



# Evolution de la qualité de l'eau autour du remblayage sous la cité du Stock (commune de Thil)

Rapport final

**BRGM/RP-55730-FR**  
Janvier 2007

# Evolution de qualité de l'eau autour du remblayage sous la cité du Stock (commune de Thil)

Rapport final

**BRGM/RP-55730-FR**

Janvier 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 04-DEP-A04

**R. Fabriol**

Avec la collaboration de  
**H. Van Kriekingen et C. Degrelle (ENSG)**

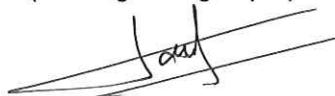
**Vérificateur :**

Nom : Laurent Vaute

Date : 28/09/07

Signature :

(Ou Original signé par)



**Approbateur :**

Nom : Michel Aguilleaume

Date : 28.09.2007

Signature :

(Ou Original signé par)



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

**Mots clés** : remblayage, coulis, cendres volantes, test de lixiviation, réservoir de Godbrange, mines de fer de Lorraine.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Fabriol R.** avec la collaboration de **Van Kriekingen, Degrelle C.** (2007) – Evolution de la qualité de l'eau autour du remblayage sous la cité du Stock (commune de Thil) – Rapport final. BRGM/RP-55730-FR, 94 p., 16 figures, 3 tableaux, 7 annexes.

## Synthèse

Suite à l'identification par GEODERIS, en juin 2002, d'une cavité résiduelle dans une zone foudroyée localisée sous la cité du Stock (commune de Thil, département de Meurthe-et-Moselle), la DRIRE a procédé à son comblement. La cavité se situant en amont du réservoir de Godbrange (AEP de Longwy), une étude préalable a permis d'évaluer l'impact de différents coulis à base de ciment et de cendres volantes sur la qualité de l'eau du réservoir (rapport BRGM/RP-52802-FR). Cette étude préalable comportait une caractérisation des cendres volantes de la centrale thermique EDF de La Maxe, des tests de lixiviation sur des coulis de différentes composition, une modélisation des transferts potentiels de contaminants dans le réservoir de Godbrange.

Le comblement de la cavité a été réalisé par la DRIRE de novembre 2004 à mars 2005. En septembre 2005, la DRIRE a fait réaliser des carottages de contrôle dans le remblayage. Le coulis utilisé pour le remblayage est un mélange proche du CEMIII 2-8 des tests préalables (20% de ciment CEMIII et 80% de cendres volantes). L'analyse en fluorescence X du matériau de remblayage carotté et du mélange CEMIII 2-8, a montré des teneurs semblables en As, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Se, Sr, Th, U, Zn et Zr. Cependant, l'observation des carottes de remblayage a mis en évidence une couche verte pluri-décimétrique, située à mi-hauteur du remblayage. Cette couche se distingue, en particulier, par une teneur très élevée en nickel (49 g/kg), alors qu'elle est inférieure à 0,08 g/kg pour les autres matériaux.

Le BRGM, dans le cadre de ses travaux au GISOS, a réalisé une série de tests de lixiviation en colonne sur le matériau carotté, selon le même protocole expérimental que les tests préalables (7,5 kg de matériau, 11 litres d'eau, faible débit de 300ml/j pendant 110 jours). L'objectif était d'évaluer l'effet d'un an de maturation du matériau sur la stabilité chimique des éléments potentiellement contaminants.

Les résultats obtenus montrent que le matériau carotté ne se comporte pas comme le CEMIII 2-8. Le sodium, le potassium, l'aluminium, le césium et le zinc sont moins relargués dans les lixiviats du matériau de remblayage, alors que le calcium, le magnésium, le sulfate, le bore, le baryum, l'antimoine et le strontium le sont plus fortement. Le chlore, le sélénium, le vanadium et le cuivre ont des concentrations proches pour les deux tests. Le sélénium en particulier, reste aussi disponible et mobile dans le remblayage que dans le CEMIII 2-8, la maturation pendant un an du coulis n'a pas amélioré son piégeage dans le matériau. Ces résultats contrastés suivant les éléments peuvent avoir deux origines, d'une part la composition du coulis utilisée pour le comblement n'est pas strictement identique au CEMII 2-8, et d'autre part, l'état de maturation des matériaux est différent (un an pour le matériau carotté et 90 jours pour le CEMII 2-8).

La couche verte à mi-hauteur du comblement a un comportement différent, les concentrations dans le lixiviat sont toujours plus faibles que celles des tests avec le

matériau gris. Ce matériau vert est chimiquement plus stable, il est plus dense et possède une meilleure résistance mécanique que tous les matériaux testés.

Dès le début du remblayage en octobre 2004 et pendant deux années consécutives, le BRGM a réalisée une surveillance régulière de la composition de l'eau des écoulements autour de la zone remblayée. Le dispositif de surveillance comporte un point en amont du remblayage, deux points localisés sous le remblayage et quatre points en aval autour de la zone. Les analyses chimiques des prélèvements d'eau montrent des concentrations toujours inférieures aux tests de lixiviation, ainsi qu'aux valeurs réglementaires pour l'alimentation en eau potable. Les concentrations ont été stables pendant les deux années avec une faible incidence des variations saisonnières. Le sélénium, dont la concentration au cours des tests de lixiviation dépasse la limite AEP (10 µg/l), a présenté un pic de faible ampleur (1,6 µg/l) et de faible durée pendant la mise en place du coulis. La concentration en sélénium a ensuite été toujours inférieure à la limite de quantification.

La composition chimique de l'eau des écoulements autour de la zone remblayée montre un relargage très faible en provenance du matériau, voire indétectable avec les méthodes analytiques utilisées, et toujours inférieures aux normes AEP pour tous les éléments analysés. Les causes en sont des écoulements rapides et une surface de contact avec le matériau de remblayage faible, qui ne permettent pas à l'eau de dissoudre le matériau. Après ces deux années de suivi régulier, il apparaît que le remblayage n'a pas modifié la qualité de l'eau du réservoir de Godbrange.

# Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Comportement du matériau de remblayage à la lixiviation</b> .....	<b>13</b>
2.1. LE MATERIAU DE REMBLAYAGE .....	13
2.1.1. Le coulis de remblayage .....	13
2.1.2. Les sondages carottés .....	13
2.1.3. La composition chimique des carottes .....	14
2.2. LES TESTS DE LIXIVIATION .....	16
2.2.1. Le dispositif expérimental .....	16
2.2.2. Le suivi de la composition de l'eau de lixiviation .....	17
2.3. RESULTATS ET INTERPRETATION DES TESTS DE LIXIVIATION .....	18
2.3.1. Test de lixiviation du matériau gris .....	18
2.3.2. Test de lixiviation du matériau de la couche verte .....	22
<b>3. La qualité de l'eau autour du remblayage</b> .....	<b>23</b>
3.1. LE DISPOSITIF DE SUIVI DE LA COMPOSITION DE L'EAU .....	23
3.1.1. Choix des points d'observation .....	23
3.1.2. Equipement des points d'observation .....	24
3.1.3. Prélèvements et analyses chimiques .....	26
3.1.4. Fonctionnement du dispositif de suivi .....	27
3.2. EVOLUTION CHIMIQUE DE L'EAU AUTOUR DU REMBLAYAGE .....	28
3.2.1. Evolution chimique de l'eau aux points d'observation .....	28
3.2.2. Comparaison des observations sur le site avec les tests de lixiviation du matériau carotté .....	29
<b>4. Conclusion</b> .....	<b>31</b>
<b>5. Bibliographie</b> .....	<b>33</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Localisation de Thil et du réservoir de Godbrange .....	9
Figure 2 : Contour en trait bleu de la cavité sous la cité du Stock à Thil (54). Les bâtiments en surface sont représentés avec un hachuré gris.....	11
Figure 3 : Position des carottages de contrôle dans le remblayage (d'après document Geoderis) .....	14
Figure 4 : Dispositif expérimental de lixiviation en laboratoire .....	16
Figure 5 : Evolution de la concentration en césium (Cs) dans les lixiviats en fonction du temps (C1, C2 et C3 : matériau de remblayage gris ; CV : couche verte dans le remblayage ; injection : eau du Dogger d'alimentation des colonnes ; CEM III 2-8 : coulis testé en préalable au remblayage).....	19
Figure 6 : Evolution de la concentration en bore (B) dans les lixiviats en fonction du temps (C1, C2 et C3 : matériau de remblayage gris ; CV : couche verte dans le remblayage ; injection : eau du Dogger d'alimentation des colonnes ; CEM III 2-8 : coulis testé en préalable au remblayage).....	19
Figure 7 : Evolution de la concentration en sélénium (Se) dans les lixiviats en fonction du temps (C1, C2 et C3 : matériau de remblayage gris ; CV : couche verte dans le remblayage ; injection : eau du Dogger d'alimentation des colonnes ; CEM III 2-8 : coulis testé en préalable au remblayage).....	20
Figure 8 : Evolution du rapport molaire Ca/SO <sub>4</sub> au cours des tests de lixiviation. (C1, C2 et C3 : matériau de remblayage gris; CV : couche verte dans le remblayage; CEM III 2-8 : coulis testé en préalable au remblayage) .....	20
Figure 9 : Indice de saturation du lixiviat par rapport au gypse. Le cercle rouge correspond à l'eau en contact avec le matériau gris dans la colonne C2 sans circulation pendant 16 jours. (résultats du calcul d'équilibre avec PHREEQC) .....	21
Figure 10 : Situation générale des points de suivi de la zone de remblayage .....	24
Figure 11: Position des points de suivi de la conductivité et de la température de l'eau, S1 à S5 .....	25
Figure 12 : Mise en place de la sonde de mesure de la conductivité de l'eau au point d'observation S3 .....	25
Figure 13 : Position des points de prélèvements d'échantillons d'eau S2 et S3 reliés à la pompe péristaltique PP par des tubes en boucle .....	26
Figure 14 : Prélèvement d'eau pour analyse chimique au point d'observation S5 .....	27
Figure 15 : Prélèvement d'eau pour analyse chimique au point d'observation S5 .....	29
Figure 16 : Evolution du rapport molaire Ca/SO <sub>4</sub> de l'eau aux points de suivi S1, S4 et S5 du remblayage.....	30

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Forages de contrôle réalisés en septembre 2005 à travers le remblayage à Thil.....	14
Tableau 2 : Analyse en fluorescence X du matériau CEMIII 2-8 des tests préalables et des échantillons BG6H et R1Hcv prélevés par carottage dans le remblayage.....	15
Tableau 3 : Remplissage des colonnes de lixiviation .....	17

## Liste des annexes

Annexe 1 - Normes de potabilité pour l'alimentation en eau potable .....	35
Annexe 2 - Composition chimique de l'eau au point S1 à Thil et de la source « La Bouillante » à Dieulouard .....	39
Annexe 3 - Composition chimique de l'eau des tests de lixiviation du matériau de remblayage .....	43
Annexe 4 - Composition chimique de l'eau du test de lixiviation de la couche verte .....	53
Annexe 5 - Tests de lixiviation en colonne du matériau carotté dans le remblayage.....	63
Annexe 6 - Composition chimique de l'eau aux points d'observation autour du remblayage de Thil.....	73
Annexe 7 - Evolution de la composition chimique de l'eau prélevée autour du remblayage .....	87



# 1. Introduction

En juin 2002, GEODERIS identifiait sous la cité du Stock (commune de Thil, département de Meurthe-et-Moselle), un secteur dont l'exploitation était donnée comme foudroyée, mais qui comportait encore des vides résiduels (figure 1 et 2).

La DRIRE Lorraine a fait procéder à l'étude de faisabilité d'un comblement de ces vides avec un coulis à base de ciment et de cendres volantes. Un des points particuliers abordé au cours de cette étude préalable a été le comportement chimique du remblayage en contact avec l'eau, car la zone remblayée se situe dans le périmètre de protection éloigné des captages d'Hussigny-Godbrange qui alimentent la ville de Longwy.

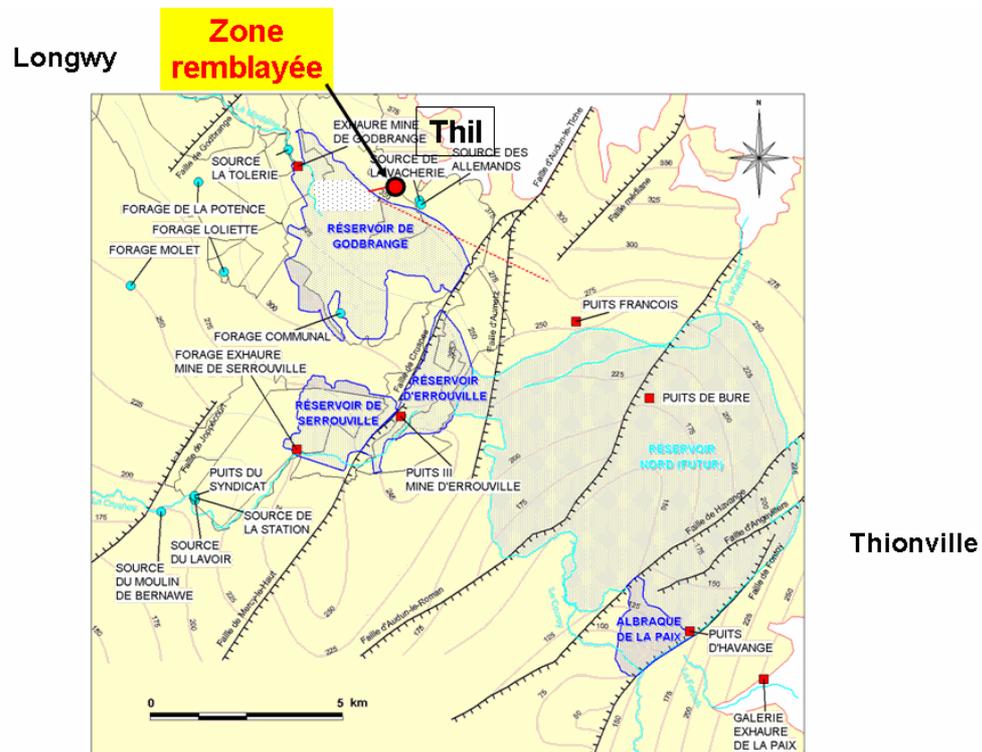


Figure 1 : Localisation de Thil et du réservoir de Godbrange

Cette étude préalable réalisée par le BRGM (rapport BRGM/RP-52802-FR) comportait trois volets principaux :

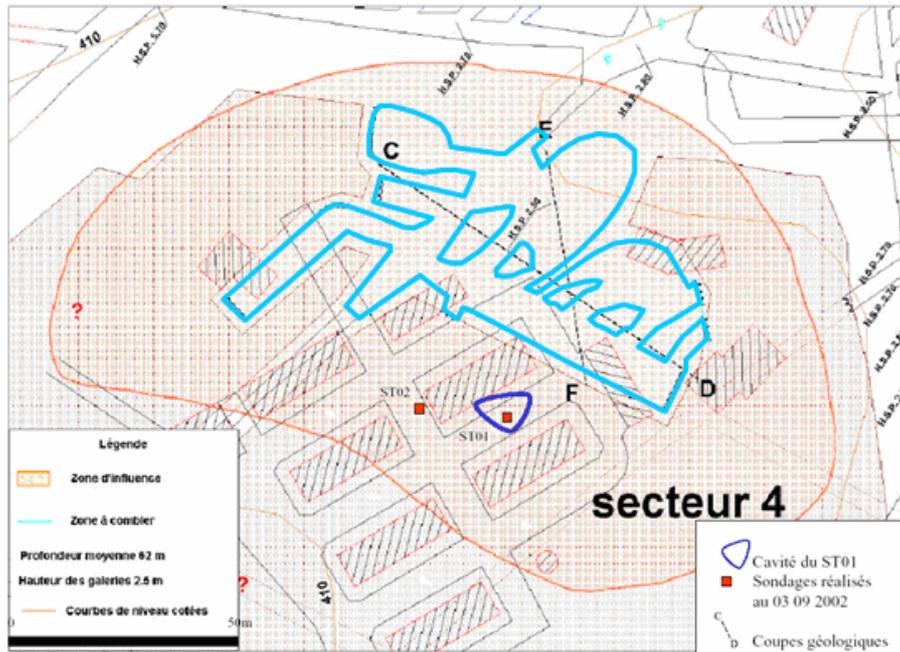
- la caractérisation du contenu en éléments contaminants des cendres volantes disponibles à la centrale thermique EDF de La Maxe,
- des essais de lixiviation en colonne (nommés « tests préalables » dans la suite du rapport) pour déterminer les cinétiques de relargage des contaminants par les différents types de coulis,
- la modélisation des écoulements dans le réseau de galeries pour déterminer les concentrations des contaminants dans le réservoir et au point de prélèvement pour l'AEP.

L'étude préalable avait montré qu'un coulis composé de 10 % de ciment CEM III 32,5 avec 90 % de cendres (noté CEMIII 1-9), provenant du parc N°4 de la centrale de La Maxe, présentait des caractéristiques acceptables pour ce type de remblayage.

La DRIRE a fait réaliser le remblayage de la cavité de novembre 2004 à mars 2005. La composition du matériau de remblayage a été modifiée suite aux contraintes de mise en œuvre sur le chantier et à la nécessité d'adapter la viscosité du matériau. La composition moyenne est proche du mélange à 20 % de CEMIII 32,5 et 80 % de cendres volantes (noté CEMIII 2-8).

En septembre 2005, la DRIRE a fait réaliser des sondages carottés dans le matériau de remblayage pour contrôler sa résistance mécanique. Ces échantillons ont permis de procéder à des tests de lixiviation selon la même procédure que celle de l'étude préalable. La réalisation de ce chantier pilote a donné l'opportunité de suivre *in situ* l'effet du remblayage sur les écoulements naturels dans la mine, et de vérifier ainsi la validité des conclusions issues de l'étude préalable.

Ce travail a été réalisé dans le cadre de ses travaux de recherche-développement du GISOS (Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains). Il a bénéficié du soutien financier de la DRIRE-Lorraine



**Figure 2 : Contour en trait bleu de la cavité sous la cité du Stock à Thil (54). Les bâtiments en surface sont représentés avec un hachuré gris.**



## **2. Comportement du matériau de remblayage à la lixiviation**

### **2.1. LE MATERIAU DE REMBLAYAGE**

#### **2.1.1. Le coulis de remblayage**

Les travaux de comblement ont débuté en novembre 2004, mais en raison de difficultés techniques rencontrées lors de la mise en place du coulis dans la cavité principale, la composition du coulis a été modifiée. La formule initialement prévue était de 144 kg de ciment et 818 kg de cendres volantes correspondant au CEMIII 1-9 des tests préalables, mais les essais de résistance mécanique réalisés par Solétanche-Bachy ne donnaient pas les résultats espérés. La formule a été ajustée de telle manière que la nouvelle composition atteigne une résistance à la compression après 90 jours comprise entre 2,5 et 3 MPa. La composition du coulis finalement utilisée pour le comblement de la cavité principale a été la suivante : 171 kg de ciment (C), 727 kg de cendres volantes équivalentes sèches (CV) et 619 L d'eau. Cette composition est finalement proche du coulis CEMIII 2-8 des tests de lixiviation préalables (rapport BRGM/RP-52802-FR). La proportion CV/C de 4,25 a diminué jusqu'à 3,17 vers la fin du comblement selon les comptes rendus de chantier.

