



HAL
open science

Migration cationique et anionique des métaux toxiques (Plomb, Chrome et Zinc) dans les sols sous l'effet d'un champ électrique

Sapho Lesoin

► **To cite this version:**

Sapho Lesoin. Migration cationique et anionique des métaux toxiques (Plomb, Chrome et Zinc) dans les sols sous l'effet d'un champ électrique. Matériaux. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997. Français. NNT: . tel-00529773

HAL Id: tel-00529773

<https://pastel.hal.science/tel-00529773>

Submitted on 26 Oct 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

X

**MIGRATION CATIONIQUE ET ANIONIQUE DES METAUX
TOXIQUES (Plomb, Chrome et Zinc) DANS LES SOLS SOUS
L'EFFET D'UN CHAMP ELECTRIQUE**

THESE

présentée par

Sapho LESOIN

pour obtenir le grade de

DOCTEUR

de L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

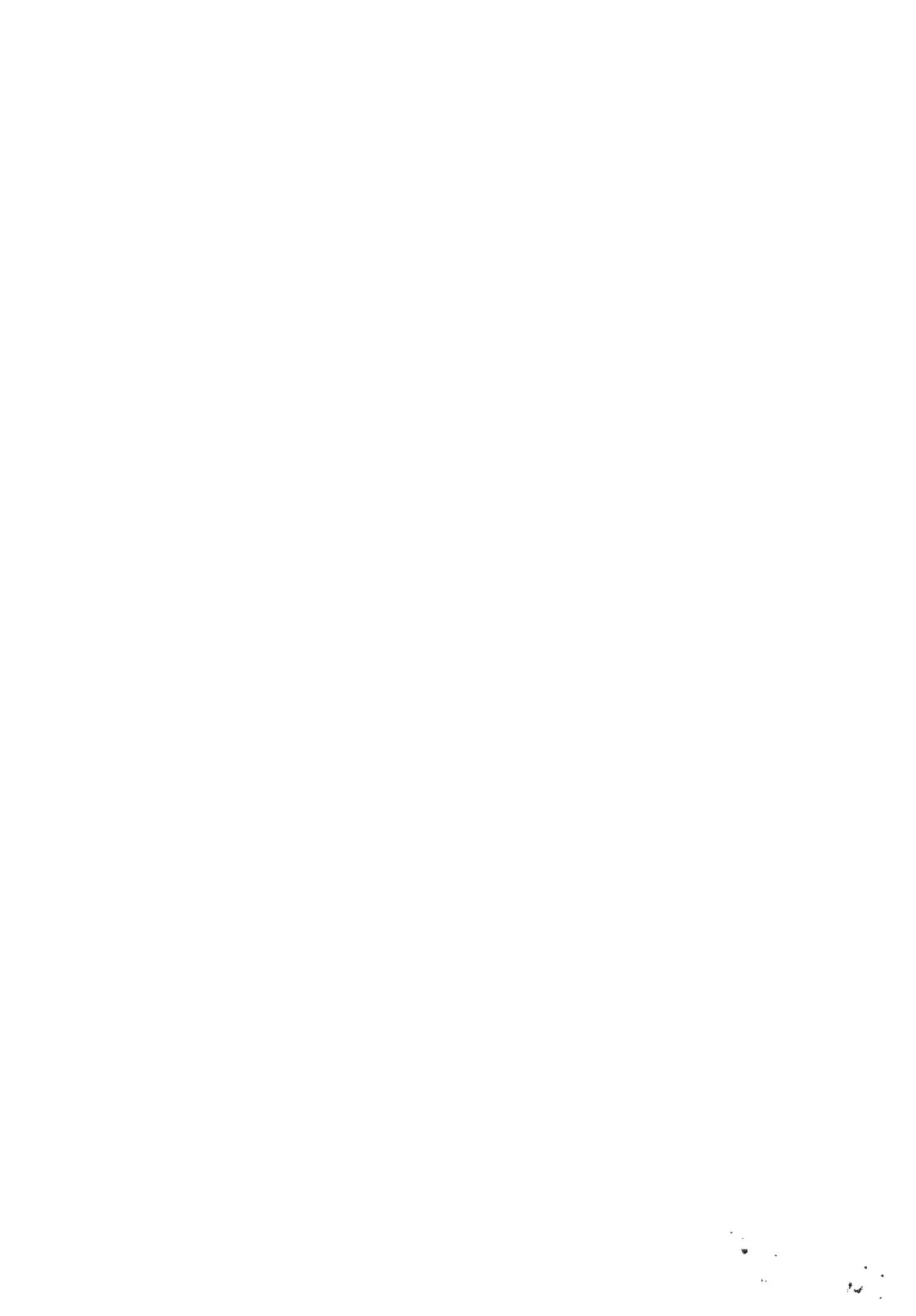
en

GEOLOGIE DE L'INGENIEUR

soutenu le 31 janvier 1997 devant le jury composé de :

M. DEVEUGHELE	Président
J. ESTEOULE	Rapporteur
P. MECHLER	Rapporteur
M. MADON	Examineur
R. STRUILLOU	Examineur

14
05



RESUME

Cette étude est une contribution à l'étude de la dépollution des sols à l'aide d'une modélisation expérimentale. L'objectif du travail est d'étudier les processus physico-chimiques intervenant au cours du transport de polluants métalliques toxiques dans les sols soumis à un champ électrique.

Les essais sont réalisés en laboratoire avec des sols obtenus à partir d'un mélange d'un sable de Fontainebleau avec une solution cationique de polluant. Les polluants étudiés sont des métaux amphotères dont le plomb(II), le chrome(III) et le zinc(II), avec des concentrations initiales variant de 0.1 à 10 g/l. Une tension électrique constante est appliquée au dispositif pendant un temps déterminé.

L'analyse des teneurs de polluant sur différents endroits de la cuve à l'arrêt du traitement dans le sol montre que la répartition du polluant varie en fonction de la nature et de la concentration initiale du polluant utilisé. Ainsi, dans le cas du plomb, nous avons observé trois cas de figure:

- une distribution plutôt homogène du plomb dans la cuve pour une concentration initiale de 0.1 g de Pb^{2+}/l , consécutive à un faible déplacement du polluant,
- un appauvrissement des zones anodique et cathodique, par rapport à la teneur initiale, avec accumulation du polluant au centre de la cuve pour 1 g de Pb^{2+}/l ,
- un appauvrissement important des zones anodiques avec accumulation du polluant à la cathode pour 10 g de Pb^{2+}/l .

Les mesures de pH réalisées sur le sol et sur l'eau interstitielle à différents intervalles de temps ont mis en évidence deux mécanismes à l'origine du transport du plomb: un **transport cationique** à l'anode en présence de pH acides, suivi d'un **transport anionique** à la cathode pour des pH basiques.

En effet, certains hydroxydes métalliques peuvent, sous des conditions de pH basiques, former des anions par réactions de dissolution. Cette propriété permet alors de « remobiliser » le plomb précipité à la cathode sous forme d'anions plombates et de concentrer le polluant dans les zones centrales du dispositif. L'action combinée de ces deux mécanismes de transport concentre la pollution, soit au centre de la cuve, soit à la cathode suivant la concentration initiale. Selon les cas, l'action d'un champ électrique permettrait de restreindre le volume de sol pollué à traiter ultérieurement ou à excaver.

La mesure de la conductivité électrique de l'eau interstitielle met en évidence des variations de la concentration ionique dans le milieu liées au déplacement du polluant ou à sa précipitation.

Les concentrations utilisées dans le cas du chrome et du zinc ont mis en évidence un transport sous une forme cationique. Aucun phénomène de « remobilisation » n'a pu être observé car les pH mesurés à la cathode ne favorisaient pas un transport important du polluant sous forme d'anions.

Mots clés: Electromigration, Electrocinétique, Champ électrique, Métaux toxiques, Plomb, Chrome, Zinc.

AVANT-PROPOS

Je tiens à remercier Monsieur ARNOULD de m'avoir accueillie au Centre de Géologie de l'Ingénieur (C.G.I), commun à l'Ecole des Mines de Paris et à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, et de la confiance qu'il m'a témoignée pendant le déroulement de ma thèse.

Je remercie Monsieur DEVEUGHELE, directeur de recherche à l'Ecole des Mines de Paris de m'avoir acceptée en thèse et de bien vouloir faire partie de ce jury.

Je remercie vivement les membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail. Je remercie particulièrement Monsieur le Professeur ESTEOULE, Professeur à l'INSA de Rennes, d'accepter d'être rapporteur de ce travail ainsi que Monsieur le Professeur MECHLER, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) de bien vouloir porter intérêt à ce travail en qualité de rapporteur.

Je remercie Monsieur le Professeur MADON, Maître de recherche à l'Université de Marne la Vallée, de bien vouloir faire partie de ce jury en tant qu'examineur.

Je remercie Monsieur STRUILLOU, Maître de recherche à l'Ecole des Mines de Paris, de bien avoir voulu guider mon travail et je le remercie des conseils qu'il a pu me prodiguer.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Madame LAPEYRE, Ingénieur de recherche au Centre de Géologie de l'Ingénieur, pour sa participation à ce travail. Je lui suis très reconnaissante pour ses encouragements et le soutien moral qu'elle m'a apportée au cours de cette thèse.

Je remercie tous mes camarades de thèse ainsi que les techniciens du C.G.I qui m'ont aidée pendant le déroulement de cette thèse.

Enfin, je remercie Monsieur MATHIEU, directeur de la recherche à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, de m'avoir accordée une bourse de recherche.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

PARTIE 1 : ETAT DE L'ART

CHAPITRE 1: RAPPELS SUR LES MECANISMES DE TRANSPORT COUPLÉS À UN CHAMP ELECTRIQUE

1. Les phénomènes électrocinétiques.....	5
1.1. Description.....	5
1.2. Théorie de la double couche électrique	6
1.2.1. Modèles de double couche.....	6
1.2.2. Influence du potentiel électrocinétique (potentiel zêta).....	7
1.3. L'électro-osmose.....	8
1.3.1. Approche microscopique: Modèle de Smoluchowski	8
1.3.2. Approche macroscopique: Modèle de Casagrande	9
1.3.3. Définition des coefficients de perméabilité et importance	9
1.3.4. Applications et limites de la méthode.....	10
1.4. L'électrophorèse	11
1.4.1. Principe	11
1.4.2. Applications et limites de la méthode.....	11
1.5. L'électro-migration	11
1.5.1. Principe	11
1.5.2. Applications et limites de la méthode.....	15
1.6. Conclusion	15
2. Les phénomènes électrochimiques.....	16
2.1. Les réactions aux électrodes	16
2.1.1. Influence des réactions d'oxydoréduction	16
2.1.2. Influence de la nature du métal de l'électrode	17
2.2. Les réactions électrochimiques du solvant	17
2.2.1. Importance de l'électrolyse	17
2.2.2. Développement d'un gradient de pH	18
2.2.3. Production de matière aux électrodes	18
2.2.4. Transport de matière par migration électrique.....	19
2.2.5. Transport de matière par diffusion.....	19

CHAPITRE 2: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE TRANSPORT DES POLLUANTS

1. Influence des caractéristiques physico-chimiques.....	21
1.1. Influence du milieu poreux	21
1.1.1. Type de sol.....	21
1.1.2. Nature du fluide interstitiel.....	23
1.2. Les types de polluants	23
1.2.1. Nature du polluant	23
1.2.2. Influence de la concentration du polluant.....	25
2. Influence des réactions chimiques.....	26
2.1. L'adsorption.....	26
2.2. L'échange d'ions.....	26
2.3. La complexation	26
2.3.1. Formation de complexes hydroxydes	26
2.3.2. Importance des complexes anioniques.....	27
2.4. La précipitation	28
2.4.1. Influence du pH sur la solubilité des métaux.....	28
2.4.2. Influence de la concentration sur la solubilité des métaux	29
2.4.3. Formation des précipités.....	29
2.4.4. Concept du système de « purges » chimiques.....	29
3. Conclusion.....	31

PARTIE 2 : ETUDE DU TRANSPORT DES POLLUANTS PAR ELECTROMIGRATION

CHAPITRE 3 : PROCEDURE EXPERIMENTALE

1. Conception des essais.....	35
1.1. Dispositif expérimental.....	35
1.1.1. Choix du modèle de sol	35
1.1.2. Création du champ électrique	35
1.2. Caractéristiques des polluants utilisés	36
1.2.1. Le plomb	36
1.2.2. Le chrome	37
1.2.3. Le zinc.....	37
1.2.4. Domaine de concentrations utilisées.....	39

2. Plan de campagne des essais.....	41
2.1. Mise en place	41
2.2. Mesure des paramètres.....	41
2.2.1. Les paramètres électriques.....	41
2.2.2. Le pH et la conductivité électrique.....	41
2.2.3. La concentration du polluant	43
2.2. Conditions des essais	44

