2001.

Un reprofilage général a été réalisé préalablement sur l'ensemble de la section concernée, avant application de la couche de roulement définitive.

Annexe 1

**Pages 7 et 8 du CR de réunion du 09 février 1999 - UNICEM Rennes**

## Les différentes étapes de l'étude

- 1) Choix d'un matériau et de son utilisation (sa mise en oeuvre) par les professionnels.
- 2) Elaboration d'un scénario
  - définir très précisément les conditions futures de mise en oeuvre et le contexte
  - indispensable pour modéliser
- 3) Etude de l'homogénéité des boues en carrière
  - nécessaire pour envisager leur utilisation.
- 4) Affinage de la formulation
  - déterminer le pourcentage optimal en liant
- 5) Comportement au gel-dégel du matériau
- 6) Détermination de la méthode d'incorporation des boues en centrale
  - s'assurer de l'homogénéité et de la dispersion des boues dans le mélange
- 7) Modélisation du comportement à long terme.
  - établissement d'un modèle de comportement
    - \*tests paramétriques précédemment réalisés
    - \*acquisition précise des données du scénario
  - validation / calibration du modèle : tests de simulation

Reproduire fidèlement les conditions du scénario pour suivre le relargage réel des polluants potentiels.

\* essais de laboratoire : maîtrise parfaite des paramètres qui agissent sur le relargage des polluants et préparation des essais à grande échelle (mise en évidence d'éventuels problèmes).

\* essais de terrain (pilote) : conditions réelles et mise en évidence d'éventuels paramètres secondaires à prendre en compte.

- 8) Contrôle de la fabrication et de la mise en oeuvre des matériaux et suivi du pilote
  - s'assurer du respect des dosages, des épaisseurs et des compacités.
  - suivi de l'évolution des performances mécaniques sur la durée de l'essai.

- §§§§§ -

## Répartition des tâches

- UNICEM Bretagne
  - \* Coordination générale de l'étude
- ENCEM - ENVironnement Carrière Et Matériaux
  - \* Elaboration du scénario
  - \* Echantillonnages sur le pilote
  - \* Coordination technique de l'étude
- INSAVALOR - Division POLDEN
  - \* Elaboration du scénario
  - \* Modélisation
  - \* Simulations au laboratoire
  - \* Analyses chimiques des échantillons du pilote
- IUT Génie Civil d'Amiens
  - \* Comportement à l'alternance gel-dégel
- Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint Brieuc
  - \* Elaboration du scénario
  - \* Etude de l'homogénéité des boues
  - \* Affinage de la formulation et fabrication d'éprouvettes
  - \* Recherche sur la méthode d'incorporation
  - \* Contrôle de la mise en place du pilote
  - \* Suivi des propriétés mécaniques du pilote

**Résumé de l'étude de formulation de grave-ciment**

Compte Rendu n° 992691 du 21 octobre 1999 – Ollivier HAMEURY



Ministère  
de l'Équipement,  
des Transports  
et du Logement



Centre d'Études  
Techniques  
de l'Équipement  
de l'Ouest

Laboratoire  
Régional  
des Ponts  
et Chaussées  
de Saint-Brieuc

# RAPPORT D'ESSAIS n° 24-99/ 2

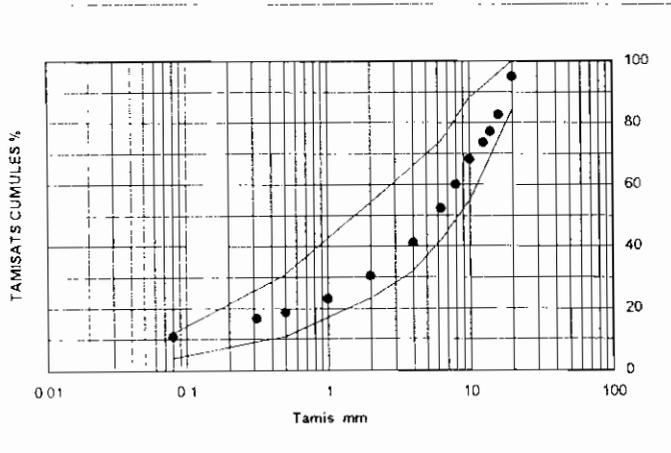
Demandeur: UNICEM Chantier: Etude de Grave-Ciment-Boue  
Dossier n°: 990255  
Prélèvement effectué par: UNICEM (boue) - Pellon (granulats) le: 23/06/99  
Essai effectué le: 27/08/99 au: Laboratoire de St-BRIEUC  
Technique utilisée: Grave - Ciment 0/20  
Respect de la norme d'essai: oui  non   
Si non, pourquoi:

## Etude de Grave - Ciment

Directive LCPC - SETRA (Juin 1983)  
Normes NF P 98-116 (Juillet 1991) - NF P 98-114-1 (Décembre 1992)

### 1 - GRANULATS

Nature Provenance par fraction N° de réception	1	2	3	4	5		
	Boue	Beaucé	99-72			%	1.2
	0/4	Moulin de Thouru	99-69			%	39.0
	4/10	Moulin de Thouru	99-69			%	22.0
	10/20	Moulin de Thouru	99-69			%	34.3
	Ciment	St Pierre la Cour	992			%	3.5
Masse Volumique Réelle (MVR) du mélange						T/m3	2.736



Granulométrie - Tamisats en %			
Tamis mm	Formule	min-max de NFP98-116	
20	95.0	85	100
16	82.7		
14	77.1		
12.5	73.5		
10	68.1	55	88
8	60.0		
6.3	52.2	42	74
4	41.2	32	66
2	30.5	23	54
1	23.1		
0.5	18.7	11	31
0.315	16.7		
0.08	10.9	4	12

#### SABLE

No	0/d	PS	BLEU	MVR
2	0/4		1.4	

#### GRAVILLONS

No	d/D	LA	MDE	MVR
1				
3	4/10	19	21.8	
4				

2 - LIANT Nature CPJ CEM I/A 42.5 ( L ) CP2 992 Provenance: St Pierre la Cour

Surface Blaine:

MVR: 3.04

Prise début:

fin:

Essai sur mortier ISO: Rt(28j):

MPa

Rc(28j)

L'attention est attirée sur le fait que les résultats mentionnés par le présent rapport d'essai ont été obtenus avec l'échantillon défini ci-dessus mais que la portée et les conclusions à tirer de ces résultats

sont indiquées en application du texte de référence suivant fixé par le demandeur

font l'objet du document suivant rapport d'étude

n'ont pas été demandées

ce rapport d'essai est établi en 1 exemplaire(s)

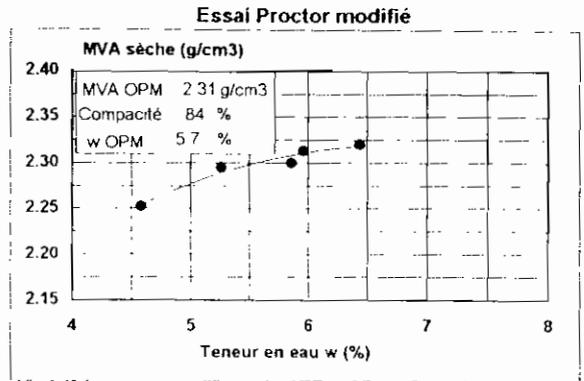
La reproduction de ce procès-verbal n'est autorisée que sous la forme de fax-similé photographique intégral

Il compte 2 pages et

annexe(s)

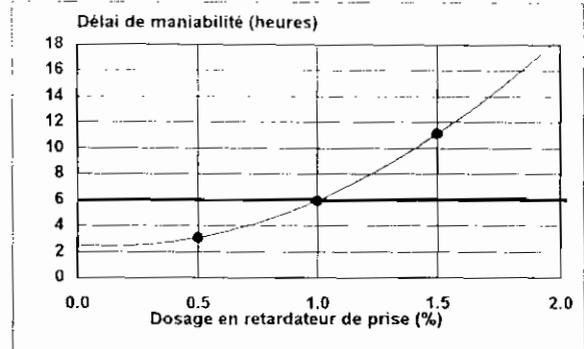
St Brieuc, le 21/10/99  
  
O. MAMEURY  
Chef de l'unité FMHC  
(Formulation des Matériaux  
et Modélisation des Chaussées)

<b>Directives NF P 98-116</b>	
<b>Compacité OPM ≥ 80%</b>	
$3\% \leq c \leq 4\%$	
<b>Classe G3 (20 cm ≤ IQE 1 an ≤ 25 cm)</b>	
Délai de maniabilité :	<b>6 heures</b>



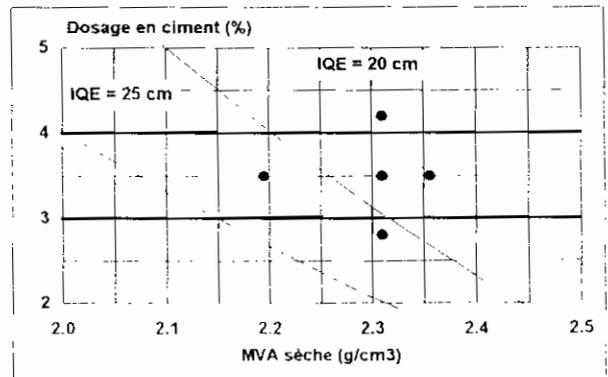
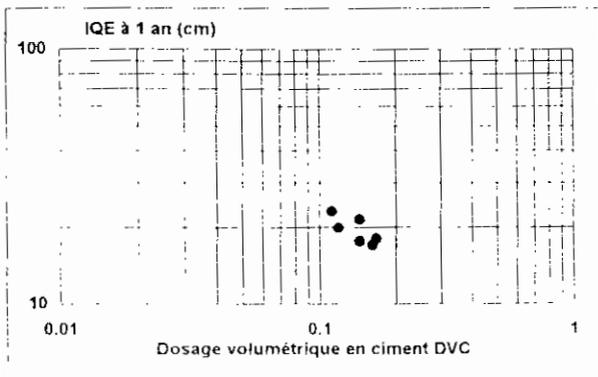
**Délai de maniabilité par auscultation dynamique :**

T (°C)	Retardateur (*)	w (%)	Délai maniabilité (heures)
20	0.5	5.7	3.1
20	1.0	5.7	6.0
20	1.5	5.7	11.1
<b>20</b>	<b>1</b>	<b>5.7</b>	<b>6.0</b>



Retardateur de prise      Sika      981

	Dosage en ciment c (%)	MVA sèche (g/cm3)	Dosage volumétrique en ciment DVC	w (%)	Dosage en retardateur de prise (%)	Performances à 28 jours			Performances estimées à 1 an		
						Rt	Et	IQE	Rt	Et	IQE
						MPa	MPa	cm	MPa	MPa	cm
Formules étudiées	3.5	2.31	0.144	5.7	1	1.16	19577	23.6	1.94	30118	17.6
	2.8	2.31	0.119	5.7	1	0.99	20977	26.6	1.65	32272	19.9
	4.2	2.31	0.167	5.7	1	1.14	20883	24.1	1.90	32128	18.0
	3.5	2.19	0.112	5.7	1	0.78	18662	30.7	1.30	28711	23.1
	3.5	2.36	0.161	5.7	1	1.24	21177	22.9	2.06	32580	17.0
	3.5	2.31	0.144	4.7	1	0.89	20865	28.5	1.49	32100	21.4
	3.5	2.31	0.144	6.2	1	1.13	19005	24.0	1.88	29238	17.9
	<b>Retenue</b>	<b>3.0</b>	<b>2.2638</b>	<b>0.113</b>	<b>5.7</b>	<b>1</b>					



$$IQE (cm) = 5.66 DVC^{-0.61}$$

- Nota :
- OPM : Optimum Proctor modifié
  - (\*) Pourcentage exprimé par rapport au poids de ciment
  - MVA : Masse Volumique apparente
  - Rt : Résistance à la traction
  - Et : Module sécant à 30% de la résistance à la rupture
  - IQE : Indice de qualité élastique

St Brieuc, le 11/10/99

*[Signature]*  
**O. HAMEURY**  
Chef de l'unité FMCC  
(Formulation des Matériaux et Modélisation des Chaussées)

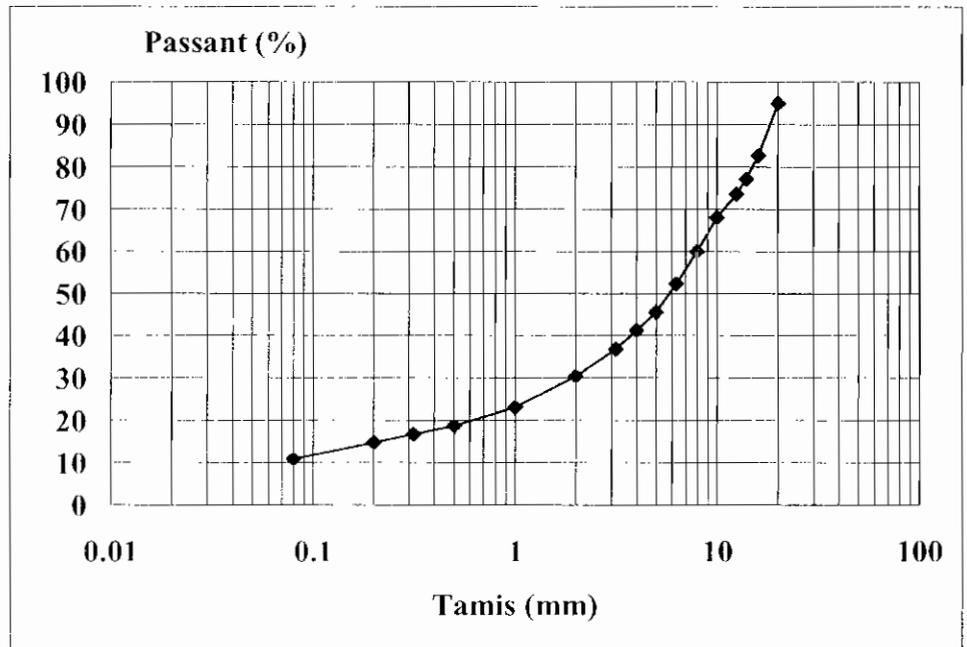
N° de dossier : 990255  
 Chantier : Traitement des boues  
 Type : GC 0/20  
 Date d'essai : 29/07/99

Formule

N°	Fraction	Carrière	%
99-72	0/0	Beaucé	1.2
99-69	0/4	Moulin de Thouru	39.0
99-69	4/10	Moulin de Thouru	22.0
99-69	10/20	Moulin de Thouru	34.3
971	Liant	CPJ 42.5	3.5

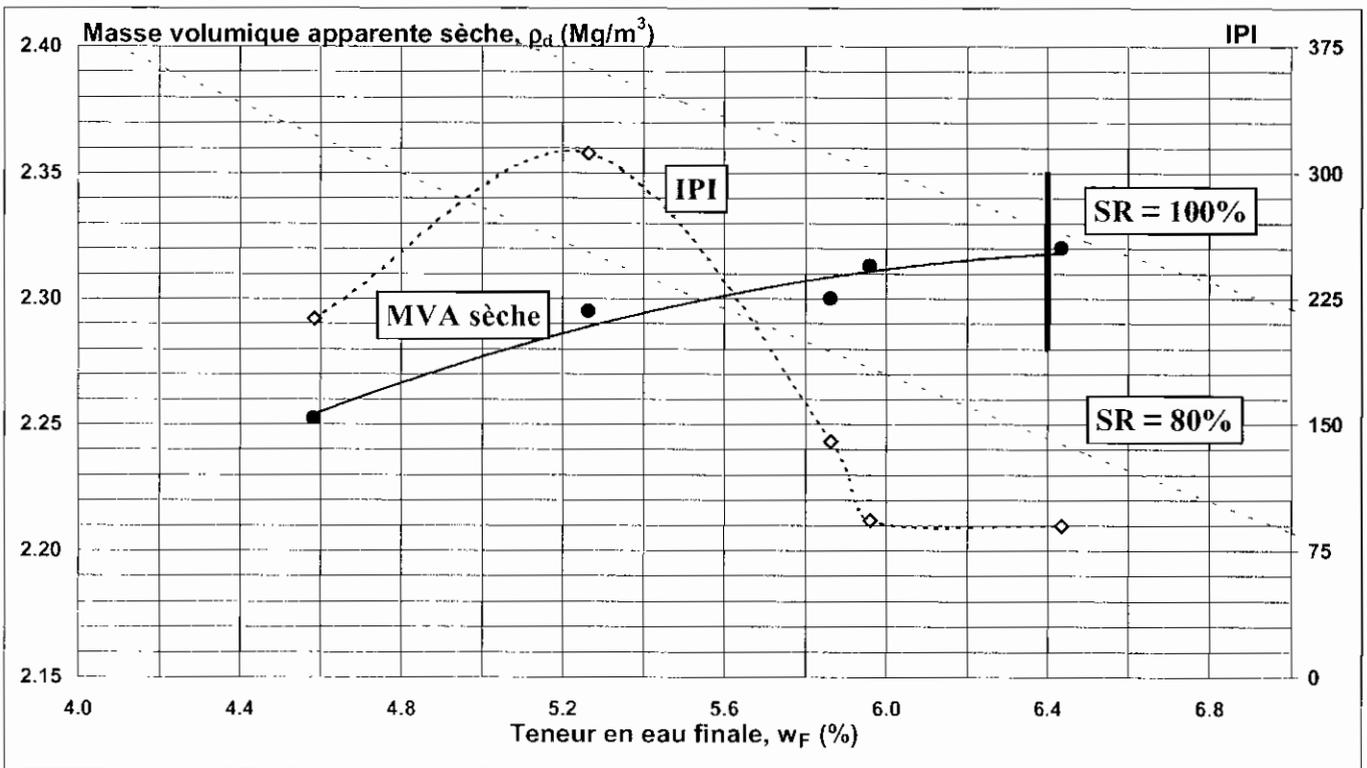
Granulométrie

Tamis	Passant
20	95.0
16	82.7
14	77.1
12.5	73.5
10	68.1
8	60.0
6.3	52.2
5	45.6
4	41.2
3.15	36.9
2	30.5
1	23.1
0.5	18.7
0.315	16.7
0.2	14.8
0.08	10.9



# ESSAI PROCTOR MODIFIE N° 24/ 994

Teneurs en eau				MVA		IPI
Théorique	Initiale	Finale		Humide	Sèche	
%	$w_0$ %	$w_F$ %	$w_0 - w_F$ %	$\rho_h$ Mg/m <sup>3</sup>	$\rho_d$ Mg/m <sup>3</sup>	
4.50	4.52	4.58	-0.06	2.356	2.252	213
5.25	5.13	5.26	-0.13	2.416	2.295	312
6.00	5.90	5.86	0.04	2.435	2.300	140
6.40	6.13	5.96	0.17	2.451	2.313	93
6.75	6.74	6.44	0.30	2.470	2.320	90



<b>MVR du mélange granulaire</b>	MVRg	2.736	Mg / m <sup>3</sup>
	<b>Ressuage</b>	$w_r$	6.40
<b>OPM</b>	$\rho_{dr}$		Mg / m <sup>3</sup>
	$w$	5.70	%
	$\rho_d$	2.31	Mg / m <sup>3</sup>
	compacité	84.4	%

**Plan de localisation du pilote**



RD 155-Déviation de ST-BRICE EN COGLES et de ST-ETIENNE EN COGLES

# Pont des Corbinières sur la VC 12

BASSIN N° 2 bis

Station de relevage

v12P2

v12P3

v12P4

v12P5

v12P6

v12P7

v12P8

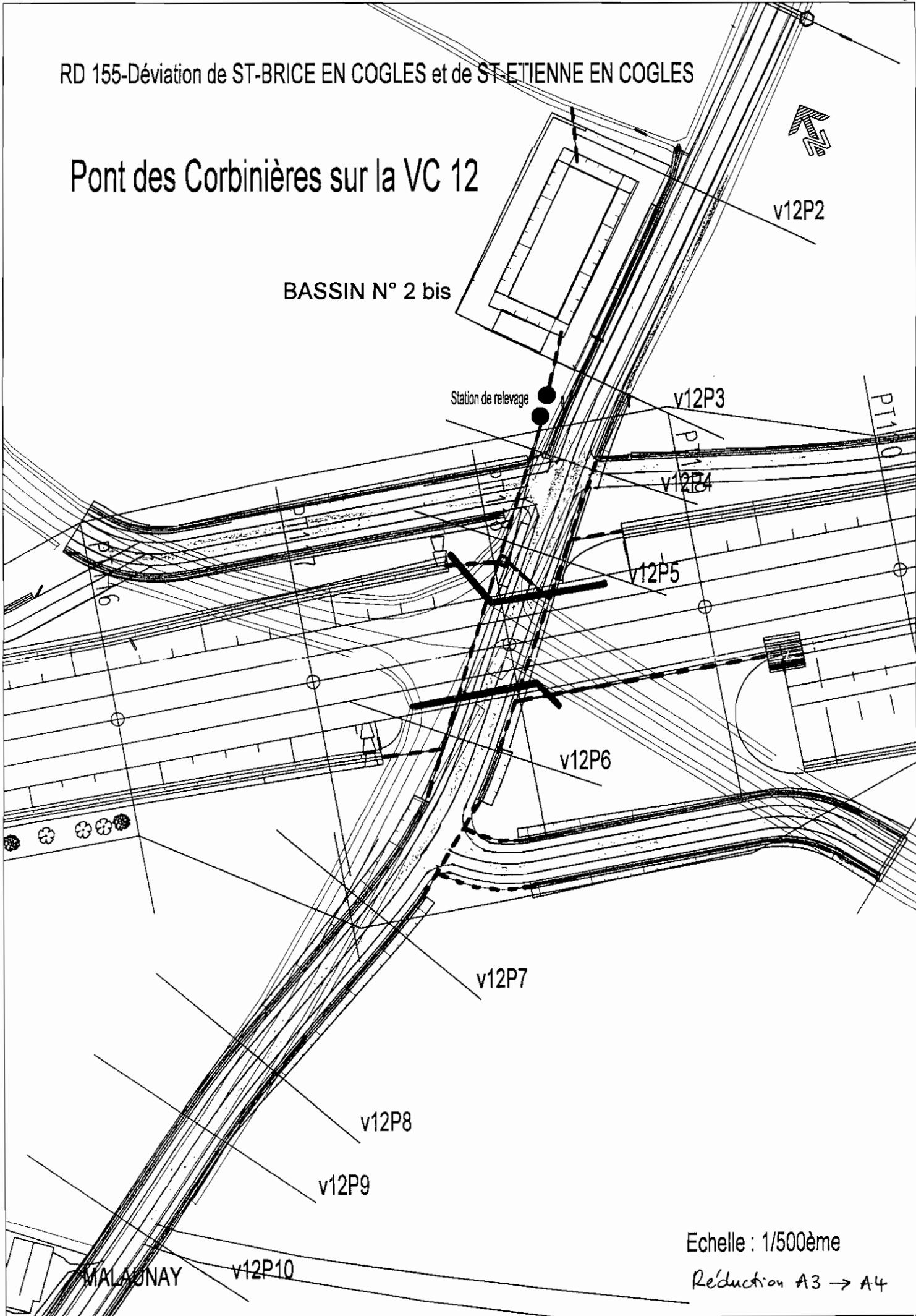
v12P9

v12P10

MALAUNAY

Echelle : 1/500ème

Réduction A3 → A4



**Schéma de principe d'exécution du pilote**

VC 12 Saint-Brice en Coglès



Ministère  
de l'Équipement,  
des Transports  
et du Logement



BRETAGNE - PAYS DE LA LOIRE

Centre d'Études  
Techniques  
de l'Équipement  
de l'Ouest

Laboratoire  
Régional  
des Ponts  
et Chaussées  
de Saint Briec

Accrédité COFRAC  
sous le n° 1-0022

SAINT-BRIEUC, le 11 septembre 2000

- UNICEM Bretagne  
Carrières et Matériaux

- INSAVALOR POLDEN

*V/Réf.: réunions et entretiens téléphoniques.*

*N/Réf.: affaire suivie par Guy Hamon - chef de l'Unité Qualité des Travaux Routiers*

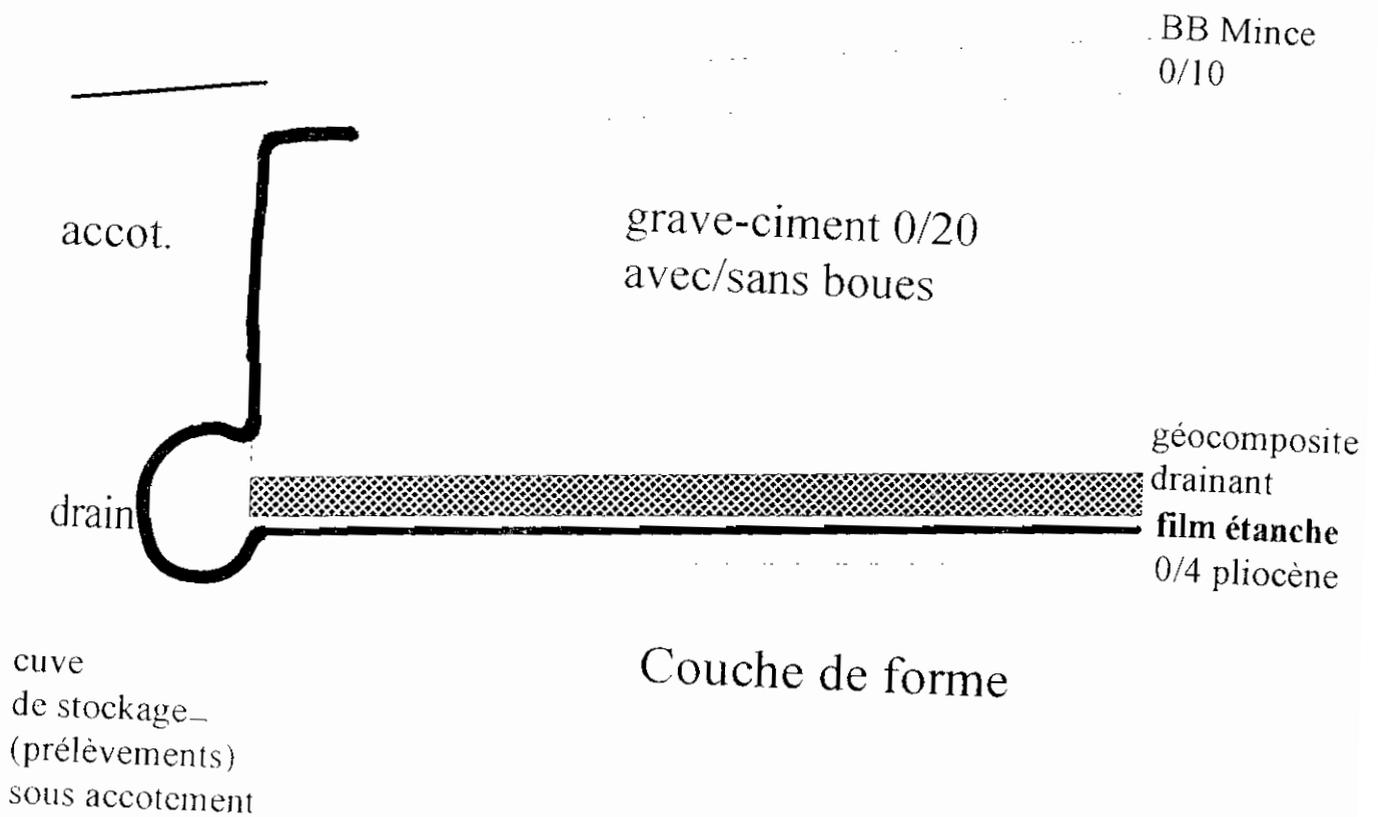
**Objet : Boues résiduaire de carrières  
Incorporation dans une grave-ciment.**

Éléments de chiffrage en préparation de la réunion prévue ce jour, à partir de documentations FRANS BOHOMME.

	Prix H.T.
■ géocomposites drainants :	
BIDIM : SPACER grille + filtres sur 2 faces en rouleaux de 20 ou 25 m x 2 m	130 F le m <sup>2</sup>
MEGADRAIN T1 ou T2 en rouleaux de 25 m x 1,90 m	160 F le m <sup>2</sup>
COLBOND : ENKADRAIN CLK 10 en rouleaux de 45 m x 1 m	185 F le m <sup>2</sup>
<b>ENKADRAIN 4004 H 5-2 S</b> en rouleaux de 100 m x 5 m	<b>120 F le m<sup>2</sup></b>
■ film étanche	
COEX SOUS-DALLAGE en rouleaux de 25 m x 6 m	5 F le m <sup>2</sup>
■ fosse de stockage pour prélèvements (ventilée avec couvercle) SIMOP (à enterrer et poser sur radier béton) en 2000 ou 3000 litres	5000 F l'unité

Ces tarifs sont indiqués en prix public, fourniture seule.

P.J. schéma de principe d'exécution



VC 12 St-Brice en Cogles :  
Schéma de principe d'exécution

**Résultats des contrôles d'exécution du pilote par le LRPC de St-Brieuc**

Fabrication et compactage

Producteur : Carrière MOULIN DE THOURU

Dossier :

22/01/11891

Granulats : Grave ciment 0/20mm - boues

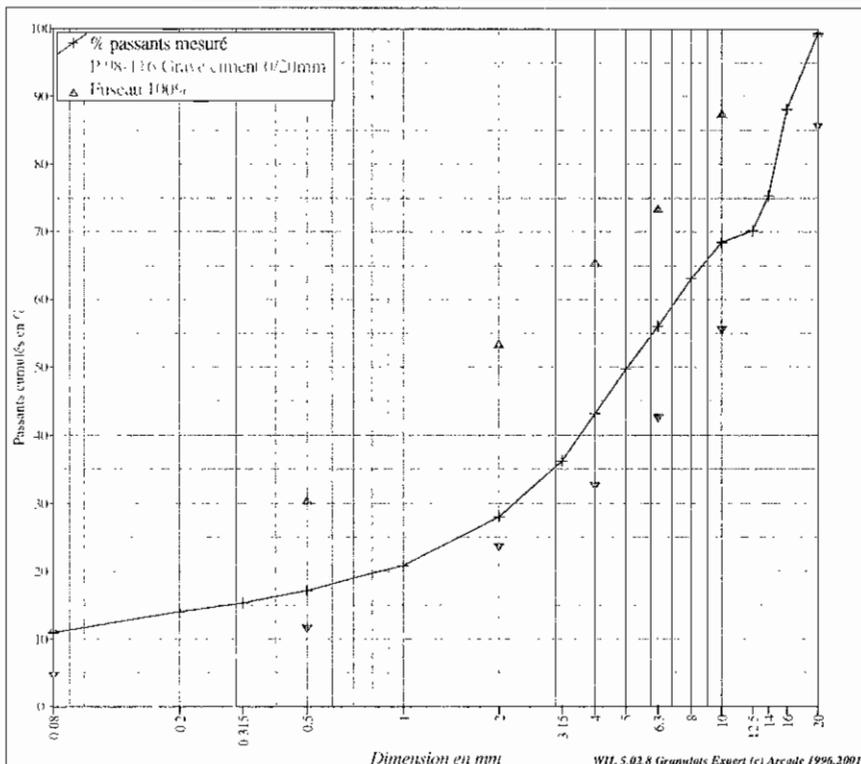
UNICEM BRETAGNE - Valorisation des boues résiduaires de centrale

Technique : Grave Ciment

Contrôleur	BLOUET Laurent
Prélèvement n° A1166005	15000 g prélevés le 12/06/2001 à 09:30
Classe granulaire	0/20 mm
Origine	Camion
Mode	Main de fer
Fait par	QTR
Observations internes	LB/UNICEM/05
Observations	

ESSAIS	Minimum	Valeur	Maximum	U	Norme
Dosage en ciment (%)		4.14			
Teneur en eau		6.6 %		0	P 18-554/5

Tamis	mini	%tamisat	maxi	Incertitude
20.000	85.0	99.3	100.0	±0
16.000		88.1		0
14.000		75.3		0
12.500		70.2		0
10.000	55.0	68.4	88.0	±0
8.000		63.1		0
6.300	42.0	56.0	74.0	±0
5.000		49.8		0
4.000	32.0	43.1	66.0	±0
3.150		36.2		0
2.000	23.0	28.0	54.0	±0
1.000		20.9		0
0.500	11.0	17.2	31.0	±0
0.315		15.4		0
0.200		14.1		0
0.080	4.0	11.0	12.0	±0



Commentaires

Granulométrie conforme  
Dosage en ciment en excès

Le chargé d'étude

L. Blouet



Producteur : Carrière MOULIN DE THOURU

Dossier :

22/01/11891

Granulats : Grave ciment 0/20mm - boues

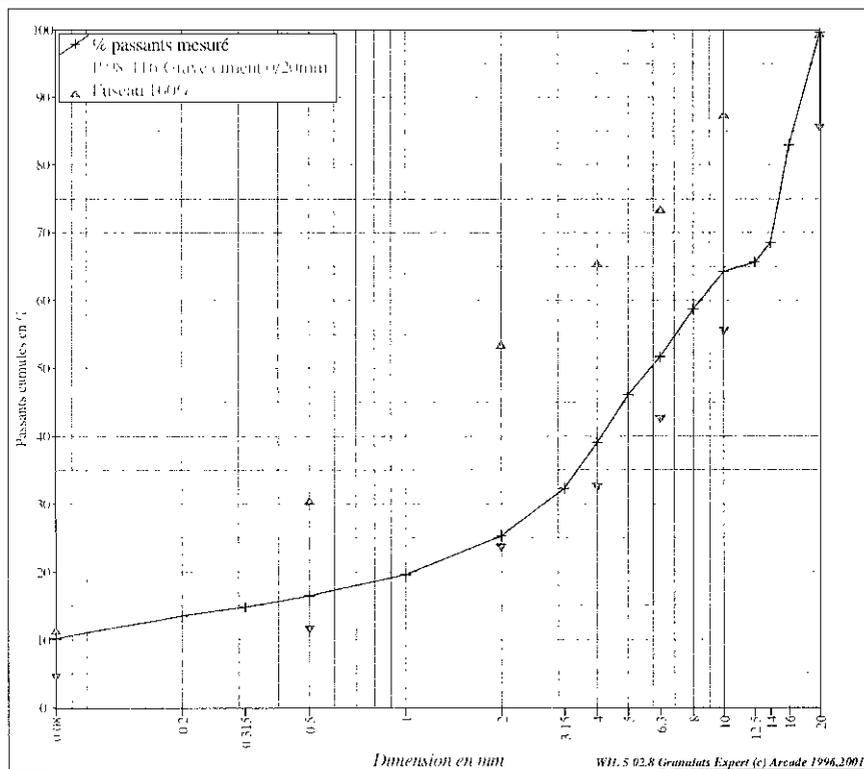
UNICEM BRETAGNE - Valorisation des boues résiduaires de carrières

Technique : Grave Ciment

Contrôleur	BLOUET Laurent
Prélèvement n° A1166006	15000 g prélevés le 12/06/2001 à 11:00
Classe granulaire	0/20 mm
Origine	Camion
Mode	Main de fer
Fait par	QTR
Observations internes	LB/UNICEM/06
Observations	

ESSAIS	Minimum	Valeur	Maximum	U	Norme
Dosage en ciment (%)	2,50	3,62	3,50		
Teneur en eau		5,6 %		0	P 18-554/5

Tamis	mini	%tamisat	maxi	Incertitude
20.000	85.0	99.6	100.0	±0
16.000		82.9		0
14.000		68.5		0
12.500		65.6		0
10.000	55.0	64.3	88.0	±0
8.000		58.8		0
6.300	42.0	51.7	74.0	±0
5.000		46.1		0
4.000	32.0	39.1	66.0	±0
3.150		32.3		0
2.000	23.0	25.3	54.0	±0
1.000		19.6		0
0.500	11.0	16.5	31.0	±0
0.315		14.8		0
0.200		13.5		0
0.080	4.0	10.2	12.0	±0