Pendant le suivi du chantier, il a été constaté une forte variation de la teneur en eau des cendres volantes. Ceci a été pris en compte et la quantité d'eau ajoutée pour la fabrication du coulis a été ajustée en fonction de ce paramètre. De plus, pour éviter des pertes de coulis dans les fissures, le coulis a été ponctuellement rigidifié, par augmentation de sa teneur en silicates. À la date du 17/03/2005, le comblement de la cavité principale a été achevé et le total de coulis injecté s'élevait à 15000 m<sup>3</sup>.

#### **2.1.2. Les sondages carottés**

En septembre 2005, la DRIRE a fait réaliser 5 sondages carottés subhorizontaux ou inclinés (figure 3 et tableau 1) à travers le remblayage, afin de procéder à des contrôles de résistance mécanique. A la fin des travaux, des tuyaux ont été mis en place dans les forages inclinés, afin de drainer l'eau à travers le remblayage dans but de réaliser des prélèvements pour analyse chimique. Jusqu'à fin 2006, ces points de drainage sont toujours restés parfaitement secs.

Le surplus du matériau extrait par carottage a été mis à disposition du BRGM afin de procéder à des tests de lixiviation selon le protocole utilisé au cours des tests préalables (rapport BRGM/RP-52802-FR).

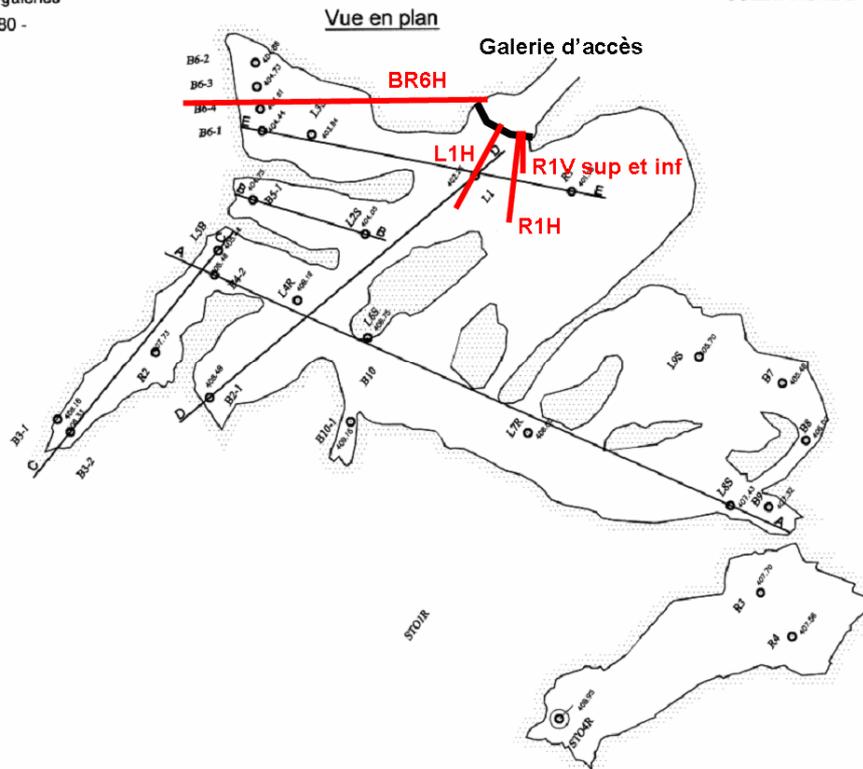


Figure 3 : Position des carottages de contrôle dans le remblayage (d'après document Geoderis)

Forage	longueur	pendage
L1H	12 m	5° descendant
BR6H	43 m	1° descendant
R1H	12 m	5° descendant
R1V sup	4 m	10° ascendant
R1V inf	4,5 m	10° descendant

Tableau 1 : Forages de contrôle réalisés en septembre 2005 à travers le remblayage à Thil.

### 2.1.3. La composition chimique des carottes

Un spectromètre de fluorescence X portable a été utilisé (Niton XL723S équipé de deux sources radioactives de <sup>109</sup>Cd et <sup>241</sup>Am) pour analyser les 15 éléments suivants : As, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, Sr, Th, U, Zn, Zr. Le même appareil avait été utilisé pour caractériser les cendres au cours de l'étude préliminaire (rapport BRGM/RP-52802-FR)

Le matériau de remblayage (CEMIII 2-8) des tests préalables a été analysé en même temps, afin permettre la comparaison avec les échantillons carottés. L'échantillon BR6H correspond au matériau de couleur grise qui compose la majorité du remblayage. L'échantillon R1H « cv » correspond à un niveau de couleur verte d'une trentaine de centimètres d'épaisseur, localisée à mi-hauteur du remblayage. Les mesures au spectromètre ont été réalisées sur des poudres pour les échantillons CEMIII 2-8 et BR6H, et directement sur la face plane d'une carotte fendue longitudinalement pour l'échantillon R1Hcv. Pour que la précision des mesures soit suffisante, le temps d'analyse a été de 30 minutes. Les résultats des analyses se trouvent dans le tableau 2.

Eléments	VCI us (mg/kg)	CEM III 2-8 (mg/kg)	BR6H (mg/kg)	R1Hcv (mg/kg)
As	37	24 ± 6	20 ± 7	<LQ ± 15
Co	240	315 ± 70	285 ± 75	320 ± 160
Cr	130	< 130	150 ± 95	680 ± 160
Cu	190	80 ± 30	84 ± 30	700 ± 150
Fe		15900 ± 220	16600 ± 230	22700 ± 350
Hg	7	7 ± 4	8 ± 4	220 ± 10
Mn		< 300	390 ± 190	500 ± 300
Ni	140	< 80	< 80	48600 ± 400
Pb	400	51 ± 6	61 ± 7	40 ± 10
Se		10 ± 4	< 5	40 ± 7
Sr		840 ± 8	1050 ± 10	370 ± 5
Th	10	60 ± 5	60 ± 5	90 ± 7
U		16 ± 2	27 ± 3	4 ± 2
Zn	9000	92 ± 14	96 ± 15	160 ± 50
Zr		177 ± 4	205 ± 5	45 ± 3

Tableau 2 : Analyse en fluorescence X du matériau CEMIII 2-8 des tests préalables et des échantillons BR6H et R1Hcv prélevés par carottage dans le remblayage.

Les échantillons CEMIII 2-8 et BR6H présentent des teneurs proches pour tous les éléments analysés. Par contre, l'échantillon R1Hcv de couleur verte, a des teneurs plus élevées en chrome (Cr), cuivre (Cu) et mercure (Hg) et nickel (Ni) dont la teneur est proche de 5%. Dans tous les cas, l'arsenic (As) est inférieur à la limite de détection et à la VCI usage sensible (VCI us).

## 2.2. LES TESTS DE LIXIVIATION

### 2.2.1. Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'une série de quatre colonnes de lixiviation (figure 4) comprenant :

- un tube en PVC de 20 cm de diamètre et un point de débordement à 50 cm de hauteur pour les colonnes C1, C2 et C3, et à 25 cm de hauteur pour la colonne C4,
- un piétement avec une embase en PVC avec un robinet de raccordement pour l'injection et un robinet de purge diamétralement opposé,
- un dispositif de filtration à la base de la colonne pour éviter un colmatage : le dispositif comprend une plaque ajourée en acier inoxydable et un tamis en acier inoxydable à la maille de 200 $\mu$ m,
- un passage latéral supérieur permettant l'évacuation et la récupération de l'eau,
- un couvercle en PVC afin d'éviter l'évaporation avec des passages pour les électrodes de mesure de la conductivité.

L'alimentation en eau des colonnes est réalisée à l'aide d'une pompe péristaltique à faible débit (pompe d'analyse IPC Ismatec®), à partir d'un réservoir en plastique de 25 litres. Le débit injecté est de 300 ml par jour pour les colonnes C1, C2 et C3, et de 125 ml par jour pour la colonne C4. La circulation de l'eau est ascendante afin que l'ensemble des morceaux de matériau soit immergé.



**Figure 4 : Dispositif expérimental de lixiviation en laboratoire**

Les échantillons utilisés ont été séchés à l'air, cassés en morceaux au marteau et tamisés à une granulométrie comprise entre 3,2 et 4 cm. Les colonnes ont été remplies avec les morceaux jusqu'au point de débordement de l'eau, elles ont ensuite été remplies d'eau jusqu'à débordement (tableau 3).

Colonne	Forage	Poids matériau (g)	Poids Eau Dogger (g)
C1	RIH	7525	10 615
C2	L1H	7419	10 511
C3	R1V Inf + R1V Sup + BR6H	7491	11 006
C4	R1Hcv	4410	4778

Tableau 3 : Remplissage des colonnes de lixiviation

L'eau utilisée pour les tests a été prélevée à la source « La Bouillante » à Dieulouard. Cette eau provient des calcaires du Dogger et présente une composition chimique proche de celle de l'eau circulant autour du remblayage à Thil (tableau 4 annexe 2).

Le temps de résidence moyen de l'eau dans les colonnes est de 36 jours. Le rapport massique eau/roche est de 1,43 en moyenne pour les colonnes C1 à C3 et de 1,08 pour la colonne C4. Cette différence est due au matériau R1Hcv de la couche verte plus dense que celui des colonnes C1 à C3. Ce matériau R1Hcv est résistant et difficile à casser au marteau, contrairement aux autres échantillons facilement cassés à la main.

### 2.2.2. Le suivi de la composition de l'eau de lixiviation

L'eau pour analyse est prélevée au point de débordement de la colonne. 300 ml d'eau sont recueillis dans un flacon en un jour pour les colonnes C1, C2 et C3 et en deux jours pour les prélèvements de la colonne C4. L'eau est ensuite filtrée à 0,45 µm (filtre en acétate de cellulose Sartorius). Chaque prélèvement comprend deux flacons de 100 mL en polypropylène : l'un est destiné au dosage des anions, l'autre, destiné au dosage des cations est acidifié avec HNO<sub>3</sub> supra pur (pH de 2 environ). Cette précaution évite toute précipitation pendant la période de stockage avant analyse. Le pH est mesuré à chaque prélèvement, au moyen d'une électrode calibrée WTW SenTix 41 et un pH-mètre WTW pH/Cond 340i.

Les analyses ont été réalisées par le laboratoire « Analyse chimique des eaux et micropolluants métalliques » du BRGM selon les méthodes suivantes :

- $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$  par la méthode potentiométrique selon la norme NF EN ISO 9963-1,
- Ca, Mg, Na, K, Fe et Si par analyse ICP-spectrométrie d'émission selon la norme NF EN ISO 11885,
- chlorures, nitrates exprimés en  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  par chromatographie ionique (DIONEX) selon la norme NF EN ISO 10304-1 pour les eaux faiblement contaminées et la norme NF EN ISO 10304-2 pour les eaux fortement contaminées,
- Al, As, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, U, V, Zn, Zr, par ICP/MS,
- Hg par absorption atomique selon la norme NF EN 1483.

Le premier prélèvement a été réalisé à la fin de la période en système fermé, après 16 jours. Les prélèvements suivants ont été effectués à 26, 40, 63 et 110 jours, conformément à la procédure utilisée pour les tests préalables.

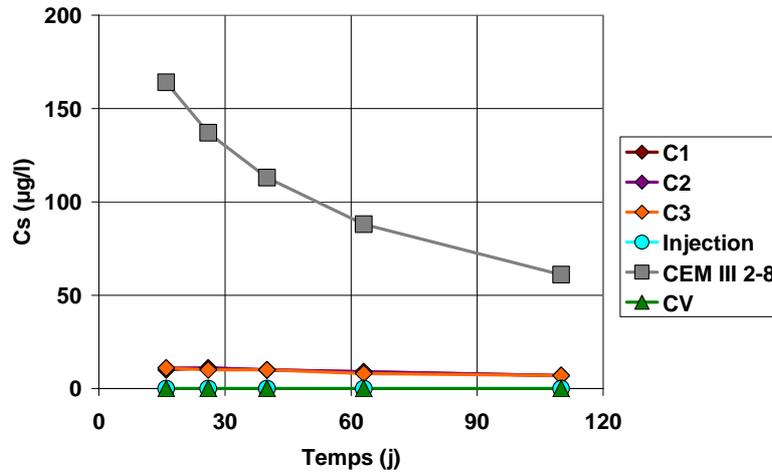
## 2.3. RESULTATS ET INTERPRETATION DES TESTS DE LIXIVIATION

L'ensemble des résultats d'analyse chimique se trouvent en annexe 3 pour les colonnes 1 à 3, et en annexe 4 pour la couche verte. Les données ont été reportées sur des graphiques en fonction du temps, en annexe 5.

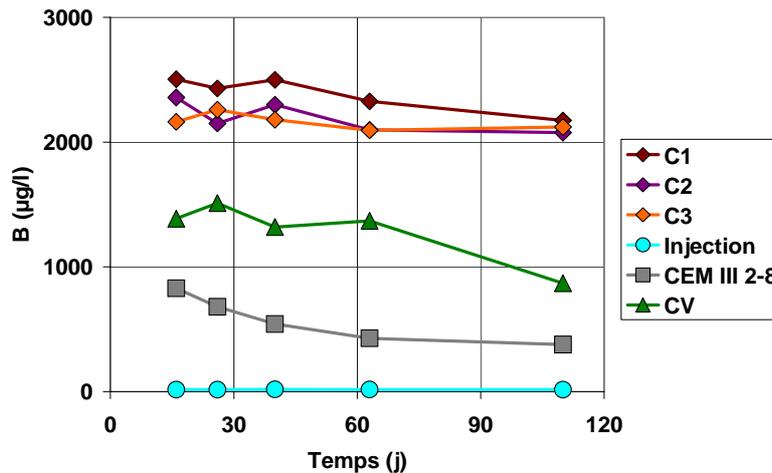
### 2.3.1. Test de lixiviation du matériau gris

Les éléments en trace ont été regroupés en trois catégories pour faciliter la comparaison avec le test préalable sur le coulis CEMIII 2-8 :

- les éléments en trace dont la concentration est inférieure au seuil de quantification pour tous les tests de lixiviation réalisés : As, Cd, Co, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sn, U, Zr
- Les éléments en trace dont la concentration est différente de celle observée à 90 jours pendant les tests préalables. L'aluminium (Al), le césium (Cs, figure 5) et le zinc (Zn) ont une concentration notablement plus faible dans le lixiviât des tests réalisés sur le matériau de remblayage carotté. A l'inverse, le bore (B, figure 6), le baryum (Ba), le cuivre (Cu), l'antimoine (Sb), et le strontium (Sr) présentent des concentrations plus élevées. Le vanadium (V) a un comportement particulier, dont l'origine n'est pas connue.

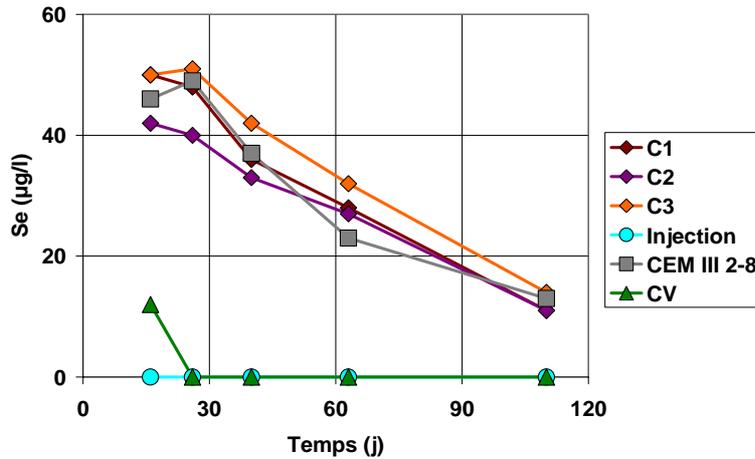


**Figure 5 : Evolution de la concentration en césium (Cs) dans les lixiviats en fonction du temps (C1, C2 et C3 : matériau de remblayage gris ; CV : couche verte dans le remblayage ; injection : eau du Dogger d'alimentation des colonnes ; CEM III 2-8 : coulis testé en préalable au remblayage)**



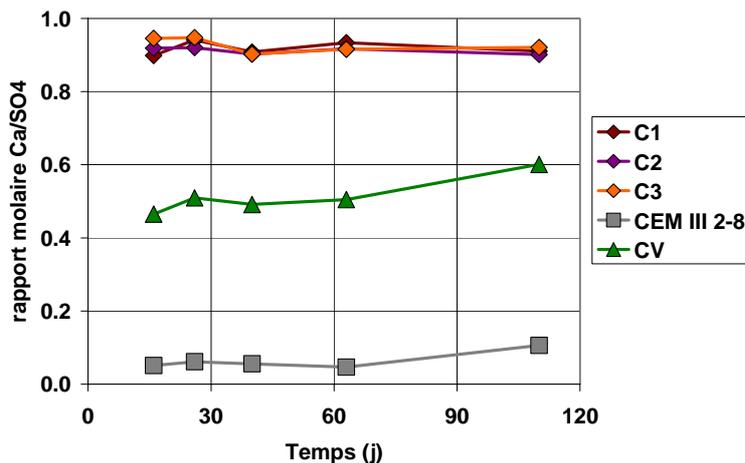
**Figure 6 : Evolution de la concentration en bore (B) dans les lixiviats en fonction du temps (C1, C2 et C3 : matériau de remblayage gris ; CV : couche verte dans le remblayage ; injection : eau du Dogger d'alimentation des colonnes ; CEM III 2-8 : coulis testé en préalable au remblayage)**

- Les éléments en trace dont le comportement est équivalent pendant les tests préalables et les tests sur le matériau de remblayage carotté : sélénium (Se), vanadium (V), cuivre (Cu). Le sélénium (figure 7) présente une concentration supérieure au seuil de 10 µg/l de la norme pour l'eau potable pour les deux tests. Pour cet élément, le potentiel de contamination du remblayage est identique un an après la mise en place du coulis.