**CHAPITRE 4: INFLUENCE DE LA NATURE DU POLLUANT SUR LE TRANSPORT PAR MIGRATION ELECTRIQUE
APPLICATION AUX POLLUANTS PLOMB, CHROME ET ZINC.**

1. Le plomb.....	47
1.1. Etude des paramètres électriques en fonction du temps	47
1.1.2. Consommation électrique.....	49
1.2. Etude des conditions de pH et de conductivité électrique en fonction du temps.....	50
1.2.1. Evolution du pH du sol et de l'eau interstitielle	50
1.2.2. Evolution de la conductivité électrique	56
1.3. Etude de la concentration du polluant en fonction du temps	58
1.3.1. Répartition du polluant	58
1.4. Conclusion	68
2. Le chrome.....	73
2.1. Etude des paramètres électriques en fonction du temps	73
2.1.1. Evolution de l'intensité électrique	73
2.1.2 Evolution de la tension électrique.....	75
2.1.3. Consommation électrique.....	75
2.2. Etude des conditions de pH et de conductivité électrique en fonction du temps.....	76
2.2.1. Evolution du pH du sol et de l'eau interstitielle	76
2.2.2. Evolution de la conductivité électrique	82
2.3. Etude de la concentration du polluant en fonction du temps	83
2.3.1. Répartition du polluant	83
2.4. Conclusion	89
3. Le Zinc.....	91
3.1. Etude des paramètres électriques en fonction du temps	91

3.1.1. Evolution de l'intensité électrique	91
3.1.2. Evolution de la tension électrique.....	92
3.1.3. Consommation électrique	94
3.2. Etude des conditions de pH et de conductivité électrique en fonction du temps.....	94
3.2.1. Evolution du pH du sol et de l'eau interstitielle	94
3.2.2. Evolution de la conductivité électrique	96
3.3. Etude de la concentration du polluant en fonction du temps	99
3.3.1. Répartition du polluant	99
3.4. Conclusion	102
 CHAPITRE 5 : INFLUENCE DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LA MIGRATION DU PLOMB	
1. Etude des paramètres électriques en fonction du temps.....	105
1.1. Evolution de l'intensité électrique	105
1.2. Consommation électrique	107
2. Etude des conditions de pH et de conductivité électrique en fonction du temps.....	107
2.1. Evolution du pH du sol et de l'eau interstitielle	107
2.2. Evolution de la conductivité électrique	111
3. Etude de la concentration du polluant en fonction du temps.....	111
3.1. Evolution de la concentration du polluant dans l'eau interstitielle.....	111
3.2. Répartition du polluant	113
4. Conclusion.....	117
 CONCLUSION GENERALE	119
 BIBLIOGRAPHIE	125
 ANNEXES I.....	129
 ANNEXES II	139
 ANNEXE III.....	187

FIGURES

Figure 1 : Evolution du potentiel électrique dans la double couche électrique.	6
Figure 2 : Evolution du potentiel zêta en fonction du pH dans des kaolinites..... [Eykholt, Daniel,1994].	7 7
Figure 3 : Influence du pH et de la concentration ionique sur le potentiel zêta du colloïde TiO ₂ [Acar, Alshawabkey, Gale, 1993].	8 8
Figure 4 : Evolution de la tension électrique au cours du temps pour des kaolinites polluées avec du cuivre et à tension initiale constante [Eykholt, Daniel, 1994].	14 14
Figure 5 : Evolution du coefficient log $\alpha_{Pb(OH)}$ et répartition des différentes formes en fonction du pH pour le plomb [Trémillon, 1993].	27 27
Figure 6 : Solubilité apparente du plomb en fonction du pH [Charlot, 1993].	28 28
Figure 7 : Conséquences de l'ajout d'additifs sur le débit électroosmotique pour des kaolinites polluées avec du cuivre [Eykholt, Daniel, 1994].	30 30
Figure 8 : Solubilité apparente du chrome(III) en fonction du pH [Charlot, 1993].	37 37
Figure 9 : Répartition des complexes hydroxydes des ions Zn ²⁺ [Trémillon, 1993].	38 38
Figure 10 : Solubilité apparente du zinc en fonction du pH [Charlot, 1993].	39 39
Figure 11 : Schéma de la cuve expérimentale	42 42
Figure 12 : Schéma du dispositif expérimental et paramètres mesurés.	42 42
Figures 13 : Intensité électrique moyenne (mA) pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de a) 0.1 g de Pb ²⁺ /l, b) 1 g de Pb ²⁺ /l, c) 10 g de Pb ²⁺ /l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).	49 49
Figures 14 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 0.1 g de Pb ²⁺ /l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 2.d - Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde pH ₁ = 8.47 et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde pH ₂ = 11.06).	53 53
Figures 15 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb ²⁺ /l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 2.d - Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde pH ₁ = 7.97 et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde pH ₂ = 12.06).	54 54

Figures 16 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 10 g de Pb^{2+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 2.d - Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1 = 7.47$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2 = 13.06$).....	55
Figures 17 : Répartition du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g de Pb^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 3.a - Annexe II).....	59
Figures 18 : Répartition du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 3.b - Annexe II).....	62
Figures 19 : Répartition du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 10 g de Pb^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 3.c - Annexe II).....	66
Figures 20 : Intensité électrique moyenne pour des sables pollués avec du chrome pour un champ électrique de 2.6 V/cm et pour une concentration initiale de a) 0.1 g de Cr^{3+}/l , b) 0.5 g de Cr^{3+}/l , c) 1 g de Cr^{3+}/l (tableaux 4.d-Annexe II).....	74
Figure 21 : Evolution de la tension électrique (Volts) pour du sable pollué par du chrome avec une concentration initiale de 0.5 g de Cr^{3+}/l (tableaux 4.e.-Annexe II).....	75
Figures 22 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du chrome pour une concentration initiale de 0.1 g de Cr^{3+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 5.a-Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1 = 4.9$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2 = 11.77$).....	79
Figures 23 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du chrome pour une concentration initiale de 0.5 g de Cr^{3+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 5.b-Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1 = 4.67$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2 = 12.48$).....	80
Figures 24 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du chrome pour une concentration initiale de 1 g de Cr^{3+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 5.c-Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1 = 4.57$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2 = 12.78$).....	81
Figures 25 : Répartition du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g de Cr^{3+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 6.a-Annexe II).....	83
Figures 26 : Répartition du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.5 g de Cr^{3+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 6.b-Annexe II).....	86

Figures 27 : Répartition du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g de Cr^{3+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 6.c-Annexe II)	87
Figures 28 : Intensité électrique moyenne pour des sables pollués avec du zinc pour un champ électrique de 2.6 V/cm et pour une concentration initiale de a) 1 g de Zn^{2+}/l , b) 3 g de Zn^{2+}/l , (tableaux 7.b et 7.c-Annexe II).	92
Figures 29.a : Evolution de la tension électrique (Volts) pour du sable pollué avec du zinc avec une concentration initiale de 1 g de Zn^{2+}/l et soumis à une tension électrique de 60 volts (Essai Zn2[1]60 tableaux 7.d.-Annexe II)	93
Figures 29.b : Evolution de la tension électrique (Volts) pour du sable pollué avec du zinc avec une concentration initiale de 3 g de Zn^{2+}/l et soumis à une tension électrique de 60 volts(Essai Zn2[3]60 -tableaux 7.e.-Annexe II)	93
Figures 30 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du zinc pour une concentration initiale de 1 g de Zn^{2+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 8.a-Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $\text{pH}_1=6.38$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $\text{pH}_2= 12.18$).....	97
Figures 31 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du zinc pour une concentration initiale de 3 g de Zn^{2+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 8.b-Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $\text{pH}_1=6$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $\text{pH}_2= 12.6$).	98
Figures 32 : Répartition du zinc (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g de Zn^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 9.a - Annexe II)	100
Figures 33 : Répartition du zinc (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 3 g de Zn^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 9.b - Annexe II)	101
Figure 34 : Intensité électrique moyenne (mA) pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l soumis à une tension électrique de 15 , 30 et 60 Volts (tableaux 10.a-Annexe III).....	106
Figures 35 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l soumis à un champ électrique de 0.65 V/cm a) pH de l'eau interstitielle, b) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 11.a-Annexe III) (pH de précipitation de l'hydroxyde $\text{pH}_1=7.97$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $\text{pH}_2 =12.06$).....	108
Figures 36 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l soumis à un champ électrique de 1.3 V/cm a) pH du sol b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 11.b-Annexe III) (pH de précipitation de l'hydroxyde $\text{pH}_1=7.97$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $\text{pH}_2=12.06$).	110

Figure 37 : Evolution de la concentration en plomb de l'eau interstitielle pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et soumis à un champ électrique de 0.65 V/cm (tableaux 12.a-Annexe III)..... 112

Figure 38 : Evolution de la concentration en plomb de l'eau interstitielle pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et soumis à un champ électrique de 1.3 V/cm (tableaux 12.a-Annexe III)..... 112

Figure 39 : Répartition de plomb (%) pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et soumis à un champ électrique de 0.65 V/cm (tableaux 12.b-Annexe III)..... 113

Figures 40 : Répartition de plomb (%) pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et soumis à un champ électrique de 1.3 V/cm (tableaux 12.c-Annexe III)..... 115

TABLEAUX

Tableau 1 : Description des phénomènes électrocinétiques	5
Tableau 2 : Comparaison des coefficients k_h et k_{eo} de matériaux soumis à un champ électrique de 0.4 V/cm [Segall, Bruell, 1992].	10
Tableau 3 : Valeurs de coefficients de mobilité ionique (u_i), de mobilité ionique effective ($u_i^{\#}$) et de diffusion (porosité=0.6; tortuosité=0.35) en solution, à dilution infinie (à 25 °C) [Acar, Alshwabkeh, 1993].	13
Tableau 4 : Valeurs de potentiels redox standard (E°) de quelques couples (pH=0).	16
Tableau 5 : Influence des caractéristiques du sol sur les coefficients de perméabilité k_h et k_{eo} [Segall, Bruell, 1992].	22
Tableau 6 : Influence du fluide interstitiel sur le coefficient électroosmotique k_{eo} [Segall, Bruell, 1992].	23
Tableau 7 : Caractéristiques des polluants utilisés dans les études de laboratoire.	25
Tableau 8 : Caractéristiques et concentrations des cations polluants Pb^{2+} , Cr^{3+} et Zn^{2+} étudiés.	39
Tableau 9 : Valeurs calculées de pH de précipitation et de redissolution des hydroxydes en fonction de la concentration des cations polluants Pb^{2+} , Cr^{3+} et Zn^{2+}	40
Tableau 10 : Dénomination et caractéristiques des essais réalisés avec du sable pollué par du plomb, du chrome et du zinc pour une tension électrique de 60 Volts, soit un champ électrique de 2.6 V/cm (w initiale: 26 %).	45
Tableau 11 : Consommation électrique des essais réalisés avec du sable pollué avec du plomb pour un champ électrique fixé à 2.6 V/cm.	49
Tableau 12 : Valeurs initiales du pH du sol et de l'eau interstitielle pour des sables pollués avec du plomb et soumis à un champ électrique de 2.6 V/cm.	50
Tableau 13 : Répartition du plomb (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 0.1 g Pb^{2+} /l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).	58
Tableau 14 : Répartition du plomb (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 1 g Pb^{2+} /l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).	61
Tableau 15 : Répartition du plomb (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 10 g Pb^{2+} /l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).	65

Tableau 16 : Synthèse des paramètres chimiques à l'arrêt pour les essais réalisés avec du sable pollué par du plomb pour une concentration initiale de 0.1 g de Pb^{2+}/l et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (teneur en eau initiale de 26%).....	70
Tableau 17 : Synthèse des paramètres chimiques à l'arrêt pour les essais réalisés avec du sable pollué par du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (teneur en eau initiale de 26%).....	71
Tableau 18 : Synthèse des paramètres chimiques à l'arrêt pour les essais réalisés avec du sable pollué par du plomb pour une concentration initiale de 10 g de Pb^{2+}/l et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (teneur en eau initiale de 26%).....	72
Tableau 19 : Consommation électrique des essais réalisés avec du sable pollué avec du chrome pour un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (W=26 %).....	76
Tableau 20 : Valeurs initiales du pH du sol et de l'eau interstitielle pour des sables pollués par du chrome et soumis à un champ électrique de 2.6 V/cm.	76
Tableau 21 : Répartition du chrome (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 0.1 g Cr^{3+}/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).	84
Tableau 22 : Répartition du chrome (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 0.5 g Cr^{3+}/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).	85
Tableau 23 : Répartition du chrome (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 1 g Cr^{3+}/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).	88
Tableau 24 : Synthèse des paramètres à l'arrêt des essais réalisés avec du sable pollué avec du chrome et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (teneur en eau initiale de 26%).....	90
Tableau 25 : Consommation électrique des essais réalisés avec du sable pollué avec du zinc pour un champ électrique fixé à 2.6 V/cm.....	94
Tableau 26 : Valeurs initiales du pH du sol et de l'eau interstitielle pour des sables pollués par du zinc et soumis à un champ électrique de 2.6 V/cm.....	94
Tableau 27 : Répartition du zinc (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 1 g Zn^{2+}/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).	99
Tableau 28 : Répartition du zinc (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 3 g Zn^{2+}/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).	102
Tableau 29 : Synthèse des paramètres à l'arrêt des essais réalisés avec du sable pollué par du Zinc et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm.	103

Tableau 30 : Dénomination et caractéristiques des essais réalisés avec du sable pollué avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l pour une tension électrique initiale de 15 et 30 volts..... 105

Tableau 31 : Consommation électrique des essais réalisés avec du sable pollué avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et pour une tension électrique de 15 ,30 et 60V.107

Tableau 32 : Répartition du plomb (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 1 g Pb^{2+}/l et pour une tension électrique initiale de 15 V, 30 V et 60 V. 114

Tableau 33 : Synthèse des paramètres chimiques à l'arrêt pour les essais réalisés avec du sable pollué par du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et sous un champ électrique fixé à 0.65 V/cm ou 1.3 V/cm..... 118

INTRODUCTION

L'aptitude d'un champ électrique à déplacer de la matière liquide ou solide dans un milieu poreux a été utilisée dans un premier temps dans les travaux de génie civil comme technique de drainage des sols peu perméables.