Commentaires

Granulométrie conforme  
Dosage en ciment satisfaisant

Le chargé d'étude

L. BLOUET



**Producteur : Carrière MOULIN DE THOURU**  
**Granulats : Grave ciment 0/20mm - boues**  
**Technique : Grave Ciment**

**Dossier :**

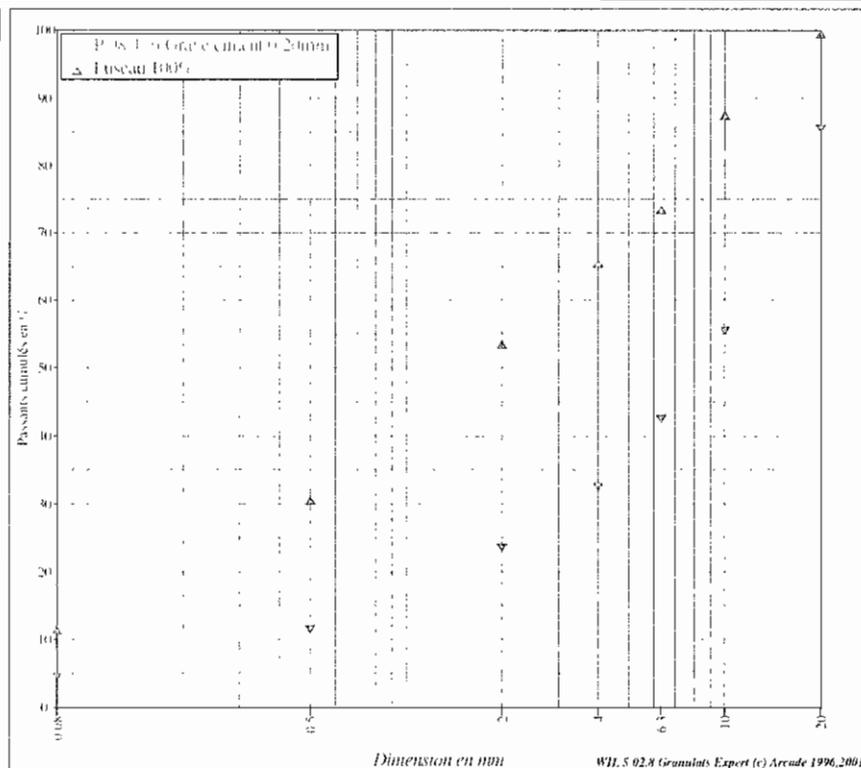
**22/01/11891**

UNICEM BRETAGNE - Valorisation des boues résiduaires de carrière

Contrôleur	BLOUET Laurent
Prélèvement n° A1166007	15000 g prélevés le 12/06/2001 à 11:00
Classe granulaire	0/20 mm
Origine	Camion
Mode	Main de fer
Fait par	QTR
Observations internes	LB/UNICEM/07
Observations	

ESSAIS	Minimum	Valeur	Maximum	U	Norme
Dosage en ciment (%)	2,50		3,80	3,50	
Teneur en eau			6.6 %		0 P 18-554/5

Tamis	mini	%tamisat	maxi	Incertitude
20.000	85.0		100.0	±0
16.000				0
14.000				0
12.500				0
10.000	55.0		88.0	±0
8.000				0
6.300	42.0		74.0	±0
5.000				0
4.000	32.0		66.0	±0
3.150				0
2.000	23.0		54.0	±0
1.000				0
0.500	11.0		31.0	±0
0.315				0
0.200				0
0.080	4.0		12.0	±0



**Commentaires**  
Dosage en ciment en excès  
Teneur en eau satisfaisante

**Le chargé d'étude**  
L. BLOUET

Producteur : Carrière MOULIN DE THOURU  
Granulats : Grave ciment 0/20mm

Dossier :

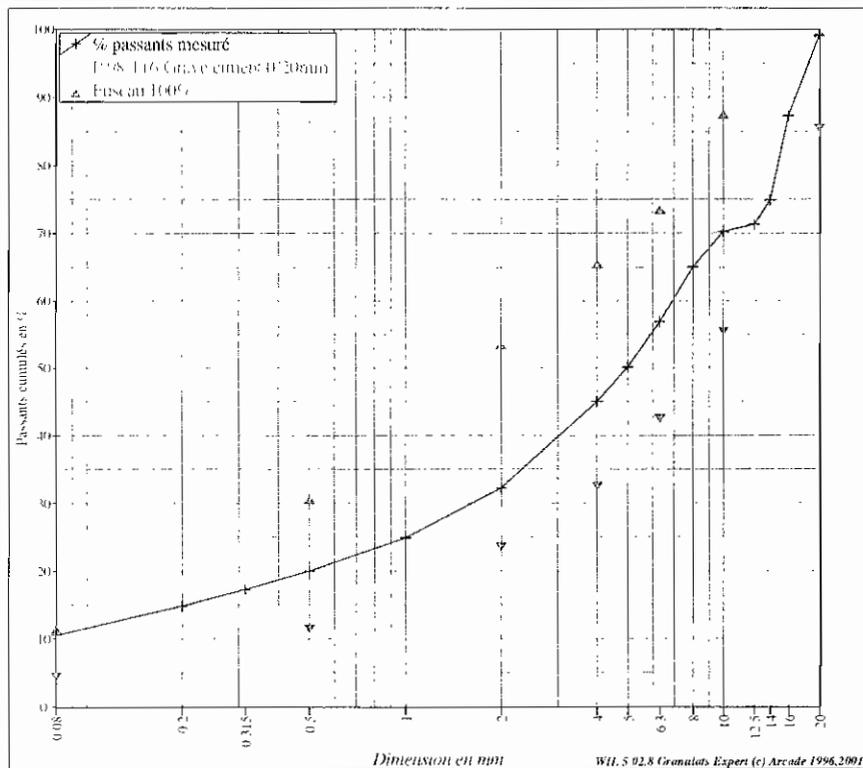
22/01/11891

UNICEM BRETAGNE - Valorisation des boues résiduaires de carrière

Contrôleur	BLOUET Laurent
Prélèvement n° A1166008	15000 g prélevés le 12/06/2001 à 14:00
Classe granulaire	0/20 mm
Origine	Camion
Mode	Main de fer
Fait par	QTR
Observations internes	LB/UNICEM/08
Observations	

ESSAIS	Minimum	Valeur	Maximum	U	Norme
Dosage en ciment (%)	2,50		2,54	3,50	
Teneur en eau			7.3 %	0	P 18-554/5

Tamis	mini	%tamisat	maxi	Incertitude
20.000	85.0	99.1	100.0	±0
16.000		87.3		0
14.000		74.8		0
12.500		71.3		0
10.000	55.0	70.3	88.0	±0
8.000		65.1		0
6.300	42.0	57.0	74.0	±0
5.000		50.2		0
4.000	32.0	45.0	66.0	±0
3.150				0
2.000	23.0	32.2	54.0	±0
1.000		24.9		0
0.500	11.0	20.0	31.0	±0
0.315		17.3		0
0.200		14.9		0
0.080	4.0	10.5	12.0	±0



Commentaires  
Granulométrie conforme  
Dosage en ciment en limite inférieure  
Teneur en eau un peu élevée

Le chargé d'étude  
L. BLOUET

Producteur : Carrière MOULIN DE THOURU  
Granulats : Grave ciment 0/20mm

Dossier :

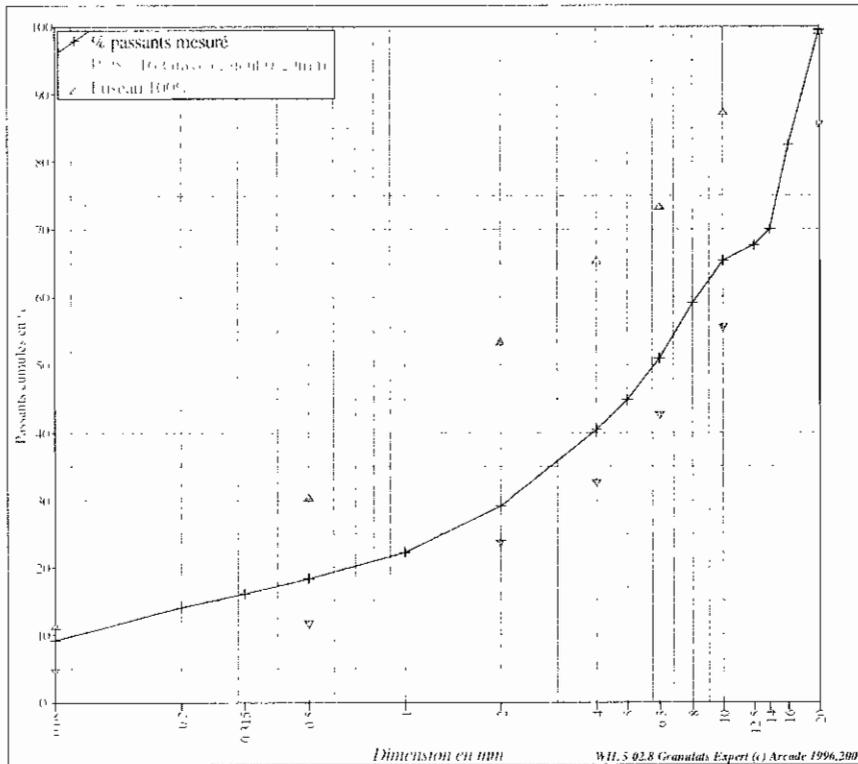
22/01/11891

UNICEM BRETAGNE - Valorisation des boues résiduaires de carrières

Contrôleur	BLOUET Laurent
Prélèvement n° A1166009	15000 g prélevés le 12/06/2001 à 14:00
Classe granulaire	0/20 mm
Origine	Camion
Mode	Main de fer
Fait par	QTR
Observations internes	LB/UNICEM/09
Observations	

ESSAIS	Minimum	Valeur	Maximum	U	Norme
Dosage en ciment (%)	2,50		1,84	3,50	
Teneur en eau			5,8 %		0 P 18-554/5

Tamis	mini	%tamisat	maxi	Incertitude
20.000	85.0	99.5	100.0	±0
16.000		82.5		0
14.000		70.0		0
12.500		67.7		0
10.000	55.0	65.4	88.0	±0
8.000		59.1		0
6.300	42.0	51.0	74.0	±0
5.000		44.9		0
4.000	32.0	40.4	66.0	±0
3.150				0
2.000	23.0	29.1	54.0	±0
1.000		22.3		0
0.500	11.0	18.3	31.0	±0
0.315		16.1		0
0.200		14.0		0
0.080	4.0	9.2	12.0	±0



Commentaires  
Granulométrie conforme  
Dosage en ciment insuffisant

Le chargé d'étude  
L. BLOUET

Producteur : Carrière MOULIN DE THOURU  
Granulats : Grave ciment 0/20mm

Dossier :

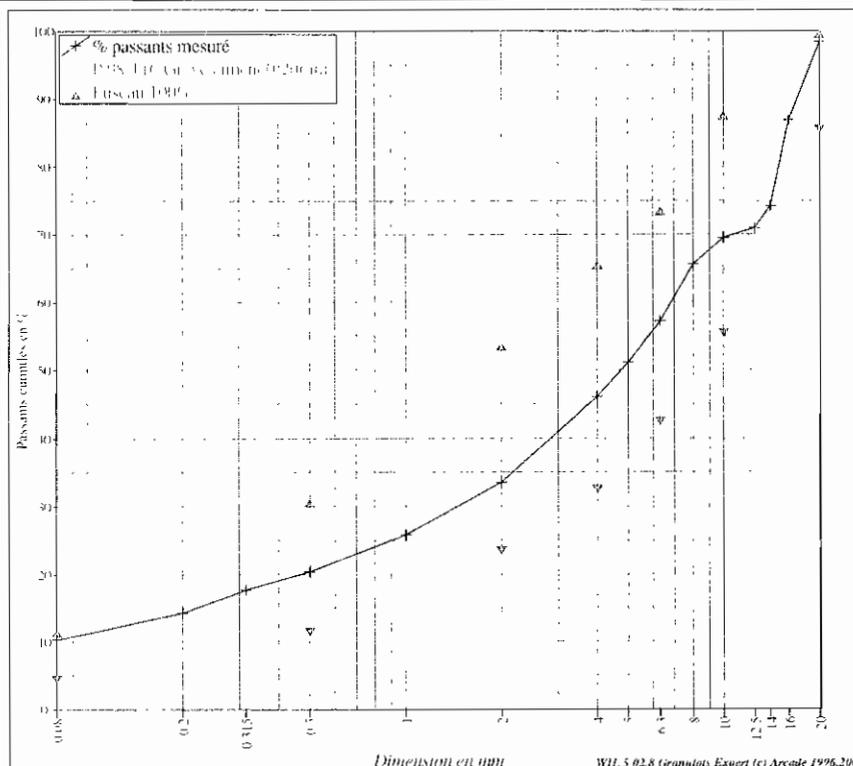
22/01/11891

UNICEM BRETAGNE - Valorisation des boues résiduaires de cimenterie

Contrôleur	BLOUET Laurent
Prélèvement n° A1166010	15000 g prélevés le 12/06/2001 à 15:00
Classe granulaire	0/20 mm
Origine	Camion
Mode	Main de fer
Fait par	QTR
Observations internes	LB/UNICEM/10
Observations	

ESSAIS	Minimum	Valeur	Maximum	U	Norme
Dosage en ciment (%)	2,50		2,41	3,50	
Teneur en eau			7.3 %		0 P 18-554/5

Tamis	mini	%tamisat	maxi	Incertitude
20.000	85.0	98.3	100.0	±0
16.000		86.8		0
14.000		74.2		0
12.500		71.0		0
10.000	55.0	69.6	88.0	±0
8.000		65.6		0
6.300	42.0	57.2	74.0	±0
5.000		51.1		0
4.000	32.0	46.1	66.0	±0
3.150				0
2.000	23.0	33.5	54.0	±0
1.000		25.8		0
0.500	11.0	20.4	31.0	±0
0.315		17.6		0
0.200		14.3		0
0.080	4.0	10.3	12.0	±0



Commentaires  
Granulométrie conforme  
Dosage en ciment à la limite inférieure  
Teneur en eau un peu élevée

Le chargé d'étude  
L. Blouet

**Producteur : Carrière MOULIN DE THOURU** Dossier :  
**Granulats : Grave ciment 0/20mm - boues**  
**Technique : Grave Ciment**

**22/01/11891**

UNICEM BRETAGNE - Valorisation des boues résiduaires de carrière

**Origine :**  
**Mode :**

**Camion**  
**Main de fer**

IMP22E17

**Partie contractuelle**

Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

**Classe granulaire**

**Norme**

**Catégorie**

0	20
---	----

Norme P 98-116 - Grave ciment

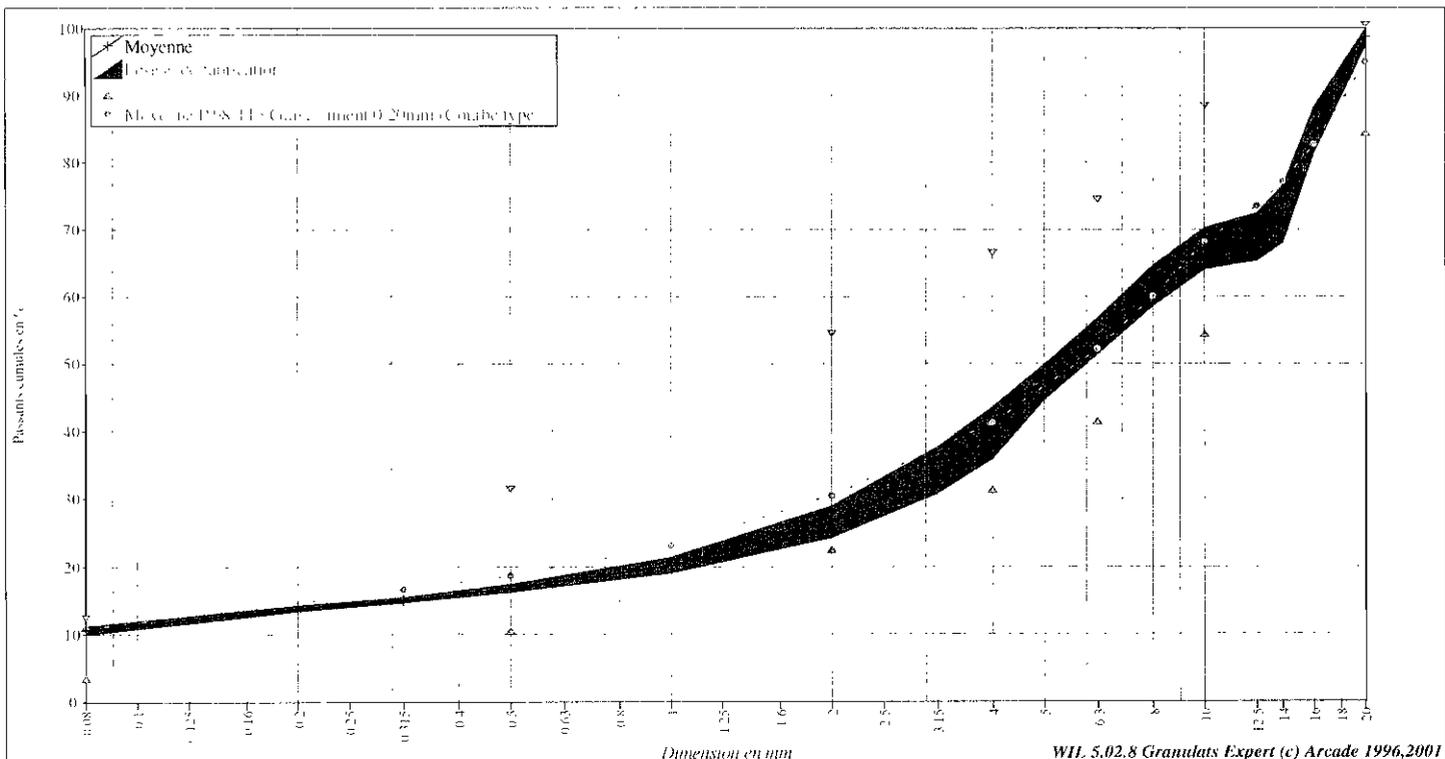
Grave ciment 0/20mm

	0.08	0.2	0.315	0.5	1	2	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	14	16	20	C%	W
V.S.S	12.0			31.0		54.0		66.0		74.0		88.0				100.0		
V.S.I	4.0			11.0		23.0		32.0		42.0		55.0				85.0		

**Partie informative**

Résultats de production du 12/06/2001 au 23/09/2002

	Date	Observations	0.08	0.2	0.315	0.5	1	2	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	14	16	20	C%	W
QTR-A1166004	12/06/2001	LBUNCEM14								37.1	46.0	54.5	63.0	68.8	70.9	73.2	83.6	97.5	3.53	5.6
QTR-A1166005	12/06/2001	LBUNCEM15	11.0	14.1	15.4	17.2	20.9	28.0	36.2	43.1	49.8	56.0	63.1	68.4	70.2	75.3	88.1	99.3	4.14	6.6
QTR-A1166006	12/06/2001	LBUNCEM16	10.2	13.5	14.8	16.5	19.6	25.3	32.3	39.1	46.1	51.7	58.8	64.3	65.6	68.5	82.9	98.6	3.62	5.6
QTR-A1166007	12/06/2001	LBUNCEM17																	3.80	6.6
Maximum			11.0	14.1	15.4	17.2	20.9	28.0	36.2	43.1	49.8	56.0	63.1	68.8	70.9	75.3	88.1	99.6	4.14	6.6
Xf-1.25 Ecart-types			11.3	14.3	15.6	17.4	21.4	29.0	37.7	43.6	50.0	56.8	64.7	70.3	72.5	76.6	88.4	100.0	4.11	6.8
Moyenne Xi			10.6	13.8	15.1	16.8	20.2	26.6	34.2	39.8	47.3	54.1	61.6	67.2	68.9	72.3	84.9	98.8	3.77	6.1
Xf-1.25 Ecart-types			9.9	13.3	14.6	16.2	19.0	24.3	30.7	35.9	44.8	51.4	58.6	64.0	65.3	68.0	81.4	97.3	3.44	5.4
Minimum			10.2	13.5	14.8	16.5	19.6	25.3	32.3	37.1	46.0	51.7	58.8	64.3	65.6	68.5	82.9	97.5	3.53	5.6
Ecart-type			0.56	0.40	0.38	0.49	0.94	1.89	2.79	3.08	2.15	2.18	2.45	2.49	2.87	3.48	2.79	1.15	0.269	0.58
Nombre de résultats			2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4





Producteur : Carrière MOULIN DE THOURU Dossier :  
Granulats : Grave ciment 0/20mm

22/01/11891

UNICEM BRETAGNE - Valorisation des boues résiduaires de carrière

Origine :  
Mode :

Camion  
Main de fer

IMP22E17

Partie contractuelle

Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

Classe granulaire

Norme

Catégorie

0 20

Norme P 98-116 - Grave ciment

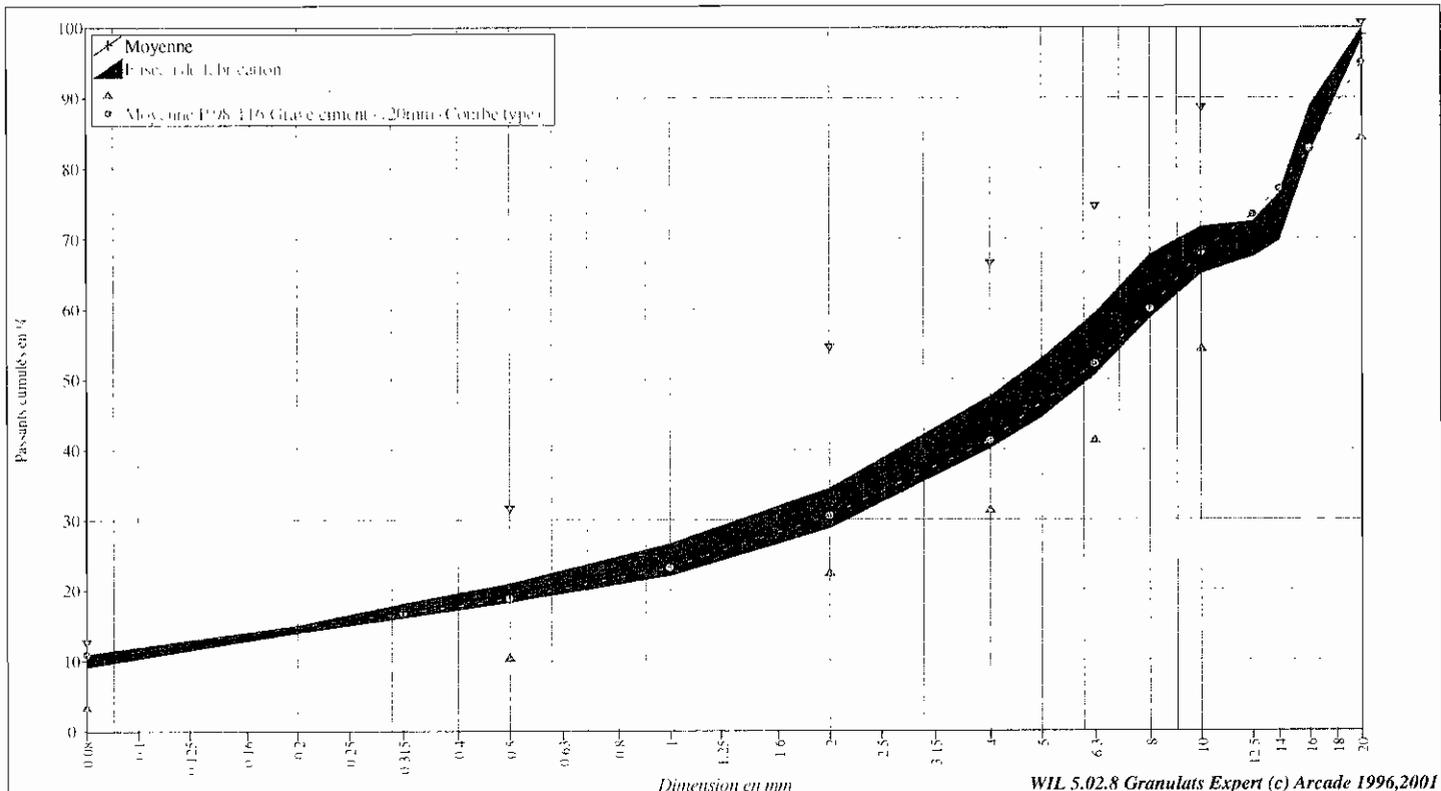
Grave ciment 0/20mm

	D																C%	W
	0.08	0.2	0.315	0.5	1	2	4	5	6.3	8	10	12.5	14	16	20			
V.S.S.	12.0			31.0		54.0	66.0		74.0		88.0					100.0		
V.S.I.	4.0			11.0		23.0	32.0		42.0		55.0					85.0		

Partie informative

Résultats de production du 12/06/2001 au 23/09/2002

	Date	Observatoire	0.08	0.2	0.315	0.5	1	2	4	5	6.3	8	10	12.5	14	16	20	C%	W
QTR-A1166008	12/06/2001	LBUNCEM16	10.5	14.9	17.3	20.0	24.9	32.2	45.0	50.2	57.0	65.1	70.3	71.3	74.8	87.3	99.1	2.54	7.3
QTR-A1166009	12/06/2001	LBUNCEM09	9.2	14.0	16.1	18.3	22.3	29.1	40.4	44.9	51.0	59.1	65.4	67.7	70.0	82.5	99.5	1.84	5.8
QTR-A1166010	12/06/2001	LBUNCEM10	10.3	14.3	17.6	20.4	25.8	33.5	46.1	51.1	57.2	65.6	69.6	71.0	74.2	86.8	98.3	2.41	7.3
Maximum			10.5	14.9	17.6	20.4	25.8	33.5	46.1	51.1	57.2	65.6	70.3	71.3	74.8	87.3	99.5	2.54	7.3
Xf+1.25 Ecart-types			10.9	15.0	18.0	20.9	26.6	34.5	47.6	52.9	59.5	67.8	71.7	72.5	76.3	88.8	99.8	2.73	7.9
Moyenne Xf			10.0	14.4	17.0	19.6	24.3	31.6	43.8	48.7	55.1	63.3	68.4	70.0	73.0	85.5	99.0	2.26	6.8
Xf-1.25 Ecart-types			9.1	13.9	16.0	18.2	22.0	28.7	40.1	44.6	50.7	58.8	65.1	67.5	69.7	82.3	98.2	1.80	5.7
Minimum			9.2	14.0	16.1	18.3	22.3	29.1	40.4	44.9	51.0	59.1	65.4	67.7	70.0	82.5	98.3	1.84	5.8
Ecart-type			0.72	0.43	0.82	1.09	1.84	2.29	3.00	3.34	3.51	3.60	2.65	2.01	2.62	2.62	0.61	0.372	0.87
Nombre de résultats			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3





C.E.T.E OUEST  
 Laboratoire Régional  
 des Ponts et Chaussées  
 5, rue Jules Vallès  
 22015 SAINT BRIEUC cedex  
 Tél : 02 96 75 93 00

Mesure de masse volumique en place **NF P 98-241-1**

Date: 12/06/2001

° affaire :	11891		
RD ou RN	PR début	PR fin	
CD12			
Localisation	Saint Brice en Coglès		

Fabrication :	HENRY
Entreprise m.e.o.:	TPR
Couche :	BASE
Opérateur d'essai	S.LETOUZE/L.BLOUET
	<i>[Signature]</i>
	(Nom et signature)

**RECAPITULATIF DU CONTRÔLE DE CONFORMITE (avec et sans boues)**

Nombre d'essais :	10		ρd Proctor	2.31
	Mini	Maxi	Moyenne	Ecart - type
MVA	2.14	2.27	2.20	0.03
w%	5.00	5.00		

Spécifications Norme produit :	
NF P 98-115	
95% ρ <sub>dOPM</sub>	2.19
90% ρ <sub>dOPM</sub>	2.08

Seuil de conformité du lot contrôlé	<b>CONFORMITE</b>
Moy > 95 % ρ <sub>dOPM</sub> pour 50% des valeurs et 95% des valeurs > 90% ρ <sub>dOPM</sub>	<b>OUI</b>

Nombre d'essais :	10		ρd Proctor	2.31
	Mini	Maxi	Moyenne	Ecart - type
MVA	2.16	2.27	2.23	0.03
w%	6.00	6.00		

Spécifications Norme produit :	
NF P 98-115	
95% ρ <sub>dOPM</sub>	2.19
90% ρ <sub>dOPM</sub>	2.08

Seuil de conformité du lot contrôlé	<b>CONFORMITE</b>
Moy > 95 % ρ <sub>dOPM</sub> pour 50% des valeurs et 95% des valeurs > 90% ρ <sub>dOPM</sub>	<b>OUI</b>

**DETAIL DES MESURES**

Appareil : GPV 10/22

Numéro d'identification : 5

n° d'essais	Profondeur	MVA	w%	Observation
1	12.5	2.18	5	Grave ciment avec boues
2	12.5	2.24	5	
3	12.5	2.17	5	
4	12.5	2.21	5	
5	12.5	2.19	5	
6	12.5	2.20	5	
7	12.5	2.23	5	
8	12.5	2.22	5	
9	12.5	2.14	5	Entrée de buse
10	12.5	2.19	5	
1	12.5	2.23	6	Grave ciment sans boues
2	12.5	2.25	6	
3	12.5	2.25	6	
4	12.5	2.27	6	
5	12.5	2.24	6	
6	12.5	2.25	6	
7	12.5	2.25	6	
8	12.5	2.19	6	
9	12.5	2.16	6	
10	12.5	2.21	6	

Observations

Pour la grave ciment sans boues, la teneur en eau plus élevée à la fabrication a saturé le mélange en eau et a conduit à de meilleures densités en place, même si après le compactage la stabilité était moins bonne.

**Caractérisation du comportement à la lixiviation  
des boues résiduaire de l'alcalinisation  
des eaux acides des carrières  
en scénario spécifié**

**Étude effectuée à la demande  
de l'UNICEM Bretagne**

**État d'avancement**

**Janvier 2000**



**INSAVALOR SA  
Division POLDEN**

***Expertises, Études et Recherche***

# Sommaire

<b><u>Introduction</u></b>	<b>3</b>
<b>1. <u>Étude de la boue</u></b>	<b>4</b>
1.1 Description de l'échantillon	4
1.2 Détermination de la teneur en eau de la boue	4
1.3 Analyse de la composition chimique de la boue	5
<b>2. <u>Étude du comportement des graves-ciment à l'échelle du laboratoire</u></b>	<b>8</b>
<b>2.1 <u>Détermination de la fraction mobilisable</u></b>	<b>8</b>
<b>2.1.1 <u>Principe, résultats attendus et limites d'application</u></b>	<b>8</b>
2.1.1.1 Principe du test	8
2.1.1.2 Résultats attendus	9
2.1.1.3 Limites du domaine d'application	9
<b>2.1.2 <u>Application dans le cas de l'étude</u></b>	<b>9</b>
2.1.2.1 Mise en œuvre du test	9
2.1.2.2 Résultats et commentaires	9
<b>2.2 <u>Influence du pH en conditions stationnaires</u></b>	<b>14</b>
<b>2.2.1 <u>Contexte normatif du test</u></b>	<b>14</b>
<b>2.2.2 <u>Principe, résultats attendus et limites d'application</u></b>	<b>14</b>
2.2.2.1 Principe du test	14
2.2.2.2 Résultats attendus et typologie de comportements	14
2.2.2.3 Limites du domaine d'application	16
<b>2.2.3 <u>Application dans le cas de l'étude</u></b>	<b>16</b>
2.2.3.1 Mise en œuvre du test	16
2.2.3.2 Résultats et commentaires	16
<b><u>Conclusion</u></b>	<b>22</b>
<b><u>Annexes</u></b>	<b>23</b>
<b>Annexe 1</b> : Analyse de la composition chimique de la boue teneurs en mg/kg de matière sèche	24
<b>Annexe 2</b> : Formulations des graves-ciment étudiées	25
<b>Annexe 3</b> : Détermination de la fraction maximale mobilisable	26
<b>Annexe 4</b> : Influence du pH en conditions stationnaires	35

## Introduction

L'UNICEM conduit actuellement un programme d'étude afin de déterminer les filières de valorisation pertinentes pour les boues résiduelles de l'alcalinisation des eaux acides des carrières de Bretagne. Dans le cadre de ce projet, l'équipe d'INSAVALOR division POLDEN est chargée de caractériser et de modéliser le comportement environnemental de ces déchets.

Une première étude, menée en 1997, a permis de sélectionner parmi les différentes possibilités de valorisation envisageables la plus adaptée au cas de ces boues.

Le scénario retenu par l'UNICEM consiste en l'incorporation de la boue dans une grave-ciment, matériau traditionnellement utilisé en sous-couche routière. La boue introduite vient en substitution partielle des granulats les plus fins (fraction granulométrique comprise entre 0 et 4 mm).

L'objet de ce rapport est de présenter l'étude de caractérisation de la boue ainsi que les premiers résultats de la caractérisation de la grave-ciment à l'échelle du laboratoire. L'ensemble sera complété par :

- la suite des essais de caractérisation du matériau en laboratoire,
- des essais de simulation en lysimètres,
- le suivi d'un chantier de route expérimentale pilote.

## 1

# Étude de la boue

## 1.1 Description de l'échantillon

La boue réceptionnée provient du site n° 1 de la première phase de l'étude (carrière de roche cornéenne). Cependant, le traitement des eaux d'exhaure par du calcaire concassé a été complété par un apport de chaux.

L'échantillon reçu au laboratoire, conditionné dans trois sacs en plastique superposés, pesait environ 6 kg.

Plusieurs paramètres physico-chimiques ont été immédiatement mesurés :

- pH 7,69
- Conductivité 1265  $\mu\text{S/cm}$
- Potentiel d'oxydo-réduction 175 mV/ENH

L'échantillon a ensuite été pesé précisément et entièrement séché à l'étuve afin de déterminer la teneur en eau de la boue, puis de soumettre le résidu sec à la minéralisation acide préalable à l'analyse chimique.

## 1.2 Détermination de la teneur en eau de la boue

L'échantillon est séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante, ce qui permet de déterminer le taux de matière sèche "MS" et la teneur en eau "w" de la boue. Ces paramètres, tous deux exprimés sous forme de pourcentage, sont calculés de la façon suivante :

$$MS = \frac{m_s}{m_{\text{tot}}} \quad \text{et} \quad w = \frac{m_{\text{tot}} - m_s}{m_s}$$

avec les notations suivantes :

- $m_s$  : masse de boue séchée (après passage à l'étuve)
- $m_{\text{tot}}$  : masse initiale de boue brute

On obtient :

$$MS = 45,5 \% \quad \text{et} \quad w = 119,8 \%$$

La boue présente une teneur en eau comparable à celle généralement observée dans le cas de la vase (environ 120 %).

Dans la première phase de l'étude, le taux de matière sèche et la teneur en eau déterminés sur la boue issue du même site que le nouvel échantillon étaient respectivement de 29,8 % et 235,9 %. Cet écart n'est probablement pas dû à la modification du traitement. En effet, l'apport de chaux a généralement pour conséquence une augmentation de la teneur en eau.

Le mode d'échantillonnage et le conditionnement peuvent être à l'origine d'une telle différence. Lors de la première phase d'étude, les quantités prélevées étaient plus importantes (50 à 100 l) et conditionnées en bacs rigides étanches. Le nouvel échantillon étudié a été prélevé à la pelle et emballé dans des sacs en plastique. Le prélèvement à la pelle induit un biais dans l'échantillonnage : la partie surnageante de la boue est moins représentée dans l'échantillon que dans le lot de départ. D'autre part, le conditionnement dans des sacs en plastique ne permet pas de garantir une étanchéité parfaite.