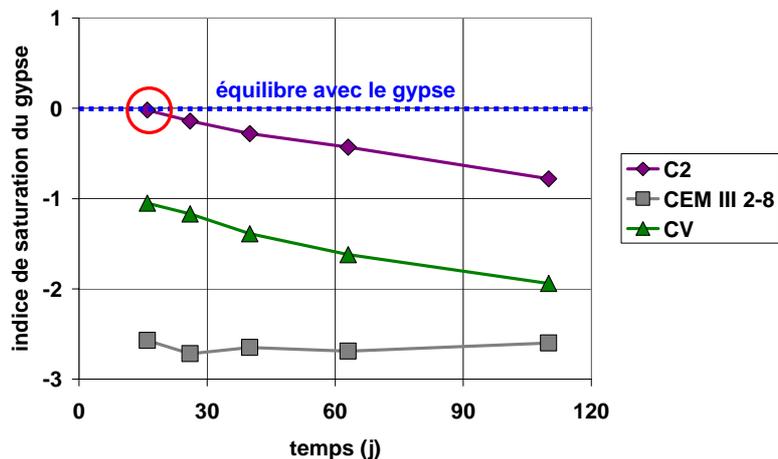
**Figure 7 : Evolution de la concentration en sélénium (Se) dans les lixiviats en fonction du temps (C1, C2 et C3 : matériau de remblayage gris ; CV : couche verte dans le remblayage ; injection : eau du Dogger d'alimentation des colonnes ; CEM III 2-8 : coulis testé en préalable au remblayage)**

Parmi les éléments majeurs, le chlorure (Cl) a le même comportement dans les deux séries de tests. Le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le sodium (Na), le potassium (K), et le sulfate (SO<sub>4</sub>) ont un comportement qui diffère entre le matériau du remblayage et le CEMIII 2-8. Le sodium et le potassium sont en concentrations plus faibles dans le lixiviat du matériau de remblayage, contrairement à Ca, Mg et SO<sub>4</sub> qui sont nettement plus concentrés. En particulier, on observe que le rapport molaire de Ca et SO<sub>4</sub> est proche de 1 dans le test sur le matériau carotté (figure 8). Ceci indique que ces deux éléments sont libérés en quantité équivalente au cours de la lixiviation, probablement par dissolution d'un même minéral.



**Figure 8 : Evolution du rapport molaire Ca/SO<sub>4</sub> au cours des tests de lixiviation. (C1, C2 et C3 : matériau de remblayage gris ; CV : couche verte dans le remblayage ; CEM III 2-8 : coulis testé en préalable au remblayage)**

Un calcul thermodynamique de l'état de saturation de l'eau a été réalisé avec le logiciel PHREEQC (v2.13.2). Les résultats reportés dans la figure 9 montrent qu'après les 16 premiers jours en système fermé sans écoulement, l'eau en contact avec le matériau dans la colonne présente un indice de saturation proche de zéro par rapport au gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ). Un indice de saturation de zéro correspond à l'équilibre, un indice inférieur à zéro correspond à une eau sous-saturée vis-à-vis du gypse et capable de le dissoudre. Ce calcul indique que l'origine du calcium et du sulfate pourrait être du gypse encore présent dans le matériau après un an de maturation. Sur cette hypothèse, la teneur en gypse dans le matériau serait d'environ 0,7% en poids, à partir des quantités lixiviées pendant la durée des tests. Le gypse est un retardateur de la prise du ciment. La présence de gypse dans le matériau après un an de maturation n'est pas habituelle, celui-ci devrait avoir été complètement consommé pendant la prise du coulis (formation d'ettringite). Cette hypothèse pourrait être confirmée par une détermination directe en diffraction RX qui peut cependant être délicate compte tenu de la faible teneur. On notera que dans le test préalable, le lixiviat CEMIII 2-8 est loin de l'équilibre avec le gypse après 90 jours de maturation, ce qui est conforme avec l'évolution normale d'un ciment.



**Figure 9 : Indice de saturation du lixiviat par rapport au gypse. Le cercle rouge correspond à l'eau en contact avec le matériau gris dans la colonne C2 sans circulation pendant 16 jours. (résultats du calcul d'équilibre avec PHREEQC)**

Ces différences de comportement entre les tests préalables et les tests sur le matériau de remblayage carotté peuvent avoir deux origines :

- les coulis n'ont pas exactement la même composition, en particulier les cendres volantes, ce qui a pour conséquence un relargage différent,
- Les différences de maturation des coulis – 90 jours pour le test préalable et 1 an pour le matériau du remblayage – induisent un comportement chimique différent. Rappelons que le ciment est un assemblage de minéraux qui, mélangé à l'eau, évolue pendant environ un an (maturation). Les cendres volantes réagissent également avec le ciment au cours de la prise.

Par rapport aux tests préalables sur le CEMIII 2-8, le bore, le baryum et le strontium sont en concentration 5 à 10 fois plus élevées dans le lixiviat du matériau de remblayage. Parmi ces éléments, seul le bore est au dessus de la valeur de potabilité (1000µg/l). Le sélénium qui dépassait la norme dans les tests préalables a un comportement semblable dans le matériau de remblayage, il reste disponible et lixiviable en quantité équivalente. Après un an de maturation, le matériau du remblayage n'apparaît pas chimiquement plus stable que le matériau CEMIII 2-8 testé au préalable.

### **2.3.2. Test de lixiviation du matériau de la couche verte**

Le matériau de la couche verte a un comportement notablement différent de celui du matériau gris. Sa teneur très élevée en nickel (49 mg/kg) ne se traduit pas par une concentration élevée dans le lixiviat (inférieure à la limite de quantification, annexe 4). Les concentrations dans le lixiviat de la couche verte sont toujours plus faibles que celles du matériau gris, à l'exception du nitrate et de la silice (graphiques annexe 5). Par rapport au test préalable sur le CEMIII 2-8, les concentrations dans le lixiviat sont plus faibles ou équivalentes, sauf pour le nitrate et le bore. Il apparaît donc que le matériau de la couche verte est chimiquement le plus stable de tous les matériaux testés.

On notera également que le rapport molaire Ca/SO<sub>4</sub> dans le lixiviat de la couche verte est de 0,5 et qu'il est sous-saturé par rapport au gypse, contrairement au test sur le matériau gris (figure 8 et 9). Enfin, ce matériau vert n'est pas friable comme le matériau gris et il est difficile à casser au marteau. Il a été observé, en calculant le rapport massique eau / roche dans les colonnes de lixiviation, que la densité du matériau vert est plus élevée que le matériau gris (Cf. § 2.2.1)

## 3. La qualité de l'eau autour du remblayage

### 3.1. LE DISPOSITIF DE SUIVI DE LA COMPOSITION DE L'EAU

#### 3.1.1. Choix des points d'observation

Initialement, cinq points d'observation étaient prévus autour du remblayage, notés S1 à S5 sur la figure 10. Ces points ont été équipés de façon à faire des prélèvements d'eau pour analyses chimiques. Chaque point est également équipé d'une sonde autonome de mesure de la conductivité et de température de l'eau.

Le point S1 situé à 30 m au nord du remblayage, permet de suivre la qualité de l'eau qui s'écoule par une fissure au toit de la galerie. Le débit est de l'ordre de 0,2 l/s et l'eau s'écoule ensuite au sol vers la cavité remblayée. On peut considérer que cette eau est représentative de l'eau circulant dans les terrains au-dessus du remblayage.

Les deux points S2 et S3 sont situés à la base du remblayage, dans la partie sud-ouest de la zone. Ils avaient pour objectif de suivre la composition de l'eau qui pourrait circuler autour ou à travers le remblayage.

Le point S4 est localisé dans une galerie à l'ouest du remblayage, il correspond à une arrivée d'eau provenant d'une galerie secondaire orientée vers le remblayage.

Le point S5 se situe à l'est du remblayage dans une galerie qui longe la zone foudroyée. L'écoulement y est généralement très faible. Ce point se situe toujours au-dessus du niveau du réservoir.

Deux points complémentaires S4M et S4R de prélèvement d'échantillons d'eau sont localisés en aval de S4 dans la galerie à l'ouest du remblayage. S4M correspond à une arrivée d'eau provenant d'une galerie secondaire orientée vers le remblayage. Le point S4R se situe proche du plan d'eau du réservoir de Godbrange. En période de hautes eaux, le niveau du réservoir atteint le point coté 338,8 m sur la paroi de la galerie. En période de basses eaux, le niveau du réservoir s'abaisse au-delà de la zone foudroyée (en bas à gauche de la figure 10) et n'est plus accessible.

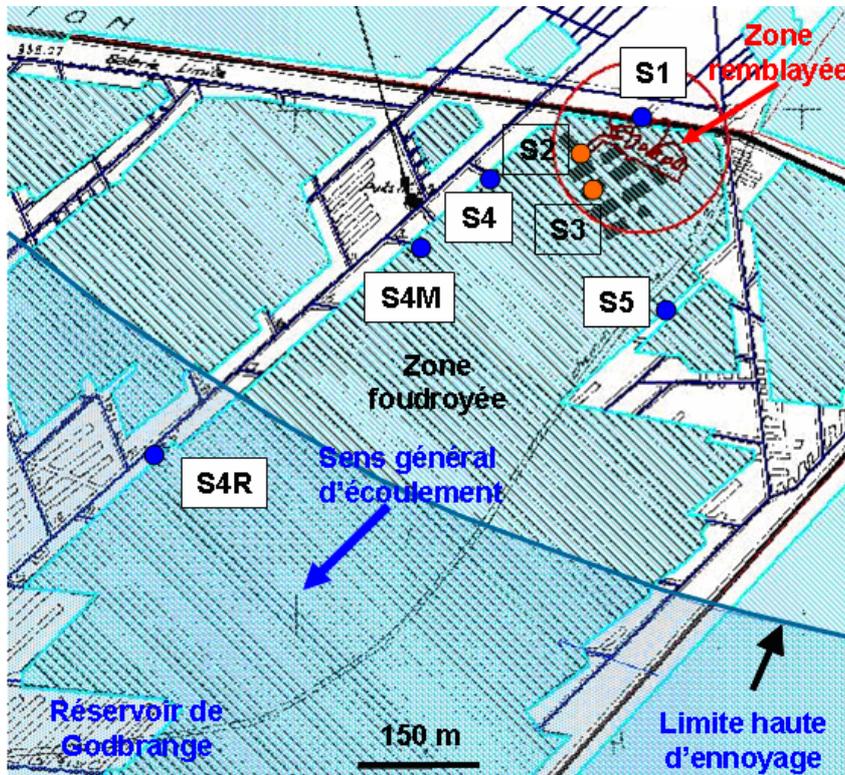
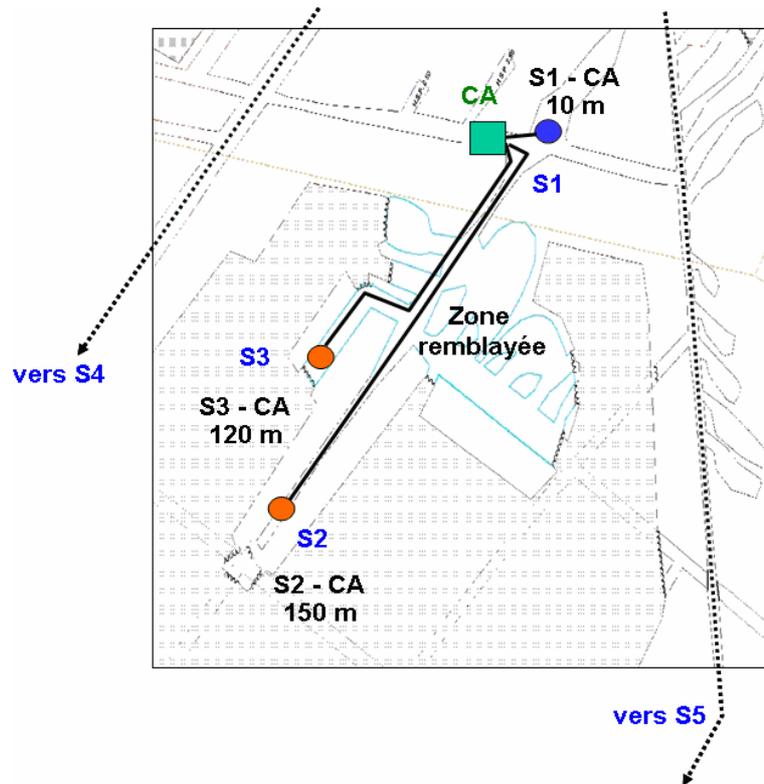


Figure 10 : Situation générale des points de suivi de la zone de remblayage

### 3.1.2. Equipement des points d'observation

- Les points S1, S2, S3 ont été équipés chacun d'une sonde de conductivité IRIS WQ301 (0-5000 $\mu$ S/cm) et d'une sonde de température IRIS WQ101 reliées à une centrale d'acquisition OSIRIS munie d'un multiplexeur 16 voies. S3 est relié par des câbles de 120m à la station d'acquisition, S4 par des câbles de 150m.
- Les points S4 et S5 ont été équipés des mêmes sondes de conductivité et de température reliées à une centrale IRIS MADOSIX autonome.

Les câbles de liaison entre la centrale d'acquisition et les sondes S2 et S3 ont été protégés dans des tubes en PVC disposés avant le remblayage (figure 11 et 12). Les sondes ont été protégées dans un coffret pour éviter le contact direct avec le coulis.



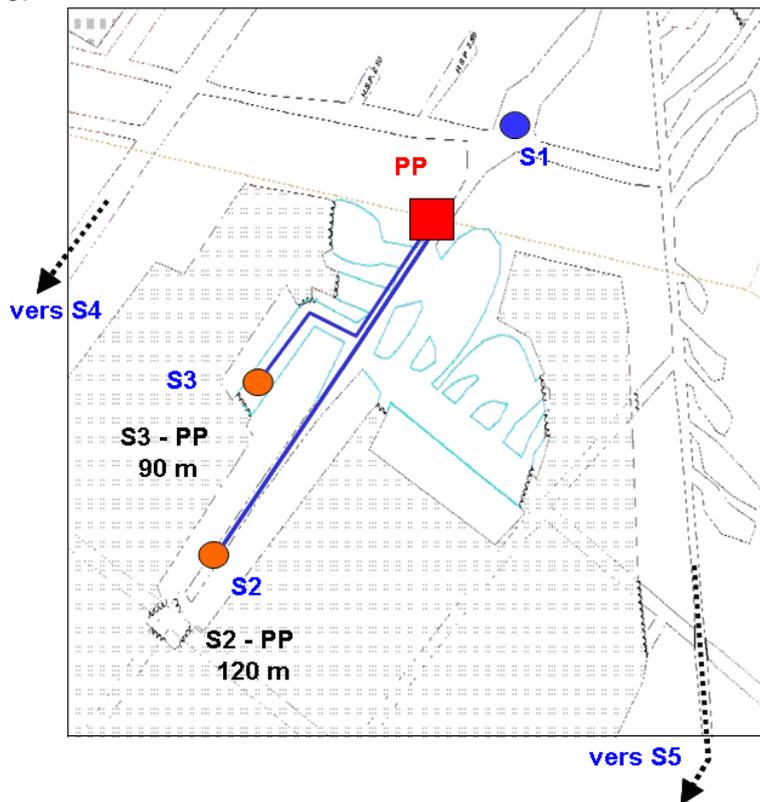
**Figure 11:** Position des points de suivi de la conductivité et de la température de l'eau, S1 à S5



**Figure 12 :** Mise en place de la sonde de mesure de la conductivité de l'eau au point d'observation S3

### 3.1.3. Prélèvements et analyses chimiques

- Les points S1, S4, S4M, S4R et S5 (figure 14) à écoulement gravitaire sont accessibles directement et n'ont pas fait l'objet d'un dispositif de prélèvement spécifique.
- Les points S2 et S3 ont été reliés par une boucle en tube Rilsan® à une pompe péristaltique située en dehors du remblayage (PP sur la figure 13). La boucle a été protégée dans le même tube PVC que les câbles pour des sondes de conductivité et de température.



**Figure 13 : Position des points de prélèvements d'échantillons d'eau S2 et S3 reliés à la pompe péristaltique PP par des tubes en boucle**

L'eau prélevée est filtrée à 0.45  $\mu\text{m}$  à l'aide d'une seringue en polycarbonate équipée d'un filtre en acétate de cellulose (Sartorius). Chaque prélèvement comprend deux flacons de 125 ml en polypropylène : l'un est destiné au dosage des anions, l'autre, destiné au dosage des cations et acidifié avec  $\text{HNO}_3$  suprapur vers un pH de 2. Cette précaution évite toute précipitation pendant la période de stockage avant analyse. Le pH est mesuré à chaque prélèvement, à l'aide d'une électrode calibrée WTW SenTix 97/T et un pHmètre WTW Multiline P4 préalablement calibré.

Les analyses ont été réalisées par le laboratoire "Analyse chimique des eaux et micropolluants métalliques" du BRGM (Cf. § 2.2.2)



*Figure 14 : Prélèvement d'eau pour analyse chimique au point d'observation S5*

### **3.1.4. Fonctionnement du dispositif de suivi**

Les points d'observation S1, S4, S4M, S4R et S5 ont permis un suivi régulier de la composition chimique de l'eau autour de la zone de remblayage. L'observation a débuté avant la mise en place du coulis, et ensuite pendant deux années consécutives.

Les sondes S2 et S3 avaient pour objectif le suivi de l'évolution chimique de l'eau sous le remblayage. Le dispositif de protection des câbles et des sondes S2 et S3 s'est avéré insuffisant, et il n'a pas été possible d'acquérir de données. En particulier, les câbles et tubes de prélèvement reliant les sondes S3 à la centrale d'acquisition ont été sectionnés au cours de la réalisation du forage B4 d'injection du coulis. Cet incident a été signalé par le foreur et transcrit dans le compte-rendu de chantier du 15/11/2004. Par ailleurs, l'origine du dysfonctionnement des sondes et du préleveur S3 n'est pas connue.

Les forages des carottages inclinés dans le remblayage ont été équipés d'un tube de sortie afin de drainer l'eau à travers le remblayage. Aucun écoulement n'a été observé à l'extrémité des ces tuyaux après 6 mois d'observation.

## 3.2. EVOLUTION CHIMIQUE DE L'EAU AUTOUR DU REMBLAYAGE

### 3.2.1. Evolution chimique de l'eau aux points d'observation

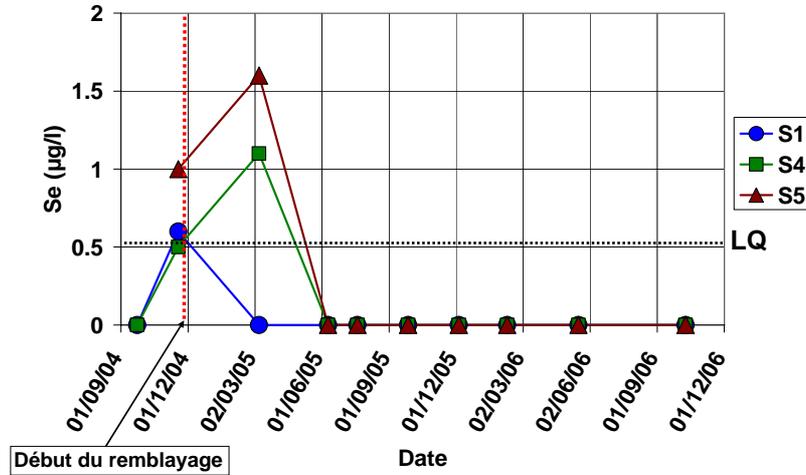
Les résultats des analyses sont rassemblés dans les tableaux de l'annexe 6. Seuls les résultats des points d'observations S1, S4 et S5, dont les chroniques sont complètes, sont reportés dans les diagrammes de l'annexe 7.