L'application de la méthode électrique au traitement des sols pollués est un concept plus récent qui a suscité un intérêt important du fait de l'avantage qu'elle présente en matière de simplicité de mise en oeuvre par rapport aux méthodes classiques de pompage hydraulique, pour la récupération des polluants.

En présence de polluants métalliques, le transport est réalisé par migration électrique vers l'électrode positive ou négative selon la charge électrique du métal. Dans un milieu poreux saturé, le passage d'un courant électrique provoque des réactions d'électrolyse de l'eau aux électrodes. L'apparition de valeurs de pH acides à l'anode et basiques à la cathode entraîne l'apparition d'un gradient de pH responsable de la précipitation des métaux sous la forme d'hydroxydes. Ces hydroxydes précipitent généralement à la cathode et ne peuvent plus être transporté par le champ électrique.

Certains précipités d'hydroxydes métalliques ont la particularité de former sous des conditions de pH basiques des anions par des réactions de dissolution. Ces anions sont soumis au champ électrique et se déplacent alors vers l'électrode positive. Cette propriété explique les taux de récupération faibles de polluants sur le terrain. Mais, d'un autre côté, elle pourrait améliorer la quantité de polluant déplacée en « remobilisant » les précipités d'hydroxydes sous une forme anionique.

Dans cette étude, nous nous sommes attachés à étudier les processus physico-chimiques intervenant au cours du transport de métaux toxiques dans les sols et en particulier, les conditions favorisant le phénomène de « remobilisation » du polluant sous une forme anionique. Nous avons particulièrement mis l'accent sur l'évolution des conditions chimiques de la phase solide et de l'eau interstitielle du sol au cours du traitement électrique.

L'influence du champ électrique d'une part, et de la nature et de la concentration initiale du polluant sur l'efficacité du transport d'autre part, ont été abordées chacun indépendamment dans cette étude.

Les sols utilisés sont obtenus à partir d'un mélange d'un sable de Fontainebleau avec une solution cationique de polluant. Les polluants étudiés sont le plomb(II), le chrome(III) et le zinc(II) avec des concentrations initiales variables.

Le plan de cette étude présente deux parties:

- la première partie consiste en une étude bibliographique. Les chapitres 1 et 2 présentent une revue des différents mécanismes de transport sous un champ électrique existant dans les milieux poreux ainsi que les réactions chimiques se déroulant au niveau des électrodes et dans le solvant.
- la deuxième partie présente les résultats des mesures des paramètres électriques et chimiques obtenus pour les trois cations étudiés Pb^{2+} , Cr^{3+} et Zn^{2+} .

Le chapitre 3 présente le dispositif expérimental utilisé, les caractéristiques des polluants étudiés et les conditions sous lesquelles les essais ont été réalisés.

L'influence du champ électrique sur le transport du polluant a été uniquement étudiée dans le cas du plomb avec une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l . Les résultats ont montré que l'augmentation du champ électrique permettait de réduire la teneur finale en polluant à la cathode. Par la suite, les essais ont été réalisés pour une tension électrique maximum de 60 volts.

L'influence de la nature et la concentration initiale du polluant sur le transport électrique est donc abordée dans le chapitre 4 en traitant dans l'ordre les polluants: plomb, chrome et zinc.

L'influence du champ électrique est traitée indépendamment dans le chapitre 5.

PARTIE 1
ETAT DE L'ART

CHAPITRE 1: RAPPELS SUR LES MECANISMES DE TRANSPORT COUPLES A UN CHAMP ELECTRIQUE.

L'application d'un champ électrique à un milieu poreux saturé est à l'origine de deux types de mécanismes:

- des mécanismes électrocinétiques responsables du transport de la matière dans le milieu
- des mécanismes électrochimiques intervenant à l'interface entre les électrodes et le solvant. Ces réactions provoquent l'apparition de nouveaux ions ou nouvelles molécules dans le milieu et favorisent l'établissement de gradients de concentration.

Par ailleurs, les ions peuvent également participer à des réactions chimiques de précipitation ou de complexation pouvant affecter leur transport sous un champ électrique.

1. Les phénomènes électrocinétiques

1.1. Description

Les phénomènes électrocinétiques provoquent des déplacements de liquide par rapport à une interface solide fixe (sol) ou des déplacements de particules chargées au sein d'un liquide immobile sous l'influence d'un champ électrique. Ces phénomènes dits "principaux" concernent l'électro-osmose, l'électro-migration ainsi que l'électrophorèse.

Les phénomènes électrocinétiques dits "inverses" provoquent l'apparition d'un champ électrique sous l'influence de mouvement de particules chargées au sein d'un liquide immobile ou de mouvement d'un liquide à travers un ensemble fixe de particules chargées. Ce sont le potentiel d'électro-filtration et le potentiel d'électro-sédimentation.

Tableau 1 : Description des phénomènes électrocinétiques

Phénomènes	Description	Mode de quantification
Electro-osmose	Déplacement de liquide entre des particules fixes provoqué par une d.d.p électrique	Mesure du débit de liquide (Qeo)
Electrophorèse	Déplacement de particules colloïdales chargées provoqué par une d.d.p électrique (charge électrique <0 ou >0)	Mesure de la vitesse de la particule (Vep)
Electro-migration	Déplacement d'ions provoqué par une d.d.p électrique (charge <0 ou >0)	Mesure de la vitesse de l'ion (Vem)
Potentiel d'électro-filtration	Différence de potentiel électrique provoquée par un déplacement de liquide au contact de particules chargées sous l'effet d'un gradient hydraulique	Mesure d'une d.d.p électrique (V)
Potentiel d'électro-sédimentation	Différence de potentiel électrique provoquée par un déplacement de particules chargées sédimentant dans un liquide sous l'effet de la pesanteur	Mesure d'une d.d.p électrique (V)

Les phénomènes électrocinétiques se développent au niveau d'une interface solide/liquide. Les différentes théories établies qui tentent d'expliquer ces mécanismes dérivent du modèle de la double couche électrique.

1.2. Théorie de la double couche électrique

Le principe de la double couche électrique repose sur le fait qu'une particule solide dans un liquide peut acquérir une charge électrique superficielle. Cette charge est compensée électriquement par une accumulation au voisinage de l'interface solide-liquide d'ions de signe opposé. Il s'établit alors une différence de potentiel électrique entre la surface de la particule et la masse liquide non influencée correspondant à la distribution des ions à l'interface solide-liquide.

1.2.1. Modèles de double couche

Le modèle de la double couche envisagé par Stern (1924) est le plus utilisé dans les études sur la circulation des fluides dans les milieux poreux. Ce modèle de Stern intègre en les améliorant ceux mis au point par ses prédécesseurs à savoir Helmholtz, Gouy et Chapman.

Le modèle d'Helmholtz (1879) considère le capillaire comme un condensateur plan sans tenir compte de la concentration des ions et de l'agitation thermique.

Le modèle de Gouy (1910) et Chapman (1913) introduit la notion de couche diffuse où les charges électriques dans le liquide diminuent lorsqu'on s'éloigne de l'interface. Il ne tient pas compte du volume des ions.

Enfin, le modèle de Stern prend en compte le volume des ions et propose un compromis entre les deux modèles précédents. Il introduit une couche compacte où les ions du liquide proches de l'interface seraient retenus par des forces électrostatiques et d'adsorption chimique. La double couche électrique se compose alors de deux couches:

- la couche compacte où les ions sont fixés à la paroi solide. Cette couche peut être subdivisée en une couche d'ions déshydratés, assimilable au condensateur plan d'Helmholtz (couche interne ou Inner Helmholtz Plane) et une couche d'ions hydratés (couche externe ou Outer Helmholtz Plane). Les ions sont pratiquement immobiles et le potentiel électrique varie linéairement.
- la couche diffuse (dite de Gouy-Chapman). Les ions sont potentiellement mobiles et le potentiel électrique varie de façon exponentielle.

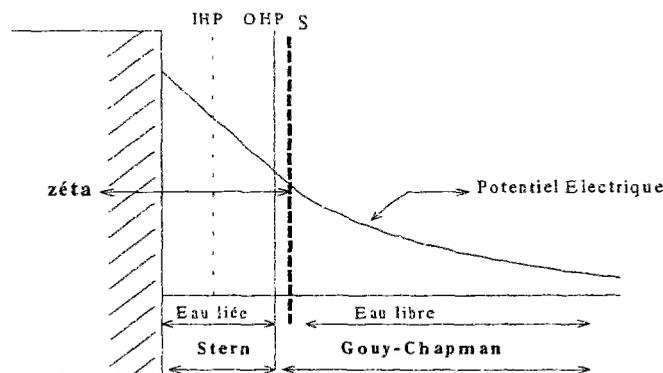


Figure 1 : Evolution du potentiel électrique dans la double couche électrique.

1.2.2. Influence du potentiel électrocinétique (potentiel zêta)

Le potentiel zêta ou potentiel électrocinétique correspond au potentiel électrique existant au niveau du plan de glissement séparant les couches fixes (eau liée) des couches potentiellement mobiles (eau libre). Ce plan appelé plan de cisaillement (S) ne correspond pas exactement à la séparation de la couche compacte de la couche diffuse. Le potentiel zêta est une grandeur accessible expérimentalement.

Le potentiel zêta renseigne sur la charge électrique superficielle des particules. Il est positif pour des pH inférieurs au pH du point isoélectrique de la particule et négatif pour des valeurs supérieures. Ainsi, des tests réalisés sur des kaolinites et faisant intervenir deux types de polluant, ont donné des résultats différents en électro-osmose selon les conditions du pH du liquide:

- les kaolinites polluées avec du phénol présentaient une circulation du liquide en direction de la cathode (potentiel $\zeta < 0$),
- les kaolinites polluées avec des concentrations initiales d'acide acétique de 0.1 et 0.5 M, donnaient un sens de circulation du liquide inversé vers l'anode (potentiel $\zeta > 0$). D'après les auteurs, les valeurs de pH très acides obtenues en présence d'acide acétique (pH<3) expliqueraient la valeur positive du potentiel zêta et le sens de circulation du liquide vers l'anode:

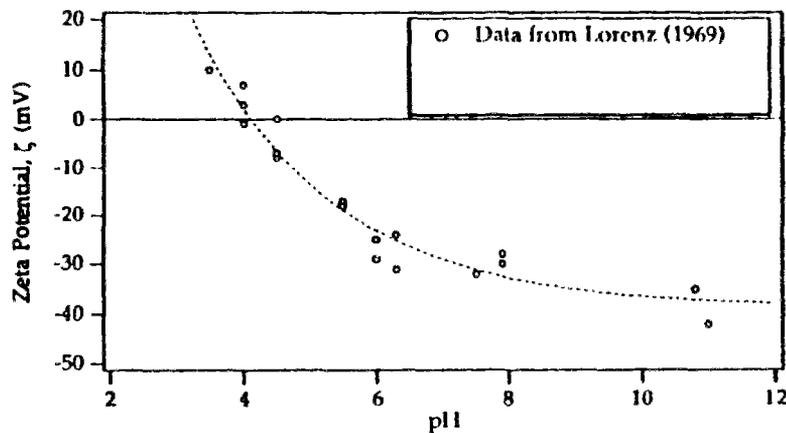


Figure 2 : Evolution du potentiel zêta en fonction du pH dans des kaolinites [Eykholt, Daniel, 1994].