### **1.3 Analyse de la composition chimique de la boue**

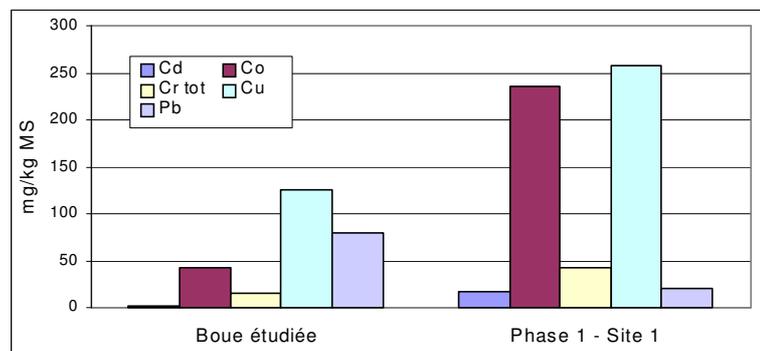
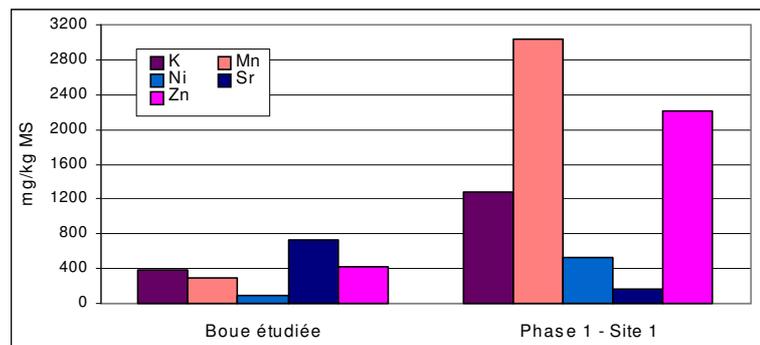
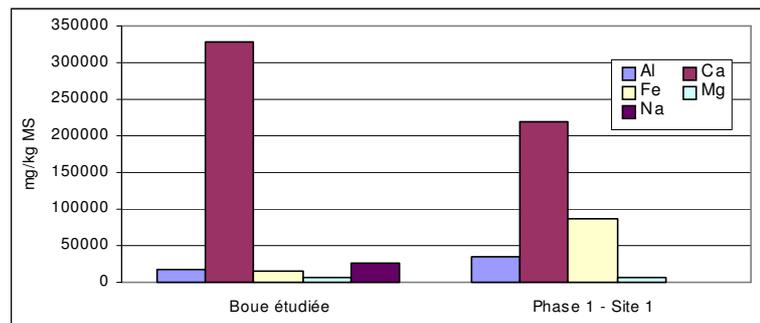
La boue séchée a été analysée après mise en solution des éléments par minéralisation acide.

Les résultats de l'analyse sont présentés ci-après sous forme de tableau et d'histogrammes. Les teneurs sont exprimées en mg/kg de matière sèche, ce qui autorise la comparaison entre la boue étudiée et la boue de même provenance analysée en phase 1, malgré leur différence de teneur en eau. Les résultats exprimés en mg/kg de boue brute figurent en annexe du présent rapport.

**Analyse de la composition chimique de la boue**  
(en mg/kg de masse sèche)

Élément (m/kg MS)	Boue étudiée	Phase 1 - Site 1
Aluminium	18176	35760
Calcium	327266	220557
Fer	16251	87794
Magnésium	6575	6531
Sodium	27076	236
Cadmium	1,3	17
Cobalt	43	236
Chrome total	15	43
Chrome VI	< 5,0	N.R.
Cuivre	125	257
Potassium	375	1285
Manganèse	295	3041
Molybdène	< ,3	N.R.
Nickel	100	535
Plomb	79	21
Soufre	2900	N.R.
Strontium	725	171
Zinc	425	2206

N.R. : Non Recherché



On constate que le complément de traitement par apport de chaux conduit à une réduction des quantités présentes dans la boue pour la plupart des éléments et notamment les métaux. Ainsi, on observe une diminution importante des teneurs en cadmium (facteur 10), manganèse (facteur 10), cobalt (facteur 5), fer (facteur 5), nickel (facteur 5), zinc (facteur 5) et, dans une moindre mesure, des teneurs en chrome total (facteur 3), potassium (facteur 3) et cuivre (facteur 2).

On remarque cependant, outre l'accroissement de la teneur en calcium attribuable à l'apport de chaux, une augmentation des teneurs en plomb (facteur 4), en strontium (facteur 4) et surtout en sodium (facteur 100).

## 2

# Étude du comportement des graves-ciment à l'échelle du laboratoire

L'étude a été menée sur des éprouvettes de graves-ciment fournies par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Saint-Brieuc.

L'une des deux graves-ciment contient de la boue de même provenance que la boue précédemment étudiée. La boue incorporée vient en substitution partielle de la partie fine du sable (fraction granulométrique inférieure à 4 mm). Cette grave-ciment contient en matière sèche 1,2 % de boue.

L'autre grave-ciment ne renferme pas de boue et constitue un échantillon témoin.

Les formulations de ces deux graves-ciment, qui nous ont été communiquées par le LRPC, figurent en annexe de ce rapport.

## 2.1 Détermination de la fraction mobilisable

### 2.1.1 Principe, résultats attendus et limites d'application

#### 2.1.1.1 Principe du test

Le test de détermination de la fraction maximale mobilisable est un test d'extraction dans un contexte chimique donné, le plus souvent représenté par le pH.

Dans le cadre de l'étude, trois contextes chimiques ont été retenus :

- contexte imposé par le matériau lui-même : l'échantillon est mis en contact avec de l'eau déminéralisée ;
- pH 4 ;
- pH 12.

Dans les deux derniers cas, le pH est imposé et régulé de façon automatique par un dispositif de pH-stat.

Pour chacun des contextes chimiques étudiés, le protocole est celui d'une extraction séquentielle : le même échantillon est mis en contact avec la solution, en utilisant des rapports masse sèche de l'échantillon / masse de liquide (ratio L/S) successifs de 10, 40 et 50. Les ratios L/S cumulés sont en conséquence : 10, 50 et 100.

L'échantillon subit une réduction granulométrique à 1 mm, puis est mis en contact avec la solution et agité pendant 48 heures. L'éluat obtenu est alors filtré. Le filtrat est conservé pour analyse tandis que le culot de filtration est remis en contact avec la solution pour la séquence de lixiviation suivante, et ce jusqu'à l'obtention du filtrat pour le ratio L/S cumulé de 100.

### **2.1.1.2 Résultats attendus**

L'objectif du test de détermination de la fraction maximale mobilisable est d'aboutir à une estimation du maximum extractible pour une espèce donnée dans les conditions physico-chimiques du scénario de lixiviation.

Pour chaque espèce suivie, deux représentations graphiques des résultats sont proposées. La première montre l'évolution des concentrations mesurées sur l'éluat après filtration en fonction du ratio L/S cumulé. La seconde présente les masses extraites (en mg/kg de masse sèche d'échantillon), également en fonction du ratio L/S cumulé. L'extrapolation de la masse extraite vers un ratio L/S infini permet, dans le cas où la courbe tend vers une asymptote, d'estimer la fraction maximale mobilisable.

### **2.1.1.3 Limites du domaine d'application**

La détermination de la fraction maximale mobilisable permet d'estimer de façon expérimentale une quantité maximum extractible pour une espèce donnée. Ce résultat est notamment utilisé pour l'application d'un modèle complexe de comportement à la lixiviation, couplant les phénomènes de dissolution et de transport.

L'objectif de l'essai n'est pas de simuler des situations réelles. Il ne représente donc pas les conditions réelles des scénarios envisagés. En conséquence, les résultats obtenus ne peuvent pas être positionnés vis-à-vis de référentiels relatifs au milieu naturel.

## **2.1.2 Application dans le cas de l'étude**

### **2.1.2.1 Mise en œuvre du test**

L'essai de détermination de la fraction maximale mobilisable a été mis en œuvre sur les échantillons de graves-ciment fournis par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc.

Pour imposer le pH de 4, l'acide utilisé est de l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>).  
Pour imposer le pH de 12, la base utilisée est de la soude (NaOH).

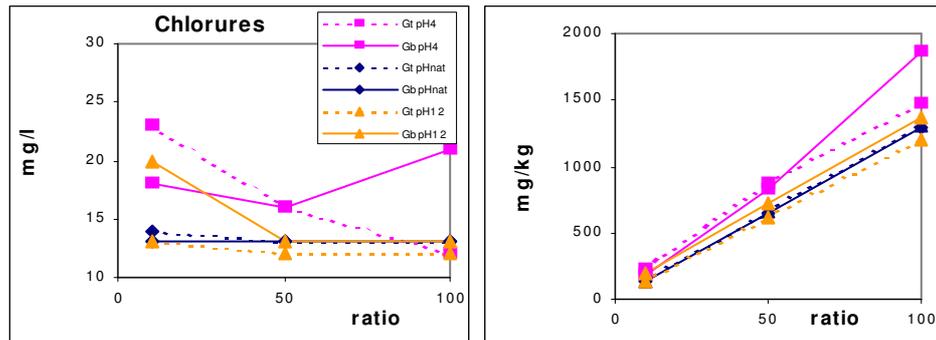
### **2.1.2.2 Résultats et commentaires**

Les résultats obtenus sont présentés de façon synthétique ci-après. Les données complètes sont récapitulées sous forme de tableaux et de graphiques en annexe de ce rapport.

Globalement, on constate que la grave-ciment contenant la boue et la grave-ciment témoin ont, le plus souvent, un comportement similaire.

Pour la grande majorité des éléments analysés, les quantités relarguées sont plus importantes à pH 4 qu'à pH naturel et pH 12.

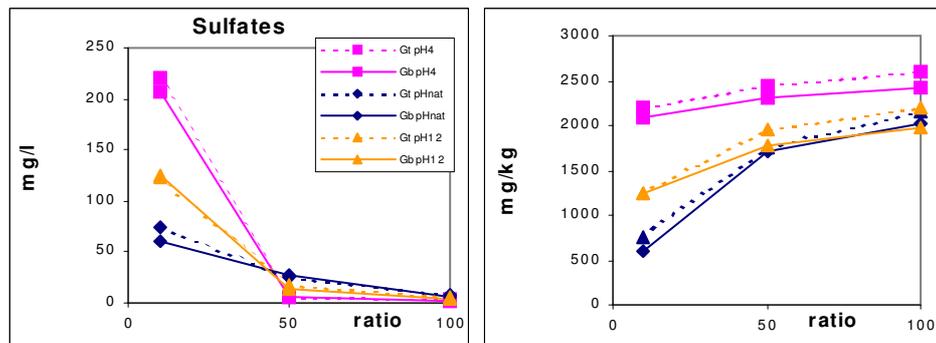
## - Chlorures

**Détermination de la fraction maximale mobilisable des chlorures**

La grave-ciment témoin et la grave-ciment additionnée de boue présentent un comportement similaire, et ce pour les trois contextes de pH testés.

On constate que les quantités relarguées cumulées augmentent de façon linéaire avec le rapport L/S ; il n'est donc pas possible de déterminer une fraction maximale mobilisable pour cette espèce. On note toutefois que, même pour un ratio L/S cumulé élevé (100), la fraction relarguée n'atteint pas 0,2 %.

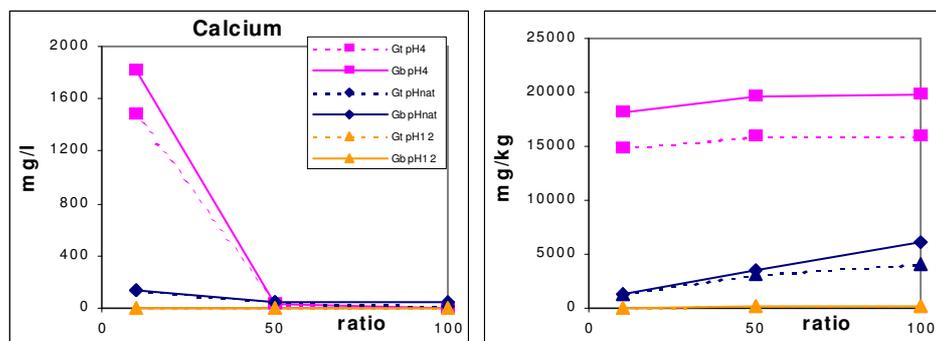
## - Sulfates

**Détermination de la fraction maximale mobilisable des sulfates**

En ce qui concerne cet élément, on observe que la grave-ciment témoin conduit systématiquement à un relargage plus important que la grave-ciment contenant la boue, bien que les quantités restent comparables.

Après une augmentation entre les rapports L/S = 10 et L/S = 50, les quantités relarguées cumulées semblent se stabiliser pour L/S = 100 autour de 2500 mg/kg (0,25 %) pour pH 4 et autour de 2000 mg/kg (0,2 %) pour pH 12 et pH naturel, soit des fractions là encore très faible.

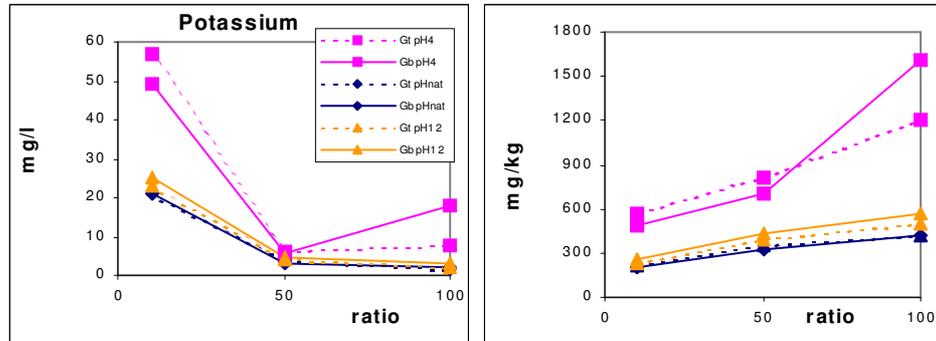
## - Calcium

**Détermination de la fraction maximale mobilisable du calcium**

Pour le pH naturel et le pH basique imposé (pH 12), la présence de calcium en solution est limitée par la formation d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

En ce qui concerne le pH acide, la différence observée entre la grave-ciment témoin et la grave-ciment contenant la boue correspond à l'apport de calcium par la boue (environ 4000 mg/kg de grave-ciment sèche). La quantité cumulée de calcium relargué se stabilise autour de 20000 mg/kg pour la grave ciment additionnée de boue.

### - Potassium

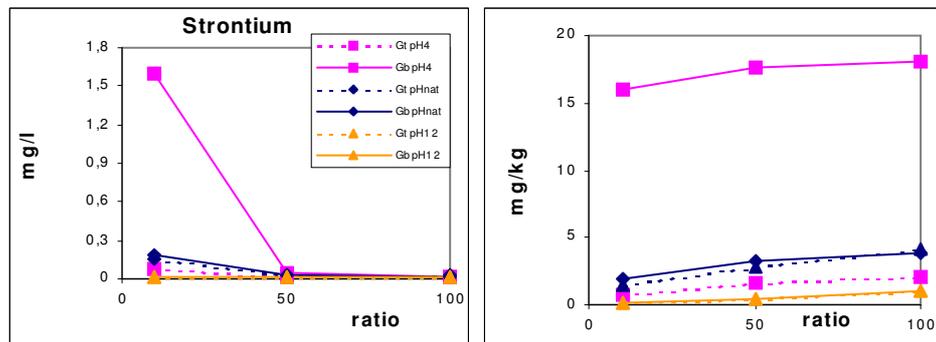


#### *Détermination de la fraction maximale mobilisable du potassium*

La grave-ciment témoin et la grave-ciment contenant la boue présentent un comportement similaire pour le pH naturel et à pH 12.

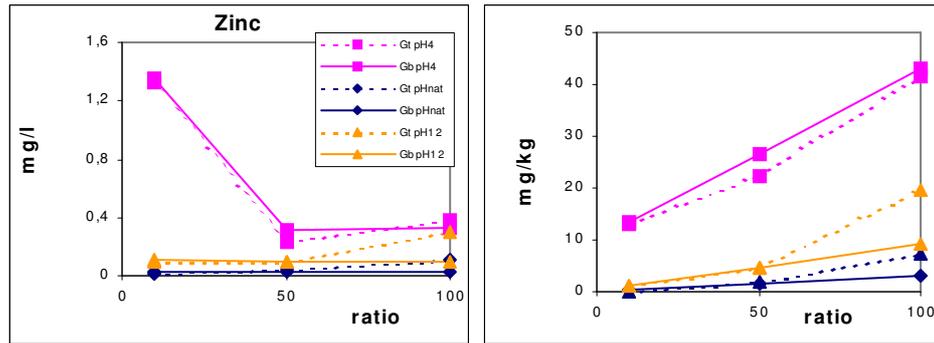
A pH 4, on constate que la concentration en potassium augmente entre le rapport L/S = 50 et le rapport L/S = 100.

### - Strontium



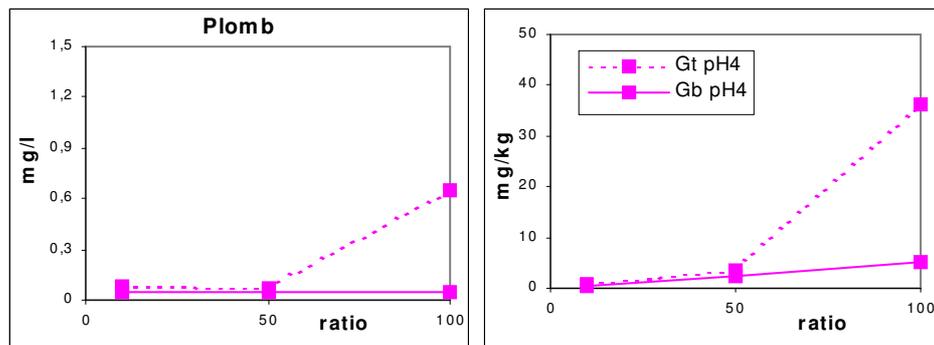
#### *Détermination de la fraction maximale mobilisable du strontium*

Toutes les courbes présentent un profil identique, à l'exception de la grave-ciment + boue à pH 4, pour laquelle la concentration à L/S = 10 est plus importante (facteur 10 par rapport aux autres échantillons testés). En conséquence, la courbe des quantités relarguées cumulées pour cette même grave-ciment se situe au-dessus des autres. L'apport dû à la boue (environ 9 mg/kg de grave-ciment sèche) reste inférieur à la différence observée.

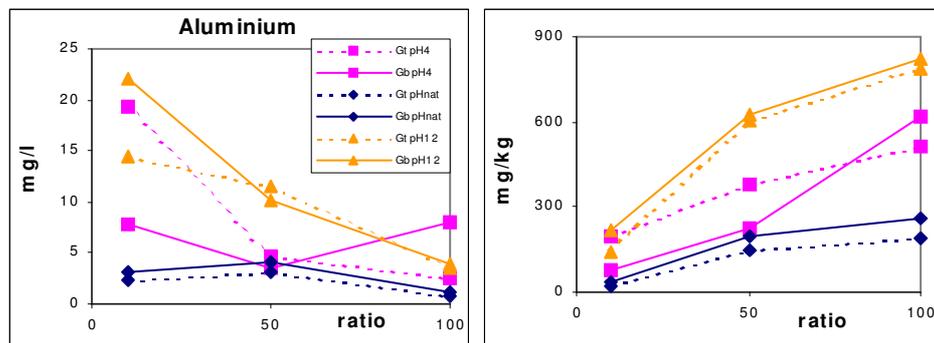
**- Zinc****Détermination de la fraction maximale mobilisable du zinc**

La grave-ciment témoin et la grave-ciment + boue présentent un comportement similaire quel que soit le contexte de pH. Dans tous les cas, les quantités relarguées cumulées augmentent de façon quasi-linéaire avec le rapport L/S. En conséquence, aucune fraction maximale mobilisable ne peut être déterminée.

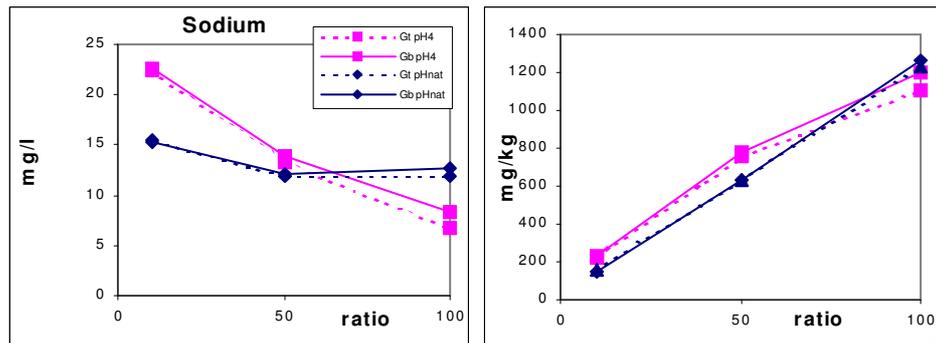
Pour certaines espèces, la situation est différente :

**- Plomb****Détermination de la fraction maximale mobilisable du plomb**

Le plomb n'a été décelé qu'à pH 4, et uniquement dans la grave-ciment témoin.

**- Aluminium****Détermination de la fraction maximale mobilisable de l'aluminium**

Pour l'aluminium, les quantités relarguées cumulées sont plus importantes à pH 12 qu'à pH 4 et pH naturel. Ceci est conforme au comportement très amphotère de ce métal mais, là encore, les quantités sont très faibles et sans lien avec la présence de boue.

**- Sodium****Détermination de la fraction maximale mobilisable du sodium**

Le comportement est similaire à pH 4 et pH naturel pour les deux graves-ciment. Le suivi du sodium à pH 12 n'est pas représentatif du comportement des graves-ciment car il est dû à l'ajout de soude NaOH pour contrôler le pH.

**- Chrome**

Le chrome total n'a été décelé que pour L/S = 10, dans certains échantillons. Le chrome hexavalent n'a été décelé dans aucun échantillon. En conséquence, il n'a pas été établi de représentation graphique pour cet élément.

## 2.2 Influence du pH en conditions stationnaires

### 2.2.1 Contexte normatif du test

Le test d'influence du pH en conditions stationnaires s'inscrit dans le cadre de la norme expérimentale européenne ENV 12920 "Caractérisation des déchets - Méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans des conditions spécifiées". Cette méthodologie vise à garantir la prise en compte des propriétés spécifiques du déchet et des conditions particulières du scénario (d'utilisation ou d'élimination).

Le test d'influence du pH en conditions stationnaires s'intéresse plus particulièrement aux propriétés spécifiques du déchet. Il permet de caractériser sa capacité de résistance face à des agressions acido-basiques.

Ce test est prévu en deux options.

#### • Option 1

Elle vise les caractéristiques intrinsèques du matériau, en l'occurrence l'effet du seul pH. Pour cela, les réactifs utilisés sont l'acide nitrique et la soude, dont les coanions (respectivement  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{Na}^+$ ) sont considérés comme non limitants et non perturbants pour la mise en solution des composés du matériau. De plus, la gamme de pH à étudier est fixée de 4 à 12. Ce choix d'une gamme de pH étendue permet de disposer d'une série de données "standard", autorisant par exemple un positionnement vis-à-vis de matériaux de référence ou des comparaisons entre matériau brut et matériau stabilisé. Cette option est actuellement dans sa phase terminale de normalisation.

#### • Option 2

Elle vise cette fois à refléter des conditions d'agression acido-basique plus réalistes et surtout spécifiques à certains scénarios (acidité due à de l'acide sulfurique ou basicité due à de la chaux, par exemple). Dans ce cas, cette détermination complémentaire peut se faire sur une fenêtre de pH plus réduite, représentative du scénario.

### 2.2.2 Principe, résultats attendus et limites d'application

#### 2.2.2.1 Principe du test

Le test d'influence du pH en conditions stationnaires a pour objet de caractériser le comportement d'un déchet ou d'un matériau face à des agressions acido-basiques.

L'essai se déroule en parallèle sur plusieurs échantillons. Chacun d'eux est immergé dans une solution avec un rapport masse de liquide / masse sèche de l'échantillon (ratio L/S) de 10. La solution est composée d'eau déminéralisée, seule ou additionnée d'une quantité connue d'acide ou de base. On recouvre ainsi la gamme de pH à étudier.

Au bout de 48 heures, les conditions stationnaires sont supposées atteintes. On peut alors procéder à la filtration, puis à l'analyse des éluats obtenus.

#### 2.2.2.2 Résultats attendus et typologie de comportements

Le test d'influence du pH en conditions stationnaires a pour but de caractériser deux paramètres du comportement des matériaux étudiés : la capacité de neutralisation acido-basique et la disponibilité des polluants.

### • Capacité de neutralisation acido-basique

La capacité de neutralisation acido-basique caractérise la stabilité physico-chimique du matériau et sa résistance aux agressions acido-basiques. Le résultat est présenté sous forme d'une courbe appelée "Courbe de neutralisation acido-basique". Elle présente l'évolution du pH (mesuré après 48 heures) en fonction des ajouts d'acide ou de base, exprimés en  $\text{m\acute{e}q H}^+/\text{g}$ . Cette courbe peut faire apparaître plusieurs caractéristiques du matériau :

- Le **pH naturel** correspondant au contexte chimique imposé par le matériau lui-même dans de l'eau déminéralisée. La plupart des résidus de process thermiques ainsi que les matériaux à base de liants hydrauliques présentent des pH naturels supérieurs à 12. Certains matériaux naturels (sols, minéraux) sont plus proches du pH neutre (entre 6 et 8). Certains sols pollués, scories soufrées ou eaux d'exhaure, peuvent par contre présenter des pH naturels acides, voire très acides (pH 2).
- Le **comportement dans la zone alcaline**. Dans le cas des matériaux contenant un minimum de chaux ou de composés alcalins, cette partie n'existe pas puisque le pH naturel est déjà supérieur ou égal à 12. Certains matériaux relativement rares possèdent une capacité de neutralisation basique notable, mais dans l'ensemble les courbes ont généralement une branche acide plus développée.
- Un ou plusieurs **plateaux alcalins** correspondant aux différentes capacités tampons des matériaux. Un plateau aux environs de 12 est très courant pour les matériaux riches en chaux, un autre plus près de 10 se rencontre également pour des matériaux cimentiers. Pour les matériaux riches en carbonates, un plateau entre 6 et 8 apparaît. Ce dernier est très important car il correspond généralement à une zone de bonne stabilité physico-chimique, et ce pour deux raisons : d'abord parce que la plupart des métaux lourds ont une forme carbonatée peu soluble (plomb, zinc...); et ensuite parce que de nombreux polluants, y compris des anions très solubles tels que les chlorures et les sulfates, peuvent être physiquement "prisonniers" des carbonates, et ainsi retenus tant que ceux-ci résistent à l'agression extérieure.
- La **zone de neutralisation**, caractérisée graphiquement par le point d'inflexion. Elle correspond à la fin de la consommation de la capacité de neutralisation acide du matériau.
- Le **palier de fin de neutralisation**, correspondant au pH généralement peu fluctuant de la partie extrêmement stable de la matrice, souvent constituée par les silicates.

### • Disponibilité des polluants

Les résultats obtenus lors de l'analyse des différents éluats sont représentés et exploités sous deux formes graphiques complémentaires :

- Le **logarithme de la concentration en mg/l en fonction du pH**. Cette représentation classique permet, grâce à son échelle logarithmique, d'avoir une vision globale du comportement de l'élément considéré et d'effectuer éventuellement une comparaison avec les courbes de solubilité de la littérature.
- La **concentration en mg/l et le pH en fonction des ajouts d'acide ou de base exprimés en  $\text{m\acute{e}q H}^+/\text{g}$** . Grâce à son échelle linéaire, cette représentation permet de relativiser les fortes et les faibles valeurs (artificiellement soulignées par l'échelle logarithmique). Elle permet surtout de rattacher les concentrations obtenues aux niveaux d'agression subis par le matériau et à sa réponse en terme de pH.

La comparaison entre les deux courbes permet de distinguer les éléments dont la solubilité est contrôlée par le pH de ceux dont le relargage est consécutif à une consommation progressive de la capacité de neutralisation acido-basique du matériau.

**2.2.2.3 Limites du domaine d'application**

Le test d'influence du pH en conditions stationnaires permet donc :

- De qualifier et quantifier la résistance d'un matériau aux agressions acido-basiques.
- D'identifier les tendances de comportement et les niveaux de disponibilité des polluants. Dans certains cas, il permet même d'émettre des hypothèses sur les mécanismes de mise en solution.
- De constituer une donnée d'entrée des modèles de comportement dynamique, en l'occurrence sous la forme de la relation solubilité = f (pH ou méq H<sup>+</sup>/g) pour chaque constituant dans le contexte du matériau, ce que ne permettent généralement pas les données de la littérature.
- De qualifier et de quantifier des niveaux de stabilisation chimique obtenus sur un matériau avant et après traitement.

A contrario, il n'est pas destiné :

- A quantifier une fraction extractible, puisque les concentrations obtenues correspondent à une situation stationnaire proche d'un équilibre chimique. Seules les valeurs obtenues pour les plus faibles pH peuvent être considérées comme une approche du maximum mobilisable.
- A simuler des situations réelles de scénarios. Les concentrations obtenues ne sont donc pas à comparer avec des référentiels naturels (seuils de potabilisation de nappe, par exemple).

**2.2.3 Application dans le cas de l'étude****2.2.3.1 Mise en œuvre du test**

Le test d'influence du pH en conditions stationnaires a été mis en œuvre sur les échantillons graves-ciment fournis par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc.

Le test a été réalisé avec deux acides différents :

- l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>), visant à caractériser l'effet du seul pH sur le matériau ;
- l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), permettant de refléter par exemple l'effet d'un contact du matériau avec les eaux d'exhaure.

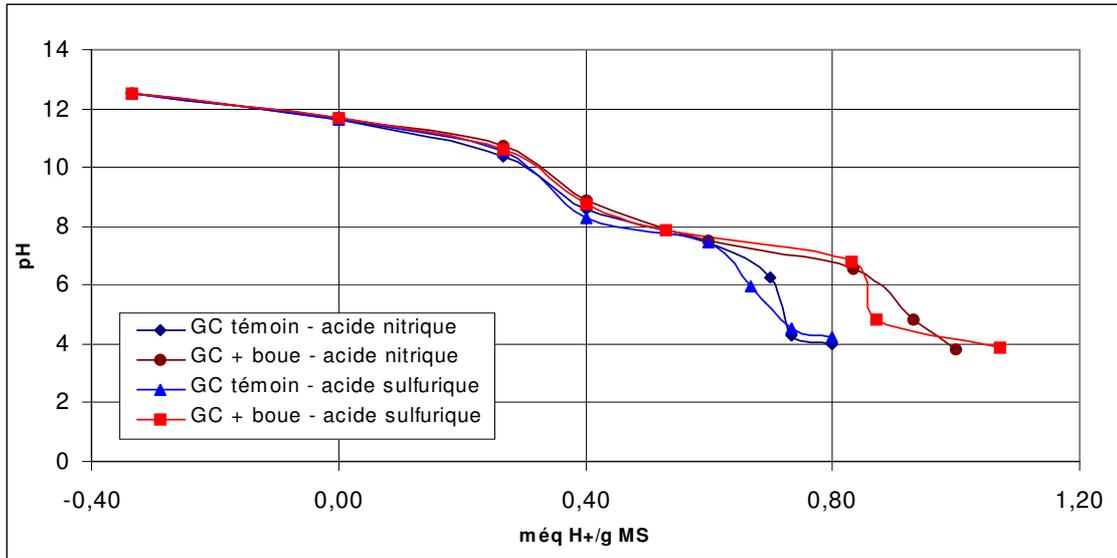
La base utilisée dans les deux cas est de la soude (NaOH).

**2.2.3.2 Résultats et commentaires**

Les résultats obtenus lors de la mise en œuvre du test d'influence du pH en conditions stationnaires sont représentés graphiquement ci-après. Les données quantitatives sont récapitulées sous forme de tableaux en annexe de ce rapport.

### • Capacité de neutralisation acido-basique

Les courbes de neutralisation acido-basique présentent un profil sensiblement identique quel que soit l'acide utilisé (voir figure ci-dessous).



**Courbes de neutralisation acido-basique**

Le pH naturel de la grave-ciment contenant de la boue et celui de la grave-ciment témoin sont du même ordre de grandeur (respectivement 11,68 et 11,60).

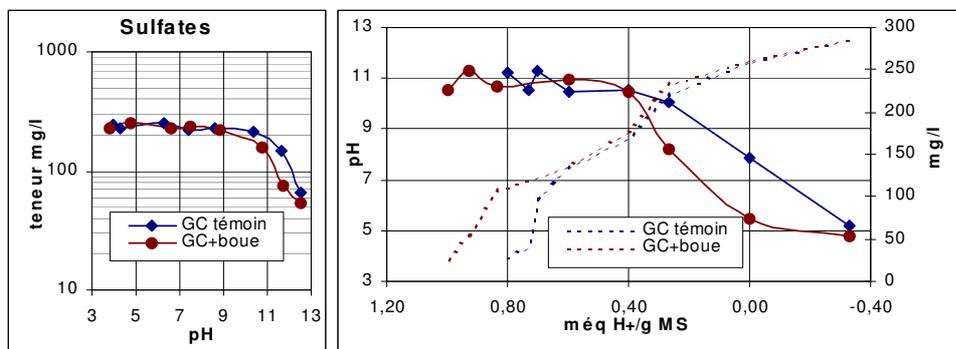
On observe le même type de comportement pour les deux graves-ciments, à savoir :

- un plateau autour de pH 10, représentatif des matériaux cimentiers,
- un plateau autour de pH 7, caractéristique des matériaux riches en carbonates.

On constate que l'incorporation de la boue dans la grave-ciment conduit à un plateau autour de pH 7 plus étendu que dans le cas de la grave-ciment témoin. La grave-ciment contenant de la boue présente donc une capacité de résistance aux agressions acides plus importante que la grave-ciment témoin.

### • Disponibilité des polluants (voir représentations graphiques ci-après)

#### - Sulfates

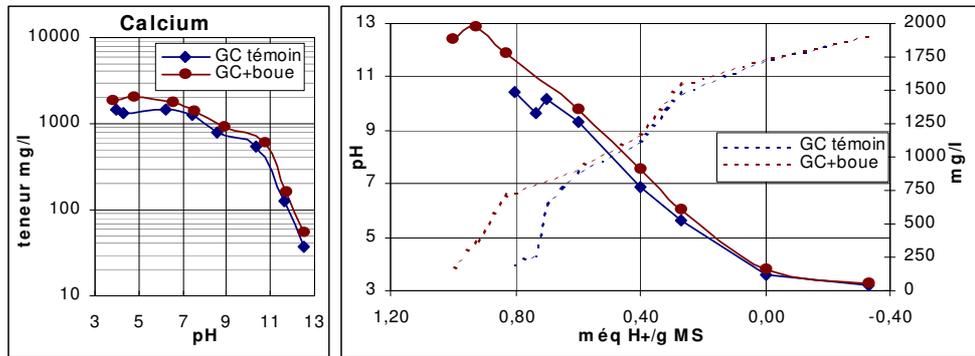


**Disponibilité des sulfates - Acide nitrique**

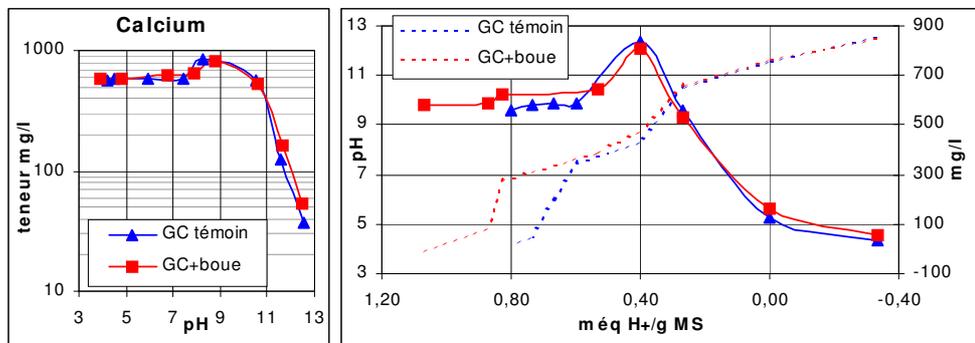
Les sulfates ont été analysés uniquement dans le cas d'une acidification à l'acide nitrique. Leur étude n'est pas pertinente en cas d'utilisation d'acide sulfurique, qui constitue un apport extérieur.