Le pH mesuré en S4 et S5 varie entre 7 et 8, il est très proche de celui de l'eau d'entrée S1. Le pH présente une variation saisonnière avec des valeurs basses en automne et des valeurs plus élevées au printemps. Parmi toutes les espèces dosées, seul HCO<sub>3</sub> présente une variation du même type, mais inversée à cause de l'équilibre du système carbonaté.

Les concentrations mesurées dans l'eau pour les espèces majeures, Na, K, Ca, Mg, SO<sub>4</sub>, Cl, NO<sub>3</sub>, ne montrent pas de tendance nette à l'augmentation ou à la diminution en fonction du temps, pendant les deux ans de la période de surveillance. D'une façon générale, ces éléments sont plus concentrés en S4 et S5 par rapport à l'eau S1 s'écoulant du toit de la galerie. Une exception cependant, pour NO<sub>3</sub> dont la concentration diminue en S4 et S5 par rapport à S1, diminution qui pourrait être le résultat d'une réduction de NO<sub>3</sub> comme cela a été observé pour tous les tests en colonnes. On notera que S5 est généralement plus concentré en Na, Ca, et Cl que le point S4.

Parmi les 22 éléments en traces dosés, seul le bore (B), le baryum (Ba), le sélénium (Se), le strontium (Sr) présentent des concentrations supérieures aux limites de quantification avec les méthodes utilisées. Mais ces concentrations sont toujours inférieures aux valeurs limites pour l'utilisation AEP. On notera que le bore est toujours en quantité plus faible dans l'eau en aval du remblayage que dans l'eau en S1. Or les tests sur le matériau de remblayage (cf § 2.3.1 et figure 6) ont montré que la concentration en bore des lixiviats était supérieure à 2g/l, ce qui pourrait signifier que le remblayage est peu lessivé par l'eau qui s'écoule vers S4 et S5. Le baryum ne présente pas de différence de concentration entre l'aval et l'amont du remblayage.

Le sélénium (Se) est le seul élément en trace qui présente un pic de concentration de faible amplitude à la période de mise en place du remblayage (figure 15). Cependant celui-ci est peu marqué par rapport à la limite de quantification (0,5 µg/l) et inférieur à la limite de 10 µg/l pour l'utilisation pour l'AEP.



**Figure 15 : Prélèvement d'eau pour analyse chimique au point d'observation S5**

Les concentrations des éléments Al, As, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Sb, Sn, U, V, Zn et Zr sont égales ou inférieures aux limites de quantification. Les concentrations de ces éléments ne sont donc pas reportées sous forme de graphique. Le plomb présente des valeurs inférieures à la limite de quantification, sauf pour deux dates dont la répartition dans le temps n'exclut pas un artéfact de prélèvement ou d'analyse.

En conclusion, la différence de composition entre l'eau en amont du remblayage (S1) et l'eau en aval (S4 et S5) est faible et l'influence du matériau de remblayage sur la qualité de l'eau apparaît non significative. Enfin, les concentrations en métaux lourds sont toujours très inférieures aux valeurs limites d'utilisation pour l'AEP.

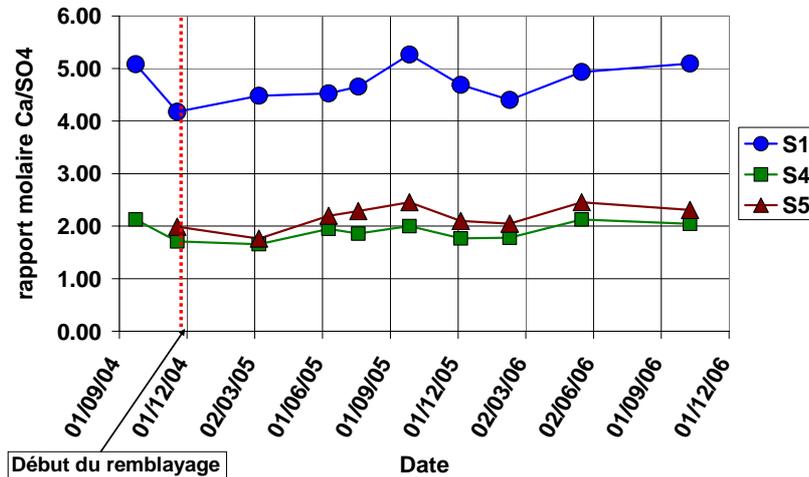
### 3.2.2. Comparaison des observations sur le site avec les tests de lixiviation du matériau carotté

Le pH mesuré dans la mine en S4 et S5 est proche de la neutralité avec des valeurs de 7,5. Il est très inférieur au pH basique entre 9 et 10,5 pour les tests sur les carottes du remblayage.

Les concentrations en sodium, potassium et calcium mesurées dans l'eau aux points S4 et S5 sont toujours inférieures à celles des tests de lixiviation, mais proche de l'eau S1 en amont du remblayage. Au contraire pour le magnésium, la concentration de 25 mg/l mesurée aux points S4 et S5 est nettement plus élevée qu'en S1, et se rapproche du maximum obtenu (30 à 40 mg/l) avec les tests sur le matériau carotté du remblayage.

La concentration en chlorure est différente entre les points S4 et S5. Pour S4, la concentration de 20 mg/l est inférieure à celle des différents tests de lixiviation, alors qu'en S5 la concentration d'environ 80 mg/l est proche des valeurs les plus élevées obtenues au cours des lixiviations.

La concentration en sulfate aux points S4 et S5, entre 100 et 150 mg/l, est inférieure aux concentrations dans les lixiviats du matériau de remblayage qui atteignent 600mg/l. Le rapport molaire Ca/SO<sub>4</sub> est proche de 2 pour S4 et S5, et de 5 pour S1 (figure 16). Ces valeurs sont différentes de la valeur de 1 observée pour les lixiviats du matériau de remblayage (figure 8).



**Figure 16 : Evolution du rapport molaire Ca/SO<sub>4</sub> de l'eau aux points de suivi S1, S4 et S5 du remblayage**

Comme indiqué dans le paragraphe précédent 3.2.1, les concentrations en éléments en trace (Al, As, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Sb, Sn, U, V, Zn et Zr) au point d'observation S1, S4 et S5 sont inférieures aux limites de quantification. Quatre éléments en trace ont un comportement qui diffère des tests de lixiviation : le bore est 30 à 50 fois moins concentré dans l'eau aux points de suivi que dans les tests de lixiviation, le baryum 3 à 5 fois moins, le sélénium 30 fois moins et le strontium 10 fois moins.

L'ensemble des comparaisons précédentes montre que les concentrations dans l'eau aux points de suivi autour du remblayage sont toujours inférieures à celles obtenues au cours des tests de lixiviation du matériau de remblayage carotté. Cette différence peut avoir deux causes :

- l'eau qui circule autour du remblayage a un temps de contact plus court et une surface d'échange avec le matériau plus faible, comparés aux tests de lixiviation où le temps de résidence moyen est de 36 jours et le rapport massique eau/roche de 1,43

l'eau qui est échantillonnée aux points de suivi S4, S4M et S5 n'entre pas en contact avec le remblayage. Cette hypothèse ne peut pas être écartée, mais elle est peu probable pour le point S4 où l'on observe la présence de coulis provenant de fuites qui se sont produites lors de la mise en place du remblayage.

## 4. Conclusion

Le comblement de la cavité sous la cité du Stock (Thil), mené à bien par la DRIRE Lorraine de novembre 2004 à mars 2005, a été accompagné d'une série de tests de lixiviation sur le matériau carotté, et d'un suivi de la qualité de l'eau autour de la zone pendant deux années.

L'analyse en fluorescence X du matériau de remblayage et du mélange CEMIII 2-8 (20% de ciment et 80% de cendres volantes) du test préalable, a montré des teneurs semblables en As, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Se, Sr, Th, U, Zn et Zr. L'observation des carottes a mis en évidence une couche verte pluri-décimétrique, située à mi-hauteur du remblayage. Cette couche se distingue par une teneur très élevée en nickel (49 g/kg), alors qu'elle est inférieure à 0,08 g/kg pour les autres matériaux.

Les tests de lixiviations réalisés sur le matériau gris carotté ont été comparés au test sur le coulis CEMIII 2-8. Le sodium, le potassium, l'aluminium, le césium et le zinc sont en concentration plus faible dans les lixiviats du matériau de remblayage, alors que le calcium, le magnésium, le sulfate, le bore, le baryum, l'antimoine et le strontium sont en concentration plus élevée. Quatre éléments ont des concentrations proches pour les deux tests : le chlore, le sélénium, le vanadium et le cuivre. Ces résultats différents peuvent avoir deux origines : la composition du coulis utilisée pour le comblement n'est pas strictement identique au CEMII 2-8, et le stade de maturation des matériaux est différent (un an pour le matériau carotté et 90 jours pour le CEMII 2-8).

Les concentrations élevées en calcium et en sulfate dans le lixiviat du matériau gris ont pour origine probable la présence de gypse. Ce minéral, utilisé pour retarder la prise du ciment, devrait avoir totalement disparu après un an de maturation. Sa présence devra être confirmée par une détermination directe, car sa forte solubilité rend le matériau de remblayage sensible à l'eau.

La couche verte a un comportement particulier, les concentrations dans le lixiviat sont toujours plus faibles que celles des tests avec le matériau gris. Ce matériau vert est chimiquement plus stable, il est plus dense et possède une meilleure résistance mécanique que le matériau gris.

Le dispositif de surveillance de la qualité de l'eau en amont et en aval du remblayage a permis d'en suivre l'impact. Les analyses chimiques des prélèvements d'eau réalisées régulièrement pendant deux années, montrent des concentrations toujours inférieures aux tests de lixiviation, ainsi qu'aux valeurs réglementaires pour l'alimentation en eau potable. Dans la zone remblayée, l'eau circule rapidement et la surface de contact avec le matériau de remblayage est faible, ce qui a pour conséquence un relargage négligeable dans l'eau. Après ces deux années de suivi régulier, il apparaît que le remblayage n'a pas modifié la qualité de l'eau du réservoir de Godbrange.



## 5. Bibliographie

**Agence Française de Normalisation.** Essai de lessivage d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification. NF X 31-211. Août 1994, Paris. 13p.

**Baubron J.C., Fabriol R., Fourniguet G., Hamm V., Vaute L.** (2003) - Modélisation hydrogéologique du réservoir minier de Godbrange et influence d'un comblement partiel à cendres volantes, rapport BRGM/RP-52802-FR.

**Collon P., Fabriol R., Buès M.** (2006) – Modelling the evolution of water quality in abandoned mines of the Lorraine Iron Basin. *Journal of Hydrology*, Vol 328, pp. 620-634.

**Collon P., Fabriol R., Buès M.** (2005) – Evolution of water quality in the abandoned iron mines of Lorraine: towards a semi-distributed modelling approach. *C.R. Geosciences*, Vol 337, pp.1492-1499.

**Midot D., Marnet A., Gionta J. and Trebucq S.** (2005) - From discovery to backfilling of potentially unstable mining voids: the cas of Thil (France). *Post Mining 2005 Symposium*. Nancy, 16-17 novembre 2005, 12p.

**Collon P., Fabriol R., Buès M.** (2004) – Ennoyage des mines de fer lorraines : impact sur la qualité de l'eau. *C.R. Geosciences*, Vol 336, pp.889-899.

**Collon P.** (2003) – Evolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain. De l'expérimentation en laboratoire à la modélisation in situ. Thèse de Doctorat. LAEGO – ENSG, Institut Polytechnique de Lorraine. Nancy, France. 219 p.

**Hamm V., Fabriol R., Fourniguet G., Vaute L., Baubron J.C.** (2005) - Modelling the impact of back-filling material on the water quality of flooded iron mines (Lorraine, France). *Colloque International Post-mining 2005*, 16-18 novembre, Nancy. CD ROM.

**Imyin A.** (2000) – Méthodologie d'évaluation environnementale des déchets stabilisés/solidifiés par liants hydrauliques. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France. 492 p.

**Moulidou E.** (2000) – Cinétiques et mécanismes de relargage des métaux lourds présents en traces dans les matrices cimentaires. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France. 219 p.

Dictionnaire français d'hydrogéologie (G. Castany, J. Margat), Editions brgm. 1977.

Dictionnaire de géologie, 5ème éd. (A. Foucault, J-F. Raoult). Editions Dunod. 2000.

Gestion des sites (potentiellement pollués), version 2, guide. Editions brgm. 2000.

## **Annexe 1**

# **Normes de potabilité pour l'alimentation en eau potable**



Paramètre	symbole	Unité	LIMITE	REFERENCE
Température	T°C	°C		25
pH		unité pH		6.5 à 9
Conductivité à 25°C		µS/cm		180 à 1000
Sodium	Na	mg/l		200
Potassium	K	mg/l		
Calcium	Ca	mg/l		
Magnésium	Mg	mg/l		
Chlorure	Cl	mg/l		250
Sulfate	SO4	mg/l		250
Carbonates	CO3	mg/l		
Hydrogénocarbonates	HCO3	mg/l		
Nitrate	NO3	mg/l	50	
Silicate	SiO2	mg/l		
Aluminium	Al	µg/l		200
Arsenic	As	µg/l	10	
Bore	B	µg/l	1000	
Baryum	Ba	µg/l	100	
Cadmium	Cd	µg/l	5	
Colbalt	Co	µg/l		
Chrome	Cr	µg/l	50	
Césium	Cs	µg/l		
Cuivre	Cu	µg/l	2000	1000
Fer	Fe	µg/l		200
Mercure	Hg	µg/l	1	
Manganèse	Mn	µg/l		50
Nickel	Ni	µg/l	20	
Plomb	Pb	µg/l	10	
Antimoine	Sb	µg/l	5	
Sélénium	Se	µg/l	10	
Etain	Sn	µg/l		
Strontium	Sr	µg/l		
Uranium	U	µg/l		
Vanadium	V	µg/l		
Zinc	Zn	µg/l		
Zirconium	Zr	µg/l		

Valeurs limites et valeurs de référence pour la concentration d'éléments dissous dans les eaux destinées à la consommation humaine, d'après les articles R. 1321-1 à D. 1321-68 et Annexe 13-1 à 13-6 du Code de la Santé Publique Décembre 2005



## **Annexe 2**

### **Composition chimique de l'eau au point S1 à Thil et de la source « La Bouillante » à Dieulouard**



prélèvement	Thil S1	Dieulouard
	10/10/2006	09/11/2006
pH	7.56	7.72
Na (mg/l)	13.7	5.3
K (mg/l)	1.2	2.6
Ca (mg/l)	83.8	93.6
Mg (mg/l)	11.1	0.5
Cl (mg/l)	24.9	9.9
SO4 (mg/l)	39.4	24.4
CO3 (mg/l)	< 5	<5
HCO3 (mg/l)	241	229
NO3 (mg/l)	14.3	23
SiO2 (mg/l)	7.8	6.4
Al (µg/l)	<10	10
As (µg/l)	< 10	<5
B (µg/l)	120	14
Ba (µg/l)	29	11
Cd (µg/l)	< 2	<2
Co (µg/l)	< 2	<2
Cr (µg/l)	< 5	10
Cs (µg/l)	<5	<5
Cu (µg/l)	< 2	4
Fe (µg/l)	< 20	<20
Hg (µg/l)	0.26	<0.05
Mn (µg/l)	< 5	<5
Ni (µg/l)	< 5	<5
Pb (µg/l)	< 2	<2
Sb (µg/l)	< 5	<5
Se (µg/l)	< 1	<10
Sn (µg/l)	<5	<5
Sr (µg/l)	543	200
U (µg/l)	<1	<5
V (µg/l)	<10	<5
Zn (µg/l)	< 5	<5
Zr (µg/l)	< 1	<5

Comparaison de la composition chimique de l'eau percolant au toit de la cavité (Thil S1) et de la source « La Bouillante » (Dieulouard). Analyses chimiques réalisées au laboratoire « Analyse chimique des eaux et micropolluants métalliques » du BRGM.