Le potentiel zêta est de l'ordre de -10 à -100 mV pour des argiles saturées en eau et généralement négatif dans le cas de matériaux siliceux saturés.

Le potentiel zêta est sensible aux variations du pH et augmente en valeur absolue pour des pH élevés sous l'influence des hydroxyles OH^- du liquide. De plus, la valeur du potentiel zêta diminue en valeur absolue quand la concentration du polluant augmente [Acar, Alshawabkhey, Gale, 1993].

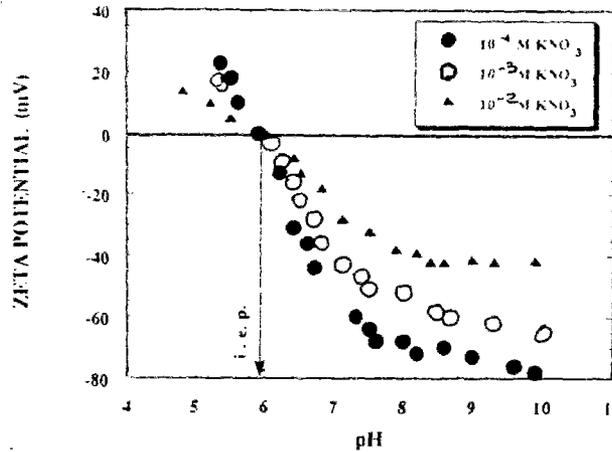


Figure 3 : Influence du pH et de la concentration ionique sur le potentiel zêta du colloïde TiO_2 [Acar, Alshawabkey, Gale, 1993].

Le modèle de la double couche électrique est couramment utilisé pour décrire des phénomènes aux interfaces solide/liquide, c'est à dire roche/liquide interstitiel. Elle peut être également utilisée dans le cas d'un contact entre un métal et un liquide (par exemple, une électrode plongeant dans une solution d'électrolytes) ou dans le cas d'une interface liquide/liquide (eau/huile) ou liquide/gaz (eau/air).

1.3. L'électro-osmose

Les premières analyses théoriques sur les phénomènes électrocinétiques datent des années 1900 et les premières bases établies concernaient les systèmes colloïdaux pour lesquels la théorie de la double couche électrique a fait l'objet de nombreuses études. Nous présenterons la théorie de la double couche électrique d'une manière succincte d'un point de vue microscopique et macroscopique:

1.3.1. Approche microscopique: Modèle de Smoluchowski

Dans un solide poreux fixe, une différence de potentiel électrique provoque un déplacement du liquide interstitiel, y compris les particules solides en suspension, par convection (ou électro-osmose).

En effet, d'après la théorie de la double couche électrique appliquée à des particules de charge négative, les ions positifs hydratés de la couche diffuse mobile sont déplacés par le champ électrique vers la cathode entraînant alors les molécules d'eau polarisées. La résultante est alors un déplacement général du liquide vers la cathode.

Un liquide soumis à un champ électrique subit une force électrique s'exerçant sur les ions et des forces de viscosité. A l'équilibre, la vitesse d'écoulement du liquide est donnée par :

$$V_{eo} = \left(\frac{\zeta \cdot \epsilon_0 \cdot D}{4 \cdot \pi \cdot \eta} \right) \cdot E$$

V_{eo} : vitesse électro-osmotique (m/s)

ζ : potentiel zêta (V)

ϵ_0 : constante diélectrique du vide (1 ou $8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m)

D: constante diélectrique du liquide dans la couche diffuse (80)
 η : viscosité du liquide (10^{-3} Pa.s ou 0.01 poises)
E: champ électrique (V/m)

L'application de cette théorie reste limitée à des systèmes dilués (concentration $<0.1\%$ en poids) où l'épaisseur de la double couche électrique est négligeable devant le rayon des pores ($d > 1000 \text{ \AA}$) et pour des valeurs du potentiel zêta modérées ($|\zeta| < 25 \text{ mV}$).

L'eau peut être transportée par entraînement des molécules dans la couche diffuse ou par hydratation des ions du solvant. Ce dernier cas n'est pas pris en compte par la théorie de Smoluchowski.

Les approches théoriques sont bien développées pour les systèmes colloïdaux et décrivent des phénomènes à une échelle microscopique. Elles s'appliquent à des systèmes où les conditions chimiques sont constantes avec le temps. Les interactions entre les ions en solution et le sol ne sont pas prises en compte (cas des sols pollués) ainsi que les variations spatiales.

1.3.2. Approche macroscopique: Modèle de Casagrande

La transposition de la théorie microscopique à des milieux poreux présentait certaines difficultés puisque les sols en tant que systèmes compacts ne répondent pas aux conditions d'utilisation du modèle de Smoluchowski.

Casagrande (1947) résout cette difficulté en définissant par analogie avec la loi de Darcy un débit et une perméabilité électro-osmotique de la manière suivante [Casagrande, 1983]:

$$Q_{eo} = k_{eo} \cdot E \cdot S$$

Q_{eo} : débit électro-osmotique (m^3/s)

k_{eo} : coefficient de perméabilité électro-osmotique ($\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)

S: section concernée par l'écoulement (m^2)

E: champ électrique (V/m)

Le débit électro-osmotique est proportionnel au champ électrique et à un coefficient k_{eo} .

1.3.3. Définition des coefficients de perméabilité et importance

Le coefficient de perméabilité électro-osmotique k_{eo} dépend de la viscosité du fluide et des propriétés électriques des particules (potentiel zêta) [Mitchell, 1976]:

$$k_{eo} = \left(\frac{\zeta \cdot D}{4 \cdot \pi \cdot \eta} \right) \cdot n \text{ avec } n: \text{porosité}$$

L'ordre de grandeur du coefficient k_{eo} est de 10^{-9} à $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, les valeurs les plus fortes se rencontrant pour les sols fins à faible perméabilité hydraulique (k_h), forte teneur en eau, et faible concentration en électrolyte. D'une manière générale, les sols fins présentent des coefficients de perméabilité électro-osmotique (k_{eo}) plus importants que ceux de leur perméabilité hydraulique (k_h) (cf tableau 2).

Tableau 2 : Comparaison des coefficients k_h et k_{eo} de matériaux soumis à un champ électrique de 0.4 V/cm [Segall, Bruell, 1992].

Matériaux	k_h ($m s^{-1}$)	k_{eo} ($m^2 V^{-1} s^{-1}$)
Kaolin	$3.2 \cdot 10^{-10}$	$3.6 \cdot 10^{-9}$
Silt	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$5.4 \cdot 10^{-9}$
30 % Kaolinite + 70 % sable	$5 \cdot 10^{-10}$	$1.8 \cdot 10^{-9}$

D'après Casagrande, le coefficient k_{eo} devait rester constant pour un sol donné. En réalité, le coefficient k_{eo} n'est pas constant au cours du traitement électrique. Des kaolinites polluées par du plomb et traitées par électro-osmose sous des conditions de courant constantes montrent une diminution des coefficients avec le temps entraînant une chute du débit de liquide [Hamed, Acar, Gale, 1991]. Dans certains cas, il peut y avoir arrêt de la circulation du liquide [Jacobs, Sengun, Hicks, 1994].

Le coefficient k_{eo} est proportionnel au potentiel zêta. Lorsque les conditions chimiques du milieu évoluent vers des valeurs de pH acides, le potentiel zêta diminue ainsi que le coefficient k_{eo} . Le coefficient varie avec les conditions de pH et avec la conductivité électrique du liquide.

Dans le cas de milieux argileux, il est indispensable de tenir compte de l'évolution du potentiel zêta. L'apparition de l'électro-osmose nécessite une valeur du potentiel non nulle: une expérience sur de la craie altérée naturellement polluée par des hydrocarbures donne des valeurs de zêta faibles (≈ 20 mV) mais suffisantes pour générer des phénomènes électrocinétiques [de Marsily, Lancelot, Londiche, 1992].

1.3.4. Applications et limites de la méthode

L'utilisation de l'électro-osmose est bien adaptée aux sols fins peu perméables (faible valeur du coefficient de perméabilité hydraulique k_h) et présentant une charge électrique (valeur du potentiel zêta non nulle).

Ces propriétés ont donné naissance à la méthode dite de consolidation électro-osmotique appliquée aux sols peu perméables dont Casagrande a été l'un des précurseurs. La théorie électro-osmotique reste applicable pour certaines hypothèses (potentiel zêta et champ électrique constants, homogénéité du sol, saturation en eau).

Il est tout de même possible d'observer des débits électro-osmotiques sur des milieux à forte perméabilité hydraulique: un sable grossier perméable ($k_h=8 \cdot 10^{-4}$ m/s), pollué avec du fuel, présente, malgré l'imposition d'un gradient hydraulique opposé, une migration des polluants sous un champ électrique de 5 V/cm [de Marsily, Lancelot, Londiche, 1992].

Dans la plupart des sols, le potentiel zêta est négatif ce qui induit un transport de l'eau de l'anode vers la cathode. Dans ce contexte, la méthode électro-osmotique est peu adaptée à des polluants anioniques: le déplacement de ces polluants vers l'anode induit un taux de récupération par électro-osmose réduit [Probstein, Hicks, 1993]. Un traitement chimique du milieu visant à modifier le signe du potentiel zêta peut alors être envisagé.

Les variations des paramètres chimiques au cours du traitement (pH, conductivité électrique et potentiel zêta) sont responsables de la diminution du débit du liquide, voire dans certains cas de son arrêt : c'est une des limites à la méthode.

1.4. L'électrophorèse

1.4.1. Principe

L'électrophorèse concerne le déplacement de particules solides colloïdales chargées (0.1-10 μm) dans un liquide immobile. Du fait de la charge électrique en général négative, ces particules se déplacent en direction de l'anode. Les lois régissant ce phénomène sont identiques à celle de l'électro-osmose.

On définit une mobilité électrophorétique (Me) des particules telles que:

$$Me = \frac{V_{ep}}{E} = \frac{\zeta \cdot \epsilon_0 D}{4 \cdot \pi \cdot \eta}$$

Me : ($\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)

V_{ep} : vitesse de la particule (m/s)

E : champ électrique (V/m)

ζ : potentiel zêta (V)

ϵ_0 : constante diélectrique du vide (1 ou $8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m)

D : constante diélectrique du liquide dans la couche diffuse (80)

η : viscosité du liquide (10^{-3} Pa.s ou 0.01 poises)

1.4.2. Applications et limites de la méthode

L'électrophorèse est utilisée dans le domaine minier pour concentrer des suspensions diluées colloïdales de particules métalliques ou de charbon dans les étangs [Davis, 1992] et [Sauer, Davis, 1994]. L'électrophorèse entraîne la floculation des particules et leur sédimentation est généralement observée à l'anode.

L'utilisation conjointe de l'électrophorèse et de l'électro-osmose permet d'une part de sédimenter des particules dans un liquide, et d'autre part d'assécher le milieu par évacuation du liquide.

La contribution de l'électrophorèse au transport de polluant semble peu importante dans les sols. Néanmoins, ce mécanisme ne peut être négligé en présence de colloïdes car des études montrent qu'ils peuvent fixer des polluants par adsorption et les transporter dans les sols sur de grandes distances [Buddemeir, 1988].

1.5. L'électro-migration

1.5.1. Principe

L'application d'un champ électrique provoque le déplacement de particules dissoutes chargées dans le liquide immobile. Ces particules sont généralement des ions métalliques mais peuvent être aussi des polluants divers à condition qu'ils soient chargés.

Soit un ion i soumis à un champ électrique, on rappelle les définitions suivantes:

- j_i : la densité de flux de l'ion (nombre de moles de l'ion i traversant une surface unitaire par unité de temps):

$$\vec{j}_i = C_i \cdot u_i \cdot \vec{E}$$

j_i : densité de flux de l'ion (mol/m².s)

u_i : mobilité absolue définie par la vitesse de l'ion sous un champ électrique unitaire (m² V⁻¹ s⁻¹)

$$u_i = \frac{D_i \cdot z_i \cdot F}{R \cdot T}$$

(relation de Nernst-Einstein)

C_i : concentration de l'ion (mol/m³)

E : champ électrique (V/m)

D_i : coefficient de diffusion en solution aqueuse pure (m²/s)

z_i : charge de l'ion

F : Constante de Faraday ($F \approx 96500$ C/mole)

R : constante des gaz parfaits (8.314 J/mol.k)

T : température absolue (K)

V_i : vitesse de migration électrique (m/s)

- J_i : la densité de courant (ou quantité d'électricité transportée par l'ion i sous un champ unitaire et une surface unitaire):

$$\vec{J}_i = F \cdot z_i \cdot \vec{j}_i$$

$$\vec{J}_i = F \cdot z_i \cdot C_i \cdot u_i \cdot \vec{E}$$

- J : la densité de courant total

$$\vec{J} = \sum \vec{J}_i$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{loi d'ohm})$$

$$\text{avec } \sigma = F \cdot \sum (z_i \cdot C_i \cdot u_i)$$

σ : conductivité électrolytique (Ω^{-1}/m ou S/m)

La vitesse d'électro-migration d'un ion est proportionnelle au champ électrique et à la charge ionique:

$$\vec{V}_{em} = u_i \cdot z_i \cdot F \cdot \vec{E}$$

V_{em} : vitesse d'électro-migration de l'ion (m/s)

En solution et à dilution infinie, les espèces ioniques présentent des valeurs de mobilité ionique (u_i) comprises entre 10^{-7} et $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ en dehors des espèces H_3O^+ et OH^- qui ont les valeurs les plus fortes ($u_{\text{H}_3\text{O}^+} = 3.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ et $u_{\text{OH}^-} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ soit $u_{\text{H}_3\text{O}^+} \approx 1.7 u_{\text{OH}^-}$).