Pour les deux matériaux, on observe un relargage sensiblement constant jusqu'à pH 10 environ. Au-delà, la quantité relarguée diminue. Cette décroissance est un peu plus marquée pour la grave-ciment contenant la boue que pour la grave-ciment témoin.

### - Calcium



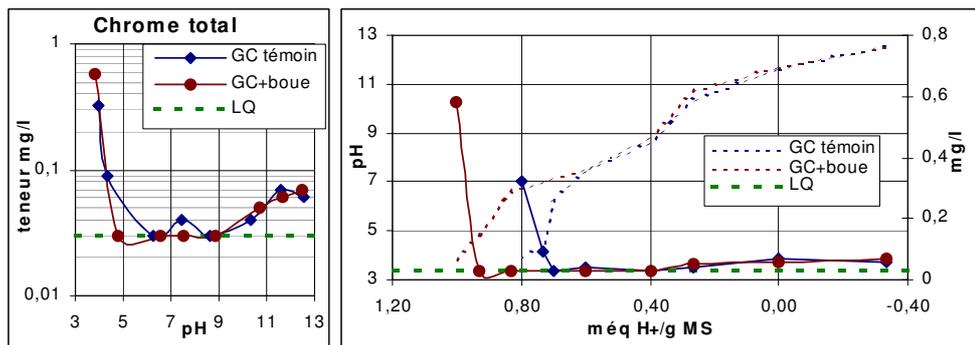
*Disponibilité du calcium - Acide nitrique*



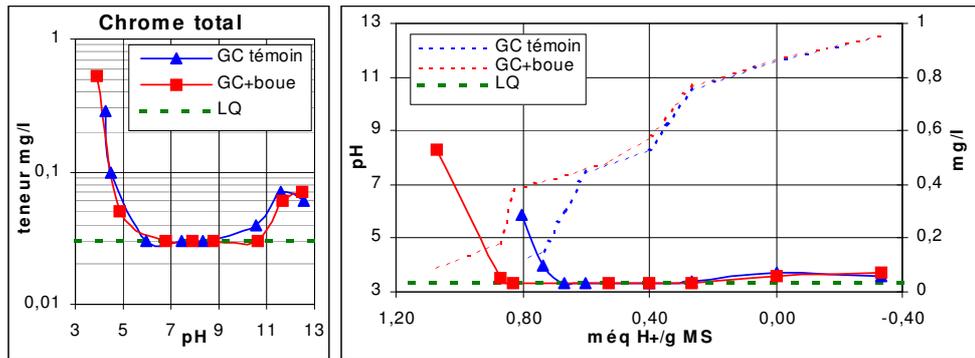
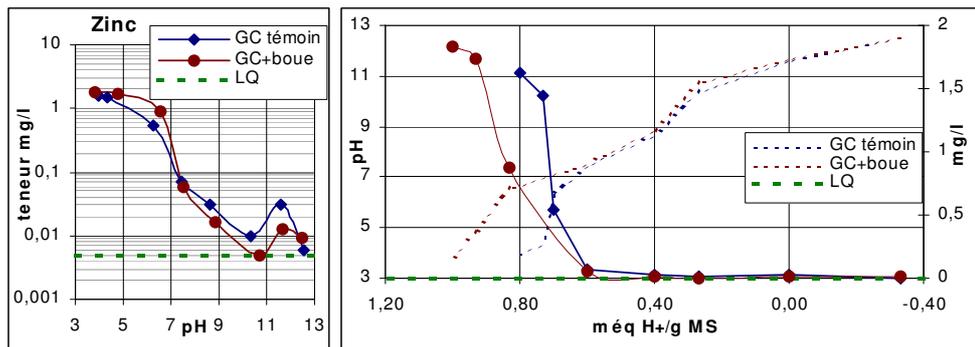
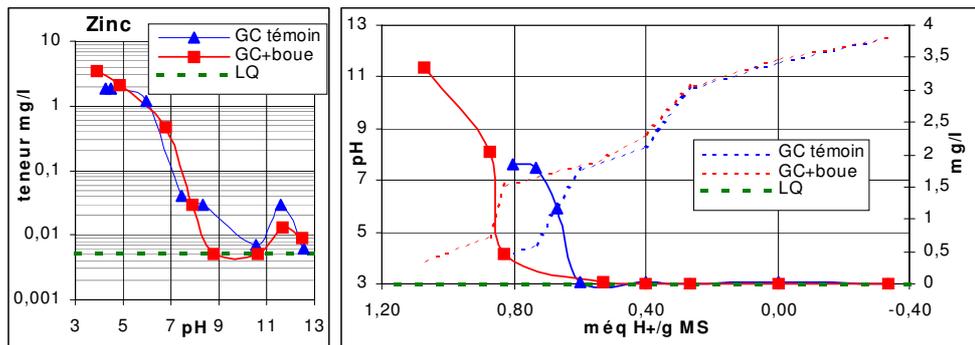
*Disponibilité du calcium - Acide sulfurique*

Le comportement observé est identique pour la grave-ciment contenant la boue et la grave-ciment témoin : la concentration en calcium décroît lorsque le pH augmente. Ceci est dû au contrôle de la teneur en calcium par la solubilité de l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

### - Chrome et zinc



*Disponibilité du chrome - Acide nitrique*

*Disponibilité du chrome - Acide sulfurique**Disponibilité du zinc - Acide nitrique**Disponibilité du zinc - Acide sulfurique*

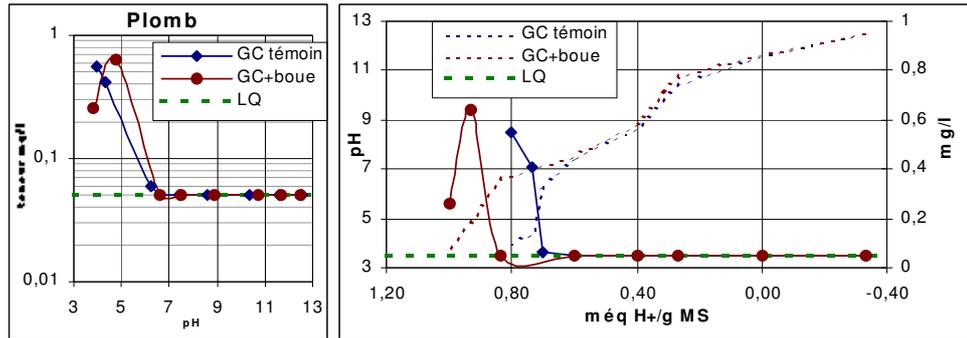
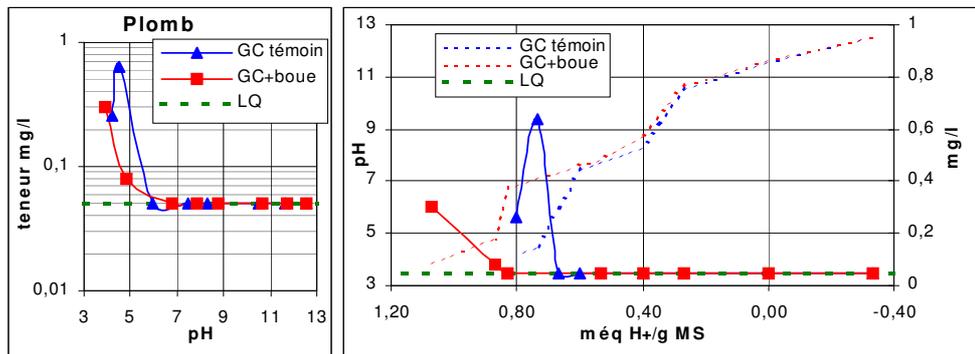
Quels que soient le pH et l'acide utilisés, les quantités de chrome hexavalent présent en solution restent inférieures à la limite de quantification d'analyse (0,05 mg/l).

Le chrome total et le zinc sont quantifiables en dehors de la zone de pH comprise entre 6 et 8 dans laquelle les métaux sont généralement présents sous forme carbonatée peu soluble.

Dans la partie acide de la courbe, on observe un faible décalage du relargage en fonction de l'ajout d'acide. Cette légère différence entre les deux matériaux correspond au décalage des courbes de neutralisation acido-basique.

On constate également que les quantités relarguées sont logiquement plus faibles à pH basique qu'à pH acide.

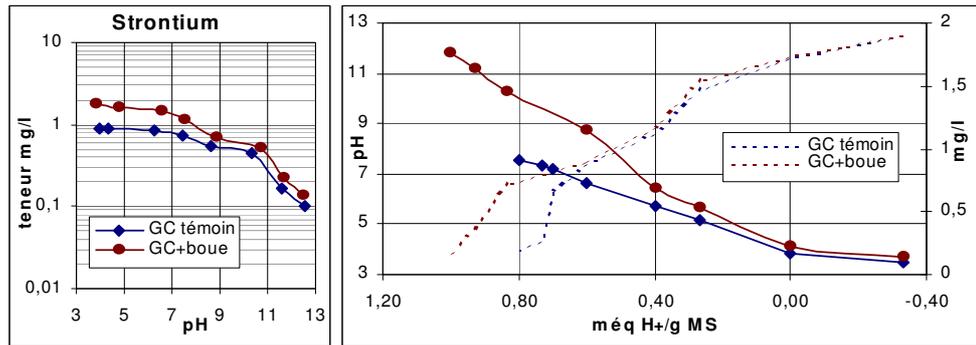
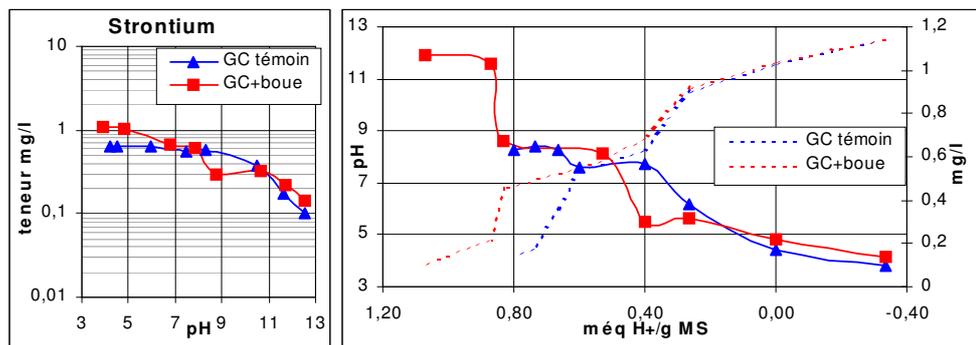
## - Plomb

*Disponibilité du plomb - Acide nitrique**Disponibilité du plomb - Acide sulfurique*

Le plomb présent en solution n'est quantifiable que dans la zone acide de la courbe.

Le comportement dans cette zone est identique à celui du chrome total et du zinc : on observe un décalage correspondant à celui des courbes de neutralisation acido-basique.

## - Strontium

*Disponibilité du strontium - Acide nitrique**Disponibilité du strontium - Acide sulfurique*

Cet élément a été analysé en raison de sa présence en quantité relativement importante dans la boue (725 mg/kg de matière sèche). Les quantités relarguées sont de l'ordre du mg/l. L'apport dû à la boue reste légèrement perceptible dans la grave-ciment, notamment à pH acide.

Globalement, les résultats du test d'influence du pH en conditions stationnaires présentent une excellente reproductibilité. On observe par ailleurs que la grave-ciment contenant la boue conduit à un relargage très légèrement plus important que la grave-ciment témoin. Néanmoins, les ordres de grandeur restent très proches et faibles.

## Conclusion

Cette partie de l'étude a permis de refaire le point sur les caractéristiques de la boue issue du traitement des eaux acides de carrière. La modification du traitement au calcaire concassé par un apport de chaux a eu pour effet de diminuer les teneurs en métaux, à l'exception du sodium, du strontium et du plomb.

Le scénario de valorisation envisagé consiste à incorporer cette boue dans une grave-ciment, en substitution partielle des éléments de granulométrie fine.

En conséquence, nous avons étudié deux matériaux, tous deux fournis par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc :

- une grave-ciment contenant en masse sèche 1,2 % de boue,
- une grave-ciment témoin.

Les essais réalisés jusqu'à présent ont pour objectif de caractériser les propriétés intrinsèques du matériau.

L'essai de détermination de la fraction maximale mobilisable a montré que la grave-ciment témoin et la grave-ciment contenant de la boue présentent des caractéristiques comparables.

Les éléments sont généralement davantage mobilisés à pH acide (pH 4) qu'à pH naturel ou pH 12, à l'exception de l'aluminium.

Les quantités relarguées sont comparables ou très légèrement plus importantes pour la grave-ciment contenant la boue que pour la grave-ciment témoin.

Le test d'influence du pH en conditions stationnaires a confirmé que la grave-ciment témoin et la grave-ciment contenant la boue présentaient des comportements similaires.

Les quantités relarguées sont également un peu plus importantes dans le cas de la grave-ciment additionnée de boue. Cette grave-ciment présente par contre une capacité de résistance aux agressions acides supérieure à celle de la grave-ciment témoin.

Dans l'ensemble, les niveaux de relargage de polluants restent très faibles.

Ces résultats seront complétés par la mise en œuvre d'essais permettant :

- de représenter les conditions réelles du scénario de valorisation,
- d'obtenir une approche de la dynamique du relargage des polluants.

Ces essais complémentaires sont :

- un essai de percolation en colonne,
- des essais de simulation en lysimètres,
- le suivi d'un chantier expérimental pendant 12 mois.

## Annexes

**Annexe 1** : Analyse de la composition chimique de la boue  
teneurs en mg/kg de matière sèche

**Annexe 2** : Formulations des graves-ciment étudiées

**Annexe 3** : Détermination de la fraction maximale mobilisable

**Annexe 4** : Influence du pH en conditions stationnaires

**Annexe 1**

Analyse de la composition chimique de la boue  
Teneurs en mg/kg de matière sèche

<b>Élément</b>	<b>Teneur dans la boue brute (mg/kg)</b>
<b>Aluminium</b>	8 270
<b>Calcium</b>	148 906
<b>Fer total</b>	7 394
<b>Magnésium</b>	2 992
<b>Sodium</b>	12 320
<b>Cadmium</b>	0,6
<b>Cobalt</b>	19
<b>Chrome total</b>	7
<b>Chrome hexavalent</b>	< 2,3
<b>Cuivre</b>	57
<b>Potassium</b>	171
<b>Manganèse</b>	134
<b>Molybdène</b>	< 0,6
<b>Nickel</b>	46
<b>Plomb</b>	36
<b>Soufre total</b>	1 320
<b>Strontium</b>	330
<b>Zinc</b>	193

**Annexe 2**

## Formulations des graves-ciment étudiées

	<b>Grave-ciment + boue</b>	<b>Grave-ciment témoin</b>
<b>Boue de Beaucé</b>	1,2 %	-
<b>Granulats 0/4 Moulin de Thouru</b>	39,0 %	40,2 %
<b>Granulats 4/10 Moulin de Thouru</b>	22,0 %	22,0 %
<b>Granulats 10/20 Moulin de Thouru</b>	34,3 %	34,3 %
<b>Ciment CPJ 42,5</b>	3,5 %	3,5 %

Source : LRPC de Saint-Brieuc

**Annexe 3**

## Détermination de la fraction maximale mobilisable

**Grave-ciment témoin  
pH 4**

Ratio	Résultats en mg/l			Résultats en mg/kg		
	10	50	100	10	50	100
pH	4,19	4,04	4,27			
Conductivité $\mu\text{S/cm}$	6660	298	110			
Aluminium	19,4	4,72	2,55	194	382,8	510,3
Plomb	0,08	0,07	0,65	0,8	3,6	36,1
Calcium	1488	24,1	2,1	14880	15844	15949
Chrome VI	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	5
Chrome total	0,03	0,03	0,03	0,3	1,5	3
Potassium	56,7	6,21	7,85	567	815,4	1207,9
Sodium	22,5	13,34	6,84	225	758,6	1100,6
Strontium	0,08	0,02	0,01	0,8	1,6	2,1
Zinc	1,32	0,23	0,38	13,2	22,4	41,4
Chlorures	23	16	12	230	870	1470
Sulfates	221	6	3	2210	2450	2600

**Grave-ciment + boue  
pH 4**

Ratio	Résultats en mg/l			Résultats en mg/kg		
	10	50	100	10	50	100
pH	4,47	4,26	3,7			
Conductivité $\mu\text{S/cm}$	7750	320	252			
Aluminium	7,85	3,59	7,97	78,5	222,1	620,6
Plomb	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	5
Calcium	1812	35,9	6,26	18120	19556	19869
Chrome VI	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	5
Chrome total	0,03	0,03	0,03	0,3	1,5	3
Potassium	49,1	5,39	18	491	706,6	1606,6
Sodium	22,7	13,8	8,34	227	779	1196
Strontium	1,6	0,04	0,01	16	17,6	18,1
Zinc	1,36	0,32	0,33	13,6	26,4	42,9
Chlorures	18	16	21	180	820	1870
Sulfates	208	6	2	2080	2320	2420

**Grave-ciment témoin  
pH naturel**

Ratio	Résultats en mg/l			Résultats en mg/kg		
	10	50	100	10	50	100
pH	11,53	11,09	10,48			
Conductivité $\mu\text{S/cm}$	1310	417	163			
Aluminium	2,3	3,1	0,8	23	147	187
Plomb	0,05	0,05	0,09	0,5	2,5	7
Calcium	135	46,2	19,3	1350	3198	4163
Chrome VI	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	5
Chrome total	0,03	0,03	0,03	0,3	1,5	3
Potassium	21	3,6	1,4	210	354	424
Sodium	15,5	12	12	155	635	1235
Strontium	0,15	0,032	0,026	1,5	2,78	4,08
Zinc	0,015	0,04	0,11	0,15	1,75	7,25
Chlorures	14	13	13	140	660	1310
Sulfates	75	25	8	750	1750	2150

**Grave-ciment + boue  
pH naturel**

Ratio	Résultats en mg/l			Résultats en mg/kg		
	10	50	100	10	50	100
pH	11,6	11,11	10,64			
Conductivité $\mu\text{S/cm}$	1377	476	190			
Aluminium	3,2	4,1	1,23	32	196	257,5
Plomb	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	5
Calcium	135	52	52	1350	3430	6030
Chrome VI	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	5
Chrome total	0,03	0,03	0,03	0,3	1,5	3
Potassium	20,9	3	1,9	209	329	424
Sodium	15,2	12,1	12,6	152	636	1266
Strontium	0,19	0,035	0,01	1,9	3,3	3,8
Zinc	0,03	0,034	0,027	0,3	1,66	3,01
Chlorures	13	13	13	130	650	1300
Sulfates	60	28	6	600	1720	2020

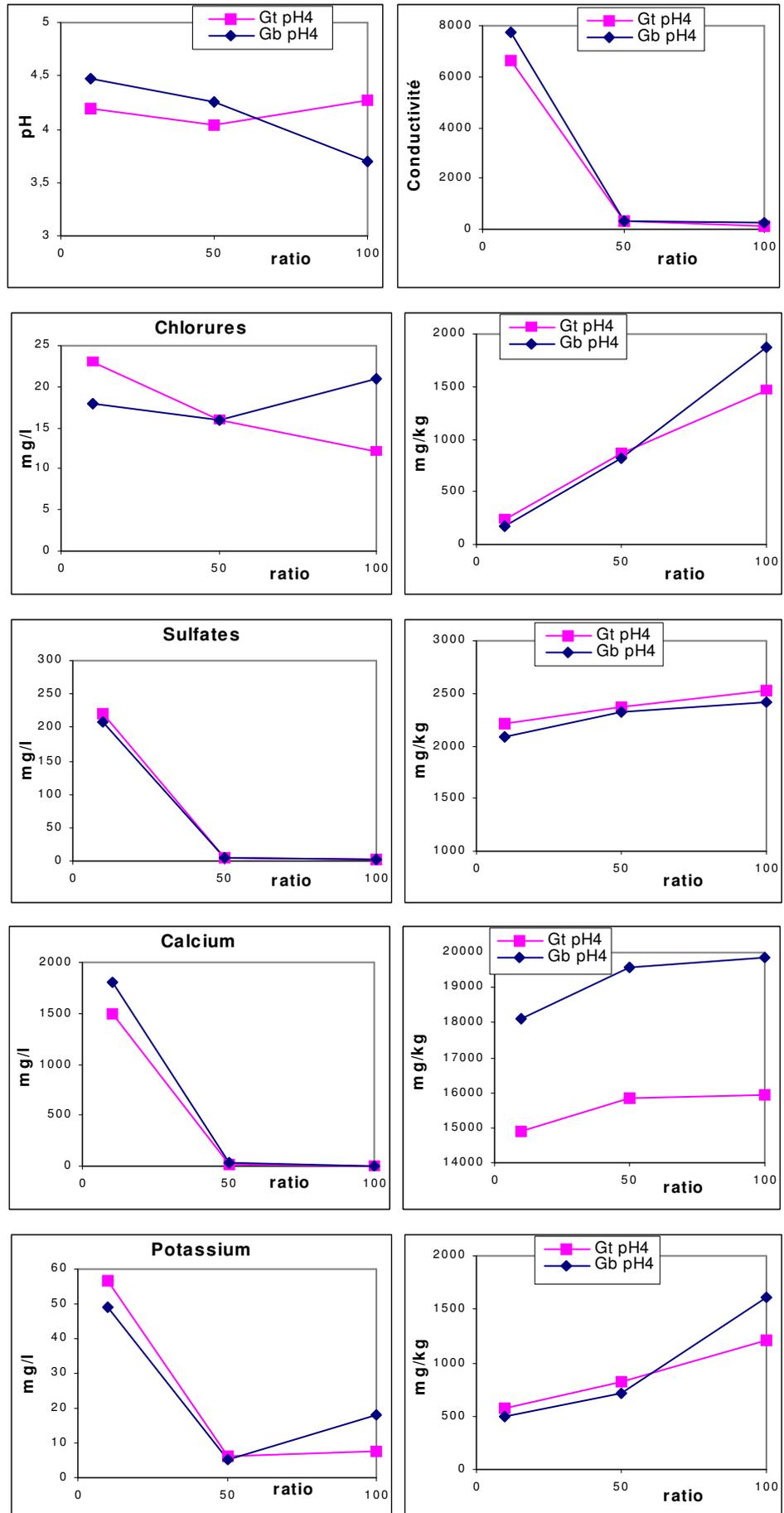
**Grave-ciment témoin**  
**pH 12**

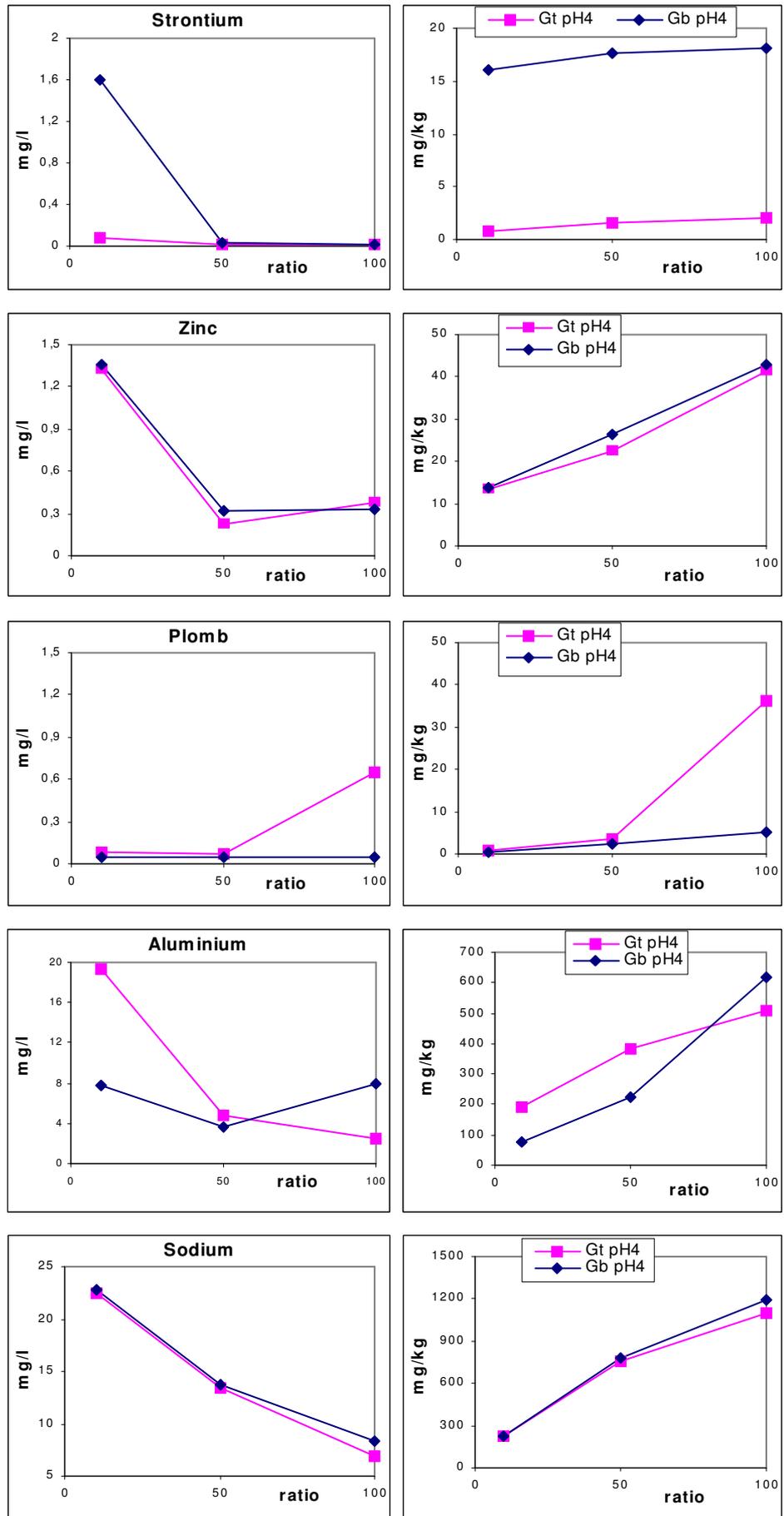
Ratio	Résultats en mg/l			Résultats en mg/kg		
	10	50	100	10	50	100
pH	12,15	12,18	12,05			
Conductivité $\mu\text{S/cm}$	4350	4720	4320			
Aluminium	14,4	11,6	3,6	144	608	788
Plomb	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	5
Calcium	5,8	1,6	2,6	58	122	252
Chrome VI	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	5
Chrome total	0,06	0,03	0,03	0,6	1,8	3,3
Potassium	22,9	4,1	2,2	229	393	503
Sodium	651	788	851,5	6510	38030	80605
Strontium	0,01	0,01	0,01	0,1	0,5	1
Zinc	0,1	0,09	0,3	1	4,6	19,6
Chlorures	13	12	12	130	610	1210
Sulfates	124	18	5	1240	1960	2210

**Grave-ciment + boue**  
**pH 12**

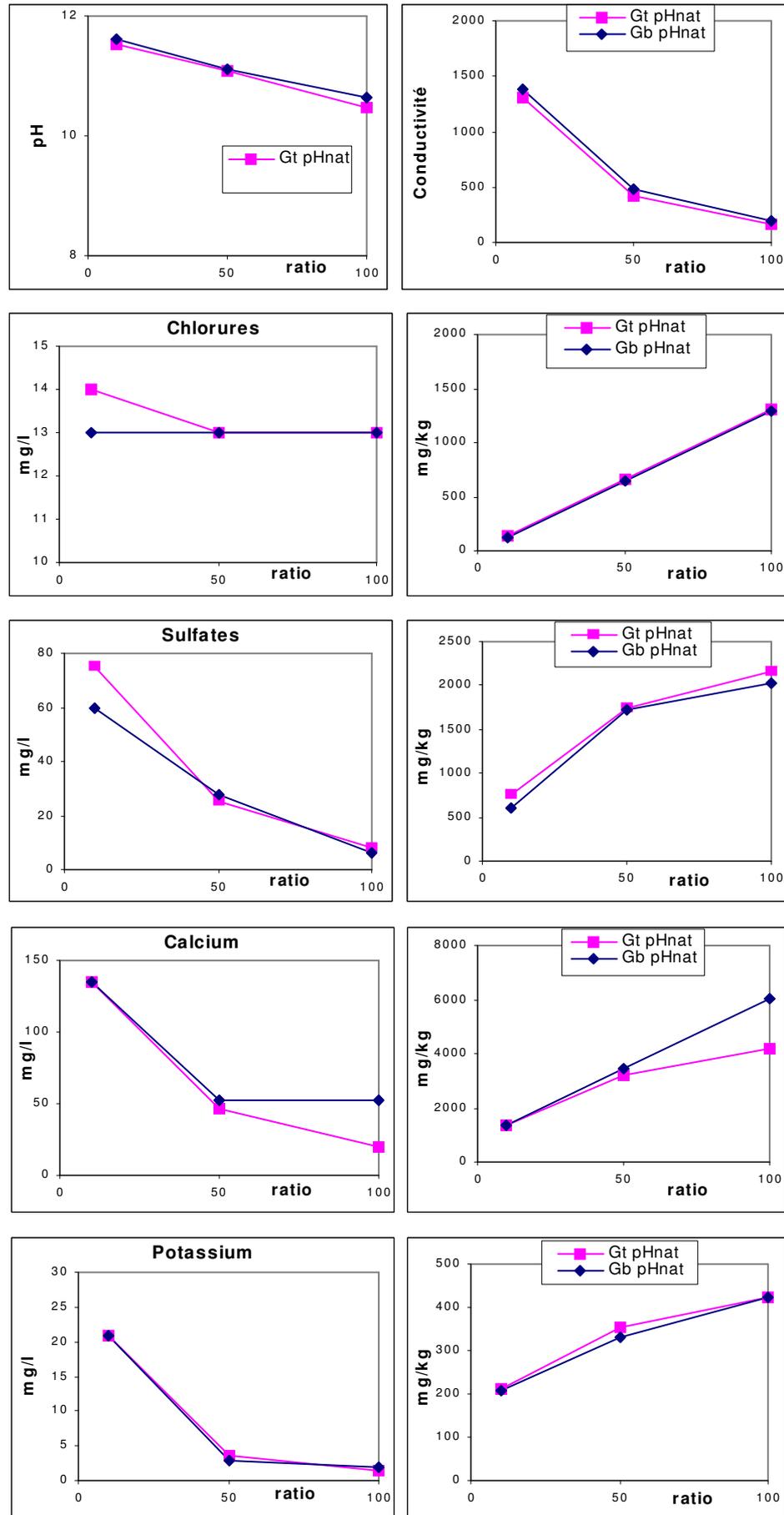
Ratio	Résultats en mg/l			Résultats en mg/kg		
	10	50	100	10	50	100
pH	12,41	12,07	11,91			
Conductivité $\mu\text{S/cm}$	8670	3270	2990			
Aluminium	22	10,1	4	220	624	824
Plomb	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	5
Calcium	2,7	2	2,9	27	107	252
Chrome VI	0,05	0,05	0,05	0,5	2,5	5
Chrome total	0,07	0,03	0,03	0,7	1,9	3,4
Potassium	25,3	4,4	2,9	253	429	574
Sodium	1198	526	499	11980	33020	57970
Strontium	0,01	0,01	0,01	0,1	0,5	1
Zinc	0,11	0,09	0,09	1,1	4,7	9,2
Chlorures	20	13	13	200	720	1370
Sulfates	125	13	4	1250	1770	1970

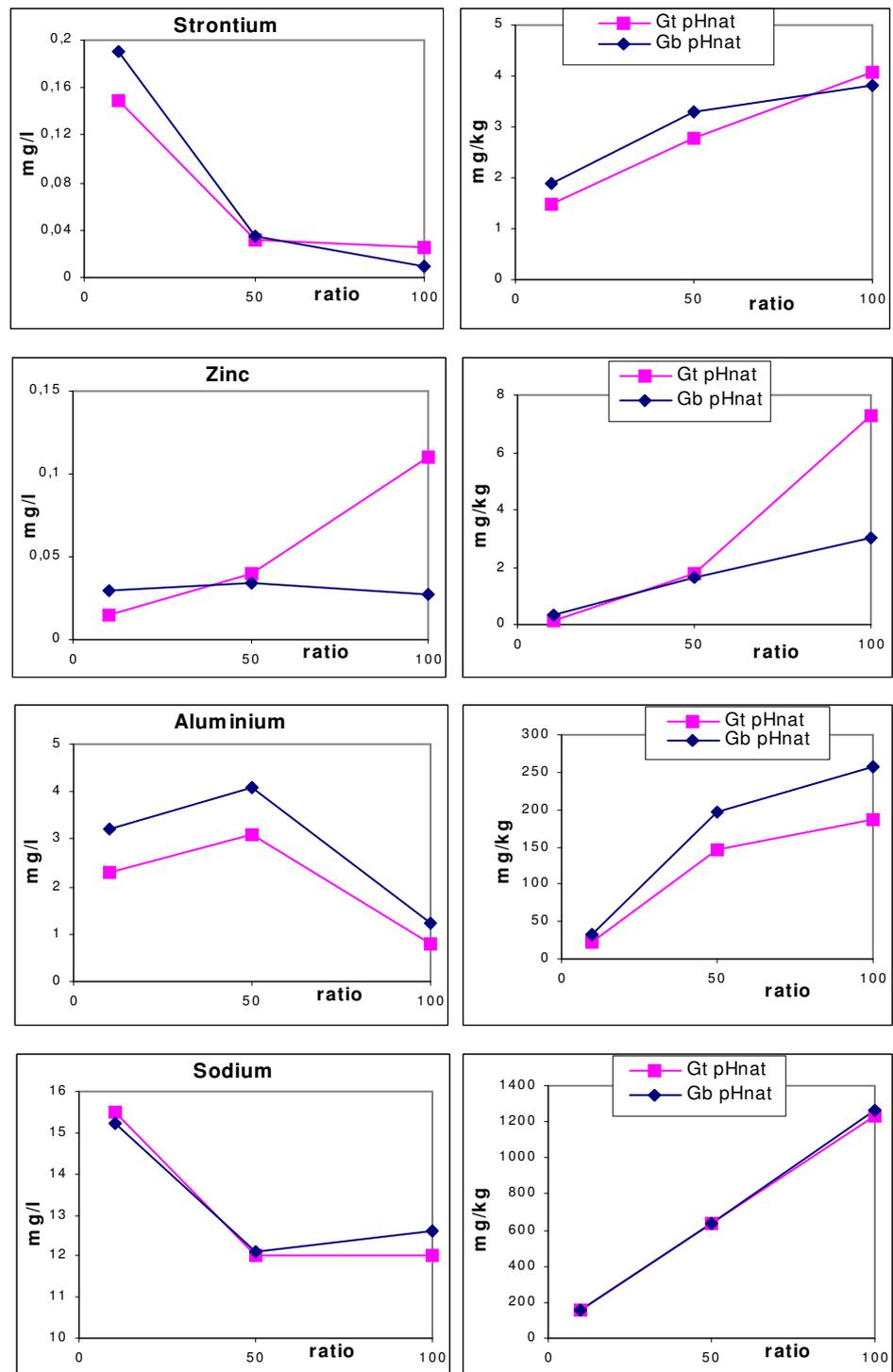
Détermination de la fraction maximale mobilisable à pH 4