## **Annexe 3**

### **Composition chimique de l'eau des tests de lixiviation du matériau de remblayage**



<b>T(°C)</b>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	20.6	20.5	20.4	20.3	24.6
26	20.3	20.1	20.1	20.0	21.2
40	21.1	20.8	20.5	20.3	20.4
63	20.8	20.7	20.7	20.4	18.4
110	19.5	19.5	19.4	19.2	20.1

<b>pH</b>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	9.5	9.7	9.7	7.5	11.5
26	9.9	9.2	9.9	7.7	11.7
40	9.9	9.8	9.9	7.5	11.7
63	10.0	10.0	10.1	7.5	11.5
110	10.2	10.4	10.3	7.6	11.3

<b>Na (mg/l)</b>					
LQ = 0.5 mg/l					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	99.9	99.4	104.2	4.6	166
26	95.2	97.4	100.8	4.6	142
40	79.5	78.9	82.6	4.5	116
63	70.8	69.5	72.1	4.8	80
110	46.6	47.0	48.4	4.3	47.1

<b>K (mg/l)</b>					
LQ = 0.5 mg/l					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	74.4	77.6	76.2	0.9	383
26	74.6	77.1	73.4	1.3	325
40	70.0	69.0	65.8	1.0	282
63	62.6	62.7	59.7	1.1	202
110	45.5	46.6	44.2	0.9	126

<b>Ca (mg/l)</b>					
LQ = 0.1mg/l					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	604.0	606.0	596.0	114.0	5.0
26	526.4	480.3	492.5	113.8	4.9
40	441.0	377.0	390.0	99.0	4.7
63	348.5	296.3	302.4	57.1	3.9
110	187.0	169.0	178.0	112.0	6.6

<b>Mg (mg/l)</b> <span style="float: right;">LQ = 0.5 mg/l</span>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	40.4	29.2	28.7	5.3	< 0.5
26	14.2	11.2	11.6	5.3	< 0.5
40	6.6	5.3	5.7	5.4	< 0.5
63	2.9	2.3	2.5	5.3	< 0.5
110	1.4	1.1	1.1	5.1	< 0.5

<b>Cl (mg/l)</b> <span style="float: right;">LQ = 0.5 mg/l</span>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	123.1	116.4	111.8	11.9	96.2
26	97.7	96.6	89.8	11.9	82.6
40	80.5	78.4	71.5	12.7	68.6
63	52.9	52.5	48.3	12.7	48.4
110	25.1	25.7	24.0	10.3	29.6

<b>SO4 (mg/l)</b> <span style="float: right;">LQ = 0.5 mg/l</span>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	1610	1580	1510	26	235
26	1340	1250	1245	24	192
40	1163	1000	1035	26	203
63	894	774	791	26	200
110	492	449	463	22	149

<b>CO3 (mg/l)</b> <span style="float: right;">LQ = 5 mg/l</span>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 5	< 5	< 5	< 5	32.00
26	< 5	< 5	< 5	< 5	62.00
40	< 5	< 5	< 5	< 5	42.00
63	< 5	< 5	< 5	< 5	40.00
110	< 5	< 5	< 5	< 5	3

<b>HCO3 (mg/l)</b> <span style="float: right;">LQ = 5 mg/l</span>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	30	23	31	285	< 5
26	47	32	49	279	< 5
40	32	34	32	272	< 5
63	31	35	38	134	< 5
110	36	40	39	280	58

<b>NO3 (mg/l)</b>					LQ = 0.5 mg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	8.9	13.2	8.3	29.8	< 0.5
26	< 0.5	< 0.5	< 0.5	29.7	< 0.5
40	< 0.5	< 0.5	< 0.5	31.4	< 0.5
63	< 0.5	< 0.5	< 0.5	31.5	< 0.5
110	1.8	1.3	1.4	26.5	< 0.5

<b>SiO2 (mg/l)</b>					LQ = 0.5 mg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	10.7	11.6	11.0	6.2	29.9
26	10.7	11.1	11.3	6.4	26.8
40	11.5	12.7	12.9	6.6	25.1
63	12.0	13.0	12.9	6.8	19.0
110	11.9	13.1	13.2	6.1	47.1

<b>Al (µg/l)</b>					LQ = 10 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	138	144	95	< 10	10670
26	217	214	189	< 10	9270
40	289	298	264	< 10	8810
63	338	379	355	< 10	6330
110	483	543	472	< 10	3380

<b>As (µg/l)</b>					LQ = 10 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 10	11	10	< 10	< 10
26	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
40	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
63	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
110	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

<b>B (µg/l)</b>					LQ = 10 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	2504	2358	2163	16	829
26	2430	2150	2260	16	680
40	2500	2300	2180	18	542
63	2327	2098	2095	17	428
110	2173	2076	2121	16	378

<b>Ba (µg/l)</b> <span style="float: right;">LQ = 5 µg/l</span>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	188	189	201	13	31
26	155	139	149	15	32
40	192	177	185	15	29
63	116	103	102	14	25
110	74	78	72	11	21

<b>Cd (µg/l)</b> <span style="float: right;">LQ = 2 µg/l</span>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
26	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
40	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
63	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
110	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

<b>Co (µg/l)</b> <span style="float: right;">LQ = 2 µg/l</span>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
26	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
40	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
63	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
110	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

<b>Cr (µg/l)</b> <span style="float: right;">LQ = 5 µg/l</span>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	9	10	14	< 5	< 5
26	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
40	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
63	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
110	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>Cs (µg/l)</b> <span style="float: right;">LQ = 5 µg/l</span>					
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	10	11	11	< 5	164
26	11	11	10	< 5	137
40	10	10	10	< 5	113
63	9	9	8	< 5	88
110	7	7	7	< 5	61

<b>Cu (<math>\mu\text{g/l}</math>)</b>					LQ = 2 $\mu\text{g/l}$
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	7	2	7	35	9
26	9	7	7	< 2	7
40	6	6	9	< 2	3
63	16	13	20	< 2	3
110	4	3	3	< 2	4

<b>Fe (<math>\mu\text{g/l}</math>)</b>					LQ = 20 $\mu\text{g/l}$
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
26	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
40	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
63	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
110	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20

<b>Hg (<math>\mu\text{g/l}</math>)</b>					LQ = 0.05 $\mu\text{g/l}$
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.11
26	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.23
40	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.05
63	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.05
110	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.05

<b>Mn (<math>\mu\text{g/l}</math>)</b>					LQ = 5 $\mu\text{g/l}$
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	12	8	9	< 5	< 5
26	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
40	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
63	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
110	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>Ni (<math>\mu\text{g/l}</math>)</b>					LQ = 5 $\mu\text{g/l}$
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	9	6	13	< 5	5
26	< 5	< 5	< 5	< 5	5
40	< 5	< 5	< 5	< 5	5
63	< 5	< 5	9	< 5	5
110	< 5	< 5	< 5	< 5	5

<b>Pb (µg/l)</b>					LQ = 2 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 2	< 2	< 2	< 2	6
26	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
40	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
63	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
110	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

<b>Sb (µg/l)</b>					LQ = 2 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	6	5	5	< 2	< 2
26	4	4	4	< 2	< 2
40	3	3	3	< 2	< 2
63	3	3	3	< 2	< 2
110	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

<b>Se (µg/l)</b>					LQ = 10 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	50	42	50	< 10	46
26	48	40	51	< 10	49
40	36	33	42	< 10	37
63	28	27	32	< 10	23
110	11	11	14	< 10	13

<b>Sn (µg/l)</b>					LQ = 5 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
26	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
40	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
63	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
110	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>Sr (µg/l)</b>					LQ = 10 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	4912	4947	5004	214	520
26	4980	4280	4580	224	600
40	4560	3840	3800	206	590
63	3906	3256	3502	231	560
110	2103	1915	1925	214	560

<b>U (µg/l)</b>					LQ = 5 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
26	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
40	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
63	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
110	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>V (µg/l)</b>					LQ = 5 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	95	100	93	< 5	219
26	103	102	107	< 5	181
40	119	124	124	< 5	162
63	142	145	147	< 5	136
110	145	150	151	< 5	113

<b>Zn (µg/l)</b>					LQ = 5 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 5	< 5	5	< 5	145
26	< 5	< 5	< 5	< 5	225
40	7	11	9	< 5	5
63	7	7	11	< 5	< 5
110	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>Zr (µg/l)</b>					LQ = 5 µg/l
temps(j)	C1	C2	C3	Injection	CEM III 2-8
16	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
26	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
40	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
63	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
110	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5



## **Annexe 4**

### **Composition chimique de l'eau du test de lixiviation de la couche verte**



<b>T(°C)</b>		
temps(j)	CV	Injection
17	20.3	20.0
28	20.4	20.1
42	20.1	19.9
59	19.7	19.4
116	19.7	19.5

<b>pH</b>		
temps(j)	CV	Injection
17	9.17	7.72
28	9.78	7.78
42	9.87	7.80
59	10.01	7.87
116	9.84	7.95

<b>Na (mg/l)</b>			LQ = 0.5 mg/l
temps(j)	CV	Injection	
17	91.0	5.3	
28	86.4		
42	72.5	5.5	
59	59.6		
116	37.1	5.1	

<b>K (mg/l)</b>			LQ = 0.5 mg/l
temps(j)	CV	Injection	
17	60.2	2.6	
28	57.9		
42	51.5	2.7	
59	46.7		
116	36.3	1.5	

<b>Ca (mg/l)</b>			LQ = 0.1mg/l
temps(j)	CV	Injection	
17	82.4	93.6	
28	75.0		
42	54.2	76.6	
59	41.0		
116	27.7	48.7	

<b>Mg (mg/l)</b> LQ = 0.5 mg/l		
temps(j)	CV	Injection
17	7.0	5.5
28	2.7	
42	1.4	5.6
59	1.0	
116	0.6	5.6

<b>Cl (mg/l)</b> LQ = 0.5 mg/l		
temps(j)	CV	Injection
17	12.8	9.9
28	12.0	
42	11.4	10.2
59	11.3	
116	11.2	11.0

<b>SO4 (mg/l)</b> LQ = 0.5 mg/l		
temps(j)	CV	Injection
17	424.6	24.4
28	352.6	
42	264.3	24.7
59	194.6	
116	110.4	24.6

<b>CO3 (mg/l)</b> LQ = 5 mg/l		
temps(j)	CV	Injection
17	< 5	< 5
28	< 5	
42	< 5	< 5
59	< 5	< 5
116	< 5	< 5

<b>HCO3 (mg/l)</b> LQ = 5 mg/l		
temps(j)	CV	Injection
17	44	229
28	53	
42		188
59	65	
116	56	122

<b>NO3 (mg/l)</b>		LQ = 0.5 mg/l	
temps(j)	CV	Injection	
17	18.5	23.0	
28	21.2		
42	28.0	24.5	
59	26.1		
116	24.1	22.9	

<b>SiO2 (mg/l)</b>		LQ = 0.5 mg/l	
temps(j)	CV	Injection	
17	27.1	6.4	
28	35.0		
42	36.6	6.5	
59	37.8		
116	32.9	4.6	

<b>Al (µg/l)</b>		LQ = 10 µg/l	
temps(j)	CV	Injection	
17	25	10	
28	38		
42	49	12	
59	50		
116	49	<10	

<b>As (µg/l)</b>		LQ = 5 µg/l	
temps(j)	CV	Injection	
17	< 5	< 5	
28	< 5		
42	< 5	< 5	
59	< 5		
116	< 5	< 5	

<b>B (µg/l)</b>		LQ = 10 µg/l	
temps(j)	CV	Injection	
17	1386	14	
28	1511		
42	1319	15	
59	1369		
116	869	22	

<b>Ba (µg/l)</b>		LQ = 5 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	29	11
28	25	
42	21	11
59	19	
116	13	11

<b>Cd (µg/l)</b>		LQ = 2 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	< 2	< 2
28	< 2	
42	< 2	< 2
59	< 2	
116	< 2	< 2

<b>Co (µg/l)</b>		LQ = 2 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	2	2
28	< 2	
42	< 2	< 2
59	< 2	
116	< 2	< 2

<b>Cr (µg/l)</b>		LQ = 5 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	5	10
28	< 5	
42	7	5
59	< 5	
116	< 5	< 5

<b>Cs (µg/l)</b>		LQ = 5 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	< 5	< 5
28	< 5	
42	< 5	< 5
59	< 5	
116	< 5	< 5

<b>Cu (µg/l)</b> LQ = 2 µg/l		
temps(j)	CV	Injection
17	9	4
28	10	
42	9	3
59	8	
116	4	4

<b>Fe (µg/l)</b> LQ = 20 µg/l		
temps(j)	CV	Injection
17	< 20	< 20
28	< 20	
42	< 20	< 20
59	< 20	
116	< 20	< 20

<b>Hg (µg/l)</b> LQ = 0.05 µg/l		
temps(j)	C1	Injection
17	< 0.05	< 0.05
28	< 0.05	
42	< 0.05	< 0.05
59	< 0.05	
116	< 0.05	< 0.05

<b>Mn (µg/l)</b> LQ = 5 µg/l		
temps(j)	CV	Injection
17	< 5	< 5
28	< 5	
42	< 5	< 5
59	< 5	
116	< 5	< 5

<b>Ni (µg/l)</b> LQ = 5 µg/l		
temps(j)	CV	Injection
17	< 5	< 5
28	< 5	
42	< 5	< 5
59	< 5	
116	< 5	< 5

<b>Pb (µg/l)</b>		LQ = 2 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	< 2	< 2
28	< 2	
42	< 2	< 2
59	< 2	
116	< 2	< 2

<b>Sb (µg/l)</b>		LQ = 5 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	< 5	< 5
28	< 5	
42	< 5	< 5
59	< 5	
116	< 5	< 5

<b>Se (µg/l)</b>		LQ = 10 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	12	< 10
28	< 10	
42	< 10	< 10
59	< 10	
116	< 10	< 10

<b>Sn (µg/l)</b>		LQ = 5 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	< 5	< 5
28	< 5	
42	< 5	< 5
59	< 5	
116	< 5	< 5

<b>Sr (µg/l)</b>		LQ = 10 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	627	200
28	577	
42	461	202
59	378	
116	294	197

<b>U (µg/l)</b>		LQ = 5 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	< 5	< 5
28	< 5	
42	< 5	< 5
59	< 5	
116	< 5	< 5

<b>V (µg/l)</b>		LQ = 5 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	35	< 5
28	54	
42	56	< 5
59	58	
116	51	< 5

<b>Zn (µg/l)</b>		LQ = 5 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	8	< 5
28	10	
42	11	< 5
59	10	
116	5	11

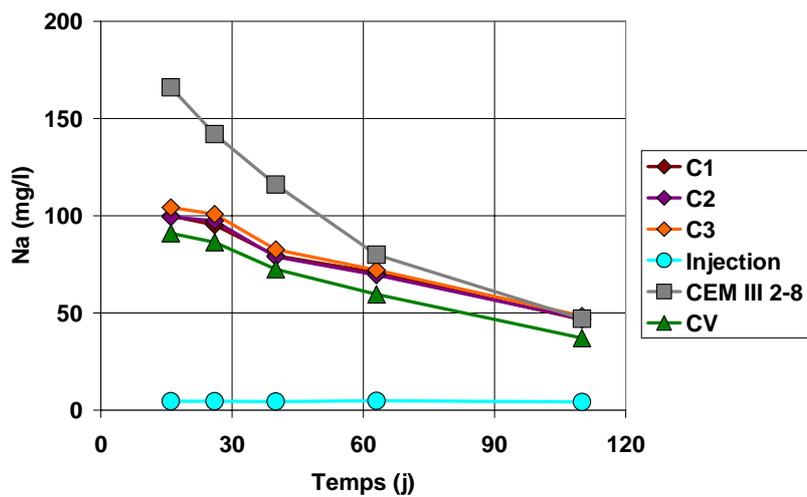
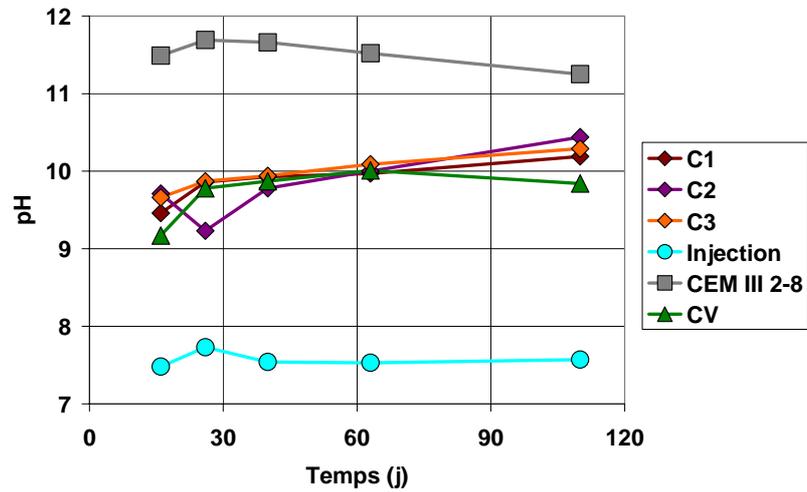
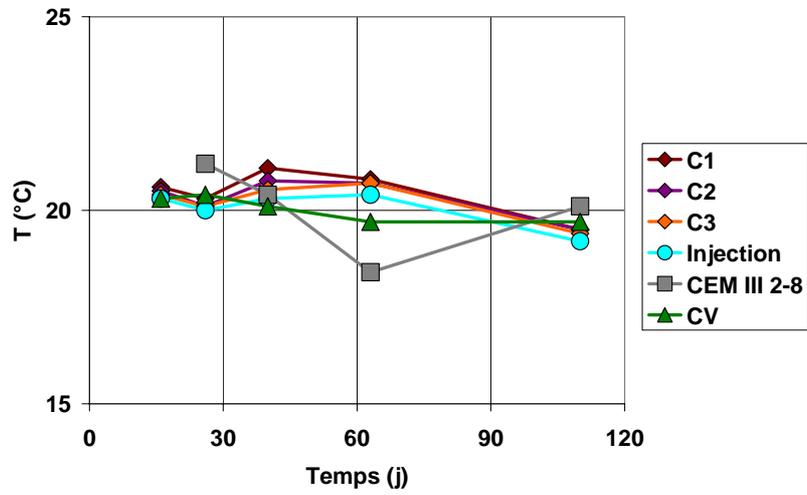
<b>Zr (µg/l)</b>		LQ = 5 µg/l
temps(j)	CV	Injection
17	< 5	< 5
28	< 5	
42	< 5	< 5
59	< 5	
116	< 5	< 5

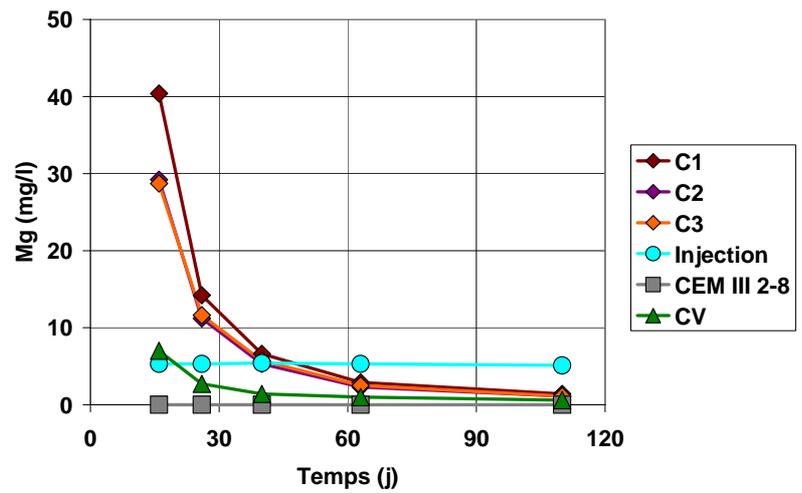
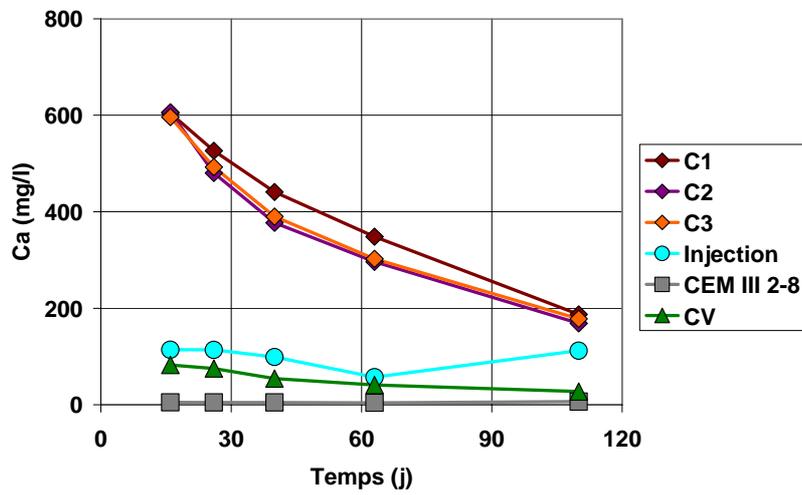
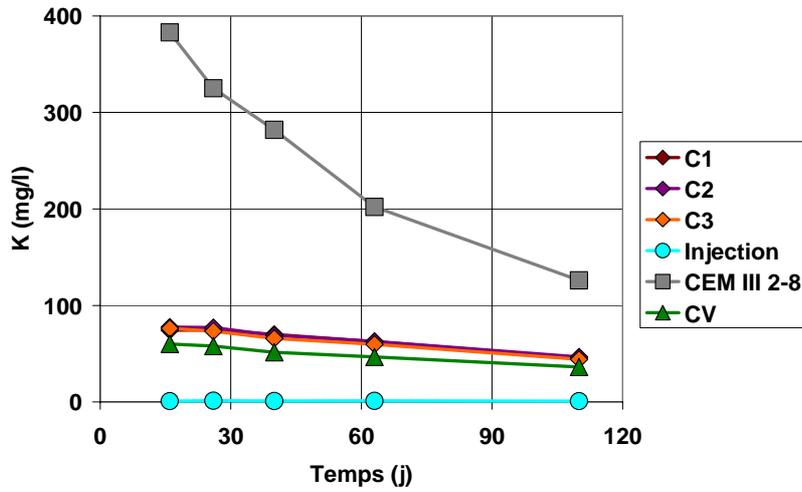