Dans les sols, on définit plutôt une mobilité ionique effective (u_i^*) fonction de la tortuosité et de la porosité du milieu. Les valeurs de mobilité ionique effective rencontrées généralement dans les sols fins saturés sont environ de 10^{-8} à $3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [Yeung, Sadek, Mitchell, 1993].

Pour un ion donné, la vitesse d'électro-migration peut être supérieure à la vitesse électro-osmotique (un à deux ordres de grandeur) et elle n'est pas affectée par les variations du potentiel zêta et par les propriétés du sol [Jacobs, Sengun, Hicks, 1994].

Un exemple de valeurs de mobilités et des coefficients de diffusion est donné dans le tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs de coefficients de mobilité ionique (u_i), de mobilité ionique effective ($u_i^{\#}$) et de diffusion (porosité=0.6; tortuosité=0.35) en solution, à dilution infinie (à 25 °C) [Acar, Alshawabkeh, 1993].

Espèces ioniques	$u_i \cdot 10^{10}$ ($\text{m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	$u_i^{\#} \cdot 10^{10}$ ($\text{m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	$D_i \cdot 10^{10}$ (m^2/s)
H_3O^+	3625	760	93
Na^+	519	109	13
Ca^{+2}	617	130	8
Pb^{+2}	560	118	7
Zn^{2+}	480 (18°C)*	-	7.02*
Cu^{+2}	440 (18°C)*	-	-
Cr^{+3}	694	146	6
OH^-	2058	432	53

*: tirées de G. Milazzo (1969).

L'énergie (W) et la puissance électrique (P) consommée au cours du traitement est calculée de la manière suivante :

$$W = (V_a - V_c) \cdot I \cdot t$$

$$P(\text{watts}) = \frac{W}{t}$$

W: énergie électrique (Watt-seconde (joules) ou Watt-heure (Wh))
 ($V_a - V_c$): d.d.p entre les électrodes (Volts)
 I: Intensité électrique (Ampères)
 t: temps d'application

La puissance consommée par unité de volume de sol traité est donnée par:

$$P\left(\frac{\text{watts}}{\text{m}^3 \text{ sol}}\right) = \frac{W}{t} * \frac{1}{v_l}$$

$$= \frac{\Delta V \cdot I}{S \cdot L} = \frac{R \cdot I^2}{v_l} = J \cdot E$$

W :(Wh)

t : temps (heure)

v_l : volume du sol traité (m^3)

ΔV : d.d.p entre les électrodes (volts)

S : section de sol traitée influencée par l'électrode (m^2)

L: longueur de l'échantillon (m)

R: résistance électrique du milieu (Ω)

J: densité de courant (A/m^2)

E : champ électrique (V/m)

Dans les tests à intensité électrique imposée, la puissance consommée augmente avec la résistance électrique du milieu.

Les études montrent que la diminution de la conductivité électrique à la cathode, en relation avec la précipitation des polluants, est responsable de l'augmentation du potentiel électrique dans cette zone.

Dans le cas d'une tension électrique imposée, l'augmentation de la résistance du milieu est responsable de la chute de l'intensité et de la puissance consommée. La résultante est une augmentation du champ électrique local dans la zone cathodique [Segall, Bruell, 1992].

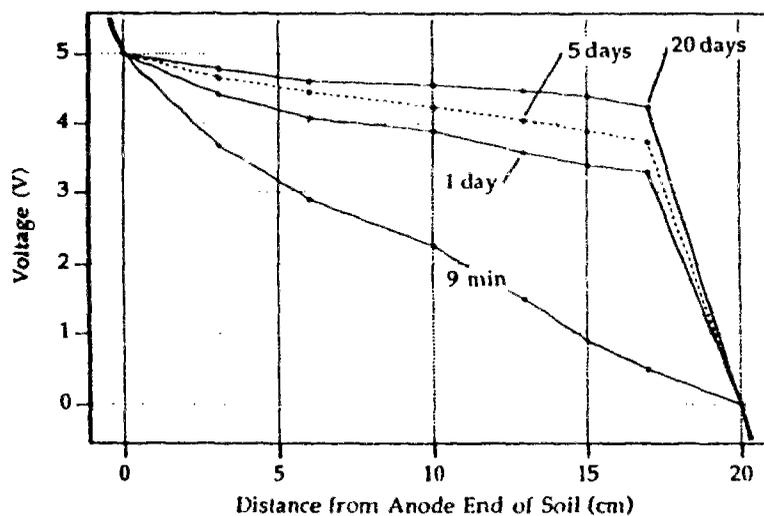


Figure 4 : Evolution de la tension électrique au cours du temps pour des kaolinites polluées avec du cuivre et à tension initiale constante [Eykholt, Daniel, 1994].

Des boues magnésiennes traitées par électro-osmose pour un dispositif électrique à intensité imposée donnaient une consommation d'énergie électrique plus importante que pour un

dispositif à tension imposée (conditions de champ électrique et de débit de liquide identiques) [Yoshida, Shinkawa, 1980].

L'énergie électrique moyenne consommée pour extraire des polluants métalliques de sables argileux se situent entre 50-200 kWh/m³ de sol traité pour une efficacité de transport de 50-90% [Acar, Alshawabkeh, Gale, 1993] et [Hamed, Acar, Gale, 1991].

1.5.2. Applications et limites de la méthode

L'électro-migration est une technique bien adaptée aux polluants métalliques à l'état dissous. L'application du champ électrique provoque le déplacement des ions vers la cathode ou l'anode selon le signe de la charge électrique.

La production d'ions OH⁻ à la cathode est responsable de la précipitation des polluants et de leur immobilisation dans le milieu. C'est une des limites de la méthode. Dans ce cas, les techniques classiques d'extraction et récupération des polluants par circulation d'un liquide dans le milieu n'est pas adaptée. L'excavation du sol pollué pourrait être alors envisagée à condition que le volume de sol reste peu important [Probstein, Hicks, 1993].

1.6. Conclusion

Les théories électrocinétiques dérivent du modèle de la double couche électrique adaptée aux systèmes microscopiques colloïdaux dilués ayant une faible concentration en électrolytes. Malgré ces conditions restrictives, elles sont appliquées aux sols, comme c'est le cas pour la consolidation électrique par électro-osmose, ou adaptées aux problèmes de pollution de sols.

On admet généralement que l'électro-osmose est le mécanisme dominant dans les sols argileux et pour des polluants ayant des faibles solubilités à l'eau. A l'inverse, pour des polluants sous forme chargée, l'électro-migration devient le mécanisme de transport principal.

La compétition entre ces deux mécanismes peut se manifester lors de variations de la concentration ionique et du potentiel zêta. La vitesse d'électro-migration peut alors devenir supérieure à la vitesse électro-osmotique selon les circonstances.

Les mécanismes de transport ne doivent pas être envisagés séparément. Les études montrent que le transport de polluants peut être réalisé simultanément par plusieurs mécanismes ou par l'action successive de ces mécanismes au cours du traitement. De plus, l'action combinée de plusieurs techniques peut contribuer soit à augmenter l'efficacité du transport de polluants (cas de l'électrophorèse et l'électro-osmose appliquées aux suspensions de charbon), soit à la diminuer (cas de l'électromigration et l'électro-osmose appliquées aux polluants anioniques).

2. Les phénomènes électrochimiques

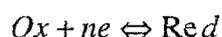
2.1. Les réactions aux électrodes

Le passage d'un courant électrique dans un sol saturé est assuré par:

- des échanges électroniques lors de réactions d'oxydoréduction se déroulant à la surface des électrodes,
- par un transport de matière produite dans le milieu par convection électro-osmotique, migration électrique ou diffusion.
- des réactions acides bases ou de complexation/précipitation dans le milieu.

2.1.1. Influence des réactions d'oxydoréduction

Les réactions d'oxydoréduction mettent en jeu une forme oxydée (Ox) et une forme réduite (Red) avec échange d'électrons tel que:



On définit un potentiel redox (E) pour chaque couple Ox/Red en tenant compte de la concentration des différents constituants et du potentiel redox standard suivant la loi de Nernst:

$$E = E^0 + \frac{R.T}{n.F} \cdot \ln \frac{[Ox]}{[Red]}$$

E: potentiel redox du couple en volts (à 25 °C)

E⁰: potentiel redox standard (potentiel normal) défini par rapport au couple H₃O⁺/OH⁻

R: constante des gaz parfaits

T: température (K)

n: nombre d'électrons

F: Constante de Faraday (F≈96500 C/mole)

Le calcul des potentiels redox permet d'établir une classification des différents couples par rapport à un couple de référence :

Tableau 4 : Valeurs de potentiels redox standard (E⁰) de quelques couples (pH=0).

Couples	O ₂ /H ₂ O	Pt/Pt ²⁺	Ag/Ag ⁺	Cu/Cu ²⁺	H ₂ /H ₃ O ⁺	Pb/Pb ²⁺	Cr ³⁺ /Cr ₂₊	Fe/Fe ²⁺	Zn/Zn ²⁺	Cr ²⁺ /Cr
E ⁰ (Volts)	+1.23	+1.2	+0.8	+0.34	0	-0.13	-0.41	-0.44	-0.76	-0.91

Les potentiels redox permettent de prévoir les réactions possibles entre les différents couples sachant que les réactions d'oxydoréductions font intervenir les couples ayant une valeur de potentiel la plus faible. Les couples métalliques ayant un potentiel très négatif seront facilement oxydables (cas de Fe/Fe²⁺).

Toutefois, la prévision de ces réactions peut ne pas être en accord avec la réalité car il faut tenir compte de la cinétique des réactions. Ainsi, les réactions d'oxydoréduction de l'eau sont des

réactions lentes, et les corps formés peuvent rester longtemps en solution avant de participer aux réactions.

2.1.2. Influence de la nature du métal de l'électrode

Deux types d'électrodes peuvent être utilisés aux cours des expérimentations: les électrodes d'injection (courant électrique) et les électrodes de mesure (potentiel électrique). Les premières sont le plus souvent constituées par des métaux inertes du type platine ou graphite. Ces couples présentent un potentiel redox élevé et le métal ne participe pas aux réactions d'oxydoréduction. Les secondes peuvent être en acier inoxydable ou en un métal peu réducteur. Les électrodes métalliques classiques peuvent participer aux réactions d'oxydoréduction avec dissolution anodique du métal dans le milieu:



La nature métallique de l'électrode influence les conditions de transport de l'eau par électro-osmose. Ainsi, une étude comparative réalisée avec deux types d'électrodes (graphite et fer) montre que pour des conditions électriques et de mise en place du sol identiques, les électrodes de graphite provoquent un débit électro-osmotique deux fois plus faible que celui obtenu avec les électrodes en fer [Segall, Bruell, 1992].

Une autre étude sur des argiles non polluées a testé trois types d'électrodes: cuivre, acier et carbone. Les électrodes en cuivre permettaient d'obtenir un débit d'eau plus important devant l'acier et le carbone [Lockhart, 1983].