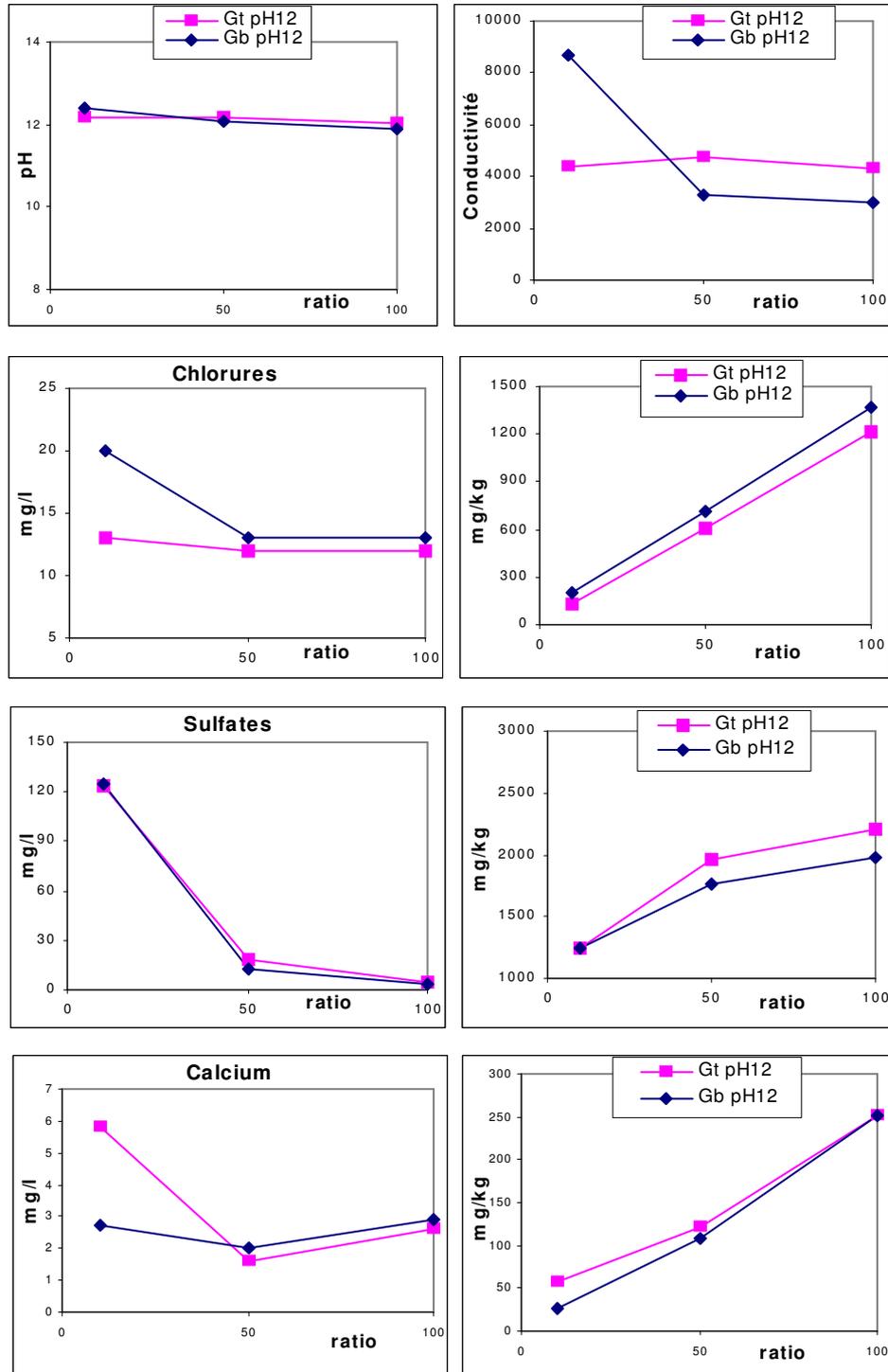


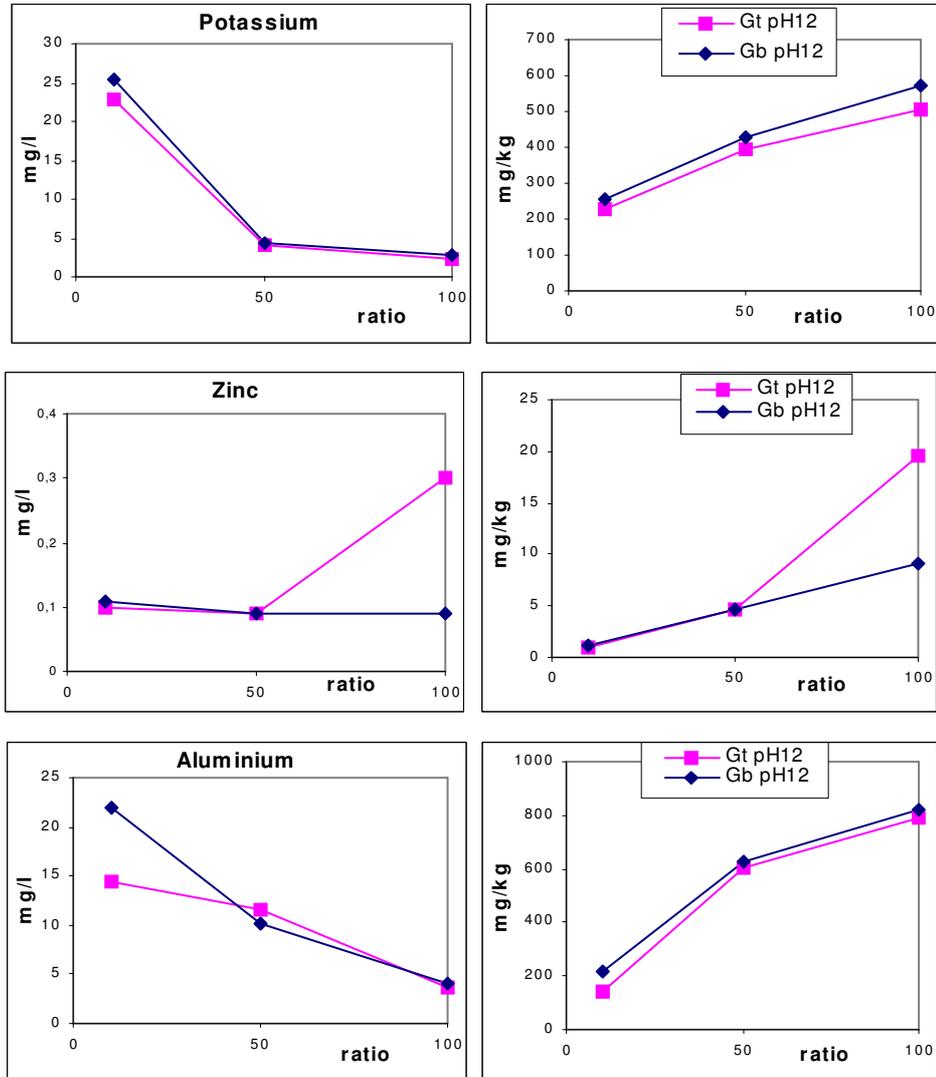
## Détermination de la fraction maximale mobilisable à pH naturel





**Détermination de la fraction maximale mobilisable à pH 12**





**Annexe 4**

## Influence du pH en conditions stationnaires

Acidification à l'acide nitrique**Grave-ciment témoin**

H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	méq /g	-0,33	0,00	0,27	0,40	0,60	0,70	0,73	0,80
pH		12,54	11,6	10,36	8,6	7,43	6,24	4,31	3,97
Conductivité	μS/cm	6850	1163	2808	3970	5640	6380	6630	7140
Sulfates par St	mg/l	65,8	146	211	227	224	249	227	247
Plomb	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,06	0,41	0,55
Calcium	mg/l	37,3	125	531	780	1263	1433	1325	1485
Chrome VI	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Chrome total	mg/l	0,06	0,07	0,04	< 0,03	0,04	< 0,03	0,09	0,32
Strontium	mg/l	0,1	0,17	0,44	0,55	0,73	0,84	0,87	0,91
Zinc	mg/l	0,006	0,03	0,01	0,03	0,07	0,54	1,45	1,63

**Grave-ciment + boue**

H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	méq /g	-0,33	0,00	0,27	0,40	0,60	0,83	0,93	1,00
pH		12,51	11,68	10,72	8,86	7,51	6,57	4,8	3,79
Conductivité	μS/cm	6980	1322	2751	3900	5800	7470	8140	8580
Sulfates par St	mg/l	53,4	74	156	224	239	231	249	226
Plomb	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,64	0,26
Calcium	mg/l	54,4	162	605	905	1358	1775,00	1980	1880,00
Chrome VI	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Chrome total	mg/l	0,07	0,06	0,05	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,58
Strontium	mg/l	0,14	0,22	0,53	0,69	1,14	1,46	1,63	1,76
Zinc	mg/l	0,009	0,01	< 0,005	0,02	0,06	0,87	1,73	1,84

Acidification à l'acide sulfurique**Grave-ciment témoin**

H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	méq /g	-0,33	0,00	0,27	0,40	0,60	0,67	0,73	0,80
pH		12,54	11,6	10,53	8,3	7,45	5,96	4,51	4,24
Conductivité	μS/cm	6850	1163	2009	2750	2185	2158	2272	2375
Plomb	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,64	0,26
Calcium	mg/l	37,3	125	560	835	588	590	580	560
Chrome VI	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Chrome total	mg/l	0,06	0,07	0,04	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,1	0,29
Strontium	mg/l	0,1	0,17	0,38	0,57	0,55	0,63	0,65	0,63
Zinc	mg/l	0,006	0,03	0,007	0,03	0,04	1,18	1,79	1,84

**Grave-ciment + boue**

H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	méq /g	-0,33	0,00	0,27	0,40	0,53	0,83	0,87	1,07
pH		12,51	11,68	10,62	8,76	7,86	6,79	4,82	3,9
Conductivité	μS/cm	6980	1322	1968	2660	2206	2189	2221	2560
Plomb	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,08	0,3
Calcium	mg/l	54,4	162	530	808	643	625	585	580
Chrome VI	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Chrome total	mg/l	0,07	0,06	0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,05	0,53
Strontium	mg/l	0,14	0,22	0,32	0,3	0,62	0,67	1,03	1,07
Zinc	mg/l	0,009	0,01	< 0,005	< 0,005	0,03	0,46	2,05	3,36

**Caractérisation du comportement à la lixiviation des  
boues résiduaire de l'alcalinisation  
des eaux acides de carrières  
en scénario spécifié**

Étude réalisée à la demande de  
Charte Granulats – Comité Régional Bretagne

**Rapport final**

Document réalisé par :  
Gwénaëlle Bröns-Laot  
Jacques Méhu



**INSAVALOR**  
Division  
**POLDEN**  
Pollution, Déchets, Environnement

**Décembre 2002**

Bâtiment CEI - BP 2132 - 66, boulevard Niels Bohr - 69603 Villeurbanne Cedex  
**Tél : + 33 (0)4.72.43.83.86 - Fax : + 33 (0)4.72.43.98.66 - E.mail : [polden@insa-lyon.fr](mailto:polden@insa-lyon.fr)**

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Méthodologie d'étude et présentation des essais</b> .....	<b>5</b>
1.1 Méthodologie.....	5
1.2 Présentation des essais à l'échelle du laboratoire.....	5
1.2.1 Essai de détermination de la Fraction Maximale Mobilisable (FMM).....	6
1.2.2 Essai d'influence du pH.....	6
1.2.3 Essai de percolation en colonne.....	6
1.3 Présentation des essais en lysimètres.....	7
1.3.1 Simulation de la phase chantier.....	7
1.3.2 Simulation du comportement de la grave-ciment contenant la boue.....	9
1.4 Présentation de la route pilote.....	11
<b>2 Synthèse des résultats expérimentaux</b> .....	<b>11</b>
2.1 Rappels sur les caractéristiques de la boue.....	11
2.1.1 Teneur en eau.....	12
2.1.2 Composition chimique.....	12
2.2 Résultats des essais à l'équilibre.....	12
2.2.1 Essai de détermination de la fraction maximale mobilisable.....	13
2.2.2 Essai d'influence du pH.....	16
2.3 Synthèse des essais dynamiques.....	19
2.3.1 Essai de percolation en colonne.....	19
2.3.2 Essais en lysimètre et essai pilote.....	22
<b>3 Modélisation et prédiction du comportement en scénario</b> .....	<b>28</b>
3.1 Description du modèle utilisé au niveau européen.....	28
3.2 Résultats de modélisation.....	29
3.2.1 Ratio L/S correspondant à 100 ans d'exposition.....	29
3.2.2 Modélisation obtenue à partir des résultats de percolation en colonne.....	30
3.2.3 Modélisation obtenue à partir des résultats des différents essais dynamiques.....	32
<b>Conclusion</b> .....	<b>34</b>
<b>Annexe 1 Formulations des deux graves-ciment (GC et GCT)</b> .....	<b>35</b>
<b>Annexe 2 Présentation synthétique de l'essai de détermination de la fraction maximale mobilisable (FMM)</b> .....	<b>37</b>
<b>Annexe 3 Résultats expérimentaux des essais de détermination de la fraction maximale mobilisable (FMM)</b> .....	<b>40</b>
<b>Annexe 4 Résultats expérimentaux des essais de détermination de l'influence du pH sur la solubilisation des éléments (CNA)</b> .....	<b>47</b>

<b>Annexe 5 Résultats expérimentaux des essais de percolation en colonne.....</b>	<b>50</b>
<b>Annexe 6 Résultats expérimentaux des essais en lysimètres simulant la phase chantier .....</b>	<b>55</b>
<b>Annexe 7 Résultats expérimentaux de l'essai en lysimètres simulant le comportement de la grave-ciment en place.....</b>	<b>58</b>
<b>Annexe 8 Résultats expérimentaux des routes expérimentales .....</b>	<b>60</b>

## Introduction

Dans le cadre d'un projet conduit par la Charte Granulats – Comité Régional Bretagne visant à définir des filières de valorisation pertinentes pour les boues résiduelles de l'alcalinisation des eaux acides de carrières, POLDEN a été chargé de déterminer le comportement à la lixiviation de ces déchets dans un scénario de valorisation spécifié.

Une première étude menée en 1997, a permis de sélectionner un scénario de valorisation qui consiste à incorporer la boue dans une grave-ciment, matériau traditionnellement utilisé en sous-couche routière. La boue est ainsi utilisée en substitution partielle des granulats les plus fins (fraction granulométrique comprise entre 0 et 4 mm).

Cette présente étude, démarrée en juin 1999, a pour objectif de déterminer le comportement à la lixiviation de la grave-ciment contenant de la boue, utilisée en sous-couche routière.

L'approche adoptée est inspirée de celle définie dans la norme expérimentale XP ENV 12920 de juin 1998, intitulée "Caractérisation des déchets - Méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet / matériau dans des conditions spécifiées".

Elle comprend plusieurs étapes dont :

- la caractérisation des matériaux,
- la mise en œuvre d'essais dits paramétriques visant à évaluer l'effet spécifique des facteurs prépondérants du scénario sur le relargage des polluants,
- la mise en œuvre de tests dynamiques visant à caractériser les dynamiques de relargage,
- la proposition d'un modèle comportemental sur la base des résultats expérimentaux à l'échelle du laboratoire,
- des essais de simulation à l'échelle pilote (dits multi-paramétriques) pour valider le modèle comportemental.

Dans le rapport d'avancement fourni en janvier 2000 était présentée l'étude de caractérisation de la boue ainsi que les premiers résultats de caractérisation de la grave-ciment à l'échelle du laboratoire.

L'objet de ce rapport final est de présenter les résultats obtenus aux différentes échelles, de les synthétiser et de proposer un modèle de comportement de la grave-ciment en scénario sous-couche routière.

# 1 Méthodologie d'étude et présentation des essais

## 1.1 Méthodologie

L'approche adoptée est inspirée de celle définie dans la norme expérimentale XP ENV 12920 de juin 1998, intitulée "Caractérisation des déchets - Méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet / matériau dans des conditions spécifiées".

Le programme expérimental proposé pour l'application au cas des graves-ciment contenant des boues résiduelles de l'alcalinisation des eaux acides de carrières, est le suivant :

- caractérisation de la boue en termes d'humidité et de composition chimique,
- caractérisation des graves-ciment à l'échelle laboratoire : détermination de la fraction maximale mobilisable, étude de l'influence du pH et essais de percolation en colonne.
- essais de simulation en lysimètre : simulation de la phase chantier (suivi sur 2 semaines) et simulation du comportement de la grave-ciment en lysimètre (suivi sur 6 mois)
- suivi du chantier de route expérimental (suivi sur 12 mois)

L'étude a été menée sur des éprouvettes de graves-ciment fournies par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Saint-Brieuc.

La grave-ciment notée GC contient de la boue dont les caractéristiques sont rappelées ci-après. La boue est incorporée en substitution partielle de la partie fine du sable (fraction granulométrique inférieure à 4 mm) à hauteur de 3 % en masse sèche, soit 1,2 % de la grave-ciment totale.

La grave-ciment témoin notée GCT possède la même formulation, mais sans incorporation de boue. Les formulations de ces deux graves-ciment sont indiquées en annexe.

## 1.2 Présentation des essais à l'échelle du laboratoire

Le programme expérimental à l'échelle laboratoire mené en parallèle sur ces deux matériaux est constitué des essais suivants :

- détermination de la fraction maximale mobilisable (FMM)
- détermination de la capacité de neutralisation acide et de l'influence du pH sur la solubilisation des polluants (ANC)
- essai de percolation en colonne ascendante.

Ces essais sont ceux retenus par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD) pour l'orientation des Résidus de Procédés Thermiques (RPT) vers les scénarios d'utilisation en Travaux Publics.

### 1.2.1 Essai de détermination de la Fraction Maximale Mobilisable (FMM)

Cet essai permet, au moyen de lixiviations successives, d'estimer la quantité de polluants maximale extractible dans différents contextes de pH.

Trois lixiviations successives sont réalisées à ratio massique liquide/solide croissant, dans trois contextes de pH distincts (pH acide imposé, pH "naturel" du matériau en contact avec de l'eau déminéralisée, pH basique imposé).

Les principes de cet essai sont présentés de façon plus détaillée en annexe 2.

Pour cet essai le matériau subit une réduction granulométrique à 1 mm.

### 1.2.2 Essai d'influence du pH

Le test de sensibilité au pH est un test réalisé en conditions stationnaires. Il fait l'objet d'une prénorme européenne prEN 14429 : "Influence of pH on leaching with initial acid/base addition".

Il consiste à mettre en contact, à un ratio Liquide/Solide fixe ( $L/S = 10 \text{ ml/g}$ ) le matériau finement broyé ( $< 1 \text{ mm}$ ) avec des solutions contenant différentes quantités d'acide ou de base, de façon à couvrir une large gamme de pH allant de 4 à 12.

Les quantités d'acide ou de base à ajouter sont préalablement déterminées à l'aide d'une titration.

Les objectifs de ce test sont doubles :

- la mesure de la capacité acido-basique du matériau qui nous permet d'évaluer sa faculté de résistance à une agression acide ou basique externe,
- les courbes de concentration des polluants relargués en fonction du pH et en fonction des quantités d'acide et de base ajoutées.

### 1.2.3 Essai de percolation en colonne

Le protocole utilisé dans le cadre de cette étude pour l'essai de percolation ascendant est le protocole provisoire pour application dans le cadre du guide technique du ministère de l'environnement et du programme RPT. Cet essai fait par ailleurs l'objet d'une prénorme européenne pr EN 14405 et est considéré au niveau européen comme l'essai de référence pour la caractérisation du comportement des déchets en stockage (notamment dans le cadre de la Directive Décharge en cours de transcription).

La colonne de diamètre 10 cm est remplie de matériau humide jusqu'à une hauteur de 30 cm et selon un protocole bien défini de compactage par couches successives.

Elle est ensuite saturée en eau (du bas vers le haut).

Les conditions stationnaires doivent être atteintes avant démarrage du test. Pour accélérer la mise en équilibre, un système de recirculation est utilisé, en faisant circuler un volume d'eau correspondant à un  $L/S = 0,1$  ml/g de matériau sec en circuit fermé durant trois jours.

Cette fraction de  $L/S = 0,1$  devient le premier éluat, les trois suivants étant collectés en dynamique et le dernier est de nouveau recirculé pour atteindre l'équilibre final.

Le tableau 1 liste les différents éluats, les volumes et ratios  $L/S$  correspondants.

Numéro de fraction	Volume de la fraction (= $L/S * \text{masse sèche}$ )	Rapport $L/S$ cumulé (l/kg)
Équilibre initial (recirculation)	$(0,1 \pm 0,02) * m_0$	$0,1 \pm 0,02$
Dynamique 1	$(0,9 \pm 0,1) * m_0$	$1 \pm 0,12$
Dynamique 2	$(1 \pm 0,1) * m_0$	$2 \pm 0,22$
Dynamique 3	$(8 \pm 0,1) * m_0$	$10 \pm 0,32$
Équilibre initial (recirculation)	$(0,1 \pm 0,02) * m_0$	$10,1 \pm 0,34$

**Tableau 1** : Collecte des fractions d'éluats

Cet essai a été effectué sur la grave-ciment contenant la boue et la grave-ciment témoin. Les éléments suivants ont été analysés :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Ca, K, Cr tot, CrVI, Zn, Pb, As, Cd, Se et Ba conformément à l'instruction technique relative aux installations de stockage de déchets inertes.

### 1.3 Présentation des essais en lysimètres

#### 1.3.1 Simulation de la phase chantier

L'objectif est ici de reproduire les conditions d'exposition à la pluie des graves-ciment durant la phase chantier, c'est-à-dire dans les quinze jours qui suivent leur mise en œuvre (phase de stabilisation avant recouvrement).

La grave-ciment contenant la boue et la grave-ciment témoin sont testées dans les mêmes conditions de façon à comparer leurs comportements. Elles sont placées dans des lysimètres à l'intérieur du laboratoire (à température ambiante) et arrosées manuellement quotidiennement. Les eaux de percolation et de ruissellement sont collectées et analysées.

Deux lysimètres de 52 cm de large et 71 cm de long sont placés dans le laboratoire. Deux orifices sont percés pour permettre la collecte des éluats.

Des granulats 10/20 sont dans un premier temps déposés au fond des lysimètres de façon uniforme pour permettre le drainage des eaux de percolation (sur une hauteur d'environ 5 cm). Cette couche drainante est ensuite recouverte de bidim (cf. photo 1).



**Photo 1** : Simulation de la phase chantier :  
Installation de la couche drainante recouverte de bidim

Le matériau formulé (180 kg pour les deux graves-ciment) est alors déposé sur le bidim, la hauteur correspondante étant de 20 cm. (cf photo 2)



**Photo 2** : Simulation de la phase chantier :  
Installation de la grave-ciment

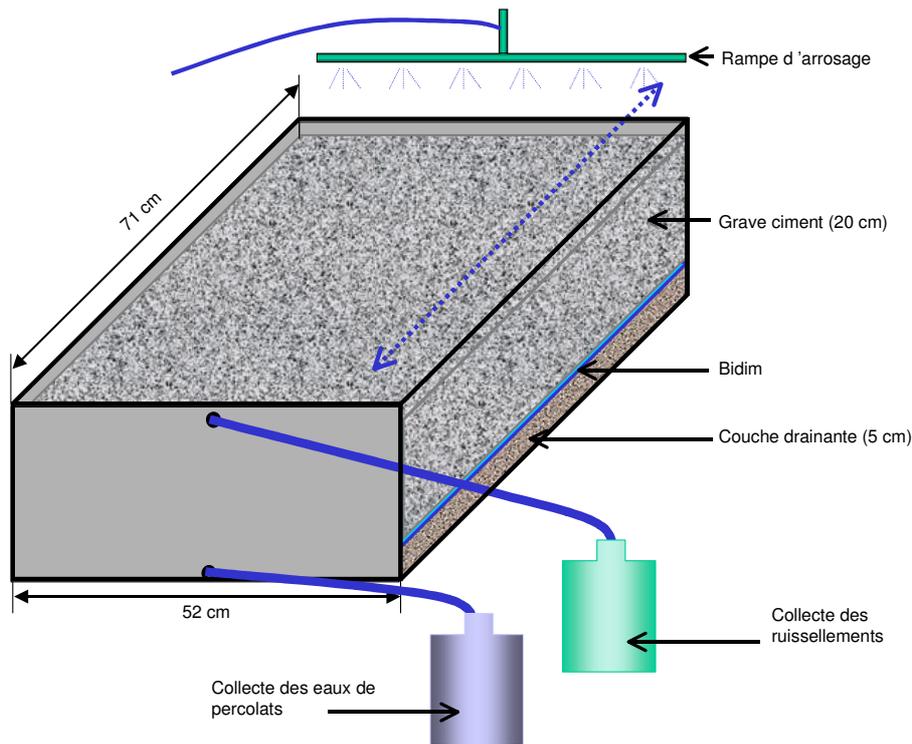


**Photo 3** : Simulation de la phase chantier :  
Niveau haut de la grave-ciment

Pour permettre aux eaux de ruissellement de s'écouler facilement (et éviter ainsi que l'eau de ruissellement stagne et donc percole), le niveau haut de la grave-ciment est placé au milieu de l'évacuation avec une légère pente (cf photo 3).

Dès le lendemain de la mise en place, un arrosage est appliqué (puis tous les jours ouvrés durant deux semaines) à l'aide d'un asperseur de la largeur du lysimètre. L'ajout d'eau est donc manuel et s'effectue en versant le volume souhaité en balayant tout le matériau plusieurs fois (cf schéma 1).

Pour chacune des deux graves-ciment, le volume versé est de 6 litres le premier jour puis 4 litres quotidiennement pendant 2 semaines.



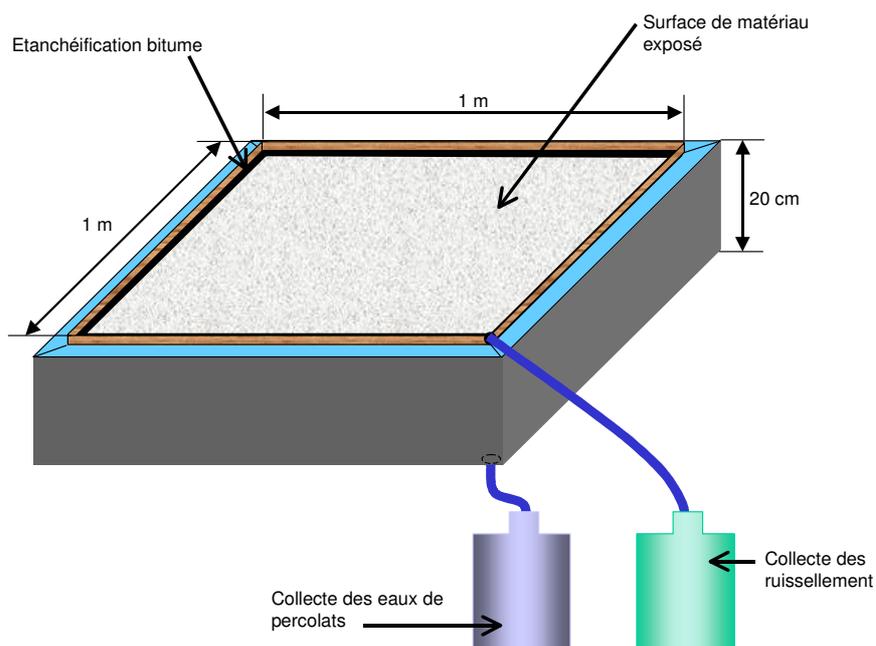
**Schéma 1** : Simulation de la phase chantier

### 1.3.2 Simulation du comportement de la grave-ciment contenant la boue

L'objectif est ici de reproduire les conditions d'exposition de la grave-ciment contenant la boue en scénario routier. L'échantillon reçu est un tronçon de la route expérimentale réalisée à Saint Brice en Coglès (35). Cet échantillon a été reçu à Polden ceinturé d'un cadre métallique.

Cet échantillon (non recouvert d'enrobé) est disposé dans un lysimètre placé à l'extérieur du laboratoire, exposé aux intempéries (surface exposée de 1 m<sup>2</sup>). Les percolats et les eaux de ruissellement sont collectés et analysés.

Les extrémités de l'échantillon reçu sont recouvertes de façon à délimiter la surface exposée qui est alors de 1 m sur 1 m (cf schéma 2). L'étanchéité entre le matériau et cette couverture est assurée par du bitume.



**Schéma 2 :** Simulation du comportement de la grave-ciment en place



**Photos 4 et 5 :** Simulation du comportement de la grave-ciment en place

Une légère pente est appliquée pour faciliter la collecte des eaux de ruissellement et le drainage des percolats est assuré par du géocomposite drainant.



**Photo 6** : Simulation de la grave-ciment en place :  
étanchéité bitume

## 1.4 Présentation de la route pilote

L'objectif est ici de suivre pendant un an le comportement des deux graves-ciment (une contenant la boue et l'autre témoin) en conditions réelles, c'est-à-dire en scénario routier.

Le chantier choisi pour la réalisation du pilote est la déviation Saint Etienne en Coglès / Saint Brice en Coglès (35), au niveau de la V.C. n°12 où le trafic est estimé à de 50 à 100 véhicules par jour.

Le pilote est constitué d'une planche d'essai de grave-ciment contenant la boue de 100 m<sup>2</sup> de surface exposée aux intempéries, et d'une planche témoin contenant la grave-ciment témoin de même superficie. L'épaisseur de grave-ciment compactée dans les deux cas est 20 cm, elle est recouverte de 4 cm d'enrobés. La collecte des éluats se fait dans des cuves séparées enterrées de 3 m<sup>3</sup> pour le pilote et le témoin.

## 2 Synthèse des résultats expérimentaux

### 2.1 Rappels sur les caractéristiques de la boue

Cette première partie du document vise à rappeler les résultats des mesures effectuées en 1999 sur un échantillon de boue brute provenant du même site et du même gisement que l'échantillon incorporé dans la formulation de la grave-ciment, mais échantillonné à une date différente.

### 2.1.1 Teneur en eau

La boue présente un taux de matière sèche (masse sèche / masse totale) de 45,5 % et une teneur en eau de 119,8 % (masse eau / masse sèche), valeur comparable à celle généralement observée pour la vase (environ 120 %).

### 2.1.2 Composition chimique

La boue séchée a été analysée après mise en solution des éléments par minéralisation acide. Les résultats sont présentés ci-après en mg/kg de matière sèche.

<b>Elément</b>	<b>Composition (en mg/kg de MS)</b>
Aluminium	18 176
Calcium	327 266
Fer	16 251
Magnésium	6 575
Sodium	27 076
Cadmium	1,3
Cobalt	43
Chrome total	15
Chrome VI	<5
Cuivre	125
Potassium	375
Manganèse	295
Molybdène	<3
Nickel	100
Plomb	79
Soufre	2 900
Strontium	725
Zinc	425

**Tableau 2 :** Analyse de la composition chimique de la boue  
(en mg/kg de matière sèche)

Le chrome hexavalent n'est pas détectable, et le strontium et le zinc sont présents en quantités non négligeables.

## 2.2 Résultats des essais à l'équilibre

### 2.2.1 Essai de détermination de la fraction maximale mobilisable

Les données complètes sont récapitulées sous formes de tableaux en annexe de ce rapport.

Parmi les éléments analysés, le chrome et le plomb n'ont jamais été détectés quels que soient le matériau et le contexte chimique imposé et le zinc n'a été détecté que dans le premier éluat de l'essai à pH acide imposé de la grave-ciment témoin à une concentration de 1,13 mg/l.

En ce qui concerne le strontium, sa présence a été détectée uniquement dans les premiers éluats de l'essai à pH acide imposé sur les deux matériaux et le premier éluat de l'essai à pH naturel de la grave-ciment témoin. Le strontium semble être plus facilement mobilisable dans le cas de la grave-ciment témoin.

Une synthèse des résultats est proposée ci-après pour quelques éléments sur la base de deux représentations :

- la comparaison des concentrations de chaque éluat en l'élément considéré en mg/l en fonction du ratio Liquide / Solide cumulé,
- les quantités cumulées extraites en mg/kg de matière sèche en fonction de ce même ratio L/S cumulé.

#### Calcium :

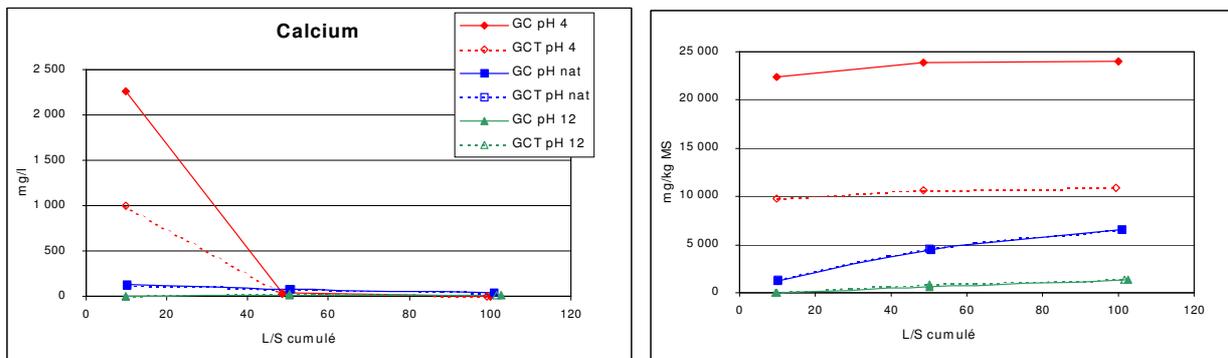


Figure 1 : Détermination de la fraction maximale mobilisable du Calcium

Le comportement du calcium se caractérise par une forte concentration dans le premier éluat de l'essai à pH acide imposé. On note que cette première concentration est deux fois plus élevée dans le cas de la grave-ciment contenant la boue : environ 2,3g/l pour GC contre 1 g/l dans le cas du témoin GCT.

Les deux éluats suivants à pH 4 sont nettement moins chargés en calcium mais les concentrations issues de la GC sont également sensiblement plus élevées que pour la grave-ciment témoin.

Il en résulte donc les quantités cumulées extraites à L/S 100 :

- 24 g/kg pour la GC contenant la boue,
- 11 g/kg environ pour la GCT témoin.

L'apport de la boue en calcium ne permet pas à lui seul d'expliquer cette différence car cet apport représente environ 4 g de calcium par kg de grave-ciment sèche.

Il faut également noter que cette différence entre les deux graves-ciment n'est pas décelable dans les deux essais à pH naturel et pH basique imposé, où dans les deux cas, la concentration du calcium en solution est limitée par la solubilité de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

### Chlorures :

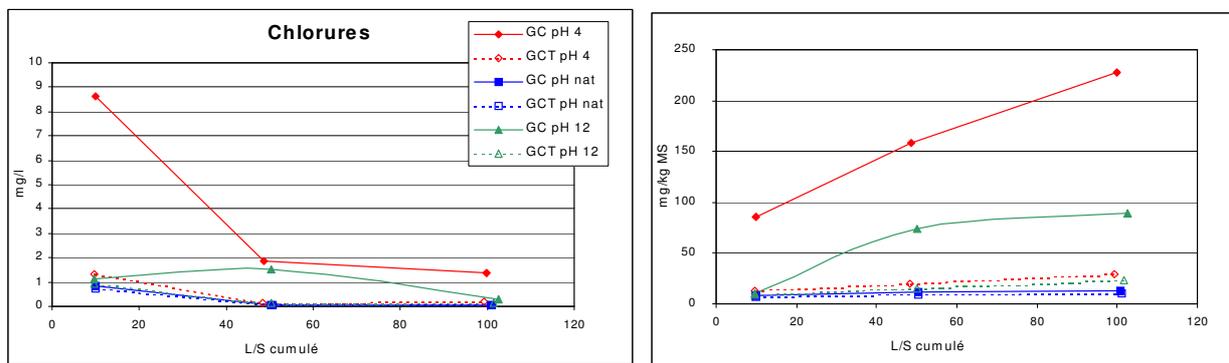


Figure 4 : Détermination de la fraction maximale mobilisable des Chlorures

D'une manière générale, les concentrations en chlorures sont très faibles (de l'ordre du mg/l), seul le premier éluat du pH 4 qui atteint plus de 8 mg/l se démarque par rapport aux autres.