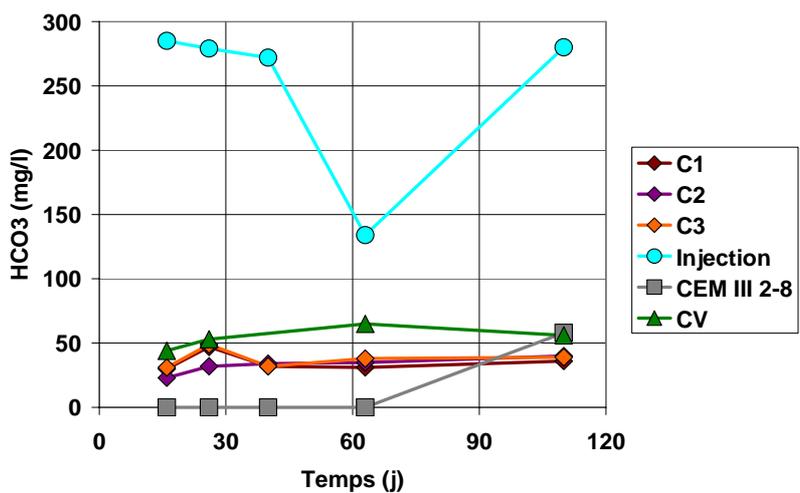
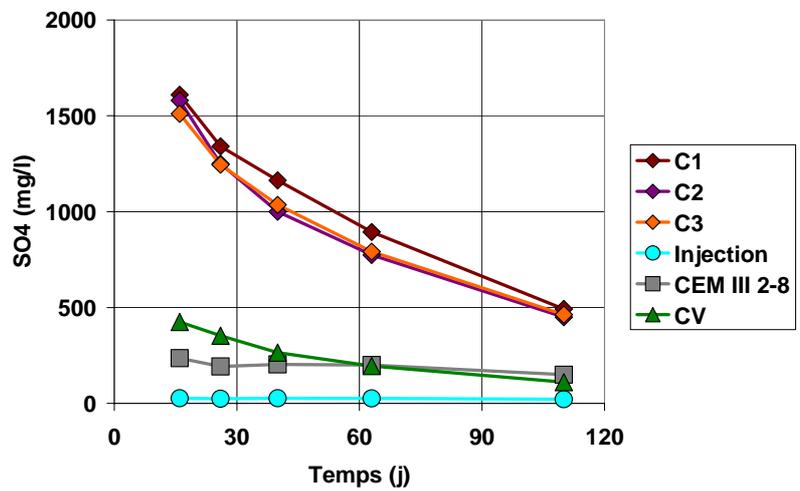
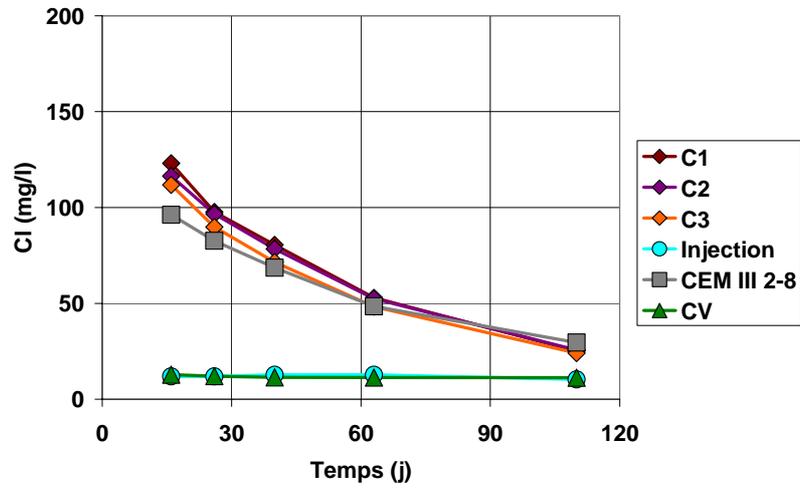
## **Annexe 5**

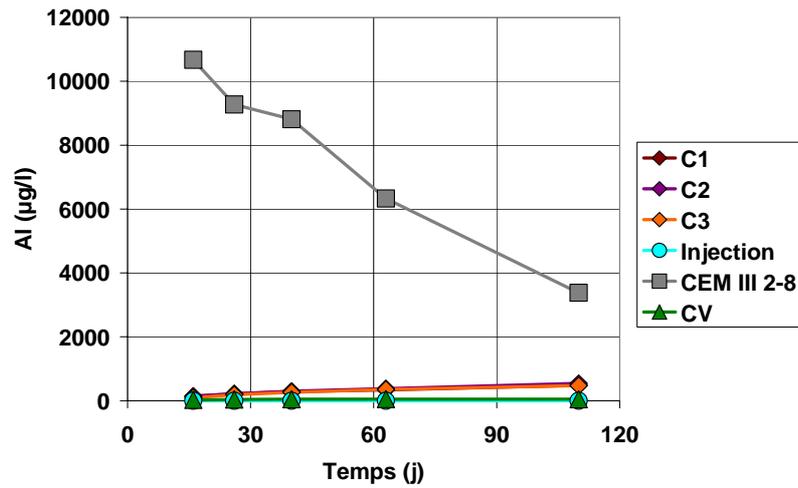
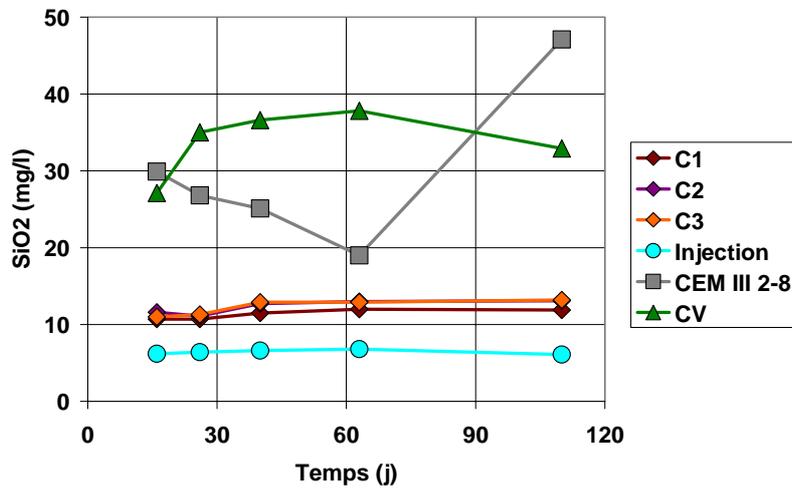
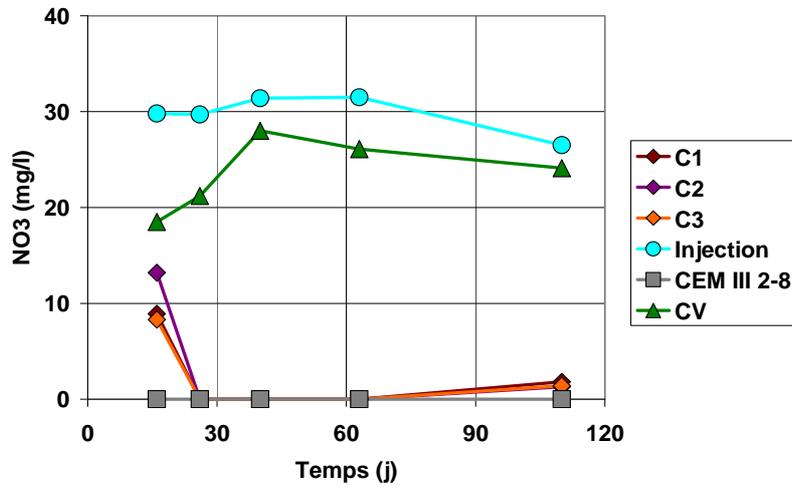
### **Tests de lixiviation en colonne du matériau carotté dans le remblayage**

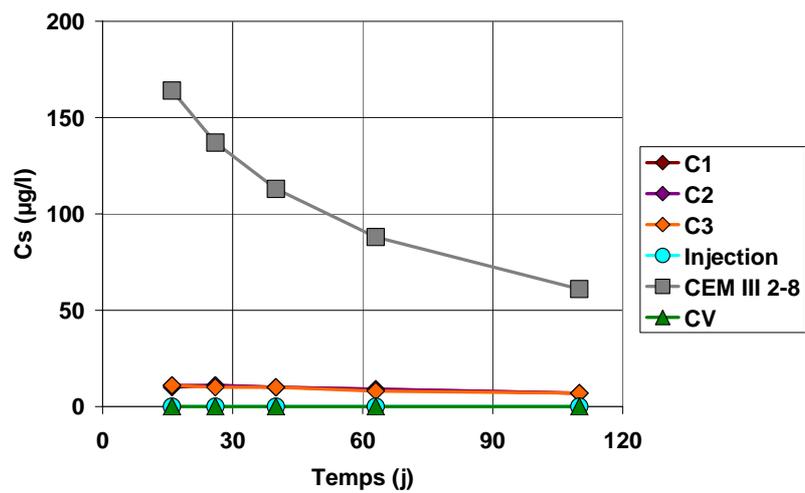
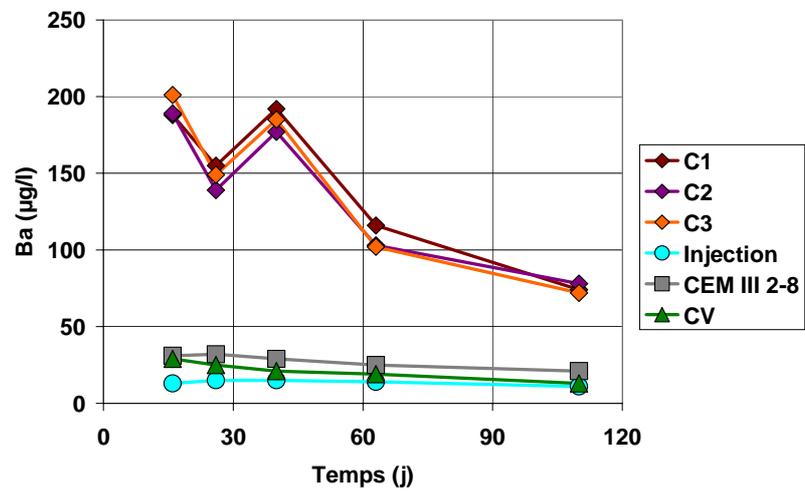
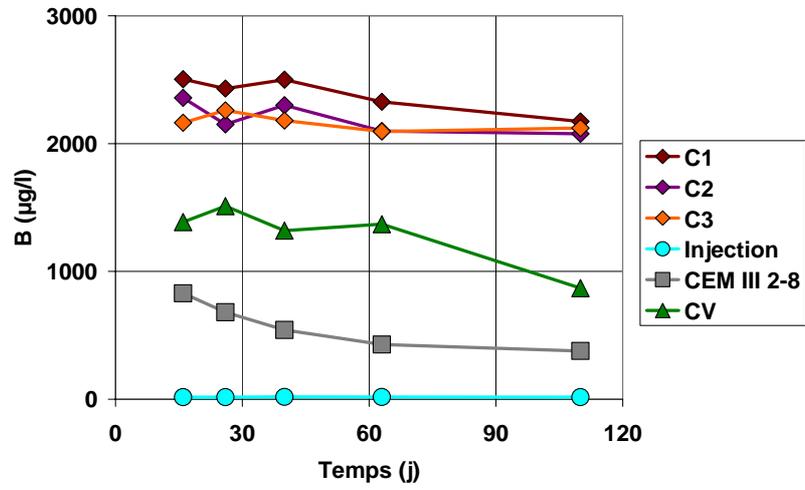


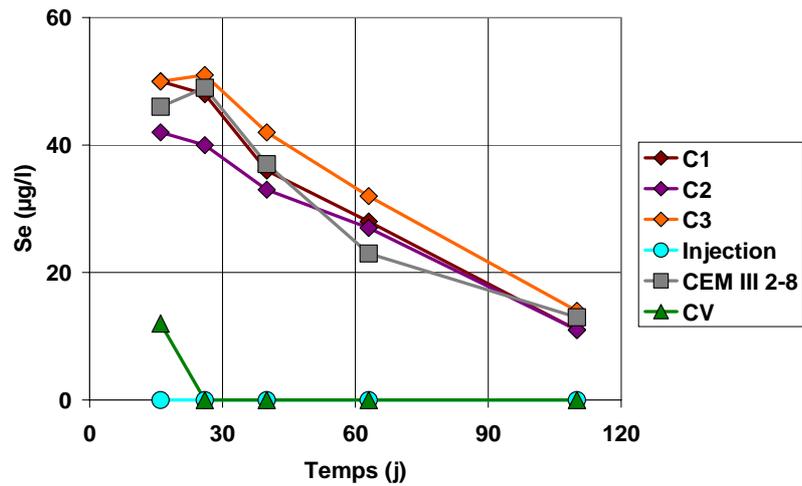
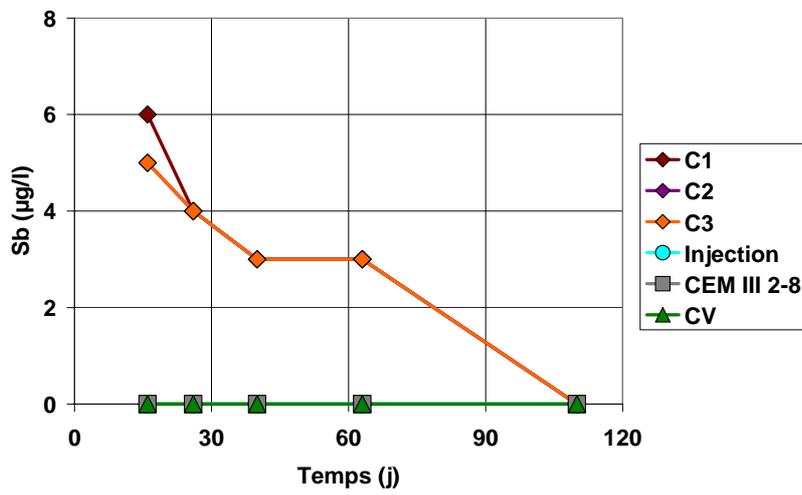
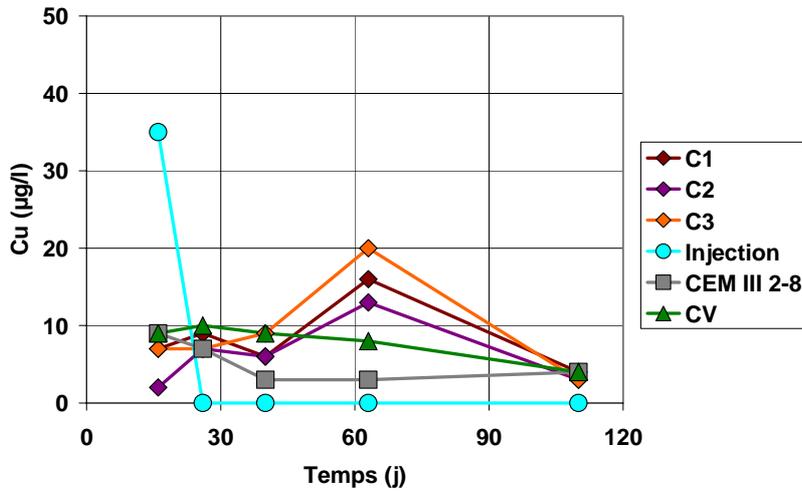


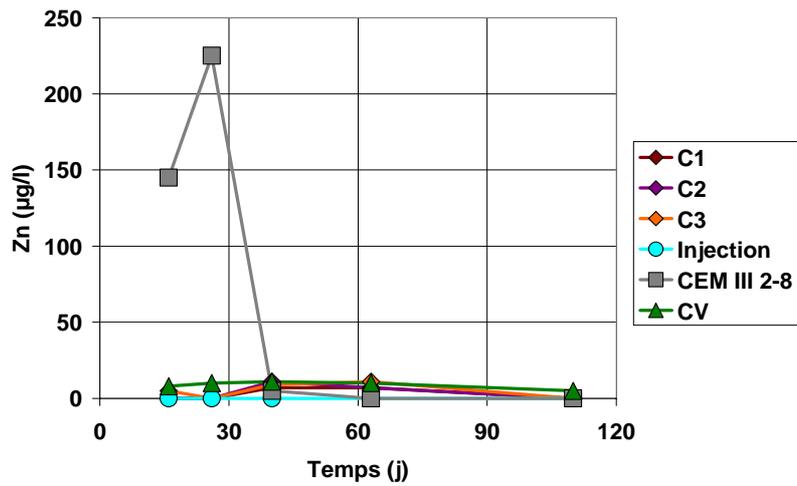
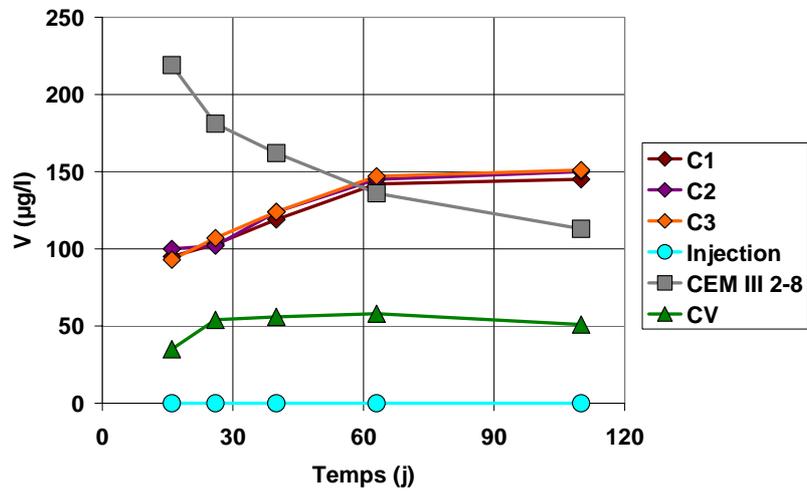
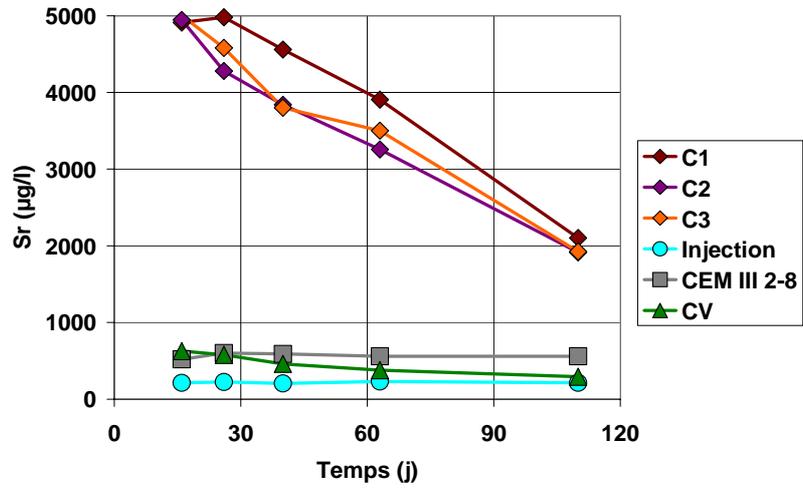