2.2. Les réactions électrochimiques du solvant

2.2.1. Importance de l'électrolyse

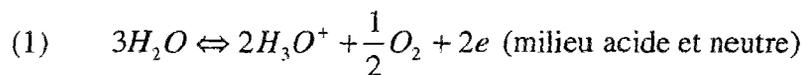
L'imposition d'un courant électrique à un milieu saturé en eau provoque des réactions d'oxydoréduction faisant intervenir les couples suivants: H_2O/O_2 et H_3O^+/H_2 . Le potentiel redox sera alors fonction du pH:



$$E = E^0 - \frac{R.T}{n.F} \cdot q \cdot pH + \frac{R.T}{n.F} \cdot \ln \frac{[Ox]}{[Red]}$$

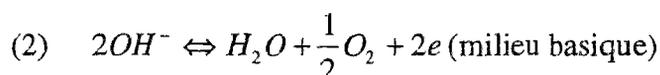
Les réactions d'électrolyse de l'eau en fonction des conditions de pH sont les suivantes:

- à l'anode (réaction d'oxydation):



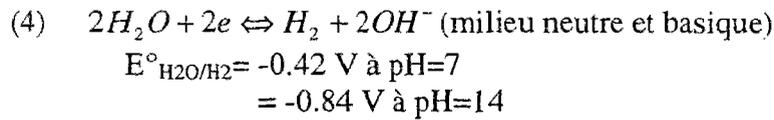
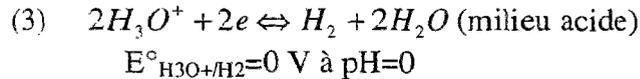
$$E^{\circ}_{O_2/H_2O} = 1.23 \text{ V à pH=0}$$

$$= 0.81 \text{ V à pH=7}$$



$$E^{\circ}_{O_2/OH^-} = 0.39 \text{ V à pH=14}$$

- à la cathode (réaction de réduction):



2.2.2. Développement d'un gradient de pH

En présence d'électrodes inertes, les réactions d'oxydoréduction produisent généralement des ions hydronium H_3O^+ à l'anode (réaction 1) et des ions hydroxydes OH^- à la cathode (réaction 4). L'apparition de ces espèces dans le milieu induit un gradient de pH et des variations locales de la conductivité électrolytique.

En présence d'électrodes métalliques, des réactions d'oxydoréduction du métal peuvent se substituer à celles de l'électrolyse de l'eau. Selon les valeurs du potentiel redox des couples présents, plusieurs possibilités peuvent se présenter:

- à l'anode, la réaction d'oxydation du métal sera prédominante sur la réaction d'électrolyse de l'eau (1) ou (2) pour les couples ayant le potentiel le plus faible excepté pour les métaux nobles (Ag, Pt ...),

- à la cathode, la réaction de réduction du métal sera prédominante sur la réaction d'électrolyse de l'eau (3) ou (4) pour les couples les moins réducteurs.

En présence de forts voltages, les réactions d'électrolyse de l'eau sont le plus souvent favorisées par rapport aux réactions d'oxydoréduction bien que certaines études réalisées sur des suspensions argileuses montrent des résultats contraires [Lockart, 1983].

2.2.3. Production de matière aux électrodes

La quantité de matière produite ou consommée aux électrodes par oxydoréduction est reliée à la quantité de courant par la loi de Faraday:

$$Nox = Nred = \frac{Q}{F} = \frac{I.t}{F}$$

La quantité et la vitesse des produits formés dépendent de l'intensité électrique traversant le milieu:

$$\frac{dNox}{dt} = -\frac{dNred}{dt} = \frac{dQ}{F.dt}$$
$$Vox = -Vred = \frac{I}{F}$$

Nox=Nred: nombre d'équivalents-grammes (eq-gr) ¹

¹ si N en moles, Nox=Nred=Q/n.F

n: nombre d'électrons
 Q : quantité d'électricité (C) avec $Q = I (A) \cdot t (s)$
 F : constante de Faraday (96500 C)
 V : vitesse de formation des espèces

La quantité réelle de matière produite aux électrodes est généralement inférieure à celle prévue par la loi de Faraday en raison de la présence de surtensions.

Dans une électrolyse à potentiel imposé, il faut tenir compte de surtensions dites de « transfert » au niveau des électrodes, surtension correspondant à la tension à appliquer pour obtenir le passage des électrons. De plus, il faut ajouter la surtension dite de « résistance » correspondant à la tension nécessaire pour vaincre la résistance électrique du milieu. Ces surtensions correspondent à la polarisation des électrodes.

La fraction du courant électrique participant réellement aux réactions d'électrolyse et de transport électrique des ions est appelée courant faradique.

Au cours d'une électrolyse à potentiel imposé, la concentration des espèces diminue dans le milieu et le courant électrique tend vers une valeur résiduelle.

2.2.4. Transport de matière par migration électrique

Les espèces produites aux électrodes et les produits nouvellement formés entre les électrodes vont se déplacer dans le milieu sous l'effet du champ électrique contribuant au courant de conduction. Au cours de l'électrolyse, il s'établit un équilibre entre le transport des ions (j : densité de flux massique) et celui des électrons (J : densité de courant). La concentration des ions dans la solution diminue au cours de l'électrolyse par consommation des espèces aux électrodes ou par participation aux réactions chimiques dans le solvant.

2.2.5. Transport de matière par diffusion

Les variations de concentration dans le milieu peuvent avoir deux origines: des réactions chimiques dans le solvant ou des réactions redox aux électrodes.

Si la vitesse des réactions aux électrodes est supérieure à celle du transfert de matière dans le milieu, les variations de concentration provoquent la formation de gradients de concentration. L'apport de nouvelles espèces peut être assuré par la migration, la convection ou la diffusion. Ce renouvellement est lent et des variations de concentration des espèces peuvent apparaître au contact des électrodes. Le transport pourrait alors être assuré par un régime de diffusion :

$$j_D = -D \frac{dC_i}{dx} \text{ (1}^{\text{ère}} \text{ loi de Fick)}$$

$$j_{migration} = -\left(\frac{z_i \cdot F}{R \cdot T}\right) \cdot D_i \cdot C_i \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \text{ et } j_{total} = j_{diffusion} + j_{migration}$$

CHAPITRE 2: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE TRANSPORT DES POLLUANTS

1. Influence des caractéristiques physico-chimiques

1.1. Influence du milieu poreux

1.1.1. Type de sol

- minéralogie:

L'argile et le sable représentent des cas extrêmes du point de vue du comportement électrique puisque l'existence d'une charge électrique de surface chez les particules argileuses est à l'origine de la convection du fluide par électro-osmose mais également de phénomènes d'adsorption des polluants. En raison de leur faible perméabilité à l'eau, les argiles restent des matériaux difficiles à dépolluer par les méthodes conventionnelles (pompage hydraulique). La méthode électrique représente alors une solution intéressante. De nombreuses études ont été réalisées sur des argiles (kaolinite, montmorillonite) ou des matériaux reconstitués en laboratoire:

- mélanges d'argile et de sable (0.07-0.9 mm) dans un rapport de 1/10 [Pamukcu, Kenneth Wittle, 1992], mélanges de sables fins (0.075-0.15) et moyens (0.15-0.3 mm) [Lindgren, Mattson, Kozak, 1991],

- 100 % sable alluvionnaire grossier (0.1-6 mm) et quelques milieux naturels constitués par de la Craie marneuse ou du grès de Fontainebleau. [de Marsily, Lancelot, Londiche, 1992].

Les matériaux sont généralement saturés en eau (70 -95 %) et consolidés dans le cas des argiles (100 à 500 kPa).

- teneur en argile, porosité:

D'après la théorie, l'électro-osmose serait plus efficace dans les sols fins du fait d'un volume moyen de pores plus petit (cf chapitre 1). Le mécanisme à l'origine du déplacement du fluide prend naissance à l'interface sol-eau et se propage ensuite à l'ensemble du fluide. Par conséquent, plus le volume des pores est faible, plus le déplacement de l'eau est facilité (cas des capillaires fins). Ceci explique le succès de la méthode électrique sur les sols fins.

Dans ce type de sol peu perméable, le flux électroosmotique serait indépendant de la taille des pores [Probstein, Hicks, 1993] et [Lindgren, Mattson, Kozak, 1991]. Pour d'autres auteurs, le flux électroosmotique dans les sols fins serait au contraire dépendant de la dimension des pores. Ainsi, une étude [Lockhart, 1983] montre un débit électroosmotique deux à quatre fois plus faible dans le cas d'une montmorillonite par rapport à une kaolinite en raison d'un volume moyen des pores inférieur pour la montmorillonite. L'assèchement d'un matériau dépend de sa nature, du volume moyen de pores et de la distribution de la taille des pores.

Une autre étude [Segall, Bruell, 1992] portant sur des mélanges limons/argiles montre que le flux électroosmotique est indépendant de la taille des particules (D_{10}) mais augmente avec la porosité:

Tableau 5 : Influence des caractéristiques du sol sur les coefficients de perméabilité k_h et k_{eo} [Segall, Bruell, 1992].

Matériaux	k_h (m/s)	Porosité (n)	k_{eo} ($m^2 V^{-1} s^{-1}$)	D_{10} (mm)
100 % silt	$6.0 \cdot 10^{-7}$	0.371	$4.48 \cdot 10^{-9}$	0.07
90 silt/10 kaolin	$1.8 \cdot 10^{-8}$	0.444	$4.72 \cdot 10^{-9}$	0.01
100 % kaolin	$3.0 \cdot 10^{-10}$	0.616	$1.23 \cdot 10^{-8}$	0.00015

La teneur en argile d'un échantillon influence le débit électroosmotique. Sous des conditions de champ électrique identiques, c'est l'échantillon ayant une teneur en argile la plus importante qui présentera un débit plus fort. Inversement, pour obtenir un débit électroosmotique identique sur trois échantillons à teneurs en argile différentes (1, 5 et 10 %), il faut augmenter le champ électrique dans le cas des échantillons à faible teneur [Amba, Chilingar, Beeson, 1964].

- homogénéité:

L'application d'un champ électrique provoque un débit électroosmotique dirigé vers la cathode. Si le dispositif expérimental est fermé aux extrémités, il s'établit un gradient hydraulique inverse dirigé vers l'anode, s'opposant au flux électroosmotique initial. Ce phénomène est plus marqué dans le cas de sols de faible perméabilité hydraulique. [Kozak, 1992].

- teneur en eau / saturation:

Bien que la majorité des expériences soit réalisée sur des argiles saturées ou proches de la saturation, les études concernent actuellement des sols non saturés. A partir du moment où il existe un film liquide assurant une continuité électrique dans le milieu, l'application de la méthode sur des sols non saturés peut être envisagée.

Les argiles par leur gamme de pores étendue peuvent garder une continuité électrique suffisante puisque le dessèchement affectera en premier lieu les pores les plus volumineux. Des expériences sur des argiles non polluées, à teneurs en eau initiales différentes, montrent que le débit électroosmotique ne chute pas au cours du traitement contrairement à ce qui est généralement observé pour les échantillons pollués. Les conditions de saturation n'auraient pas une importance significative sur le débit électro-osmotique dans les expériences à 1-D [Report N°EK-BR-009-0292, 1992].

Des essais en 2.D réalisés sur des sables non saturés, pollués avec du chrome montrent un déplacement quasi total du polluant dans le milieu. Le mécanisme de transport dominant dans de telles conditions est l'électromigration malgré la présence au départ d'un faible débit électroosmotique [Lindgren, Mattson, Kozak, 1991]. L'électromigration est donc efficace à la fois sur des sols saturés et non saturés.

Dans le cas d'un traitement sans apport d'eau aux électrodes, on observe le dessèchement du sol et une diminution de la teneur en eau à l'anode. De nombreux dispositifs sont donc approvisionnés en eau au cours de l'expérimentation. Dans le cas contraire, il peut y avoir

développement de pressions d'eau négatives dans le milieu. Ce phénomène a pu être observé sur des argiles [Eykholt, Daniel, 1994].

Dans un système sans addition, ni extraction de liquide, le sol à l'anode se dessèche suffisamment pour que dans le cas d'un sol non saturé, il y ait arrêt de la continuité électrique [Mattson, Lindgren, 1993].

1.1.2. Nature du fluide interstitiel

Pour obtenir le déplacement d'un polluant par électro-migration, ce dernier doit être sous forme chargée dans le fluide interstitiel. Dans les essais de laboratoire, celui ci est généralement constitué par de l'eau permutée ou distillée.

Des études portant sur l'influence de la nature du fluide interstitiel ont été réalisées sur des argiles et des mélanges sable/argile pollués par des métaux toxiques:

Le fluide était constitué soit par de l'eau distillée, soit par un liquide type eau souterraine ($\text{CaCO}_3=212$ ppm; $\text{pH}_0=7.9$), soit par un liquide riche en matière organique ($C=260$ mg/l; $\text{pH}_0=9.4$). Des taux de transport importants de métaux lourds ont été obtenus avec l'eau distillée. Dans les autres cas, les valeurs initiales élevées de pH favorisaient la précipitation des polluants [Pamukcu, Kenneth Wittle, 1992]. Les valeurs initiales de pH conditionnent donc l'efficacité du transport.

Une étude sur l'effet de la salinité du fluide interstitiel compare l'influence du NaCl à différentes concentrations sur le débit électroosmotique dans des kaolinites non polluées. Le type de fluide utilisé (eau du robinet, distillée ou solution de NaCl) a peu d'influence sur le coefficient électroosmotique k_{eo} . L'augmentation de la salinité provoque une hausse de la consommation d'énergie avec, pour les concentrations les plus élevées, une production de gaz occasionnant des dégâts dans l'argile (craquelures).

Tableau 6 : Influence du fluide interstitiel sur le coefficient électroosmotique k_{eo} [Segall, Bruell, 1992].