La grave-ciment contenant la boue présente systématiquement un relargage plus important, atteignant environ 230 mg/kg de MS contre 30 mg/kg de MS pour la grave-ciment témoin.

### Sulfates :

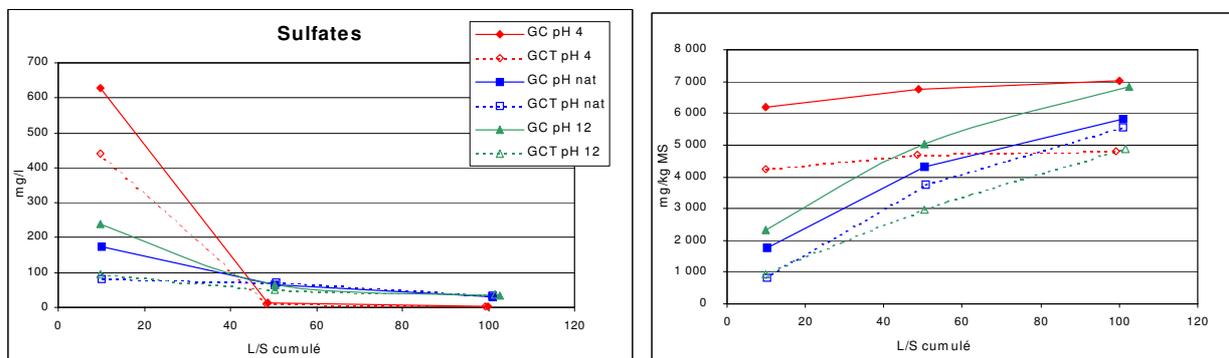


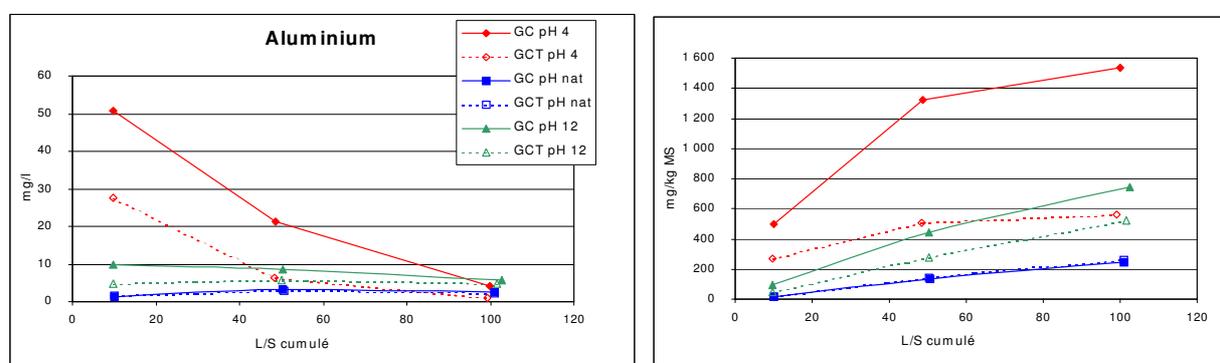
Figure 5 : Détermination de la fraction maximale mobilisable des Sulfates

Le profil des concentrations en sulfates est légèrement différent pour l'essai à pH acide imposé par rapport aux deux autres essais (pH naturel et pH basique imposé) : les concentrations sont plus importantes dans le premier éluat mais l'asymptote est rapidement atteinte, contrairement aux autres concentrations.

A pH acide, les sulfates sont disponibles et leur relargage n'est pas limité par des équilibres de solubilité. En revanche, à pH naturel (aux environs de 11) et à pH basique, les concentrations en sulfates sont limitées par la solubilité de phases telles que l'ettringite par exemple.

En ce qui concerne la comparaison des deux matériaux, un relargage systématiquement plus important est observé pour la grave-ciment qui contient la boue.

### Aluminium :



**Figure 6 :** Détermination de la fraction maximale mobilisable de l'Aluminium

L'aluminium semble réagir de la même façon que les sulfates. Il faut noter qu'à pH naturel, les concentrations en aluminium sont identiques pour les deux matériaux.

Aucune atténuation visible du relargage n'est observée pour les essais à pH naturel et pH basique, contrairement à l'essai à pH 4 où une asymptote semble atteinte.

A pH acide, tout l'aluminium mobilisable est rapidement extrait, il atteint environ 1540 mg/kg de MS pour GC et 560 mg/kg de MS pour GCT.

### Conclusion :

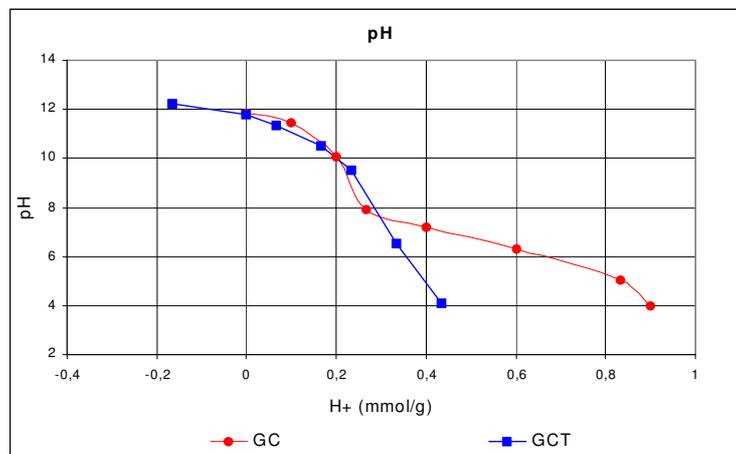
**D'une façon générale, la grave-ciment contenant la boue et la grave-ciment témoin ont des comportements similaires.** Les éléments Chrome et Zinc n'ont pas été détectés. Pour tous les éléments détectés, les quantités relarguées sont plus importantes à pH 4 qu'à pH naturel et pH 12 (ces deux derniers étant très proches) tout en restant globalement faibles.

A l'exception du zinc et du strontium, tous les autres éléments détectés sont extraits en quantités faibles, supérieures dans le cas de la grave-ciment contenant la boue (GC) par rapport à la grave-ciment témoin (GCT).

### 2.2.2 Essai d'influence du pH

Cet essai permet d'étudier l'influence du pH à travers la capacité de neutralisation acide et la solubilisation des éléments en fonction du pH.

#### Capacité de neutralisation acide :



**Figure 8 :** Capacité de neutralisation acide de GC et GCT

Le pH naturel est le pH résultant de la mise en contact d'un échantillon pour essai avec une solution d'eau déminéralisée (sans ajout d'acide ni de base). Les pH naturels de la grave-ciment contenant la boue et de la grave-ciment témoin sont comparables : 11,84 et 11,77 respectivement.

Les deux graves-ciment ont des comportements similaires en région basique : un plateau à environ pH 12 caractéristique de la présence de chaux et une évolution du pH avec l'ajout d'acide caractéristique des matériaux à base de ciment.

Pour les pH acides, les comportements des matériaux se distinguent :

- pour la grave-ciment témoin, l'évolution du pH avec l'ajout d'acide est linéaire et environ 0,4 mmol d'acide par gramme de MS sont suffisantes pour atteindre le pH 4,
- pour la grave-ciment contenant de la boue, un plateau caractéristique de la présence de carbonates apparaît à pH 6-8, et environ 0,9 mmol d'acide par gramme de MS sont nécessaires pour atteindre le pH 4.

La grave-ciment contenant la boue présente donc une capacité de résistance aux agressions acides plus importante que la grave-ciment témoin.

### Étude de la solubilisation des polluants :

Les éléments analysés sont les suivants : Pb, Zn, Cl<sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Pour les deux matériaux, les concentrations en chlorures sont faibles et comparables. Aucune influence significative du pH sur le relargage des chlorures n'est décelée.

Pour chacun des autres éléments, une synthèse des résultats est proposée ci-après sur la base de deux représentations :

- les évolutions des concentrations en mg/l en échelle logarithmique en fonction du pH,
- les concentrations en mg/l en fonction de la quantité d'acide ajouté confrontées au pH correspondants.

Les données complètes sont récapitulées sous formes de tableaux en annexe de ce rapport.

### Sulfates :

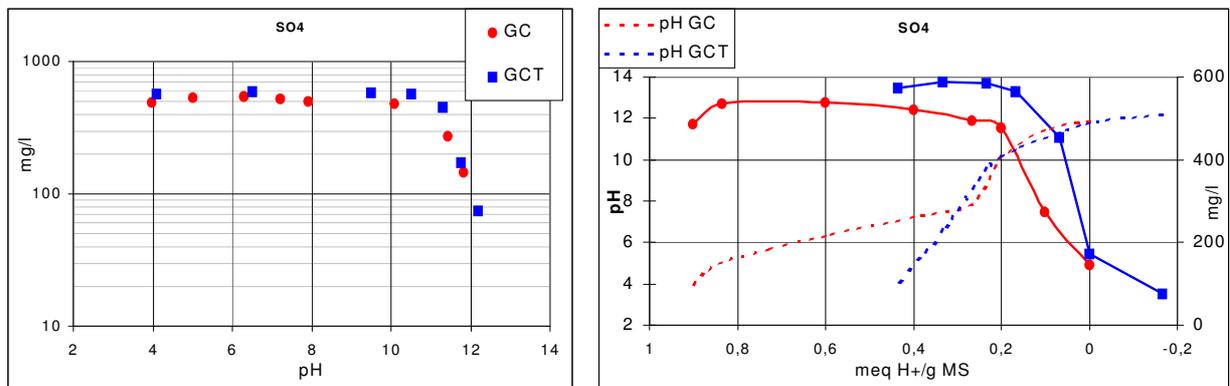


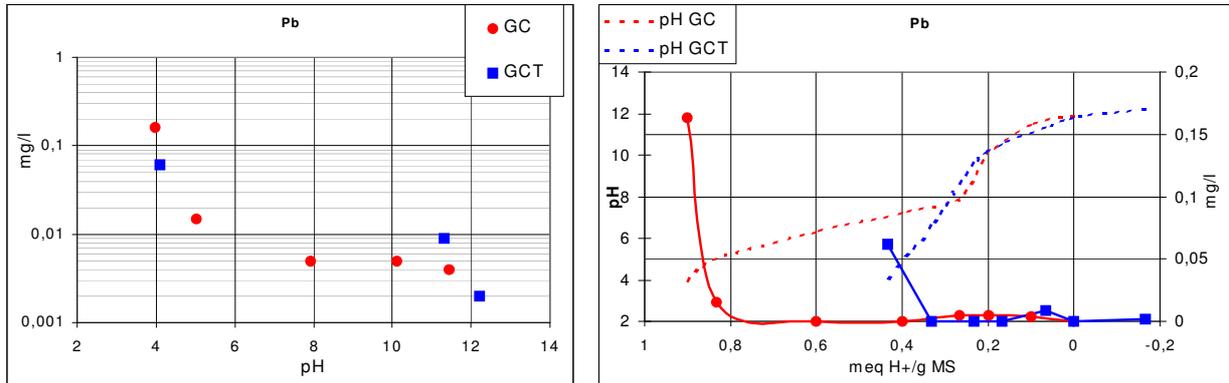
Figure 9 : Étude de la solubilisation des sulfates en fonction du pH

L'évolution des concentrations en sulfates en fonction du pH est la même pour les deux matériaux, comme nous le montre le graphique de gauche.

Au pH naturel, les concentrations en sulfates sont contrôlées par la solubilité d'une phase (telle que l'ettringite) qui se dissout avec l'ajout d'acide jusqu'à l'atteinte d'un palier qui correspond au maximum disponible.

Le décalage observé entre les deux courbes est dû à la différence de capacité acido-basique mentionnée page précédente.

Plomb :



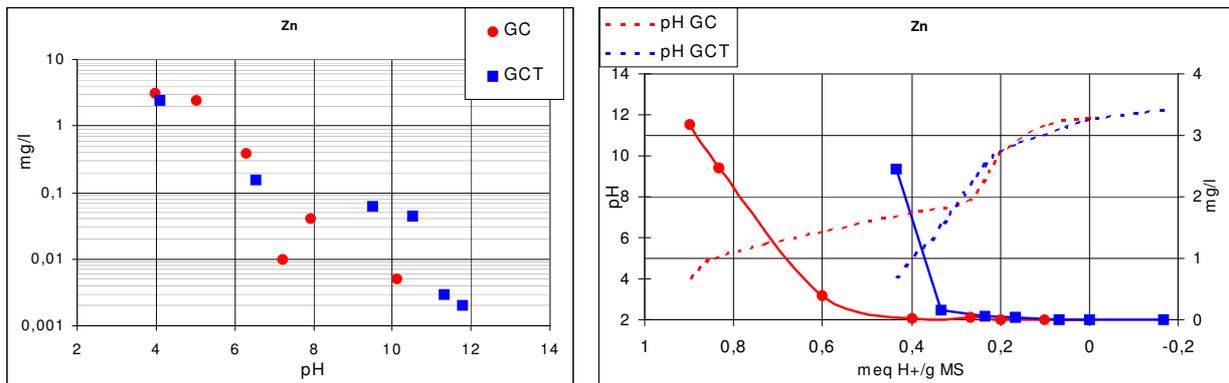
**Figure 11 :** Étude de la solubilisation du plomb en fonction du pH

Excepté à pH très acide, les concentrations en plomb sont très faibles, à la limite du seuil de détection. Néanmoins, les profils obtenus montrent une solubilisation du plomb très dépendante du pH et similaire pour les deux matériaux (graphique de gauche).

Le graphique de droite nous montre les évolutions des concentrations en fonction de l'acide ajouté, ce qui nous permet d'appréhender la solubilisation en fonction des niveaux d'agression chimique.

En effet, le cas du plomb illustre bien les deux types de représentations dans le sens où l'évolution des concentrations en fonction du pH est la même quel que soit le matériau, alors que l'évolution des concentrations en fonction du niveau d'agression chimique est différente. On remarque que pour une agression correspondant à 0,4 meq d'acide par gramme de MS, la grave-ciment témoin relargue environ 0,05 mg/l, alors que la grave-ciment contenant de la boue relargue 0,005 mg/l soit 10 fois moins, grâce à sa plus grande capacité à neutraliser l'acide.

Zinc :



**Figure 12 :** Étude de la solubilisation du zinc en fonction du pH

Comme pour le plomb, l'évolution des concentrations en zinc est dépendante du pH avec un minimum de solubilisation au pH naturel.

Et de la même façon, une agression chimique correspondant à 0,4 meq H<sup>+</sup>/g de MS conduit à un relargage d'environ 2 mg/l dans le cas de la grave-ciment témoin et 0,5 mg/l dans le cas de la grave-ciment contenant la boue.

### **Conclusion :**

**Les concentrations maximales observées sont issues de la grave-ciment contenant la boue qui par contre, grâce à sa plus grande capacité de résistance aux agressions acides, génère les plus faibles relargages pour un niveau d'agression donné.**

## **2.3 Synthèse des essais dynamiques**

### **2.3.1 Essai de percolation en colonne**

L'essai de percolation en colonne tel que défini dans la norme prEN 14405 est celui préconisé dans le projet de dispositions relatives aux installations de stockage de déchets inertes du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable ainsi que dans l'annexe II de la Directive Décharge. Les résultats en concentrations et en fractions relarguées sont directement comparables aux seuils fixés rappelés en annexe de ce rapport. Ces valeurs limites applicables aux déchets admissibles dans les décharges pour déchets inertes correspondent à un relargage cumulé maximal exprimé en mg/kg (relargage cumulé à l'issue de l'essai de percolation pour un ratio Liquide / Solide de 10 l/kg) et une concentration maximale exprimée en mg/l (premier éluat de l'essai de percolation, avec un ratio L/S de 0,1 l/kg).

Les données complètes sont récapitulées sous forme de tableaux en annexe 5 de ce rapport.

### **pH des éluats :**

Les pH des éluats des deux matériaux sont comparables et compris entre 10,5 et 12,5. D'une manière générale, le pH diminue au cours du test jusqu'à l'équilibre final où le pH est plus élevé d'environ 1/2 unité par rapport au dernier éluat dynamique.

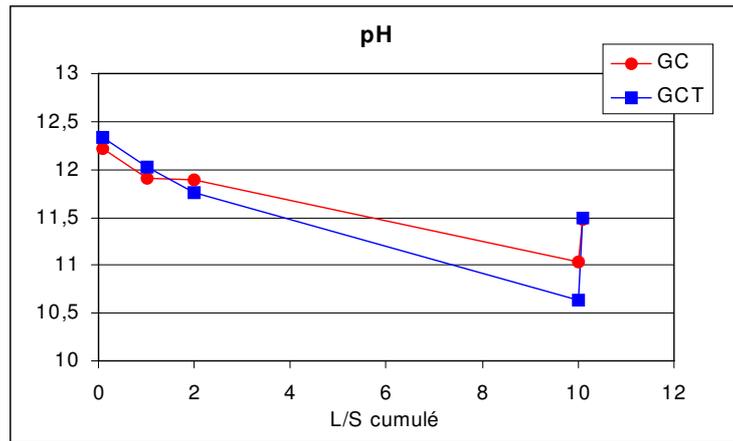


Figure 13 : Essais de percolation : pH des éluats

Parmi les éléments analysés, l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome total (Cr tot), le chrome hexavalent (CrVI), le plomb (Pb) et le zinc (Zn) n'ont été détectés dans aucun des éluats.

En ce qui concerne le calcium, le potassium et les chlorures, les concentrations dans les percolats sont faibles et du même ordre de grandeur pour les deux graves-ciment. Une atténuation du relargage est nette pour le potassium et les chlorures mais non visible pour le calcium dont le relargage cumulé à l'issue de l'essai est très inférieur à la fraction maximale mobilisable déterminée précédemment.

Pour les autres éléments détectés, une comparaison des deux matériaux est proposée ci-dessous sur la base de deux types de représentations des résultats :

- les concentrations de chaque éluat (en mg/l) en fonction du ratio L/S cumulé correspondant,
- les quantités relarguées cumulées (en mg/kg) en fonction du ratio L/S cumulé.

#### Sulfates :

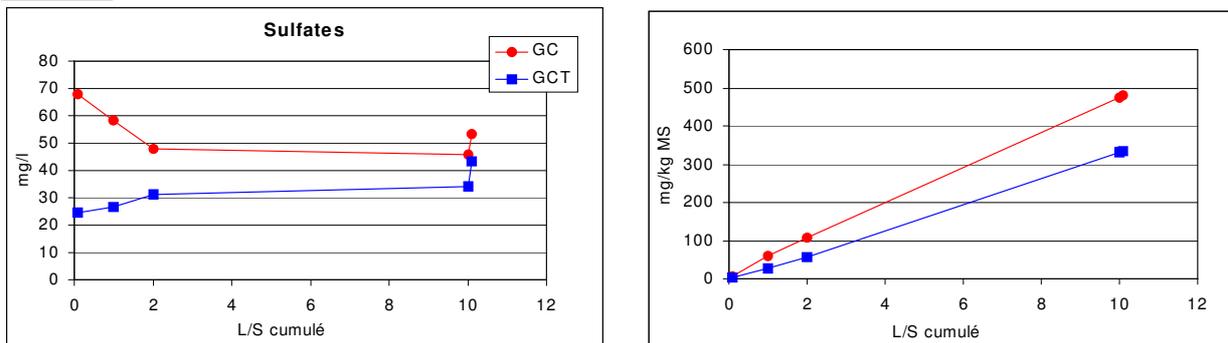


Figure 16 : Essais de percolation : cas des sulfates

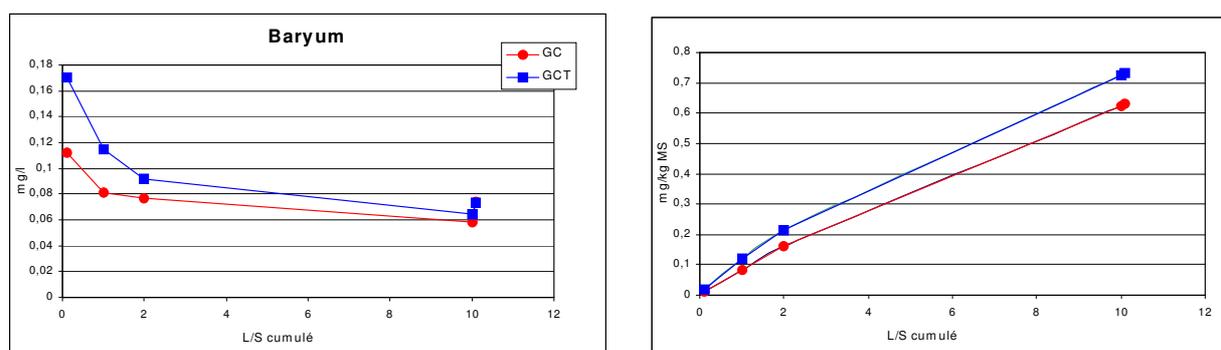
En ce qui concerne les sulfates, les comportements sont différents pour les deux graves-ciment :

- dans le cas de la grave-ciment contenant la boue, les concentrations en sulfates sont plus élevées en début de test et diminuent au cours de l'essai
- dans le cas de la grave-ciment témoin, les concentrations sont plus faibles (en accord avec les résultats de l'essai de détermination de la FMM) mais augmentent au cours de l'essai.

Quelque soit le matériau, aucune atténuation du relargage n'est décelable sur la représentation des quantités cumulées relarguées mais les quantités relarguées sont très faibles en comparaison avec les fractions maximales mobilisables déterminées auparavant.

Pour les deux matériaux, les concentrations dans les premiers percolats et les relargages cumulés à l'issue de l'essai sont inférieurs aux valeurs limites fixées par l'annexe II de la Directive Décharge pour les déchets inertes.

### Baryum :



**Figure 17 :** Essais de percolation : cas du baryum

D'une manière générale, les concentrations en baryum issues de la grave-ciment témoin sont légèrement supérieures à celles issues de la grave-ciment contenant la boue. Les profils sont néanmoins similaires, et on observe une diminution des concentrations au cours de l'essai mais sans réelle atténuation du relargage. Les concentrations et relargages sont nettement inférieurs aux seuils fixés par la Directive Décharge pour l'admission des déchets inertes en centre de stockage.

### Sélénium :

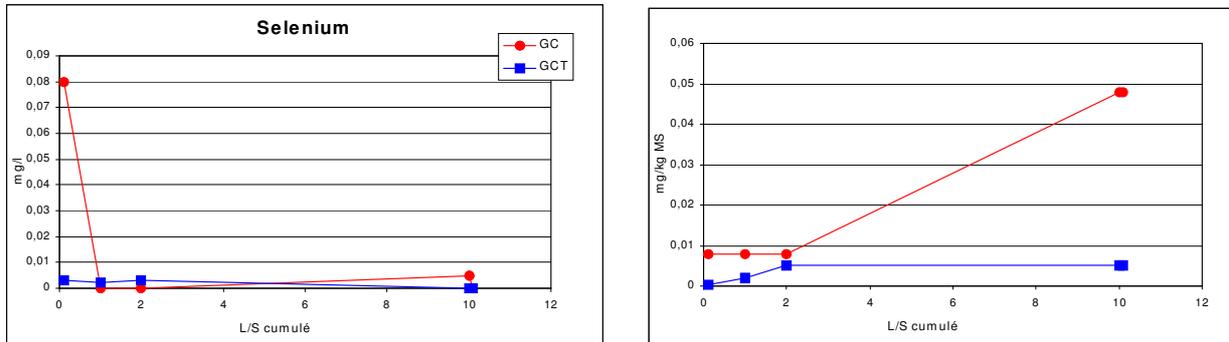


Figure 18 : Essais de percolation : cas du sélénium

Les concentrations en sélénium issues de la grave-ciment témoin sont très faibles et à la limite du seuil de détection (seuls les trois premiers éluats présentent des concentrations détectables).

En ce qui concerne la grave-ciment contenant la boue, le premier éluat présente une concentration relativement élevée, puis le sélénium n'est détecté que dans le quatrième éluat, à une concentration relativement faible mais suffisante pour augmenter considérablement la quantité cumulée relarguée.

Il faut noter que la concentration observée dans le premier éluat est deux fois plus élevée que le seuil fixé par l'annexe II de la Directive Décharge qui est de 0,04 mg/l.

### Conclusion :

Excepté pour les sulfates où les comportements divergent, les autres éléments présentent des concentrations et dynamiques de relargage très similaires.

**Les quantités cumulées relarguées à la fin de l'essai sont relativement faibles et seul le premier percolat issu de la grave-ciment contenant la boue ne respecte pas le seuil fixé pour le sélénium permettant de vérifier le caractère inerte du matériau vis-à-vis du stockage.**

### 2.3.2 Essais en lysimètre et essai pilote

Les données complètes sont récapitulées sous forme de tableaux en annexes 6, 7 et 8 de ce rapport.

Dans ce paragraphe, nous proposons une synthèse des résultats expérimentaux obtenus à l'issue :

- des essais en lysimètres pour simuler la phase chantier pour GC et GCT,
- de l'essai en lysimètre pour simuler le comportement de GC en place,
- des routes expérimentales comportant GC et GCT.

### Bilans hydriques :

La figure 19 présente les pourcentages de volumes recueillis par rapport à la pluviométrie pour les trois essais. Les courbes en pointillées représentent les résultats des essais sur la grave-ciment témoin (inexistante dans le cas du lysimètre simulant le comportement de la grave-ciment en place).

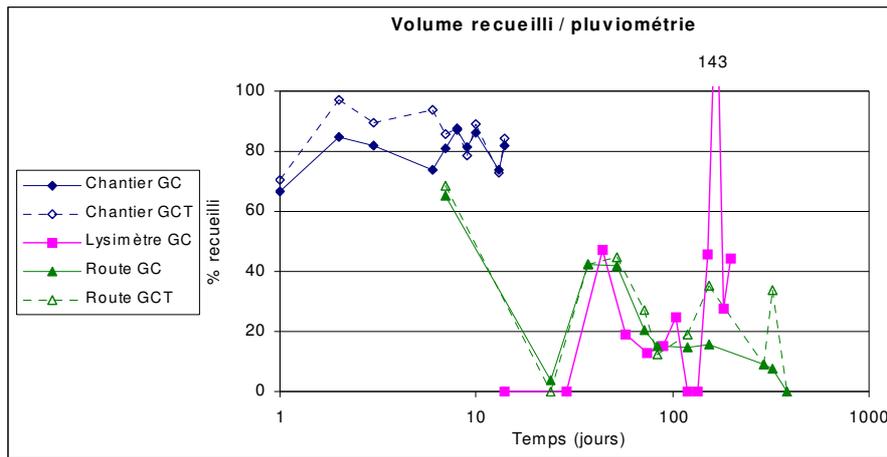
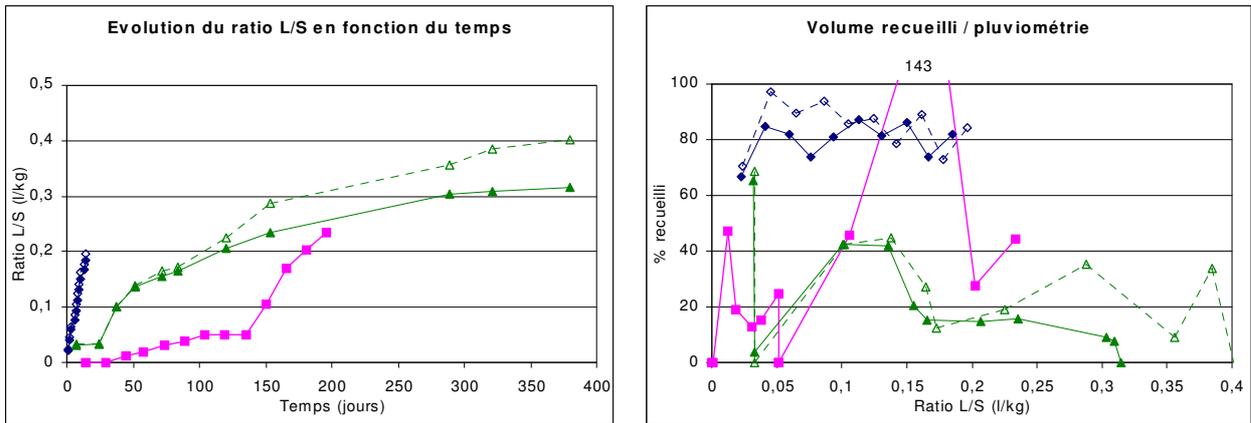


Figure 19 : Synthèse essais pilotes : volumes recueillis par rapport à la pluviométrie

L'ordre de grandeur des deux essais soumis aux intempéries "naturelles" (lysimètre GC et routes) est le même. Nous rappelons que l'arrosage des lysimètres simulant la phase chantier a été effectué manuellement à raison de quatre litres par jour (versés en une seule fois) ce qui explique le fort taux de récupération.

Cette figure nous permet également de faire l'hypothèse de la plus grande perméabilité de la grave-ciment témoin par rapport à la grave-ciment contenant la boue, les volumes recueillis étant supérieurs.

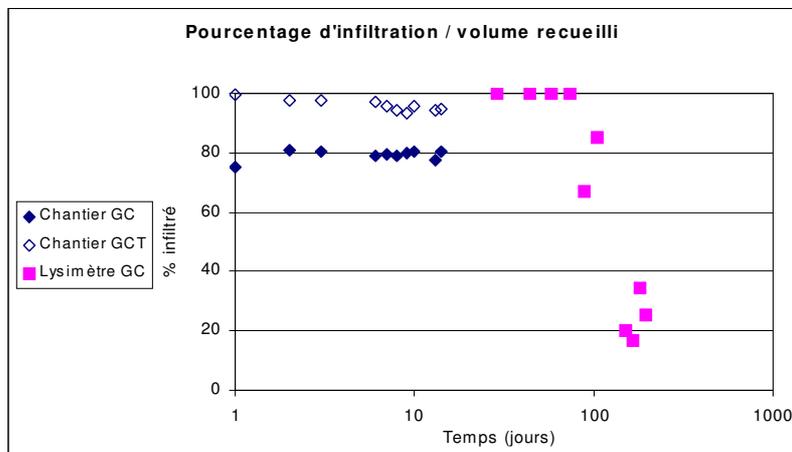
La figure 20 présente les mêmes résultats exprimés en fonction du ratio Liquide / Solide cumulé, c'est-à-dire en fonction du ratio "volume de liquide recueilli" sur "masse estimée de solide en contact avec l'eau".



**Figure 20** : Synthèse essais pilotes : pourcentage de volume recueilli en fonction du ratio L/S

Les volumes recueillis étant différents pour la route témoin et la route pilote, les ratios cumulés atteints en fin de suivi sont différents : 0,3 et 0,4 l/kg.

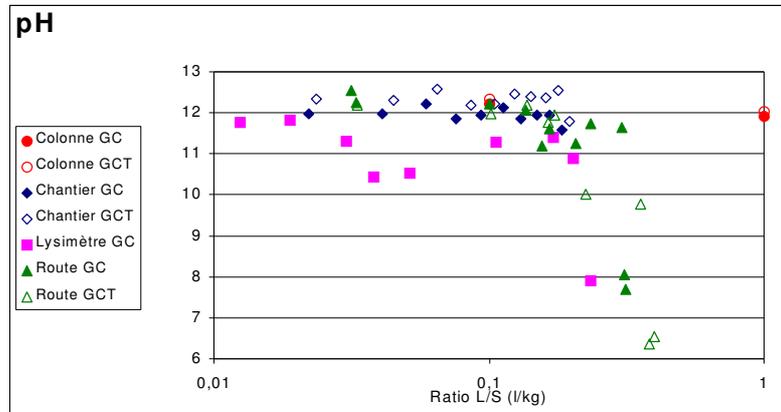
Pour les essais en lysimètres (simulation de la phase chantier et comportement de la grave-ciment en place), les percolats et les eaux de ruissellement sont collectés séparément. Il est donc possible de représenter le pourcentage d'infiltration par rapport au volume total recueilli à chaque prélèvement (figure 21).



**Figure 21** : Synthèse essais pilotes : pourcentage d'infiltration par rapport au volume recueilli

On confirme donc le caractère plus perméable de la grave-ciment témoin. Néanmoins, les deux graves-ciment sont très perméables, le pourcentage d'infiltration étant toujours supérieur à 75 %, mis à part les derniers prélèvements du lysimètre GC pour lesquels de violents orages ont eu lieu, provoquant des ruissellements importants.

La figure 22 représente les pH des différents percolats pour les essais comparés.

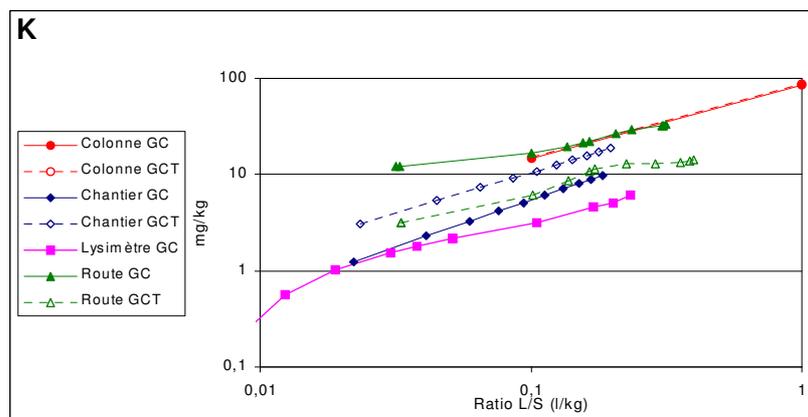


**Figure 22** : Synthèse essais pilotes : pH des percolats

En début de suivi, les pH issus du lysimètre simulant le comportement de GC en place sont plus faibles que les autres essais d'environ 1 unité de pH. En fin de suivi, une chute du pH est observée pour ce lysimètre et pour les routes (témoin et pilote) à partir d'un ratio L/S de 0,2 l/kg.

Nous proposons à ce stade de l'interprétation, de comparer les relargages cumulés de quelques éléments suivis pour tous les essais dynamiques. La représentation en fonction du ratio L/S est la plus adaptée pour comparer les différents essais, car dans le cas de pluviométries différentes, les relargages sont fonction de la quantité d'eau vue par le matériau, et moins du temps d'exposition (périodes de sécheresse par exemple). C'est pourquoi, dans le reste du document, les comparaisons seront dorénavant effectuées sur cette base.

#### Cas du potassium :



**Figure 23** : Synthèse essais pilotes : cas du potassium

Nous avons choisi de représenter le cas du potassium, son relargage étant souvent considéré comme indépendant du contexte chimique, car issu de phases fortement solubles.

Malgré des intensités de relargage différentes, les évolutions suivent le même profil pour tous les essais dynamiques.

### Cas du calcium :

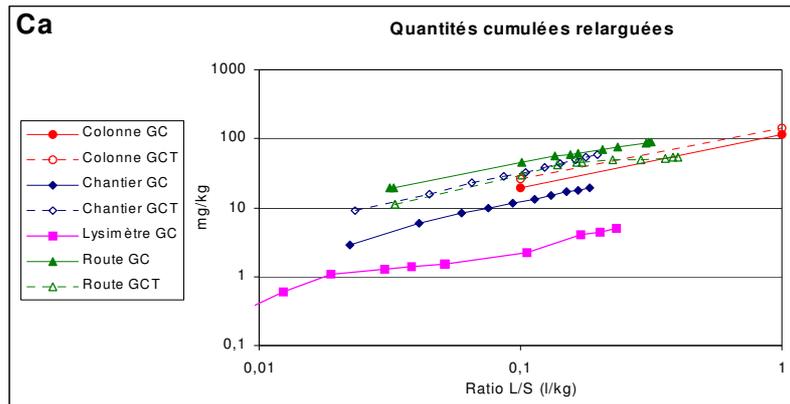


Figure 24 : Synthèse essais pilotes : cas du calcium

De la même façon, les profils sont similaires, mis à part le lysimètre GC pour lequel le relargage est plus faible.