## **Annexe 6**

### **Composition chimique de l'eau aux points d'observation autour du remblayage de Thil**



<b>T (°C)</b>					
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004					
18/11/2004					
08/03/2005					
10/06/2005	10.9	10.6		10.4	10.3
20/07/2005	10.3	10.7		10.6	10.4
27/09/2005	11.8	10.7		10.5	10.4
05/12/2005	10.4	10.7	10.4	10.5	10.2
09/02/2006	10.3	10.7	10.4	10.4	10.1
17/05/2006	10.2	10.5	10.3	10.4	10.4
10/10/2006	10.4	10.6	10.4	10.4	10.4

<b>Cond (µS/cm)</b>					
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	727	660			
18/11/2004	529	657			862
08/03/2005	536	702			823
10/06/2005	526	655		597	844
20/07/2005	515	659		642	845
27/09/2005	483	662		661	873
05/12/2005	528	660	653	607	811
09/02/2006	526	676	636	621	876
17/05/2006	534	648	616	613	836
10/10/2006	554	664	659	666	837

<b>pH</b>					
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	7.35	7.34			
18/11/2004	8.02	7.76			7.85
08/03/2005	8	7.87			7.7
10/06/2005	7.84	7.63		7.52	7.54
20/07/2005	7.54	7.4		7.27	7.33
27/09/2005	7.42	7.27		6.94	7.26
05/12/2005	7.67	7.48	7.25	7.42	7.43
09/02/2006	7.89	7.72	7.73	7.65	7.48
17/05/2006	7.87	7.7	7.81	7.83	7.71
10/10/2006	7.56	7.45	7.47	7.38	7.43

<b>Na (mg/l)</b>	LQ = 0.5 mg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	32.6	4.9			
18/11/2004	12.4	6.1			23
08/03/2005	13	10.8			26.7
10/06/2005	13.2	9.5		4.9	23.4
20/07/2005	10.4	9.4		6.1	23.5
27/09/2005	7	8.7		3.5	24.1
05/12/2005	9.6	7.6	6.2	3.1	22.2
09/02/2006	12.8	8	6.3	5.4	23.4
17/05/2006	14.9	9.2	7.1	6.2	23.7
10/10/2006	13.7	8.8	7.1	6	24.8

<b>K (mg/l)</b>	LQ = 0.5 mg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	1.1	1			
18/11/2004	1.3	1.2			1.4
08/03/2005	1.1	1.7			1.5
10/06/2005	1.6	1.2		1.4	1.6
20/07/2005	1.3	1.2		1.4	1.7
27/09/2005	1.4	1.3		1.4	1.7
05/12/2005	1.3	1.1	1.1	1.1	1.4
09/02/2006	1.1	1.1	1.1	1.2	1.4
17/05/2006	1.1	1.1	1.1	1.3	1.4
10/10/2006	1.2	1.1	1	1.2	1.5

<b>Ca (mg/l)</b>	LQ = 0.5 mg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	97.6	102.1			
18/11/2004	78.3	94.9			109.1
08/03/2005	77.1	91.3			107.4
10/06/2005	79.9	97.9		87.8	116
20/07/2005	81.8	100		103	127
27/09/2005	82	104.4		110.2	132.3
05/12/2005	82.6	97.5	97.9	94.2	121.9
09/02/2006	81.6	101	95.7	93.1	123
17/05/2006	82	95.9	93.6	94.5	121
10/10/2006	83.8	95.3	94.1	93.7	118.8

<b>Mg (mg/l)</b>	LQ = 0.5 mg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	8.4	25.3			
18/11/2004	12	25.3			21.7
08/03/2005	10	21.7			20.4
10/06/2005	11.1	22.7		21.6	22.7
20/07/2005	11.3	23.9		24.4	23.6
27/09/2005	11.5	24.4		26.6	24.7
05/12/2005	12.1	24.7	25.1	23.8	24
09/02/2006	11	24.8	23.8	23.5	23.7
17/05/2006	10.5	23	22.2	22.4	22.3
10/10/2006	11.1	23.4	23.4	24.6	22.8

<b>Cl (mg/l)</b>	LQ = 0.5 mg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	54.9	10.4			
18/11/2004	18.6	11.7			75
08/03/2005	21.3	19.9			57.2
10/06/2005	24.8	19.7		8.5	78.9
20/07/2005	15.7	16.4		10.9	79
27/09/2005	8.3	14.5		4.6	78.1
05/12/2005	17.4	14	14.1	4.8	83.5
09/02/2006	22.7	18.9	15	12.1	87.9
17/05/2006	25.6	21.8	18	15.4	73.1
10/10/2006	24.9	20.8	16.6	13.7	89.3

<b>SO4 (mg/l)</b>	LQ = 0.5 mg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	46	115			
18/11/2004	44.9	133			131.3
08/03/2005	41.2	132			146
10/06/2005	42.3	120.3		100.2	126.5
20/07/2005	42.1	129		125	133
27/09/2005	37.3	125.1		112.7	129
05/12/2005	42.2	132.1	131.1	122.2	139.2
09/02/2006	44.4	136	131	130	144
17/05/2006	39.8	108	103	105	118
10/10/2006	39.4	111.7	119.6	118.8	123.3

<b>CO3 (mg/l)</b>	LQ = 5 mg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 5	< 5			
18/11/2004	< 5	< 5			< 5
08/03/2005	< 5	< 5			< 5
10/06/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
20/07/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
27/09/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
05/12/2005	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
09/02/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
17/05/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
10/10/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>HCO3 (mg/l)</b>	LQ = 5 mg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	248	269			
18/11/2004	248	275			222
08/03/2005	219	207			202
10/06/2005	234	232		238	223
20/07/2005	241	235		245	231
27/09/2005	240	233		290	234
05/12/2005	241	236	235	241	215
09/02/2006	227	235	225	220	217
17/05/2006	223	227	221	225	232
10/10/2006	241	239	241	241	242

<b>NO3 (mg/l)</b>	LQ = 0.5 mg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	20.1	3.9			
18/11/2004	10.7	6.1			10
08/03/2005					
10/06/2005	10.5	8		4	5.6
20/07/2005	10	7		5.5	5.7
27/09/2005	8.9	6.6		0.5	5.7
05/12/2005	9.5	5.8	5.3	0.6	5.1
09/02/2006	13.4	7.3	7.7	6.5	7.4
17/05/2006	10.1	9.1	8.8	8	6
10/10/2006	14.3	7.7	7.7	6.1	7.6

<b>SiO2 (mg/l)</b>	LQ = 0.5 mg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	6.9	6.9			
18/11/2004	8.4	7.2			6.5
08/03/2005	6.6	6.2			11.5
10/06/2005	7.6	7.5		6.5	8.9
20/07/2005	7.3	6.9		6.6	7.8
27/09/2005	8.6	7.4		7.3	8.9
05/12/2005	8	7.1	6.9	6.2	7.9
09/02/2006	7.3	7.2	6.6	6.2	7.4
17/05/2006	7.2	7.1	6.6	6.5	7.2
10/10/2006	7.8	7.1	6.8	6.8	7.4

<b>Al (µg/l)</b>	LQ = 30 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 30	< 30			
18/11/2004	< 30	< 30			< 30
08/03/2005	< 30	< 30			< 30
10/06/2005	< 30	< 30		< 30	< 30
20/07/2005	< 30	< 30		< 30	< 30
27/09/2005	< 30	< 30		< 30	< 30
05/12/2005	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
09/02/2006	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
17/05/2006	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
10/10/2006	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30

<b>As (µg/l)</b>	LQ =10 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 10	< 10			
18/11/2004	< 10	< 10			< 10
08/03/2005	< 10	< 10			< 10
10/06/2005	< 10	< 10		< 10	< 10
20/07/2005	< 10	< 10		< 10	< 10
27/09/2005	< 10	< 10		< 10	< 10
05/12/2005	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
09/02/2006	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
17/05/2006	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
10/10/2006	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

<b>B (µg/l)</b>	LQ =20 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	219	40			
18/11/2004	174	51			79
08/03/2005	106	63			79
10/06/2005	107	51		32	62
20/07/2005	124	50		44	69
27/09/2005	111	55		39	66
05/12/2005	133	58	51	39	71
09/02/2006	115	57	50	47	79
17/05/2006	96	52	43	41	68
10/10/2006	120	52	45	45	70

<b>Ba (µg/l)</b>	LQ =5 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	24	26			
18/11/2004	29	26			27
08/03/2005	27	25			28
10/06/2005	28	30		21	30
20/07/2005	28	28		27	29
27/09/2005	27	30		22	31
05/12/2005	31	31	31	19	33
09/02/2006	28	31	30	25	34
17/05/2006	27	29	26	25	28
10/10/2006	29	29	29	24	29

<b>Cd (µg/l)</b>	LQ =2 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 2	< 2			
18/11/2004	< 2	< 2			< 2
08/03/2005	< 2	< 2			< 2
10/06/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
20/07/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
27/09/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
05/12/2005	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
09/02/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
17/05/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
10/10/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

<b>Co (µg/l)</b>	LQ =2 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 2	< 2			
18/11/2004	< 2	< 2			< 2
08/03/2005	< 2	< 2			< 2
10/06/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
20/07/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
27/09/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
05/12/2005	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
09/02/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
17/05/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
10/10/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

<b>Cr (µg/l)</b>	LQ =5 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 5	< 5			
18/11/2004	< 5	< 5			< 5
08/03/2005	< 5	< 5			< 5
10/06/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
20/07/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
27/09/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
05/12/2005	12	6	< 5	< 5	6
09/02/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
17/05/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
10/10/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>Cs (µg/l)</b>	LQ = 5 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 5	< 5			
18/11/2004	< 5	< 5			< 5
08/03/2005	< 5	< 5			< 5
10/06/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
20/07/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
27/09/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
05/12/2005	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
09/02/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
17/05/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
10/10/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>Cu (µg/l)</b>	LQ =2 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 2	< 2			
18/11/2004	< 2	< 2			< 2
08/03/2005	< 2	< 2			< 2
10/06/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
20/07/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
27/09/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
05/12/2005	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
09/02/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
17/05/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
10/10/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

<b>Fe (µg/l)</b>	LQ =20 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 20	< 20			
18/11/2004	< 20	< 20			< 20
08/03/2005	< 20	< 20			< 20
10/06/2005	< 20	< 20		< 20	< 20
20/07/2005	< 20	< 20		< 20	< 20
27/09/2005	< 20	< 20		< 20	< 20
05/12/2005	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
09/02/2006	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
17/05/2006	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
10/10/2006	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20

<b>Hg (µg/l)</b>	LQ =0.05 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 0.05	< 0.05			
18/11/2004	< 0.05	< 0.05			< 0.05
08/03/2005	< 0.05	< 0.05			< 0.05
10/06/2005	< 0.05	< 0.05		< 0.05	< 0.05
20/07/2005	< 0.05	< 0.05		< 0.05	< 0.05
27/09/2005	< 0.05	< 0.05		< 0.05	< 0.05
05/12/2005	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
09/02/2006	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
17/05/2006	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
10/10/2006	0.26	0.24	0.14	0.14	0.14

<b>Mn (µg/l)</b>	LQ = 5 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 5	< 5			
18/11/2004	< 5	< 5			< 5
08/03/2005	< 5	< 5			< 5
10/06/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
20/07/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
27/09/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
05/12/2005	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
09/02/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
17/05/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
10/10/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>Ni (µg/l)</b>	LQ =5 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 5	< 5			
18/11/2004	< 5	< 5			< 5
08/03/2005	< 5	< 5			< 5
10/06/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
20/07/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
27/09/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
05/12/2005	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
09/02/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
17/05/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
10/10/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>Pb (µg/l)</b>	LQ =2 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 2				
18/11/2004	< 2	< 2			< 2
08/03/2005	< 2	< 2			< 2
10/06/2005	6	2		3	12
20/07/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
27/09/2005	< 2	< 2		< 2	< 2
05/12/2005	8	3	10	7	6
09/02/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
17/05/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
10/10/2006	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

<b>Sb (µg/l)</b>	LQ = 5 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 5	< 5			
18/11/2004	< 5	< 5			< 5
08/03/2005	< 5	< 5			< 5
10/06/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
20/07/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
27/09/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
05/12/2005	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
09/02/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
17/05/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
10/10/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

<b>Se (µg/l)</b>	LQ = 0.5 à 1 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 1	< 1			
18/11/2004	0.6	< 1			1
08/03/2005	< 1	1.1			1.6
10/06/2005	< 1	< 1		< 1	< 1
20/07/2005	< 1	< 1		< 1	< 1
27/09/2005	< 1	< 1		< 1	< 1
05/12/2005	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
09/02/2006	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
17/05/2006	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
10/10/2006	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

<b>Sn (µg/l)</b>	LQ = 10 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 10	< 10			
18/11/2004	< 10	< 10			< 10
08/03/2005	< 10	< 10			< 10
10/06/2005	< 10	< 10		< 10	< 10
20/07/2005	< 10	< 10		< 10	< 10
27/09/2005	< 10	< 10		< 10	< 10
05/12/2005	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
09/02/2006	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
17/05/2006	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
10/10/2006	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

<b>Sr (µg/l)</b>	LQ = 10 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	386	377			
18/11/2004	575	355			480
08/03/2005	456	340			470
10/06/2005	491	316		331	499
20/07/2005	521	319		363	515
27/09/2005	566	331		425	545
05/12/2005	548	327	339	373	513
09/02/2006	477	345	345	351	513
17/05/2006	453	313	323	340	488
10/10/2006	543	346	359	397	543

<b>U (µg/l)</b>	LQ = 1 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 1	< 1			
18/11/2004	< 1	< 1			< 1
08/03/2005	< 1	< 1			< 1
10/06/2005	< 1	< 1		< 1	< 1
20/07/2005	< 1	< 1		< 1	< 1
27/09/2005	< 1	< 1		< 1	< 1
05/12/2005	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
09/02/2006	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
17/05/2006	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
10/10/2006	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

<b>V (µg/l)</b>	LQ = 0.5 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	0.6	0.5			
18/11/2004	0.6	0.6			2.3
08/03/2005	< 0.5	< 0.5			< 0.5
10/06/2005	< 0.5	< 0.5		< 0.5	< 0.5
20/07/2005	< 0.5	< 0.5		< 0.5	< 0.5
27/09/2005	< 0.5	< 0.5		< 0.5	< 0.5
05/12/2005	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
09/02/2006	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
17/05/2006	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
10/10/2006	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5

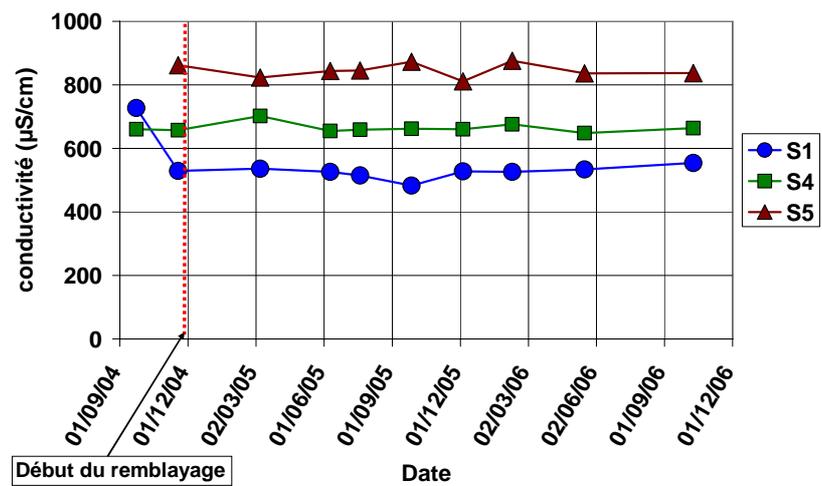
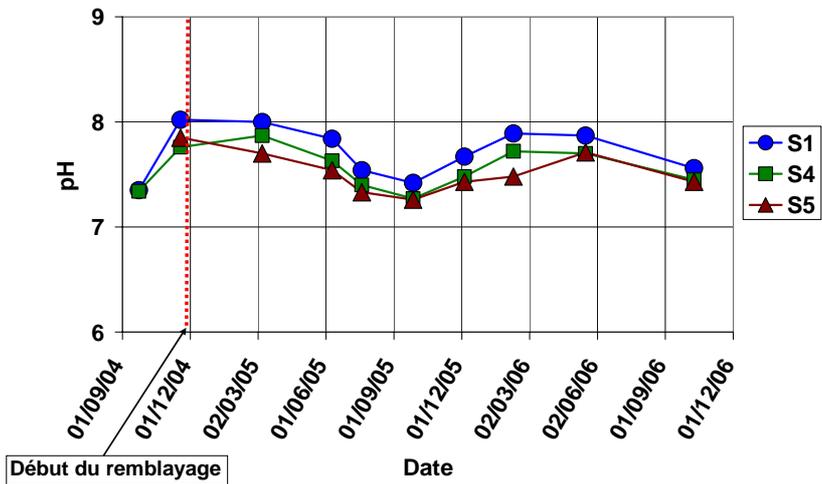
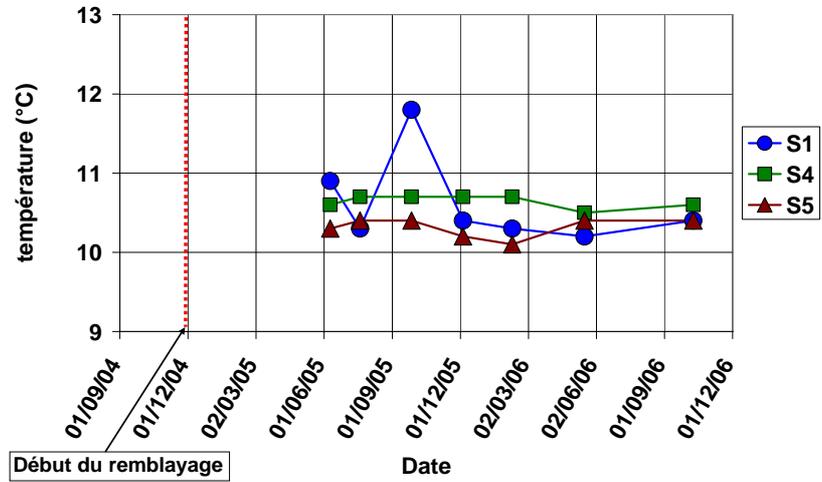
<b>Zn (µg/l)</b>	LQ =5 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 5	< 5			
18/11/2004	< 5	120			5
08/03/2005	< 5	< 5			< 5
10/06/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
20/07/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
27/09/2005	< 5	< 5		< 5	< 5
05/12/2005	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
09/02/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
17/05/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
10/10/2006	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