Temps (jours)	Nature du fluide (mg/l de NaCl)	k_{eo} ($\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	Consommation (kWh/l d'eau déplacé)
29	robinet	$3.7 \cdot 10^{-9}$	0.01
35	distillée	$3.6 \cdot 10^{-9}$	0.01
3	29 000	craquelures dans le milieu	
2	1000	$3.6 \cdot 10^{-9}$	0.025
16	500	$3.6 \cdot 10^{-9}$	0.06

1.2. Les types de polluants

1.2.1. Nature du polluant

Une grande variété de polluants a fait l'objet d'expérimentations en laboratoire mais ce sont les métaux lourds qui présentent des taux de déplacement les plus importants. Les études réalisées avec des dispositifs permettant la circulation d'un fluide donnent des taux de transport fonction de la nature du polluant:

- 90-95 % pour du Cadmium(II) (argile avec une concentration initiale de cadmium de 99-114 $\mu\text{g/g}$ et consommation totale de 50-106 kWh/m^3 de sol) [Acar, Hamed, Alshawabkeh, Gale, 1994],
- 75-95 % pour du Plomb(II) (argiles polluées avec concentration initiale supérieure à 1500 $\mu\text{g/g}$ et une consommation de 29-60 kWh/m^3 sol traité) [Hamed, Acar, Gale, 1991],
- 50% pour le Chrome(III),
- 85-95 % pour des sols (argiles et mélanges argile/sable) pollués avec du Strontium, Nickel, Cobalt, Cadmium [Pamukcu, Kenneth Wittle, 1992],

Des études ont été réalisées avec des polluants organiques bien que ces derniers présentent une solubilité à l'eau faible:

- On obtient des taux de transport de 85-95 % pour du phénol (dans une argile polluée initialement à 500 mg/kg avec une consommation de 19-39 KWh/m^3 de sol), et de 95 % pour de l'acide acétique sous certaines conditions [Shapiro, Renaud, Probstein, 1989],
- les composés BTEX (benzène, toluène, éthylène et m-xylène) peuvent être mobilisés sous un champ électrique mais avec des taux de 30%,
- l'isooctane et l'hexane sont très peu mobilisables [Bruell, Segall, Walsh, 1992],

Les expériences en laboratoire montrent que les polluants organiques sont déplacés généralement par le passage d'une solution donc par électro-osmose. Elles relient le « degré » de transport de ces polluants avec leur solubilité (Benzène : $s > 1 \text{ g/l}$; Toluène et m-xylène : $0.1 < s < 1 \text{ g/l}$; Isooctane et Hexane : $s < 0.01 \text{ g/l}$) [Probstein, Hicks, 1993].

Des composés radioactifs ont été également testés [Report N°EK-BR-009-0292, 1992]:

- le radium 226 avec une concentration initiale de 1000 pci^2/g ne subit pas de déplacement au sein de l'échantillon malgré la présence d'un débit électroosmotique,
- le thorium avec une concentration de 50-300 pci/g est partiellement déplacé,
- l'uranium présente le déplacement le plus important avec une concentration initiale de 1000 pci/g .

²1 pci=1 picocurie (curie=activité d'un g de radium)

1.2.2. Influence de la concentration du polluant

Le tableau ci-dessous regroupe les polluants les plus couramment analysés en laboratoire ainsi que leur gamme de concentration:

Tableau 7 : Caractéristiques des polluants utilisés dans les études de laboratoire.

Polluants	Concentration
Acide acétique	0.1-0.5 M
Phénol	45-450 ppm
Cadmium	600-1000 ppm
Cobalt	40-600 ppm
Nickel	400-1000 ppm
Strontium	500-5000 ppm
Plomb	200-500 ppm

Polluants	Concentration
TCE*	150 ppm
Isooctane	0.4 ppm
Benzène	130 ppm
Hexane	1 ppm
Toluène	70 ppm
m-xylène	30 ppm

(*: Trichloroéthylène)

La nature du polluant et sa concentration initiale influencent le type de mécanisme de transport et les taux de déplacement du polluant:

- des kaolinites polluées avec du cadmium présentaient un taux de transport de 16 % pour des concentrations initiales en métal faibles (40 mg/l) contre 84% pour les concentrations élevées (1000 mg/l) bien que le débit électroosmotique soit plus faible dans le second cas (champ électrique d'environ 3 V/cm) [Pamukcu, Wittle, 1992].

L'électromigration serait le mécanisme de transport dominant dans le cas des fortes concentrations en métal tandis que l'électro-osmose serait plus développée pour les faibles concentrations.

- des kaolinites polluées avec du phénol présentaient des taux de déplacement de 94-95% pour une concentration initiale de 450 ppm et 75% pour 45 ppm avec arrêt du débit électroosmotique pour le deuxième cas [Shapiro, Probst, 1993].

L'électro-osmose explique le taux de transport élevé obtenu dans ces essais pour de fortes concentrations en polluants organiques.

On note donc à travers la littérature des taux de transport variables suivant la nature du polluant et du milieu poreux utilisés.

Si la technique électrique est bien adaptée à la consolidation ou la stabilisation de sols argileux, il semble, qu'en matière de dépollution, l'application d'un champ électrique ne soit pas une garantie suffisante pour obtenir le déplacement du polluant.

En effet, dans le schéma classique du traitement électrique, le courant électrique provoque une circulation d'eau dans le milieu ce qui contribue au transport électroosmotique des polluants. Mais le déplacement du polluant peut être observé en l'absence de débit d'eau ce qui témoigne de l'importance de l'électromigration comme mécanisme de transport et ceci même dans les milieux argileux [Acar, Hamed, Alshawabkeh, Gale, 1994].

Dans le cas de polluants organiques ou radioactifs, aucun déplacement de polluant peut ne pas être observé malgré la présence d'un débit électroosmotique [Report N°EK-BR-009-0292, 1992].

Ces faits illustrent bien la complexité du comportement des divers milieux pollués soumis à un champ électrique. De nombreux paramètres relatifs aux polluants ainsi qu'aux milieux poreux peuvent être des facteurs limitants à la méthode électrique.

2. Influence des réactions chimiques

Il existe parmi les réactions physico-chimiques un certain nombre de mécanismes pouvant limiter le transport des polluants.

2.1. L'adsorption

L'adsorption est un mécanisme très développé chez les argiles. Elle peut être de nature physique, liée aux forces de Van der Waals (sans changement chimique) ou de nature chimique (avec réactions entre les molécules adsorbées et le sol) entraînant des modifications de la valence des composés.

Certains hydroxydes peuvent se présenter sous une forme colloïdale (cas des hydroxydes de degré d'oxydation +2 ou +3). Ils adsorbent des cations ou des ions H_3O^+ en milieu acide et acquièrent alors une charge positive. Inversement, la charge de la particule devient négative en milieu alcalin par adsorption d'anions ou d'ions OH^- .

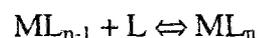
2.2. L'échange d'ions

Ce phénomène peut être observé chez les argiles où il se produit un échange des cations de l'argile avec des cations métalliques. Les interactions métal-argile sont fortement dépendantes du pH. On définit alors la capacité d'un sol à échanger ses cations par la capacité d'échange cationique (CEC). La matière organique et plus précisément les matières humiques dans un sol présentent des CEC très importantes.

2.3. La complexation

2.3.1. Formation de complexes hydroxydes

Un ion métallique peut se lier à un ligand (L) pour former une succession d'équilibres de complexation caractérisés par des constantes de formation (ou de dissociation):



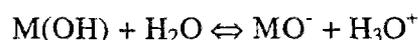
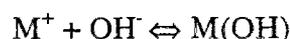
$$k = \frac{[ML_{n-1}][L]}{[ML_n]}$$

k : constante de dissociation

En présence d'eau, il y a formation de complexes acides avec l'ion H_3O^+ ou basiques avec l'ion OH^- :



ou



Les complexes les plus stables sont caractérisés par des coefficients de dissociation (k) faibles.

Afin d'évaluer la quantité de métal complexé par le ligand, on définit un coefficient de complexation:

$$\alpha_M(L) = \frac{C_M}{[M]}$$

C_M : concentration totale du métal

$[M]$: fraction métallique libre

L'évolution du coefficient $\alpha_M(L)$ en fonction de la concentration du ligand L peut être représentée graphiquement. Si le ligand est représenté par l'ion OH^- , le coefficient de complexation devient $\alpha_M(\text{OH})$ et on représente l'évolution du $\log \alpha_M(\text{OH})$ en fonction du pH. Le diagramme ci-dessous donne un exemple de répartition des différents complexes dans le cas du plomb:

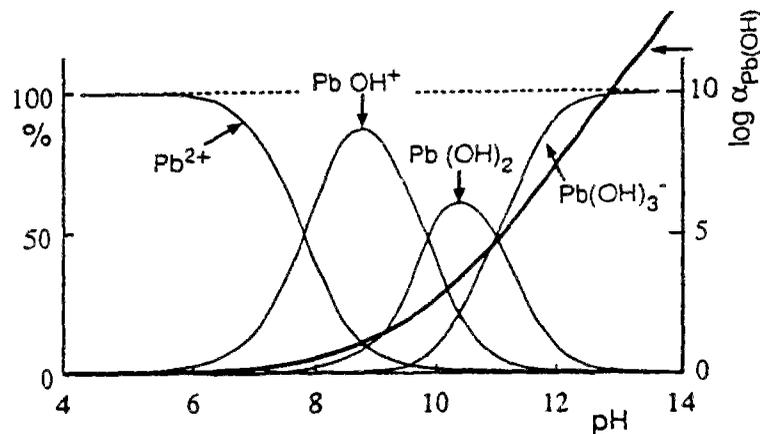


Figure 5 : Evolution du coefficient $\log \alpha_{\text{Pb}(\text{OH})}$ et répartition des différentes formes en fonction du pH pour le plomb [Trémillon, 1993].

En tenant compte des équilibres établis pour une solution de 10^{-2}M , la figure 5 montre trois domaines de répartition des espèces du plomb:

- pour un pH inférieur à 6, 100 % des espèces sont représentées par Pb^{2+} ,
- pour un pH de 9.4, il y a autant de $\text{Pb}(\text{OH})^+$ que de $\text{Pb}(\text{OH})_2$,
- à partir d'un pH moyen de 11, 50 % des espèces sont représentées par les anions $\text{Pb}(\text{OH})_3^-$.

Bien que l'on se limite dans notre présentation au ligand OH^- , il faut rappeler qu'il existe dans les systèmes naturels des ligands très importants comme les carbonates. En effet, ces derniers peuvent modifier sensiblement les conditions de solubilité des éléments métalliques.

2.3.2. Importance des complexes anioniques

Selon les conditions de pH, un cation se lie à l'ion OH^- pour former un hydroxyde. Celui-ci peut en milieu basique s'associer à des ions OH^- et former des complexes anioniques: $\text{Pb}(\text{OH})_3^-$ pour le plomb, $\text{Zn}(\text{OH})_3^-$, $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$, pour le zinc, $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ pour le cadmium et CrO_2^- , CrO_4^{2-} pour le chrome.

Lorsque ce phénomène survient au cours du traitement électrique, le déplacement du polluant s'effectue à la fois à partir de l'anode (sous une forme cationique) et à partir de la cathode (sous une forme anionique) et la précipitation est observée entre les deux électrodes [Probstein, Hicks, 1993].

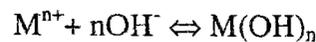
Une étude [Jacobs, Sengun, Hicks, 1994] sur une argile polluée avec du zinc montre un déplacement du polluant sous une forme anionique de la cathode vers l'anode. L'apparition d'anions est plutôt considérée comme gênante dans les traitements électriques puisqu'elle n'est pas adaptée avec la récupération des polluants à la cathode par électro-osmose.

D'autres études [Mattson, Lindgren, 1993] mettent en évidence la possibilité d'une modification de la charge des polluants métalliques au cours du traitement électrique, soit par réaction d'oxydoréduction (réduction de CrO_4^{2-} en Cr^{3+}), soit par la dissolution d'hydroxydes en anions. Cette modification de la charge des particules provoque également le déplacement électrique des polluants dans le sens inverse, c'est à dire de la cathode vers l'anode.