### Cas des sulfates :

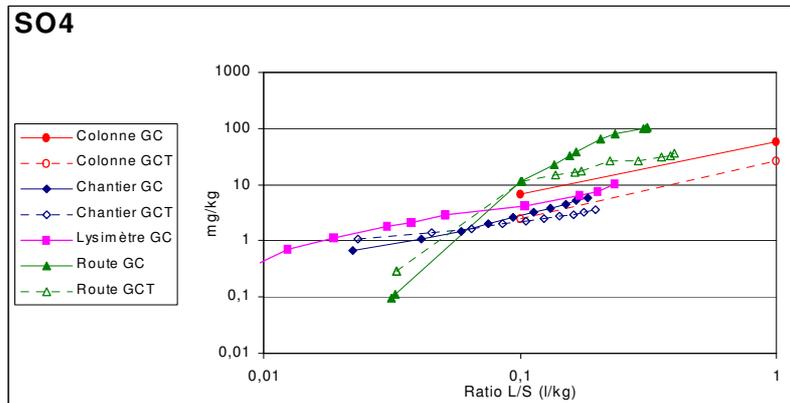


Figure 25 : Synthèse essais pilotes : cas des sulfates

Le comportement des sulfates diffère dans le cas de la route contenant la boue par rapport aux autres essais. Il faut rapprocher ces différentes valeurs des valeurs de pH obtenues dans chaque éluat (figure 22) où on constate qu'à partir de  $L/S = 0,2$ , le pH diminue fortement, favorisant la dissolution de phases sulfatées telles que l'ettringite (cf. figure 9 p.17 : solubilisation des sulfates en fonction du pH).

### Cas de l'aluminium :

Nous nous penchons maintenant sur les éléments traces, en commençant par l'aluminium, où nous remarquons que les relargages les plus importants sont observés pour les lysimètres simulant la phase chantier et pour la route témoin ( $L/S > 0,2$  l/kg).

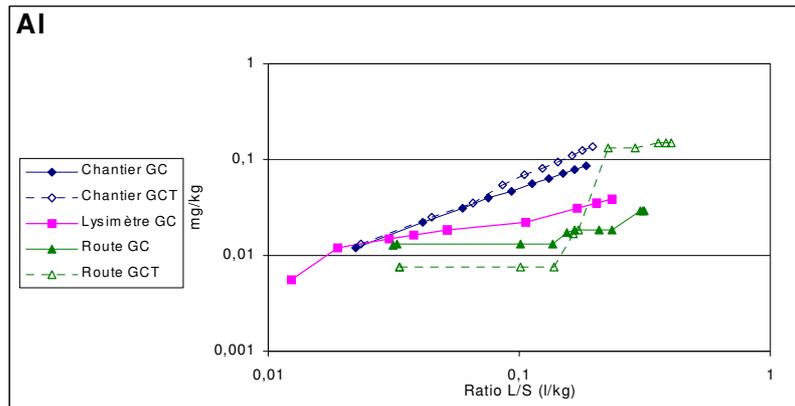


Figure 26 : Synthèse essais pilotes : cas de l'aluminium

### Cas du chrome :

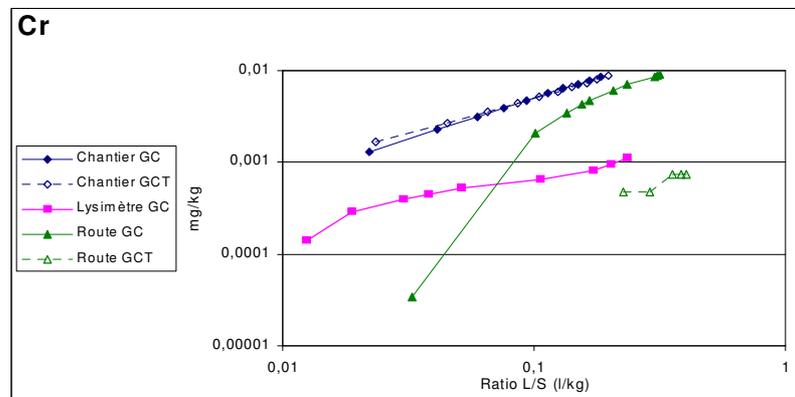


Figure 27 : Synthèse essais pilotes : cas du chrome

Le même constat est fait dans le cas du chrome (pour la grave-ciment contenant la boue et la grave-ciment témoin), ce qui met en évidence la nécessité de couvrir le matériau pendant la phase de chantier (quel que soit le matériau). A noter que l'exposition pendant la phase chantier intervient plus tôt mais le niveau de relargage atteint par la route est sensiblement le même (environ 0,01 mg/kg, c'est-à-dire très faible).

### **Conclusion :**

**Les intensités de relargage sont globalement faibles et similaires pour la grave-ciment contenant la boue et la grave-ciment témoin.**

**Il faut tout de même noter que la comparaison des différents essais a permis de mettre en évidence le caractère critique de la phase chantier où des polluants tels que du chrome et de l'aluminium sont mobilisés mais les quantités restent très faibles.**

## **3 Modélisation et prédiction du comportement en scénario**

L'objectif est ici de proposer pour chaque élément une tendance de comportement pour pouvoir prédire le relargage sur une période de temps donnée (100 ans par exemple) en se basant sur les essais effectués à l'échelle du laboratoire et sur le suivi des routes pendant un an.

### **3.1 Description du modèle utilisé au niveau européen**

Le modèle utilisé au niveau européen (initié notamment aux Pays Bas dans le cadre du Building Material Decree) pour décrire le relargage des polluants issus d'un dépôt de matériaux inertes stockés en installation de stockage de déchets inertes est décrit ci-dessous. Ce modèle se base sur les données de lixiviation obtenues à partir de l'essai de percolation en colonne.

Les relargages de la plupart des éléments peuvent être décrits par un pic de concentration initial dans le premier percolat ( $C_0$ ) suivi d'une diminution exponentielle des concentrations avec le temps (lié au ratio L/S). L'évolution des concentrations en fonction du ratio L/S peut alors s'écrire selon l'expression suivante :

$$C = C_0 \times \exp[-(L / S) \times \kappa] \quad (1)$$

C Concentration de l'élément dans le lixiviat en fonction du ratio L/S (mg/l)

$C_0$  Pic de concentration initial de l'élément dans le premier lixiviat (mg/l)

L / S Ratio Liquide / Solide correspondant à la concentration C (l/kg)

$\kappa$  Constante cinétique décrivant la diminution de relargage pour un matériau et un élément donnés (kg/l)

En intégrant cette dernière expression, la quantité cumulée de l'élément relargué E en mg/kg peut être calculée de la façon suivante :

$$E = (C_0 / \kappa) \times (1 - \exp[-(L / S) \times \kappa]) \quad (2)$$

Il est alors possible de connaître le relargage cumulé de chaque espèce au ratio L/S infini, on a alors :

$$E_{max} = C_0 / \kappa \quad (3)$$

La relation entre le temps t et le ratio L/S est obtenu à partir de la description du scénario, soit :

$$t = (L / S) \times d \times H / I \quad (4)$$

- t Temps à partir duquel des lixiviats sont produits (années)
- L Volume total de lixiviats produits au temps t (litres)
- S Masse sèche totale de matériau déposé (kg)
- d Densité sèche moyenne
- H Hauteur moyenne de l'ouvrage (mm)
- I Taux d'infiltration des précipitations

La valeur de  $\kappa$  est obtenue par ajustement des résultats de simulation sur les données expérimentales du test de percolation en colonne ou des essais pilotes. La valeur retenue est celle qui permet la meilleure concordance entre les points expérimentaux et simulés.

### 3.2 Résultats de modélisation

Nous proposons ici d'appliquer le modèle décrit précédemment au cas de la grave-ciment contenant la boue en scénario routier pour pouvoir proposer une prédiction des relargages cumulés au bout de 100 ans d'exposition.

#### 3.2.1 Ratio L/S correspondant à 100 ans d'exposition

Pour connaître le ratio L/S correspondant à 100 ans d'exposition dans le cas du scénario route, nous utilisons l'expression (4) avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 100 \text{ ans} \\ d = 2,3 \\ H = 200 \text{ mm} \\ I = 138 \text{ mm/an} \end{array} \right.$$

Ces deux dernières valeurs sont obtenues expérimentalement à partir du chantier expérimental, elles correspondent respectivement à la hauteur de grave-ciment en place et au volume total de percolats recueillis au bout d'un an de suivi exprimé en mm (13,8 m<sup>3</sup> pour 100 m<sup>2</sup> exposés).

On obtient L/S = 30 l/kg. Il faut donc extrapoler les courbes obtenues à un ratio L/S = 30 l/kg pour connaître le relargage cumulé sur 100 ans.

### 3.2.2 Modélisation obtenue à partir des résultats de percolation en colonne

Ci-dessous sont représentés les résultats de modélisation obtenus à partir des données de percolation en colonne sur quelques éléments. Les croix représentent les valeurs expérimentales et le trait plein la simulation qui a volontairement été prolongée jusqu'à L/S = 30 l/kg pour pouvoir estimer le relargage cumulé des éléments au bout de 100 ans d'exposition.

#### Cas des éléments chlorures et potassium :

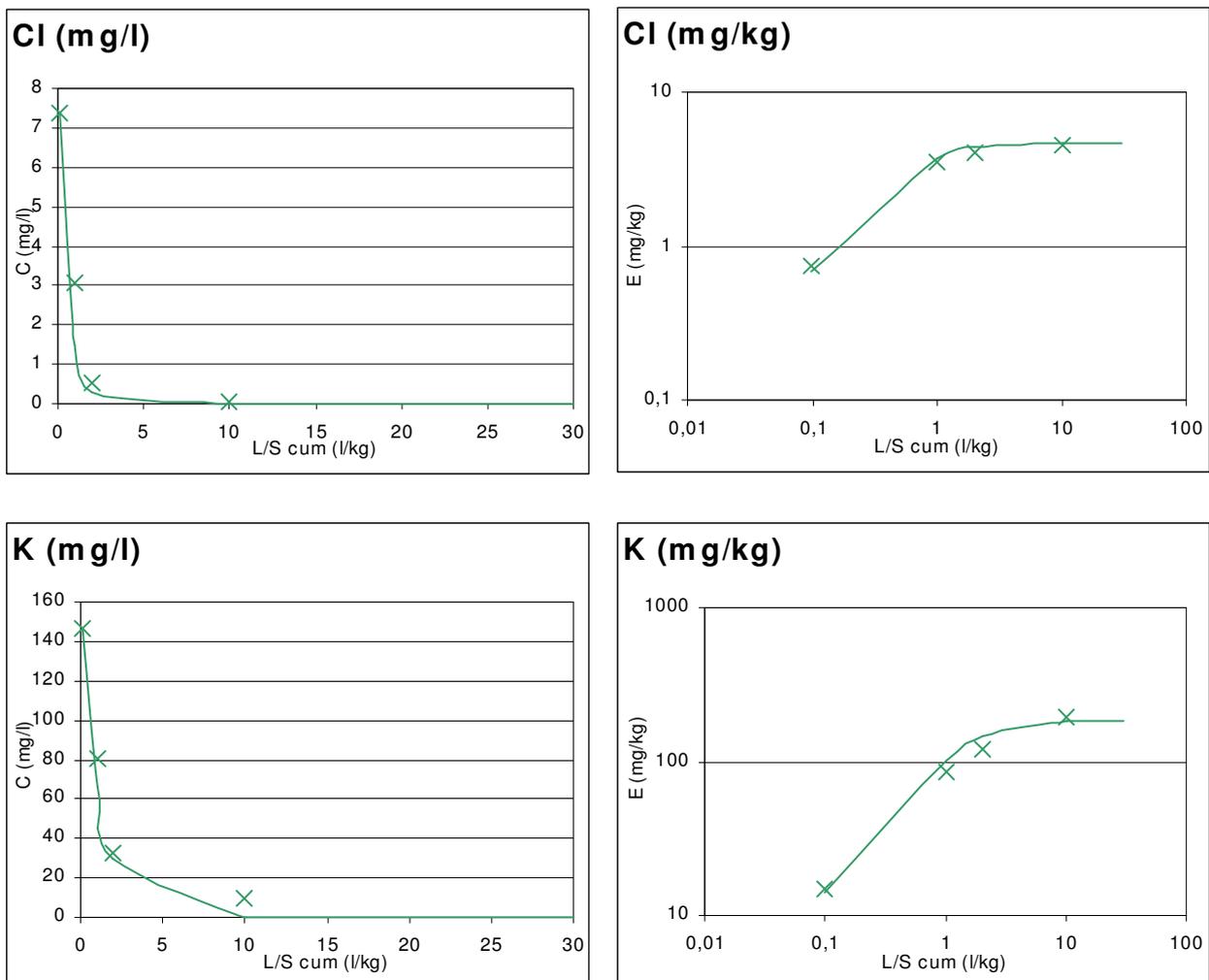


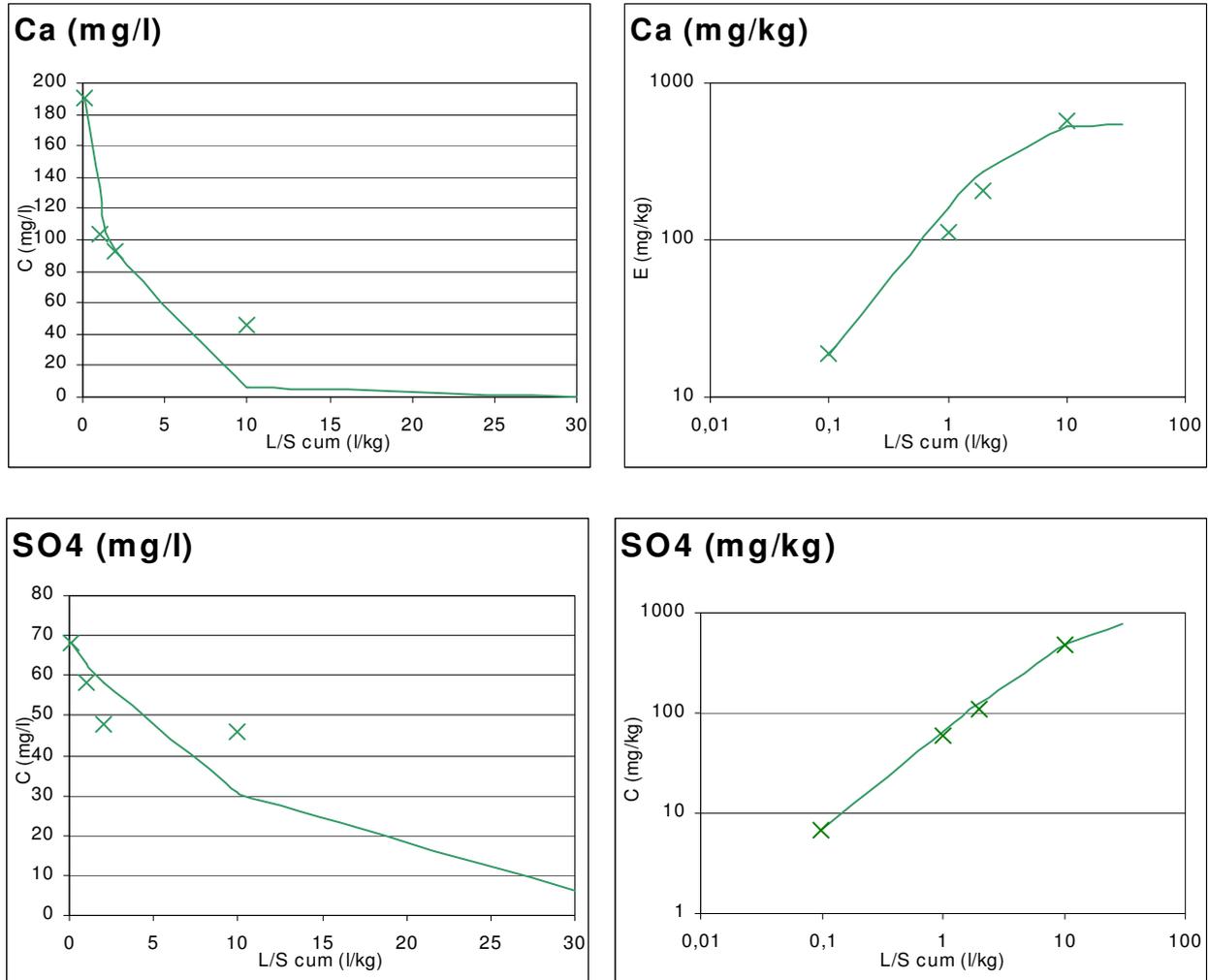
Figure 28 : Simulation à partir des données de percolation : cas des chlorures et du potassium

Le relargage de ces éléments est considéré comme insensible au contexte chimique. Une bonne concordance est observée entre les valeurs expérimentales et les valeurs simulées.

**On remarque qu'au bout de 100 ans le relargage cumulé maximal est atteint.**

En effet pour les chlorures :  $E_{\max} = C_0 / \kappa = 4,6 \text{ mg/kg}$ , et pour le potassium :  $E_{\max} = 184 \text{ mg/kg}$ .

Cas du calcium et des sulfates:



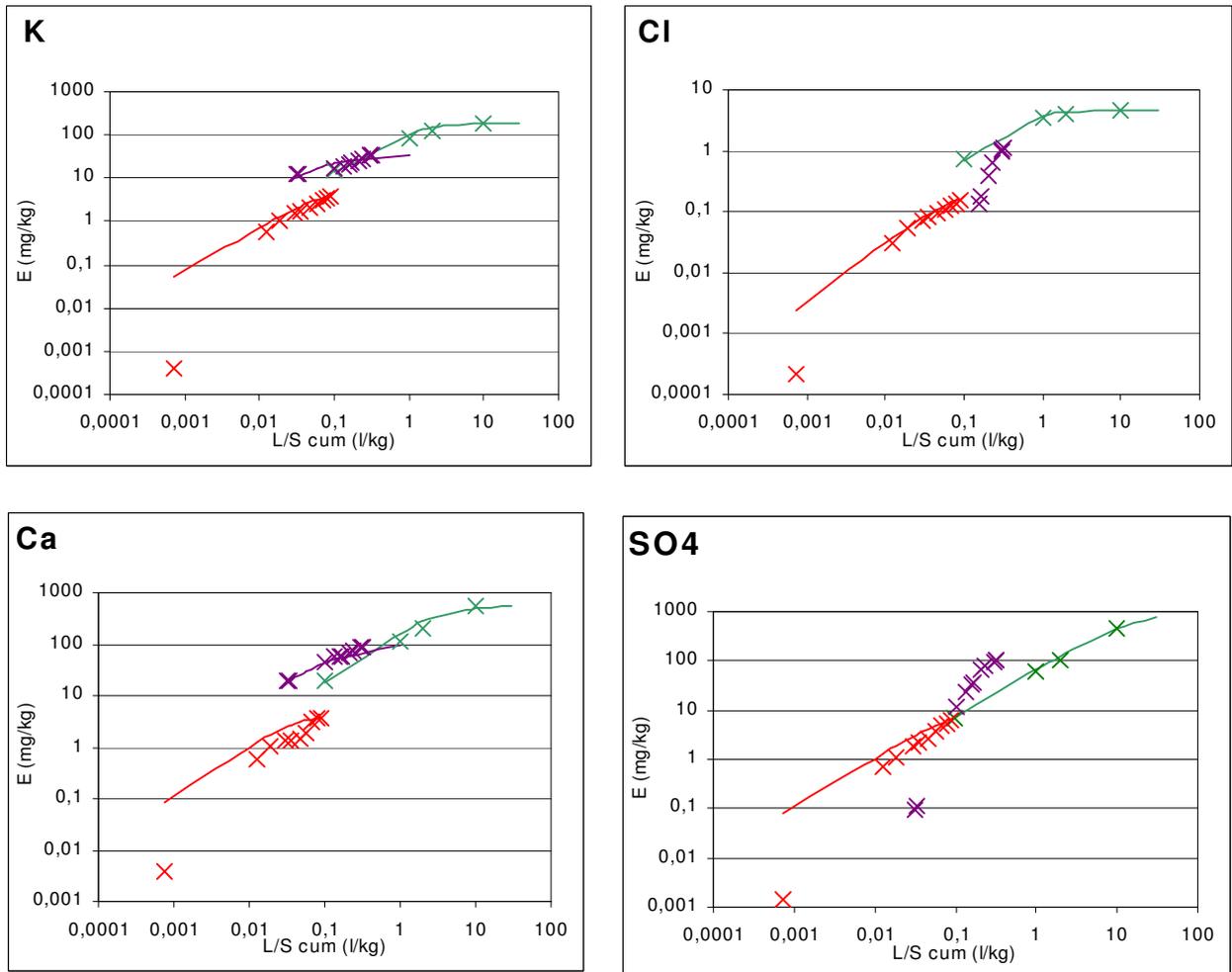
**Figure 29 :** Simulation à partir des données de percolation : cas du calcium et des sulfates

**Pour le calcium, le relargage maximal est également obtenu au bout de 100 ans d'exposition, soit 543 mg/kg.**

En revanche, dans le cas des sulfates, le relargage n'atteint pas d'asymptote au bout de 100 ans d'exposition, mais un début d'atténuation est néanmoins décelable. **Le relargage maximal** peut être calculé :  $E_{\max} = 851 \text{ mg/kg}$ . Il est **théoriquement atteignable à partir du ratio L/S = 100 l/kg , soit environ 300 ans d'exposition.**

### 3.2.3 Modélisation obtenue à partir des résultats des différents essais dynamiques

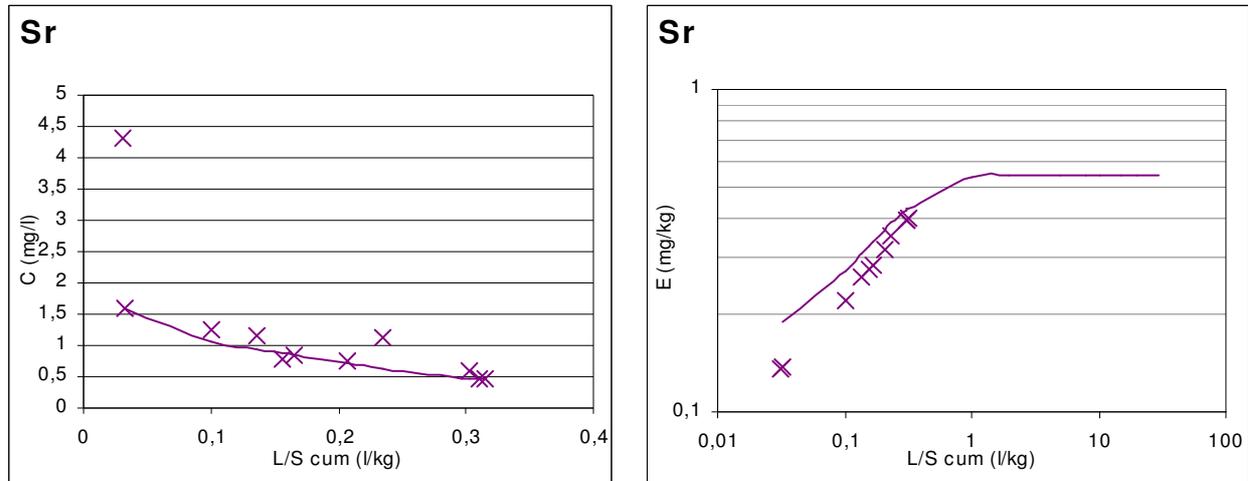
Les différents essais pilotes réalisés sur la grave-ciment contenant la boue ont, de la même façon, été modélisés et représentés pour chaque élément sur le même graphique. En rouge sont représentés les résultats concernant le lysimètre suivi sur 6 mois, en vert les résultats de l'essai de percolation en colonne présentés précédemment et en violet, les résultats de suivi du chantier expérimental.



**Figure 30 :** Simulation des différents essais pilotes :  
cas du potassium, des chlorures, du calcium et des sulfates

On note dans l'ensemble une bonne concordance entre les dynamiques observées au cours des essais en lysimètres et en colonnes. Seuls les chlorures et les sulfates issus de la route expérimentale ont des comportements qui s'écartent de la tendance en début de suivi mais qui tendent à rejoindre les résultats de la colonne en fin de suivi. Il faut noter que le temps d'exposition peut expliquer ces différences. En effet, il est de 1 an pour la route, et seulement quelques jours pour la colonne.

Cas du strontium :



**Figure 31 :** Simulation à partir du chantier expérimental : cas du strontium

Les données issues de la route expérimentale ont été modélisées dans le cas du strontium et sont représentées en trait plein. Le premier point expérimental n'a pas été pris en compte dans la simulation car considéré comme résultant d'un phénomène de surface.

Une bonne concordance est observée et **le relargage cumulé au bout de 100 ans d'exposition est faible et voisin de 0,5 mg/kg.**

## Conclusion

L'évaluation environnementale de la valorisation des boues résiduelles de l'alcalinisation des eaux acides en scénario routier à hauteur de 1,2 % en masse de matière sèche de la grave-ciment totale (3 % de la fraction 0/4) ne montre **aucune différence significative avec la grave-ciment témoin généralement utilisée dans ce type de scénario**. On note même **un léger gain en capacité acido-basique et donc en résistance aux agressions faiblement acides**.

On peut toutefois émettre des **recommandations quant à la phase chantier, la couverture de l'ouvrage pendant cette période étant fortement conseillée**.

En ce qui concerne les différents essais réalisés sur la grave-ciment contenant la boue, excepté pour les sulfates, l'essai de percolation en colonne représente une situation extrême pour le matériau, et se caractérise par les relargages maximaux observés. **A l'exception du sélénium sur le premier percolat, tous les résultats sont inférieurs aux seuils européens de stockage des déchets inertes**.

**La modélisation prédictive en scénario nous a permis d'estimer les relargages cumulés des polluants sur une durée d'exposition de 100 ans. Ces valeurs sont faibles et sont en faveur d'une valorisation des boues en substitution partielle des granulats les plus fins dans les graves-ciment destinées à la technique routière.**

# **Annexe 1**

## **Formulations des deux graves-ciment (GC et GCT)**

	<b>Grave-ciment + Boue (GC)</b>	<b>Grave-ciment témoin (GCT)</b>
<b>Granulats</b>		
Fraction 0/4	39,5 %	40,7 %
Fraction 4/10	22 %	22 %
Fraction 10/20	34,3 %	34,3 %
<b>Boues</b>		
en masse sèche soit	3,13 % de la fraction 0/4 1,2 % de la Grave-Ciment	
<b>Ciment</b>		
CPJ CEM II/A 42,5 (L) CP2)	3 %	3 %
<b>Retardateur</b>		
Sika Plastiroute	1 %	1 %

Masse volumique réelle du mélange	2,736 Mg/m <sup>3</sup>	
Teneur en eau à l'OPM	5,7 %	
Masse volumique apparente à l'OPM (compacité de 84 %)	2,31 g/cm <sup>3</sup>	

## **Annexe 2**

### **Présentation synthétique de l'essai de détermination de la fraction maximale mobilisable (FMM)**

## Principe du test

Le test de détermination de la fraction maximale mobilisable est un test d'extraction dans un contexte chimique donné, le plus souvent représenté par le pH.

Trois contextes chimiques sont généralement retenus :

- contexte imposé par le matériau lui-même : l'échantillon est mis en contact avec de l'eau déminéralisée ;
- pH acide maintenu (par exemple pH 4) ;
- pH basique maintenu (par exemple pH 12).

Dans les deux derniers cas, le pH est imposé et régulé de façon automatique par un dispositif de pH-stat. Pour chacun des contextes chimiques étudiés, le protocole est celui d'une extraction séquentielle : le même échantillon est mis en contact avec la solution, en utilisant des rapports masse de liquide / masse sèche de l'échantillon (ratio L/S) successifs de 10, 40 et 50. Les ratios L/S cumulés sont en conséquence : 10, 50 et 100.

L'échantillon subit une réduction granulométrique à 1 mm, puis est mis en contact avec la solution et agité pendant 24 heures. L'éluat obtenu est alors filtré. Le filtrat est conservé pour analyse tandis que le culot de filtration est remis en contact avec la solution pour la séquence de lixiviation suivante, et ce jusqu'à l'obtention du filtrat pour le ratio L/S cumulé de 100.

## Résultats attendus

L'objectif du test de détermination de la fraction maximale mobilisable est d'aboutir à une estimation du maximum extractible pour une espèce donnée dans des conditions physico-chimiques imposées.

Pour chaque espèce suivie, deux représentations graphiques des résultats sont proposées. La première montre l'évolution des concentrations mesurées sur l'éluat après filtration en fonction du ratio L/S cumulé. La seconde présente les masses extraites (en mg/kg de masse sèche d'échantillon), également en fonction du ratio L/S cumulé. Dans le cas où la courbe tend vers une asymptote, l'extrapolation de la masse extraite vers un ratio L/S infini permet d'estimer la fraction maximale mobilisable. Dans le cas

contraire et pour une utilisation simple de l'essai, la valeur cumulée atteinte pour L/S=100 est assimilée à la FMM.

### **Limites du domaine d'application**

La détermination de la fraction maximale mobilisable permet d'estimer de façon expérimentale une quantité maximale extractible pour une espèce donnée.

L'objectif de l'essai n'est pas de simuler des situations réelles. Il ne représente donc pas les conditions réelles des scénarios envisagés. En conséquence, les résultats obtenus ne peuvent pas être positionnés directement vis-à-vis de référentiels relatifs au milieu naturel. Ils seront donc utilisés en application du principe de précaution, afin de se prémunir contre tout emploi abusif de déchets dans l'élaboration des matériaux.

## **Annexe 3**

### **Résultats expérimentaux des essais de détermination de la fraction maximale mobilisable (FMM)**

## Résultats Expérimentaux d'essai FMM

Matériau/Déchet :		Grave Ciment (GC)			
Granulométrie	< 1 mm	Lab.	POLDEN	Date	fev 02

pH acide imposé      pH 4

Référence de lixiviation		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3
Masse humide initiale	g	30,39	30,39	30,39
Taux de matière sèche	%	98,73%	98,73%	98,73%
Masse sèche	g	30,00	30,00	30,00
Volume eau dém.	ml	280,00	1150,00	1500,00
Volume acide ou base	ml	16,20	2,40	4,00
Volume liquide total	ml	296,59	1163,99	1537,99
Volume filtré	ml	285,00	1130,00	
Volume liquide résiduel	ml	11,59	33,99	
L/S de la séquence	ml/g	9,88	38,79	51,26
L/S cumulé	ml/g	9,88	48,68	99,94
pH		3,66	2,80	3,27
Conductivité	µS/cm	10780	793	273

Métaux		Concentration en mg/l			
	LD*				
Al	0,002	défaut	50,700	21,200	4,210
		excès	50,700	21,200	4,210
Ca	0,002	défaut	2260,000	39,900	2,390
		excès	2260,000	39,900	2,390
Cr tot	0,0004	défaut	0,0000	0,0000	0,0000
		excès	0,0004	0,0004	0,0004
K	0,031	défaut	45,300	5,800	2,920
		excès	45,300	5,800	2,920
Na	0,0095	défaut	8,3300	0,8040	0,4310
		excès	8,3300	0,8040	0,4310
Pb	0,004	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,004	0,004	0,004
Sr	0,063	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,063	0,063	0,063
Zn	0,003	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,003	0,003	0,003
<b>Anions</b>					
Cl <sup>-</sup>	ncertitude 5%	défaut	8,6	1,9	1,4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ncertitude 5%	défaut	627,0	14,9	4,7

\* LD=Limite de détection

## Résultats Expérimentaux d'essai FMM

Matériau/Déchet :		Grave Ciment (GC)			
Granulométrie	< 1 mm	Lab.	POLDEN	Date	fev 02

pH naturel		pH nat		
Référence de lixiviation		1	2	3
Masse humide initiale	g	30,39	30,39	30,39
Taux de matière sèche	%	98,73%	98,73%	98,73%
Masse sèche	g	30,00	30,00	30,00
Volume eau dém.	ml	300,00	1200,00	1500,00
Volume acide ou base	ml	0,00	0,00	0,00
Volume liquide total	ml	300,39	1208,39	1518,39
Volume filtré	ml	292,00	1190,00	
Volume liquide résiduel	ml	8,39	18,39	
L/S de la séquence	ml/g	10,01	40,27	50,61
L/S cumulé	ml/g	10,01	50,29	100,89
pH		11,50	11,15	11,09
Conductivité	µS/cm	1124	575	287

Métaux		Concentration en mg/l			
	LD*				
Al	0,002	défaut	1,360	3,110	2,390
		excès	1,360	3,110	2,390
Ca	0,002	défaut	138,000	78,700	39,100
		excès	138,000	78,700	39,100
Cr tot	0,0004	défaut	0,0000	0,0000	0,0000
		excès	0,0004	0,0004	0,0004
K	0,031	défaut	29,100	2,510	0,680
		excès	29,100	2,510	0,680
Na	0,0095	défaut	6,5900	0,5800	0,2940
		excès	6,5900	0,5800	0,2940
Pb	0,004	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,004	0,004	0,004
Sr	0,063	défaut	0,197	0,000	0,000
		excès	0,197	0,063	0,063
Zn	0,003	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,003	0,003	0,003
<b>Anions</b>					
Cl <sup>-</sup>	ncertitude 5%	défaut	0,9	0,1	0,0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ncertitude 5%	défaut	175,0	63,4	29,9

\* LD=Limite de détection

## Résultats Expérimentaux d'essai FMM

Matériau/Déchet :		Grave Ciment (GC)			
Granulométrie	< 1 mm	Lab.	POLDEN	Date	fev 02

pH basique imposé      pH 12

Référence de lixiviation		1	2	3
Masse humide initiale	g	30,39	30,39	30,39
Taux de matière sèche	%	98,73%	98,73%	98,73%
Masse sèche	g	30,00	30,00	30,00
Volume eau dém.	ml	280,00	1150,00	1500,00
Volume acide ou base	ml	10,40	55,80	15,00
Volume liquide total	ml	290,79	1216,59	1571,59
Volume filtré	ml	280,00	1160,00	
Volume liquide résiduel	ml	10,79	56,59	
L/S de la séquence	ml/g	9,69	40,55	52,38
L/S cumulé	ml/g	9,69	50,24	102,62
pH		12,15	12,60	11,78
Conductivité	µS/cm	5680	8010	2261

Métaux		Concentration en mg/l			
	LD*				
Al	0,002	défaut	10,000	8,480	5,820
		excès	10,000	8,480	5,820
Ca	0,002	défaut	0,294	15,200	14,400
		excès	0,294	15,200	14,400
Cr tot	0,0004	défaut	0,0000	0,0000	0,0000
		excès	0,0004	0,0004	0,0004
K	0,031	défaut	28,000	3,760	1,520
		excès	28,000	3,760	1,520
Na	0,0095	défaut			
		excès			
Pb	0,004	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,004	0,004	0,004
Sr	0,063	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,063	0,063	0,063
Zn	0,003	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,003	0,003	0,003
<b>Anions</b>					
Cl <sup>-</sup>	ncertitude 5%	défaut	1,2	1,5	0,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ncertitude 5%	défaut	240,0	66,3	35,0

\* LD=Limite de détection

## Résultats Expérimentaux d'essai FMM

Matériau/Déchet :		Grave Ciment Témoin (GCT)			
Granulométrie	< 1 mm	Lab.	POLDEN	Date	fev 02

pH acide imposé      pH 4

Référence de lixiviation		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3
Masse humide initiale	g	31,37	31,37	31,37
Taux de matière sèche	%	95,64%	95,64%	95,64%
Masse sèche	g	30,00	30,00	30,00
Volume eau dém.	ml	280,00	1150,00	1500,00
Volume acide ou base	ml	9,20	2,00	0,80
Volume liquide total	ml	290,57	1162,57	1523,37
Volume filtré	ml	280,00	1140,00	
Volume liquide résiduel	ml	10,57	22,57	
L/S de la séquence	ml/g	9,68	38,75	50,78
L/S cumulé	ml/g	9,68	48,43	99,21
pH		3,75	2,83	3,50
Conductivité	µS/cm	5910	427	126