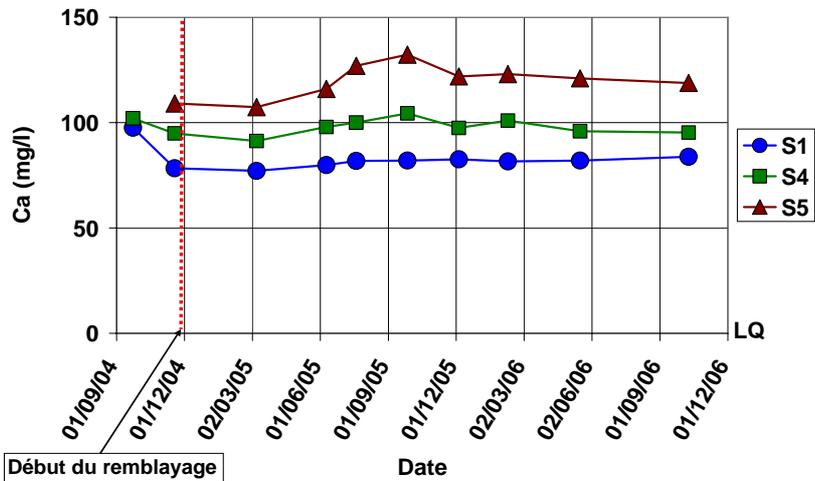
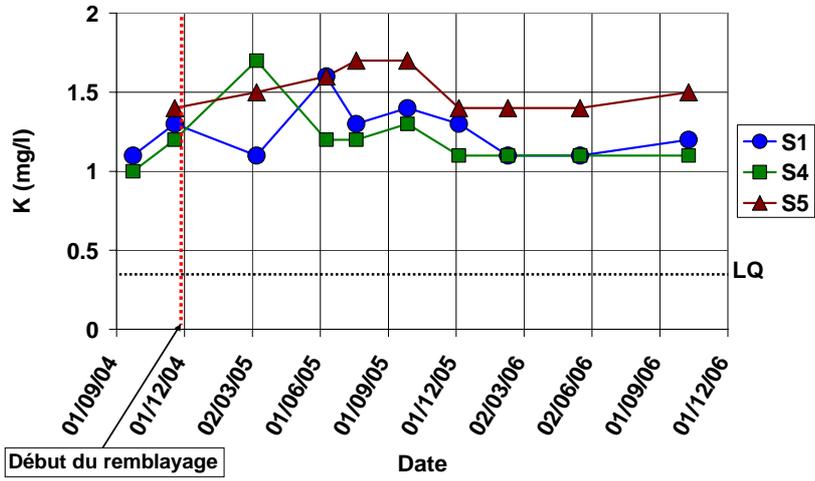
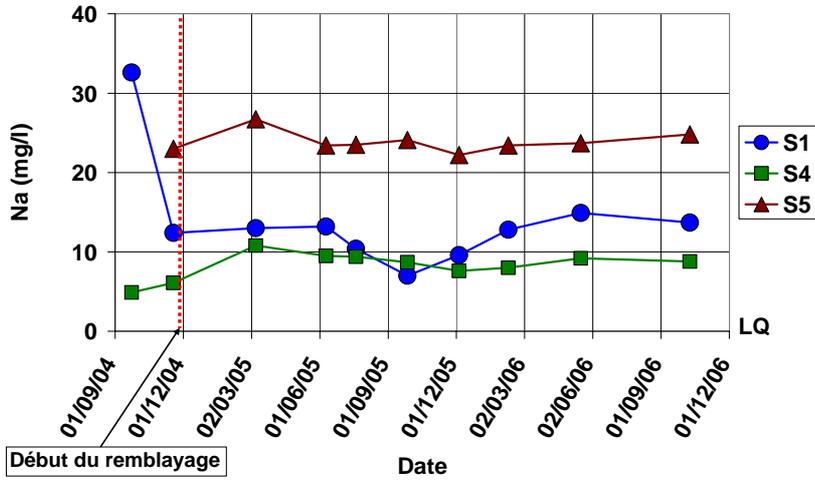
<b>Zr (µg/l)</b>	LQ =1 µg/l				
Date	S1	S4	S4M	S4R	S5
23/09/2004	< 1	< 1			
18/11/2004	< 1	< 1			< 1
08/03/2005	< 1	< 1			< 1
10/06/2005	< 1	< 1		< 1	< 1
20/07/2005	< 1	< 1		< 1	< 1
27/09/2005	< 1	< 1		< 1	< 1
05/12/2005	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
09/02/2006	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
17/05/2006	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
10/10/2006	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

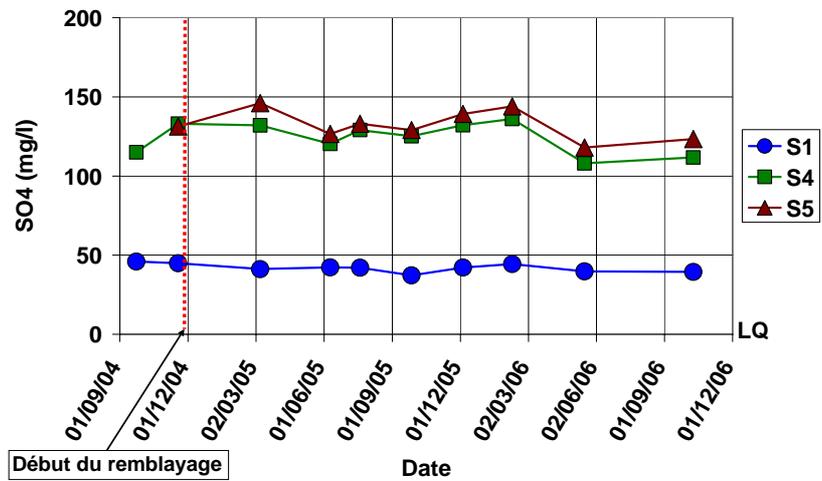
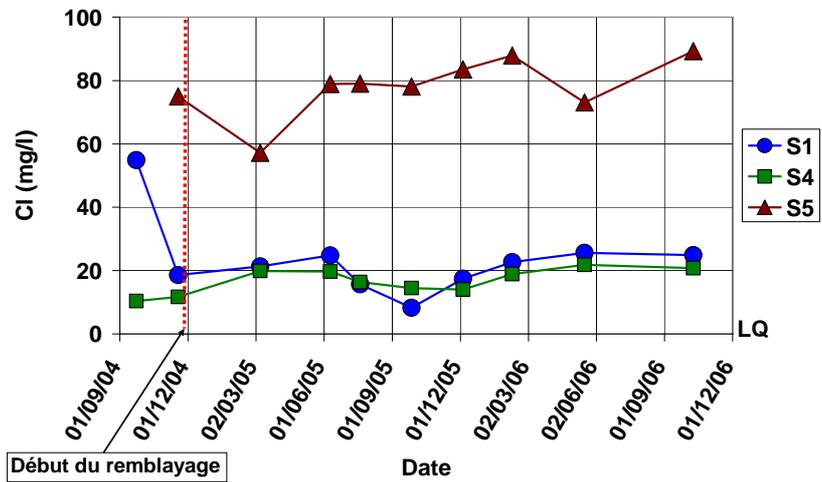
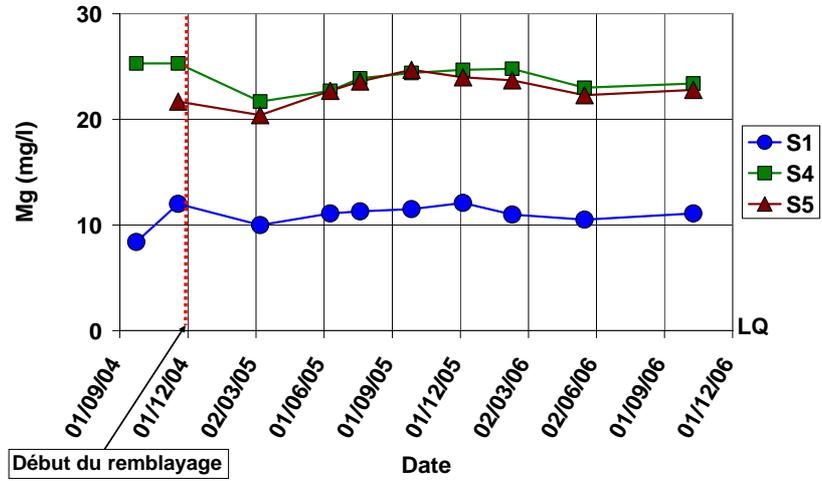
## **Annexe 7**

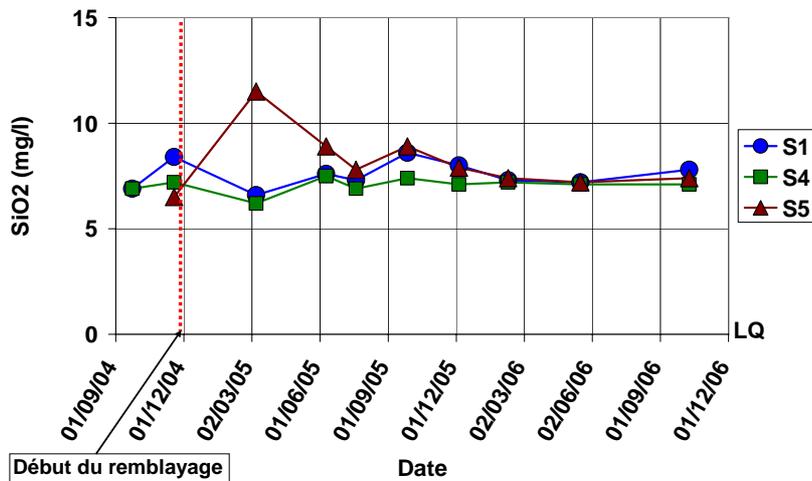
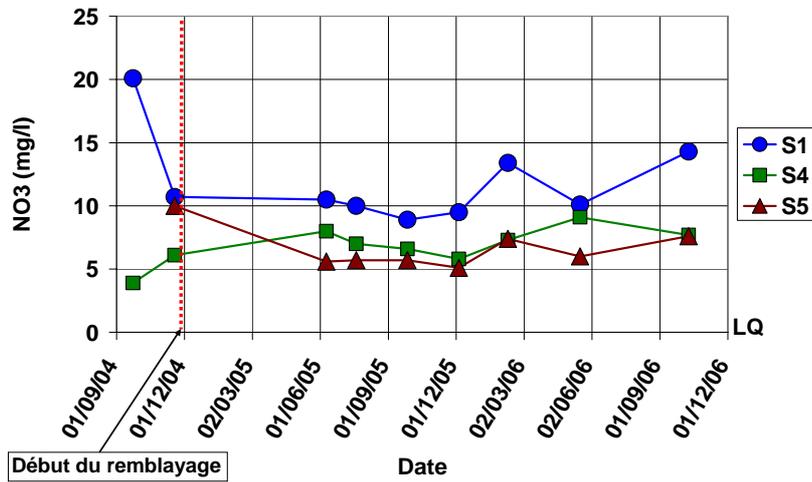
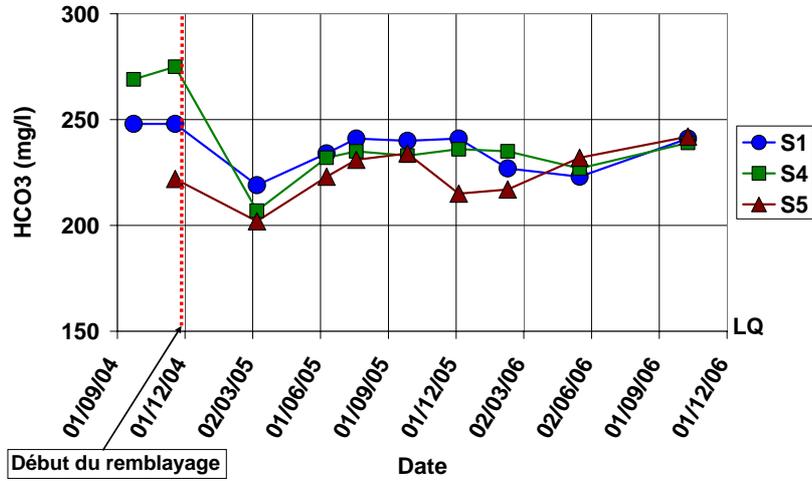
### **Evolution de la composition chimique de l'eau prélevée autour du remblayage**

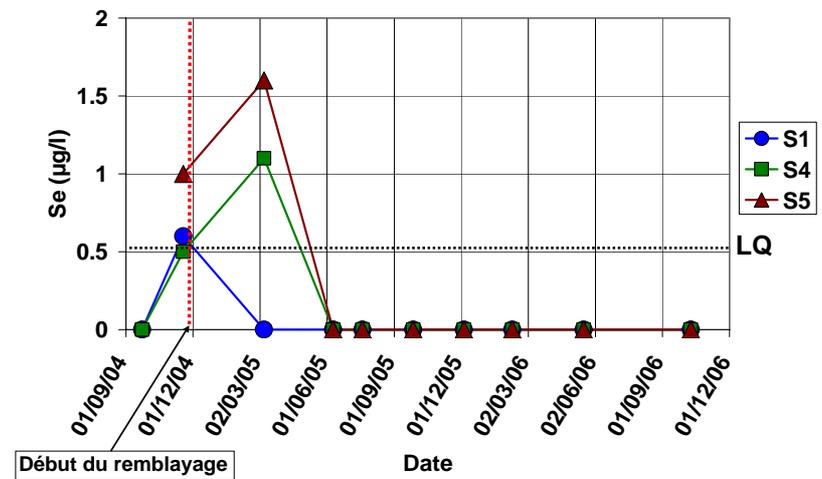
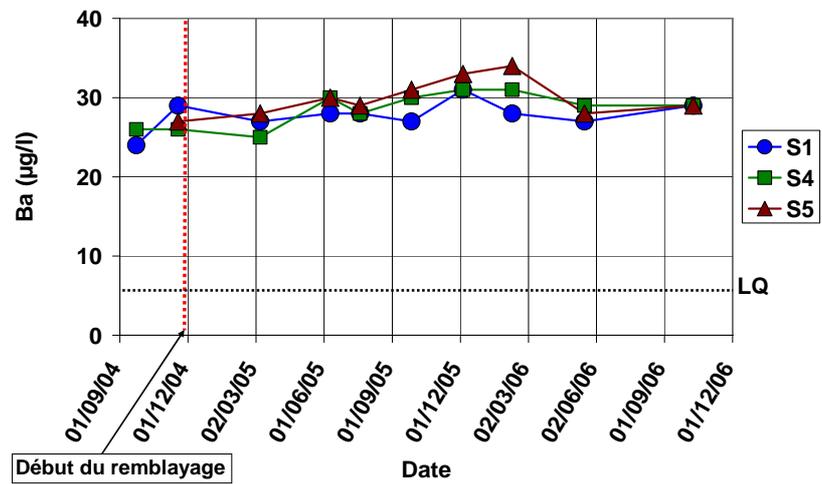
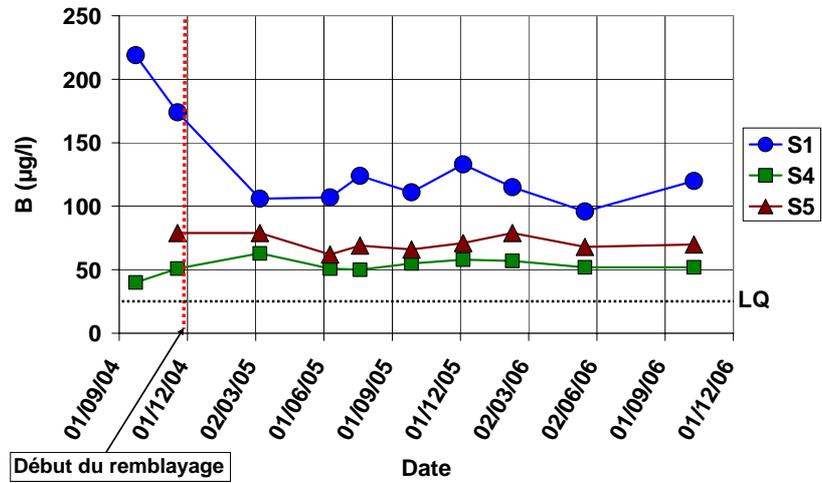


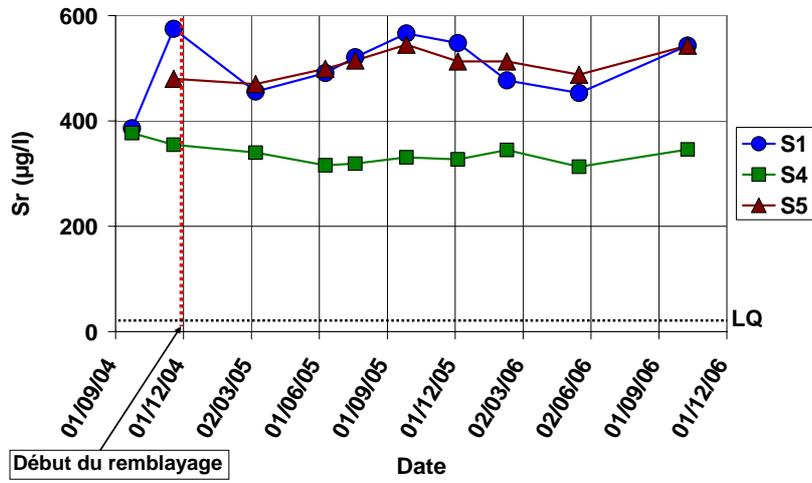














**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemain  
BP 6009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional lorraine**  
1, avenue du Parc de Brabois  
54500 – Vandœuvre-lès-Nancy - France  
Tél. : 03.83.44.81.49