Métaux		Concentration en mg/l			
	LD*				
Al	0,002	défaut	27,500	6,230	1,110
		excès	27,500	6,230	1,110
Ca	0,002	défaut	1004,000	25,000	4,180
		excès	1004,000	25,000	4,180
Cr tot	0,0004	défaut	0,0000	0,0000	0,0000
		excès	0,0004	0,0004	0,0004
K	0,031	défaut	40,600	2,110	0,632
		excès	40,600	2,110	0,632
Na	0,0095	défaut	8,0200	0,5170	0,5170
		excès	8,0200	0,5170	0,5170
Pb	0,004	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,004	0,004	0,004
Sr	0,063	défaut	0,865	0,000	0,000
		excès	0,865	0,063	0,063
Zn	0,003	défaut	1,130	0,000	0,000
		excès	1,130	0,003	0,003
<b>Anions</b>					
Cl <sup>-</sup>	ncertitude 5%	défaut	1,32	0,17	0,20
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ncertitude 5%	défaut	439,0	11,6	2,3

\* LD=Limite de détection

## Résultats Expérimentaux d'essai FMM

Matériau/Déchet :		Grave Ciment Témoin (GCT)			
Granulométrie	< 1 mm	Lab.	POLDEN	Date	fev 02

pH naturel		pH nat		
Référence de lixiviation		1	2	3
Masse humide initiale	g	31,37	31,37	31,37
Taux de matière sèche	%	95,64%	95,64%	95,64%
Masse sèche	g	30,00	30,00	30,00
Volume eau dém.	ml	300,00	1200,00	1500,00
Volume acide ou base	ml	0,00	0,00	0,00
Volume liquide total	ml	301,37	1214,37	1514,37
Volume filtré	ml	287,00	1200,00	
Volume liquide résiduel	ml	14,37	14,37	
L/S de la séquence	ml/g	10,04	40,48	50,48
L/S cumulé	ml/g	10,04	50,52	101,00
pH		11,84	11,09	11,22
Conductivité	µS/cm	1231	686	359

Métaux		Concentration en mg/l			
	LD*				
Al	0,002	défaut	1,560	2,920	2,190
		excès	1,560	2,920	2,190
Ca	0,002	défaut	118,000	80,900	42,700
		excès	118,000	80,900	42,700
Cr tot	0,0004	défaut	0,0000	0,0000	0,0000
		excès	0,0004	0,0004	0,0004
K	0,031	défaut	28,000	2,330	0,527
		excès	28,000	2,330	0,527
Na	0,0095	défaut	7,1000	0,3250	0,1110
		excès	7,1000	0,3250	0,1110
Pb	0,004	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,004	0,004	0,004
Sr	0,063	défaut	0,175	0,000	0,000
		excès	0,175	0,063	0,063
Zn	0,003	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,003	0,003	0,003
<b>Anions</b>					
Cl <sup>-</sup>	ncertitude 5%	défaut	0,73	0,04	0,03
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ncertitude 5%	défaut	82,2	72,8	35,5

\* LD=Limite de Détection

## Résultats Expérimentaux d'essai FMM

Matériau/Déchet :		Grave Ciment Témoin (GCT)			
Granulométrie	< 1 mm	Lab.	POLDEN	Date	fev 02

pH basique imposé      pH 12

Référence de lixiviation		1	2	3
Masse humide initiale	g	31,37	31,37	31,37
Taux de matière sèche	%	95,64%	95,64%	95,64%
Masse sèche	g	30,00	30,00	30,00
Volume eau dém.	ml	280,00	1150,00	1500,00
Volume acide ou base	ml	9,00	55,80	15,00
Volume liquide total	ml	290,37	1216,17	1541,17
Volume filtré	ml	280,00	1190,00	
Volume liquide résiduel	ml	10,37	26,17	
L/S de la séquence	ml/g	9,68	40,54	51,37
L/S cumulé	ml/g	9,68	50,21	101,58
pH		12,12	12,65	11,70
Conductivité	µS/cm	5720	9930	1804

Métaux		Concentration en mg/l			
	LD*				
Al	0,002	défaut	4,610	5,670	4,880
		excès	4,610	5,670	4,880
Ca	0,002	défaut	0,152	19,900	11,300
		excès	0,152	19,900	11,300
Cr tot	0,0004	défaut	0,0000	0,0000	0,0000
		excès	0,0004	0,0004	0,0004
K	0,031	défaut	27,000	3,780	0,944
		excès	27,000	3,780	0,944
Na	0,0095	défaut			
		excès			
Pb	0,004	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,004	0,004	0,004
Sr	0,063	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,063	0,063	0,063
Zn	0,003	défaut	0,000	0,000	0,000
		excès	0,003	0,003	0,003
<b>Anions</b>					
Cl <sup>-</sup>	ncertitude 5%	défaut	0,95	0,14	0,16
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ncertitude 5%	défaut	95,9	50,2	37,2

\* LD=Limite de Détection

## **Annexe 4**

### **Résultats expérimentaux des essais de détermination de l'influence du pH sur la solubilisation des éléments (CNA)**

## Resultats Expérimentaux d'essai ANC

Matériau / déchet	Grave Ciment (GC)
-------------------	-------------------

### Préparation de l'échantillon pour essai

Granulométrie	< 1 mm
Taux de matière sèche (%)	98,73

### Essai de lixiviation

Référence de lixiviation		1	2	3	4	5	6	7	8
Matériau sec	g	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
H2O	ml	300,00	270,00	240,00	220,00	180,00	120,00	50,00	30,00
acide	ml		30,00	60,00	80,00	120,00	180,00	250,00	270,00
base	ml								
conc. acide ou base	M		0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
H+ ajouté	mmol/g	0,00	0,10	0,20	0,27	0,40	0,60	0,83	0,90
L/S	ml/g	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
pH après 4h		11,21	10,08	8,92	7,18	6,00	4,71	3,96	3,41
pH après 44h		11,48	10,89	9,65	7,76	7,00	6,09	4,91	3,94
pH après 48h		11,84	11,45	10,10	7,91	7,22	6,30	5,03	3,97
ΔpH entre 44h et 48h		0,36	0,56	0,45	0,15	0,22	0,21	0,12	0,03
conductivité	μS/cm	1105	2101	3520	4530	6310	7850	8480	8950

Référence de lixiviation			1	2	3	4	5	6	7	8
Elément	LQ*		mg/l							
Pb	0,05	défaut	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,16
		excès	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Zn	0,05	défaut	0,00	0,00	0,01	0,04	0,01	0,39	2,47	3,17
		excès	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,39	2,47	3,17
Cl	incertitude 5%		0,97	0,67	0,83	0,85	1,25	0,91	0,88	0,82
SO4	incertitude 5%		145,00	273,00	477,00	496,00	520,00	540,00	537,00	486,00

\* LQ=Limite de Quantification

## Resultats Expérimentaux d'essai ANC

Matériau / déchet	Grave Ciment Témoin (GCT)
-------------------	---------------------------

### Préparation de l'échantillon pour essai

Granulométrie	< 1 mm
Taux de matière sèche (%)	95,64

### Essai de lixiviation

Référence de lixiviation		1	2	3	4	5	6	7
Matériau sec	g	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
H <sub>2</sub> O	ml	295,00	300,00	280,00	250,00	230,00	200,00	170,00
acide	ml			20,00	50,00	70,00	100,00	130,00
base	ml	5,00						
conc. acide ou base	M	1,0000		0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
H <sup>+</sup> ajouté	mmol/g	-0,17	0,00	0,07	0,17	0,23	0,33	0,43
L/S	ml/g	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
pH après 4h		12,55	11,90	9,44	3,20	2,39	2,06	3,54
pH après 44h		12,11	11,63	11,30	10,51	9,55	6,34	4,18
pH après 48h		12,21	11,77	11,32	10,52	9,51	6,53	4,10
conductivité	µS/cm	4040	1178	1647	2977	3920	5150	

Référence de lixiviation			1	2	3	4	5	6	7
Elément	LQ*	mg/l							
Pb	0,05	défaut	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,06
		excès	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06
Zn	0,05	défaut	0,00	0,00	0,00	0,04	0,06	0,16	2,45
		excès	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,16	2,45
Cl	Incertitude 5%		0,73	0,76	0,84	0,73	0,73	0,82	0,76
SO <sub>4</sub>	Incertitude 5%		74,50	173,00	454,00	565,00	586,00	573,00	541,00

\* LQ=Limite de Quantification

## **Annexe 5**

### **Résultats expérimentaux des essais de percolation en colonne**

## Résultats expérimentaux de percolation en colonne

Matériau/Déchets :		Grave Ciment (GC)			
Granulométrie	< 10 mm	Labo	POLDEN	Date	6-févr-02

Référence de lixiviation		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5
Masse humide initiale	g	3020,00	3020,00	3020,00	3020,00	3020,00
Taux de matière sèche	%	94,07%	94,07%	94,07%	94,07%	94,07%
Masse sèche	g	2840,91	2840,91	2840,91	2840,91	2840,91
Volume percolat	ml	284,00	2557,00	2841,00	22728,00	284,00
L/S de la séquence	ml/g	0,10	0,90	1,00	8,00	0,10
L/S cumulé	ml/g	0,10	1,00	2,00	10,00	10,10
pH		12,21	11,90	11,89	11,03	11,48
Conductivité	µS/cm	3260	1588	1089	326	1147

Métaux		Concentration en mg/l					
	LD						
As	0,007	défaut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		excès	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Ba	0,001	défaut	0,112	0,081	0,077	0,058	0,074
		excès	0,112	0,081	0,077	0,058	0,074
Ca	0,001	défaut	190,000	104,000	92,800	45,600	123,000
		excès	190,000	104,000	92,800	45,600	123,000
Cd	0,007	défaut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		excès	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Cr	0,0004	défaut	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		excès	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
K	0,031	défaut	147,000	80,100	32,300	9,180	5,360
		excès	147,000	80,100	32,300	9,180	5,360
Pb	0,004	défaut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		excès	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Zn	0,003	défaut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		excès	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Se		défaut	0,080	0,000	0,000	0,005	0,000
		excès					

Anions						
Cl <sup>-</sup>	Incertitude 5%	7,4	3,0	0,5	0,1	0,1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Incertitude 5%	68,1	58,3	48,0	45,8	53,1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Incertitude 5%	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1

Autres paramètres						
Cr VI	0,010	défaut	0,00	0,00	0,00	0,00
		excès	0,01	0,01	0,01	0,01

\* LD=Limite de Détection

## Résultats expérimentaux de percolation en colonne

Matériau/Déchet :		Grave Ciment Témoin (GCT)			
Granulométrie	< 10 mm	Labo	POLDEN	Date	6-févr-02

Référence de lixiviation		Eluat 1	Eluat 2	Eluat 3	Eluat 4	Eluat 5
Masse humide initiale	g	2950,00	2950,00	2950,00	2950,00	2950,00
Taux de matière sèche	%	94,86%	94,86%	94,86%	94,86%	94,86%
Masse sèche	g	2798,37	2798,37	2798,37	2798,37	2798,37
Volume percolat	ml	280,00	2518,00	2798,00	22384,00	280,00
L/S de la séquence	ml/g	0,10	0,90	1,00	8,00	0,10
L/S cumulé	ml/g	0,10	1,00	2,00	10,00	10,10
pH		12,34	12,02	11,76	10,63	11,49
Conductivité	µS/cm	4320	1880	1032	256	1248

Métaux		Concentration en mg/l					
	LD						
As	0,007	défaut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		excès	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Ba	0,001	défaut	0,170	0,115	0,092	0,064	0,073
		excès	0,170	0,115	0,092	0,064	0,073
Ca	0,001	défaut	265,000	125,000	82,900	35,200	124,000
		excès	265,000	125,000	82,900	35,200	124,000
Cd	0,007	défaut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		excès	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Cr	0,0004	défaut	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		excès	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
K	0,031	défaut	153,000	82,500	32,200	8,870	4,890
		excès	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031
Pb	0,004	défaut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		excès	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Zn	0,003	défaut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		excès	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Se		défaut	0,003	0,002	0,003	0,000	0,000
		excès					

Anions						
Cl <sup>-</sup>	Incertitude 5%	6,0	2,6	1,0	0,2	0,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Incertitude 5%	24,7	26,6	31,2	34,2	43,4
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Incertitude 5%	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1

Autres paramètres						
Cr VI	0,010	défaut	0,00	0,00	0,00	0,00
		excès	0,01	0,01	0,01	0,01

\* LQ=Limite de Quantification

Seuils à respecter extraits de l'annexe II de la directive européenne « décharge » en cours d'adoption par les Etats membres

Component	L/S = 2 l/kg	L/S = 10 l/kg	C <sub>0</sub> (percolation test)
	mg/kg dry substance	mg/kg dry substance	mg/l
As	0.1	0.5	0.06
Ba	7	20	4
Cd	0.03	0.04	0.02
Cr	0.2	0.5	0.1
Cu	0.9	2	0.6
Hg	0.003	0.01	0.002
Mo	0.3	0.5	0.2
Ni	0.2	0.4	0.12
Pb	0.2	0.5	0.15
Sb	0.02	0.06	0.1
Se	0.06	0.1	0.04
Zn	2	4	1.2
Chloride	550	800	450
Fluoride	4	10	2.5
Sulphate	560*	1000*	1500 *
Phenol index	0,5	1	0,3
DOC**	240	500	160
TDS***	2500	4000	

\* If the waste does not meet these values for sulphate, it may still be considered as complying with the acceptance criteria if the leaching does not exceed either of the following values: 1500 mg/l as Co at L/S = 0.1 l/kg and 6000 mg/kg at L/S = 10 l/kg. It will be necessary to use a percolation test to determine the limit value at L/S = 0.1 l/kg under initial equilibrium conditions, whereas the value at L/S = 10 l/kg may be determined either by a batch leaching test or by a percolation test under conditions approaching local equilibrium

\*\* If the waste does not meet these values for dissolved organic carbon (DOC) at its own pH value, it may alternatively be tested at L/S = 10 l/kg and a pH between 7.5 and 8.0. The waste may be considered as complying with the acceptance criteria for DOC, if the result of this determination does not exceed 500 mg/kg. (A draft method based on prEN 14429 is available).

\*\*\* The values for TDS (Total Dissolved Solids) can be used alternatively to the values for Sulphate and Chloride.

**CONCENTRATIONS MAXIMALES POUR LES ELUATS, OBTENUS EN  
LABORATOIRE ET SEUILS MAXIMAUX EN CONTENU TOTAL POUR LES  
DECHETS NECESSITANT UNE PROCEDURE D'ACCEPTATION PREALABLE**

*Avril 2001* : les seuils ci-dessous sont donnés à titre provisoire. Si peu de changement sont à prévoir pour les stockages de type H, les valeurs pour les stockages de type G et F pourraient être abaissées selon les discussions au sein de la Commission Européenne. Les valeurs présentées dans le tableau sont les valeurs en discussions à la Commission Européenne.

Paramètre	Type de stockage	
	Stockage H	Stockage G et F
<b>paramètres inorganiques</b>	<b>Concentrations maximales admissibles dans les percolats (mg/l)</b>	
Chlorures	400	1235
Sulfates	500	1235
Nitrates	100	247
Ammonium	1	25
Cuivre	0,1	0,4
Zinc	0,6	0,7
Baryum	0,6	0,6
Arsenic	0,05	0,05
Cadmium	0,01	0,01
Cyanures totaux	0,1	0,3
Chrome total	0,1	0,1
Mercuré	0,002	0,002
Nickel	0,04	0,04
Plomb	0,05	0,05
Selenium	0,02	0,02
Cobalt	0,1	0,3
Molybdène	0,1	0,2
Indice phénol	0,05	0,5
<b>paramètres organiques</b>	<b>Seuils maximaux admissibles en contenu total (mg/kg)</b>	
COT	-	-
BTEX	-	-
Hydrocarbures totaux	-	-
HAP (16)	-	-
PCB	-	-

Pour les paramètres inorganiques, les seuils ont été déterminés par modélisation, afin qu'en aval de la zone d'exploitation de la décharge, les eaux de la nappe phréatique respectent les seuils de potabilité des eaux, fixés par l'annexe III du décret 89-3 du 3 janvier 1989 modifié, relatif aux eaux destinées à la consommation humaine à l'exception des eaux minérales naturelles. Ces seuils doivent être respectés pour tous les éluats, afin qu'à n'importe quel temps T, la qualité de la nappe respecte les obligations du décret.

## **Annexe 6**

### **Résultats expérimentaux des essais en lysimètres simulant la phase chantier**

## SIMULATION DE LA PHASE CHANTIER

Matériau/Déchet :	Grave Ciment (GC)		
Laboratoire	POLDEN	Date	janv-02

Hauteur	20,0	cm	Volume	75075	cm <sup>3</sup>
Longueur	71,5	cm	Masse humide	180	kg
Largeur	52,50	cm	Humidité		%
Surface	12468	cm <sup>2</sup>	Masse sèche	180	kg

Date	09/01/02	10/01/02	11/01/02	14/01/02	15/01/02	16/01/02	17/01/02	18/01/02	21/01/02	22/01/02
Temps de lixiviation										
Temps cumulé (h)										
Volume ajouté (l)	6	4	4	4	4	4	4	4	4	

### PERCOLATS

	3	2,74	2,63	2,33	2,565	2,75		2,77	2,29	2,63
Volume recueilli (l)										
pH	11,98	11,98	12,23	11,34	11,94	12,11	11,84	11,93	11,94	11,57
Conductivité (µS/cm)	2474	2650	2144	1842	1825	1800	1772	1779	1167	1352

Métaux		mg/l									
Al	défaut	0,627	0,608	0,624	0,623	0,543	0,545	0,524	0,564	0,499	0,558
	excès	0,627	0,608	0,624	0,623	0,543	0,545	0,524	0,564	0,499	0,558
Ca	défaut	173	194	151	124	123	117	118	118	70,7	89,1
	excès	173	194	151	124	123	117	118	118	70,7	89,1
Cr	défaut	0,058	0,051	0,049	0,048	0,047	0,045	0,044	0,043	0,041	0,041
	excès	0,058	0,051	0,049	0,048	0,047	0,045	0,044	0,043	0,041	0,041
K	défaut	69,4	69	60,1	62,3	61,1	60,2	59,9	61,2	50,1	56
	excès	69,4	69	60,1	62,3	61,1	60,2	59,9	61,2	50,1	56
Na	défaut	30,1	28,6	26,4	30	29,3	28,6	28,4	29,1	25,6	27,3
	excès	30,1	28,6	26,4	30	29,3	28,6	28,4	29,1	25,6	27,3
Pb	défaut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	excès	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Sr	défaut	0,785	0,846	0,666	0,528	0,538	0,509	0,505	0,509	0,3	0,383
	excès	0,785	0,846	0,666	0,528	0,538	0,509	0,505	0,509	0,3	0,383
Zn	défaut	0	0,018	0	0	0	0	0	0	0	0
	excès	0,003	0,018	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Cl	Incertit 5%	6,02	5,34	4,28	5,69	3,61	3,98	2,93	2,98	2,23	2,31
SO <sub>4</sub>	Incertit 5%	30,4	20,2	20,4	29,1	27,4	28,7	27,7	29	40,1	38,7

### RUISSELLEMENTS

	0,1	0,65	0,65	0,62	0,665	0,73	0,65	0,675	0,66	0,65
Volume recueilli (l)										
pH	9,98	8,42	8,04	8,62	8,94	7,71	9,38	7,86	9,04	8,88
Conductivité (µS/cm)	134,1	99,7	108,9	198,9	161,5	135,7	169,6	152,7	222	163

Métaux		mg/l									
Al	défaut	0,251	0,264	0	0	0	0	0	0	0	0
	excès	0,251	0,264	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Ca	défaut	5,67	4,13	3,14	4,30	2,73	2,04	2,34	2,00	2,25	2,06
	excès	5,67	4,13	3,14	4,30	2,73	2,04	2,34	2,00	2,25	2,06
Cr	défaut	0,061	0,049	0,045	0,048	0,043	0,040	0,040	0,037	0,037	0,035
	excès	0,061	0,049	0,045	0,048	0,043	0,040	0,040	0,037	0,037	0,035
K	défaut	16,4	13,2	13,4	28,5	21,9	20,4	24,9	24,4	38	26,8
	excès	16,4	13,2	13,4	28,5	21,9	20,4	24,9	24,4	38	26,8
Na	défaut	9,37	8,23	8,65	17,3	14	12,5	14,9	14,3	18,9	14,1
	excès	9,37	8,23	8,65	17,3	14	12,5	14,9	14,3	18,9	14,1
Pb	défaut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	excès	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Sr	défaut	0,033	0,031	0,027	0,030	0,025	0,023	0,024	0,023	0,025	0,024
	excès	0,033	0,031	0,027	0,030	0,025	0,023	0,024	0,023	0,025	0,024
Zn	défaut	0	0,005	0	0	0	0	0	0	0	0
	excès	0,003	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Cl	Incertit 5%	1,73	1,25	1,12	1,71	1,34	1,13	1,39	1,23	1,37	1,06
SO <sub>4</sub>	Incertit 5%	30,6	24,5	23,9	59,8	43,1	37,9	44,6	42,7	68,4	48,5

## SIMULATION DE LA PHASE CHANTIER

Matériau/Déchet :	Grave Ciment Témoin (GCT)		
Laboratoire	POLDEN	Date	janv-02

Hauteur	20,0	cm	Volume	75075	cm <sup>3</sup>
Longueur	71,5	cm	Masse humide	180	kg
Largeur	52,50	cm	Humidité		%
Surface	12468	cm <sup>2</sup>	Masse sèche	180	kg

Date	09/01/02	10/01/02	11/01/02	14/01/02	15/01/02	16/01/02	17/01/02	18/01/02	21/01/02	22/01/02
Temps de lixiviation										
Temps cumulé (h)										
Volume ajouté (l)	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4

### PERCOLATS

	09/01/02	10/01/02	11/01/02	14/01/02	15/01/02	16/01/02	17/01/02	18/01/02	21/01/02	22/01/02
Volume recueilli (l)	4,2	3,8	3,5	3,65	3,28	3,31	2,92	3,4	2,75	3,2
pH	12,39	12,3	12,57	12,19	12,22	12,47	12,39	12,37	12,55	11,8
Conductivité (µS/cm)	1469	4300	4470	3410	3560	3790	4230	4050	3540	3720

Métaux		mg/l									
Al	défaut	0,562	0,535	0,535	0,902	0,809	0,661	0,785	0,839	0,868	0,864
	excès	0,562	0,535	0,535	0,902	0,809	0,661	0,785	0,839	0,868	0,864
Ca	défaut	381	327	348	258	263	279	310	304	269	288
	excès	381	327	348	258	263	279	310	304	269	288
Cr	défaut	0,071	0,047	0,042	0,043	0,041	0,040	0,039	0,039	0,039	0,040
	excès	0,071	0,047	0,042	0,043	0,041	0,040	0,039	0,039	0,039	0,040
K	défaut	133	107	107	85,2	87,1	91,1	100	94,9	85,2	90,7
	excès	133	107	107	85,2	87,1	91,1	100	94,9	85,2	90,7
Na	défaut	54,5	43	43,7	40,5	40,5	42,1	45,7	43,3	39,5	40,6
	excès	54,5	43	43,7	40,5	40,5	42,1	45,7	43,3	39,5	40,6
Pb	défaut	0	0,019	0	0	0	0	0,012	0	0	0
	excès	0,004	0,019	0,004	0,004	0,004	0,004	0,012	0,004	0,004	0,004
Sr	défaut	1,870	4,620	1,680	1,280	1,31	1,38	1,54	1,47	1,26	1,32
	excès	1,870	4,620	1,680	1,280	1,31	1,38	1,54	1,47	1,26	1,32
Zn	défaut	0,068	0,07	0,012	0,015	0,011	0,01	0,017	0,011	0,004	0,004
	excès	0,068	0,07	0,012	0,015	0,011	0,01	0,017	0,011	0,004	0,004
Cl	Incertit 5%	10,7	6,34	5,17	3,9	2,38	2,2	1,98	1,66	1,6	1,19
SO <sub>4</sub>	Incertit 5%	45,9	16,8	11,9	15,8	13,4	12,6	12,7	13,3	15,7	16

### RUISSELLEMENTS

	09/01/02	10/01/02	11/01/02	14/01/02	15/01/02	16/01/02	17/01/02	18/01/02	21/01/02	22/01/02
Volume recueilli (l)	0,02	0,09	0,09	0,106	0,14	0,2	0,215	0,155	0,173	0,175
pH	8,72	8,40	8,06	8,70	7,36	7,24	7,62	8,15	8,18	8,08
Conductivité (µS/cm)	169,6	103,8	30,9	41,6	60,4	36,9	42,1	46,1	61	47,6

Métaux											
Al	défaut	0	0,710	0	0	0	0	0	0	0	0
	excès	0,230	0,710	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Ca	défaut	22,20	24,80	3,29	3,21	4,32	2,24	1,81	2,50	3,56	3,37
	excès	22,20	24,80	3,29	3,21	4,32	2,24	1,81	2,50	3,56	3,37
Cr	défaut	0,052	0,040	0,034	0,036	0,039	0,035	0,033	0,034	0,033	0,032
	excès	0,052	0,040	0,034	0,036	0,039	0,035	0,033	0,034	0,033	0,032
K	défaut	9,22	5,33	2,11	2,14	4,25	2,91	2,91	3,4	5,43	3,49
	excès	9,22	5,33	2,11	2,14	4,25	2,91	2,91	3,4	5,43	3,49
Na	défaut	5,27	2,26	1,2	1,62	4,01	2,6	3,61	2,99	3,99	2,94
	excès	5,27	2,26	1,2	1,62	4,01	2,6	3,61	2,99	3,99	2,94
Pb	défaut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	excès	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Sr	défaut	0,066	0,070	0,028	0,027	0,028	0,024	0,023	0,025	0,03	0,028
	excès	0,066	0,070	0,028	0,027	0,028	0,024	0,023	0,025	0,03	0,028
Zn	défaut	0	0,037	0	0	0	0	0	0	0	0
	excès	0,003	0,037	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Cl	Incertit 5%	1,92	0,257	0,152	0,164	0,359	0,403	2,24	0,45	0,586	0,413
SO <sub>4</sub>	Incertit 5%	42,4	7,85	2,3	3,96	7,62	10,7	9,55	14,3	22,1	16,9

## **Annexe 7**

### **Résultats expérimentaux de l'essai en lysimètres simulant le comportement de la grave-ciment en place**

<b>SIMULATION DU COMPORTEMENT DE LA GRAVE CIMENT EN PLACE</b>															
Matériau/Déchet :		Grave Ciment (GC)													
Laboratoire	POLDEN		Date janv-02												
Hauteur	0,2	m	Surface esposée		1										
Longueur	1	m	Volume		200									dm3	
Largeur	1	m	Masse estimée (d=2,3)		460									kg	
t0 : 03/12/01															
Date	17/12/01	01/01/02	16/01/02	30/01/02	15/02/02	02/03/02	17/03/02	01/04/02	17/04/02	02/05/02	18/05/02	02/06/02	17/06/02		
Temps de lixiviation	14	15	15	14	16	15	15	15	16	15	16	15	15		
Temps cumulé (h)	14	29	44	58	74	89	104	119	135	150	166	181	196		
Pluviométrie	1,4	?	11	16	41	23	25	5	9	55	21	52	32		
<b>PERCOLATS</b>															
Référence			PI2	PI3	PI4	PI5	PI6	PI7			PI10	PI11	PI12	PI13	
Volume recueilli (l)	0		0,34	5,38	2,95	5,3	2,38	5,2	0		5	5	5	3,6	
pH			7,15	11,75	11,81	11,3	10,44	10,53			11,27	11,4	10,9	7,9	
Conductivité (µS/cm)			63,2	1310	2283	889	533	358			883	1869	524	374	
<b>Métaux</b>															
		mg/l													
Al	défait	0		0,482	1,02	0,223	0,33	0,16			0,341	0,736	0,289	0,404	
	excès	0,0004		0,482	1,02	0,223	0,33	0,16			0,341	0,736	0,289	0,404	
Ca	défait	5,19		51,4	74,8	17,5	10	11,2			41,9	119	32,5	23,6	
	excès	5,19		51,4	74,8	17,5	10	11,2			41,9	119	32,5	23,6	
Cr	défait	0		0,012	0,023	0,009	0,01	0,007			0,011	0,015	0,007	0,01	
	excès	0,002		0,012	0,023	0,009	0,01	0,007			0,011	0,015	0,007	0,01	
K	défait	0,537		47,5	75	42,4	45,4	30,4			35,2	60,2	24,8	37,1	
	excès	0,537		47,5	75	42,4	45,4	30,4			35,2	60,2	24,8	37,1	
Na	défait	2,15		42,6	54,5	34	35,2	19,5			19,4	37,4	12,7	25,2	
	excès	2,15		42,6	54,5	34	35,2	19,5			19,4	37,4	12,7	25,2	
Pb	défait	0		0	0	0	0	0			0	0	0	0	
	excès	0,001		0,001	0,001	0,001	0,001	0,001			0,001	0,001	0,001	0,001	
Sr	défait	0,041		0,234	0,394	0,113	0,114	0,082			0,163	0,348	0,124	0,142	
	excès	0,041		0,234	0,394	0,113	0,114	0,082			0,163	0,348	0,124	0,142	
Zn	défait	0,011		0,011	0,009	0,061	0,008	0,006			0,006	0,02	0,015	0,021	
	excès	0,011		0,011	0,009	0,061	0,008	0,006			0,006	0,02	0,015	0,021	
Cl	incertit 5%	0,287		2,67	3,28	1,81	1,76	1,06			1,28	1,29	1	2,44	
S04	incertit 5%	1,91		59,6	66,6	57,2	63,2	54,4			90,5	89,6	63,4	110	
<b>RUISSELLEMENTS</b>															
Référence															
Volume recueilli (l)	0		0	0	0	0	PR6	PR7	0		0	PR10	PR11	PR12	PR13
pH							1,18	0,9			20	25	9,5	10,6	
Conductivité (µS/cm)							7,68	8,24			7,94	9,18	9,38	9,60	
<b>Métaux</b>															
		mg/l													
Al	défait						0	0			0	0,03	0	0,031	
	excès						0,0004	0,0004			0,0004	0,03	0,0004	0,031	
Ca	défait						13,1	17,4			6,32	7,95	5,63	17,2	
	excès						13,1	17,4			6,32	7,95	5,63	17,2	
Cr	défait						0	0,003			0	0	0,003	0,003	
	excès						0,002	0,003			0,002	0,002	0,003	0,003	
K	défait						22	3,75			13,9	15,7	4,16	31,7	
	excès						22	3,75			13,9	15,7	4,16	31,7	
Na	défait						13,9	30,5			6,44	7,89	2,33	24,5	
	excès						13,9	30,5			6,44	7,89	2,33	24,5	
Pb	défait						0	0			0	0	0	0	
	excès						0,001	0,001			0,001	0,001	0,001	0,001	
Sr	défait						0,061	0,065			0,04	0,049	0,043	0,07	
	excès						0,061	0,065			0,04	0,049	0,043	0,07	
Zn	défait						0,026	0,025			0,025	0,004	0,001	0,004	
	excès						0,026	0,025			0,025	0,004	0,001	0,004	
Cl	incertit 5%						0,93	1,22			0,26	0,469	0,214	2,3	
S04	incertit 5%						13,7	46,7			6,07	24,9	10,7	98,1	

## **Annexe 8**

### **Résultats expérimentaux des routes expérimentales**

### SUIVI ROUTE EXPERIMENTALE

Matériau :	Grave ciment contenant la boue référencée "pilote"
Date de début de suivi :	12/06/01

Teneur en eau résiduelle	5	%	Surface exposée	100	m <sup>2</sup>
Densité sèche après compactage	2,2		Volume	20	m <sup>3</sup>
Hauteur de grave	0,2	m	Masse estimée	44 000	kg

Date de prélèvement	19/06/01	06/07/01	19/07/01	03/08/01	23/08/01	04/09/01	10/10/01	13/11/01	28/03/02	29/04/02	27/06/02
Temps (jours)	7	24	37	52	72	84	120	154	289	321	380
Pluviométrie (m3)	2,13	1,26	7,05	3,62	4,3	2,84	12,15	7,87	33,04	3,66	manque mai et juin
Volume recueilli (m3)	1,39	0,05	3	1,52	0,89	0,43	1,82	1,25	3	0,28	0,22
Ratio L/S cumulé (l/kg)	0,03	0,03	0,10	0,14	0,16	0,17	0,21	0,24	0,30	0,31	0,31
pH	12,56	12,24	12,23	12,06	11,2	11,61	11,24	11,73	11,63	8,05	7,69
Conductivité (µS/cm)	10180	5140	4590	3630	1530	2111	1616	2367	1618	670	1023

Analyses	mg/l										
Al	0,399	0,474	0	0	0,206	0,121	0	0	0,161	0	0
Ca	598,6	288,6	388,03	313,43	134,54	22,13	211	255	161	116	222
Cr	0	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,033	0,038	0,023	0,033	0,038
K	382,88	170,19	63,06	87,91	99,03	72,98	97,2	94,6	48,8	58,6	65,2
Na	149,08	101,12	25,06	41,31	51,93	40,6	56	45,9	22,7	26,4	38,5
Pb	0,05	0,109	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sr	4,328	1,609	1,235	1,155	0,773	0,831	0,764	1,11	0,604	0,458	0,484
Zn	0	0,05	0	0	0	0	0,005	0,005	0,005	0,009	0,015
Cl	0	0	0	0	6,6	5,2	5,01	8,02	5,63	7,62	7,28
SO4	3	17	164	319	509	501	661	523	272	277	470

### SUIVI ROUTE EXPERIMENTALE

Matériau :	Grave ciment témoin référencée "témoin"
Date de début de suivi :	12/06/01

Teneur en eau résiduelle	5	%	Surface exposée	100	m <sup>2</sup>
Densité sèche après compactage	2,2		Volume	20	m <sup>3</sup>
Hauteur de grave	0,2	m	Masse estimée	44 000	kg

Date de prélèvement	19/06/01	06/07/01	19/07/01	03/08/01	23/08/01	04/09/01	10/10/01	13/11/01	28/03/02	29/04/02	27/06/02
Temps (jours)	7	24	37	52	72	84	120	154	289	321	380
Pluviométrie (m3)	2,13	1,26	7,05	3,62	4,3	2,84	12,15	7,87	33,04	3,66	manque mai et juin
Volume recueilli (m3)	1,46	0	3	1,62	1,16	0,35	2,32	2,76	3	1,23	0,74
Ratio L/S cumulé (l/kg)	0,03	0,03	0,10	0,14	0,16	0,17	0,23	0,29	0,36	0,38	0,40
pH	12,19		11,97	12,18	11,76	11,93	10,02		9,76	6,36	6,54
Conductivité (µS/cm)	4580		2900	4200	2042	2738	536		213	307	408

Analyses	mg/l										
Al	0,2281		0	0	0,3492	0,2016	2,16		0,258	0	0
Ca	340,3		261,76	333,6	114,9	186,21	66		28,4	41,3	56,9
Cr	0		0	0	0	0	0,009		0,004	0	0
K	94,87		43,52	70,34	78,42	73,36	29,2		8,73	12,7	15,2
Na	36,03		22,06	31,17	34,98	37,19	17		6,02	9,99	9,58
Pb	0		0	0	0	0	0		0	0	0
Sr	1,141		0,74	1,109	0,553	0,931	0,286		0,125	0,1	0,114
Zn	0		0	0	0	0	0,005		0,009	0,023	0,221
Cl	0		2,4	3,2	2,7	5,5	5,04		2,79	4,83	6,75
SO4	8,7		168	87	78	67	185		49,6	87,8	149