2.4. La précipitation

2.4.1. Influence du pH sur la solubilité des métaux

La précipitation fait intervenir deux phases dissoutes et donne naissance à des corps solides et insolubles:



et la réaction à l'équilibre est caractérisée par un coefficient de solubilité (qui représente la concentration totale de M en solution saturée de $\text{M}(\text{OH})_n$):

$$k_s = [\text{M}^{n+}] \cdot [\text{OH}^-]^n$$

En tenant compte de la concentration totale de toutes les formes de l'élément M dissous dans une solution saturée, on définit la solubilité (apparente) par:

$$S_M = \left([\text{M}] + \sum [\text{M}(\text{OH})_n] \right)_{\text{sat}}$$

et on peut représenter les variations de S_M en fonction du pH. La courbe de solubilité du plomb est représentée par la figure 6:

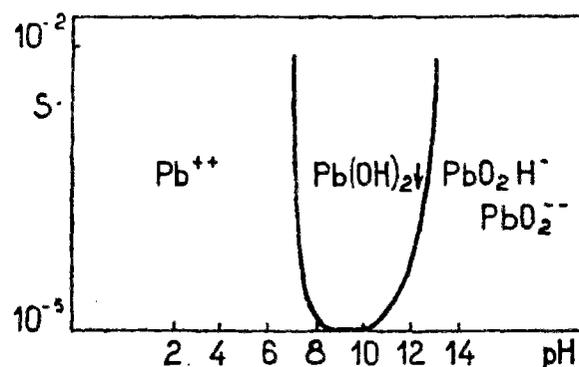


Figure 6 : Solubilité apparente du plomb en fonction du pH [Charlot, 1993].

La courbe de solubilité permet de connaître la stabilité des différentes phases selon des domaines de pH. C'est la phase la plus stable qui contrôle les équilibres.

2.4.2. Influence de la concentration sur la solubilité des métaux

Lorsque la concentration totale de l'élément métallique diminue, le coefficient $\alpha_{M(OH)}$ diminue également. Autrement dit, pour un pH donné, la complexation du métal par l'ion OH^- sera plus forte dans le cas de concentrations totales élevées. Inversement, la dilution entraîne la dissociation du complexe donc sa disparition.

2.4.3. Formation des précipités

Les réactions de précipitation ou de redissolution sont des réactions lentes.

La formation de précipités passe tout d'abord par l'apparition de germes cristallins. La formation de ces germes se déroule à l'intérieur d'un intervalle étroit de concentration et augmente avec cette dernière. Une concentration minimale est nécessaire pour pouvoir observer une formation rapide de ces germes.

La deuxième étape concerne la formation de précipités à partir de ces germes. Leur évolution dans le temps vers un équilibre stable s'effectue lentement avec accroissement de la taille et/ou cristallisation.

Certains hydroxydes formés à partir de corps de degré d'oxydation +2 ou +3 précipitent souvent sous une forme colloïdale. Ils peuvent adsorber des ions positifs ou négatifs, ce qui retardent leur croissance. La redissolution d'un hydroxyde précipité à l'état d'anions ou de cations peut s'accompagner d'apparition de colloïdes.

2.4.4. Concept du système de « purges » chimiques

Le pH est un des paramètres les plus importants pour le transport des polluants métalliques. La précipitation d'hydroxydes métalliques pour des pH basiques et leur immobilisation dans le milieu sont considérées comme une limite à la méthode de traitement électrique. Par conséquent, une solution adoptée consiste à ajuster et contrôler le pH en cours d'essai. L'opération consiste à introduire des additifs chimiques dans le milieu (« purge » chimique) en agissant sur le pH à deux niveaux:

- sur la valeur du pH initial (fonction de la chimie du fluide interstitiel),
- sur le développement du gradient de pH dans le milieu en contrôlant les réactions aux électrodes. Dans ce cas, les produits issus de l'électrolyse de l'eau sont continuellement évacués par un système de réservoirs aux électrodes afin de garder un pH relativement constant.

On peut également introduire des produits dans les réservoirs cathodiques et anodiques de manière à augmenter le taux de transport du polluant. L'ajout de citrate de sodium dans des kaolinites polluées avec du cuivre permet d'obtenir une augmentation du débit électroosmotique lorsque le complexant est introduit à l'anode ou mélangé au sol avant traitement. Inversement, l'ajout du citrate dans le réservoir cathodique provoque une diminution du débit. L'ajout ultérieur d'acide nitrique (HNO_3) dans le réservoir cathodique provoque une baisse du pH et une inversion du sens du débit électroosmotique.

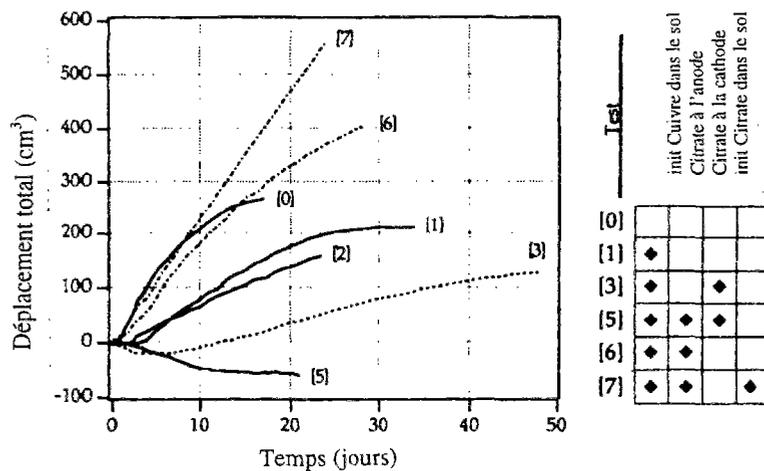


Figure 7 : Conséquences de l'ajout d'additifs sur le débit électroosmotique pour des kaolinites polluées avec du cuivre [Eykholt, Daniel, 1994]

Le type de purges à utiliser dépend de la nature du polluant: acides, agents complexant, EDTA (cas du zinc), des molécules du type NO_3 , NH_3 , dans le cas des hydrocarbures (apport de nutriment aux bactéries dégradant les hydrocarbures).

L'introduction de réactifs est toujours possible dans le cadre de l'expérimentation en laboratoire mais le procédé reste délicat et les résultats obtenus ne sont pas toujours ceux attendus.

Néanmoins, il existe des cas où l'extraction de polluants ne peut être réalisée sans le concours de ces agents. Par exemple, dans le cas de sols pollués par des hydrocarbures, l'utilisation de tensioactifs sur des sols pollués par des hydrocarbures permet d'augmenter leur taux de récupération [de Marsily, Lancelot, Londiche, 1992].

Dans le cas d'argiles polluées avec des composés radioactifs (Thorium, Radium et Uranium), l'utilisation de purges est bénéfique lorsque la partie du sol proche de la cathode est traitée avec de l'acide sulfurique. Mais, les résultats obtenus diffèrent selon le polluant radioactif utilisé:

- dans le cas du thorium, un test réalisé avec ajout de 0.1 M de H_2SO_4 donne un débit électroosmotique plus faible que pour les tests avec ajout de 0.01 M de H_2SO_4 ,
- dans le cas de l'uranium, le conditionnement du sol entraîne l'apparition d'un débit électroosmotique faible sans précipitation d'hydroxydes. Inversement, en l'absence de conditionnement, le déplacement du polluant est plus important malgré des réactions de précipitation,
- dans le cas du radium, un simple traitement chimique n'est pas concluant [Report N°:EK-BR-009-0292, 1992].

3. Conclusion

La synthèse bibliographique met en évidence plusieurs mécanismes de transport des polluants dont l'efficacité dépend des caractéristiques physico-chimiques du milieu. Le pourcentage de récupération des polluants est limité par des réactions modifiant la charge électrique de la surface des particules de sol (potentiel zêta), la conductivité électrique et/ou par le développement d'un gradient de pH. L'électro-migration est le transport dominant en présence de polluants métalliques dissous.

Dans certains cas, l'application d'un champ électrique n'est pas suffisante pour obtenir le déplacement du polluant.

L'introduction de substances chimiques dans le milieu permet sous certaines conditions d'améliorer le transport des polluants. Cette technique nécessite une bonne prévision de l'impact des composés chimiques introduits sur les mécanismes de transport et augmente le coût du traitement.

L'étude bibliographique a montré qu'il pouvait y avoir apparition d'anions à la cathode ce qui entraînait un déplacement du polluant vers l'anode. Ce déplacement survient en présence de conditions basiques et permet de « remobiliser » des hydroxydes métalliques sous la forme d'anions.

L'analyse bibliographique montre que le pH, la conductivité ionique et les concentrations initiales de polluants sont des paramètres chimiques importants qui conditionnent l'efficacité du traitement électrique. On attachera dans notre étude une importance particulière à ces paramètres afin de connaître l'état des composés formés et de suivre leur transport dans le milieu.

PARTIE 2

**ETUDE DU TRANSPORT DES POLLUANTS PAR
ELECTROMIGRATION**

CHAPITRE 3 : PROCEDURE EXPERIMENTALE

1. Conception des essais

L'objectif des essais est d'étudier les conditions de transport du polluant dans le sol en fonction du temps en faisant varier, d'une part le champ électrique initial, et d'autre part, la nature et la concentration initiale du polluant. Ce déplacement est suivi indirectement par la mesure de paramètres électriques et chimiques au cours et à l'arrêt du traitement:

1.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental doit permettre d'appliquer un courant électrique à un modèle de sol et de procéder à la mesure des paramètres suivants:

- l'intensité et la tension électrique
- le pH du sol et le pH de l'eau interstitielle
- la conductivité électrique de l'eau interstitielle
- la concentration du polluant dans l'eau interstitielle et dans le sol.

1.1.1. Choix du modèle de sol

La synthèse bibliographique réalisée en première partie de cette étude a mis en évidence un nombre important de paramètres pouvant influencer les mécanismes de transport du polluant. Afin de limiter les effets liés à l'adsorption chimique et aux variations de teneur en eau provoquées par le déplacement électro-osmotique du liquide dans le milieu, le choix s'est porté sur un sol non argileux. Le matériau choisi est donc un sable de Fontainebleau dont les caractéristiques sont reportées en annexe I.a ($e=0.6$; $n=0.37$; $\gamma_d = 1.65$; $\gamma_h=2.08$; $d_{60}=0.25\text{mm}$; $d_{10}=0.14\text{mm}$).

Le sol est mis en place dans une cuve rectangulaire en plexiglass de petites dimensions ($L=23.3$ cm; $l=17.7$ cm; $H= 8$ cm), équipée d'électrodes.

1.1.2. Création du champ électrique

L'étude nécessite la création d'un gradient de pH dans le milieu par électrolyse de l'eau afin de favoriser le transport du polluant sous une forme cationique et/ou anionique.

Le passage du courant est assuré par deux électrodes fixées aux extrémités de la cuve. Une alimentation stabilisée en tension (Racal-Dana 9232, tension 2* (0-30 V), intensité max.: 0-2 A) fournit une tension réglable entre 0 et 60 volts. Les électrodes utilisées sont de nature métallique, en cuivre, et se présentent sous forme de plaques rectangulaires ($l=17$ cm et $H=7.5$ cm soit $S= 127.5$ cm²).

Des expériences préliminaires réalisées sur du sable pollué avec du plomb soumis à un champ électrique moyen de 0.75 V/cm pendant une période de 200 heures ont permis de tester quatre types d'électrodes de nature différente: aluminium, cuivre, acier et graphite. Tous les essais ont montré le développement d'un gradient de pH dans le milieu. Ce gradient était toutefois moins développé dans le cas des électrodes en graphite. Le cuivre paraît être un bon compromis face à

l'acier qui conférerait au milieu un caractère basique plus marqué et à l'aluminium qui lui conférerait un caractère plus acide. De plus, le cuivre est un couple métallique peu réducteur et bon conducteur électronique (résistivité électrique à 20 °C = 1.69 $\mu\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$).

La géométrie en plaque permet de minimiser la densité de courant initiale et d'obtenir des lignes de courants parallèles. Des études portant sur l'influence de la géométrie du dispositif électrique sur le transport des polluants ont montré une bonne corrélation entre les équipotentielles mesurées dans le milieu et le déplacement des polluants [Segall, Bruell, 1992 ; Probstein, 1992].

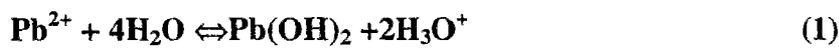
1.2. Caractéristiques des polluants utilisés

Notre étude nécessite l'utilisation de cations métalliques pouvant former des complexes anioniques sous des conditions basiques. Les polluants choisis sont le plomb (Pb^{2+}), le chrome (Cr^{3+}) et le zinc (Zn^{2+}) dont les caractéristiques électrochimiques principales sont présentées ci-dessous. Une revue plus détaillée des réactions d'oxydoréduction est présentée en annexe I.b.

1.2.1. Le plomb

Le plomb en solution peut se présenter sous forme cationique: (Pb^{2+} , $\text{Pb}(\text{OH})^+$), hydroxyde ($\text{Pb}(\text{OH})_2$) et anionique: ($\text{Pb}(\text{OH})_3^-$ ou HPbO_2^- (biplombite), PbO_2^{2-}).

En considérant les espèces principales: Pb^{2+} , $\text{Pb}(\text{OH})_2$, HPbO_2^- , les équilibres résultants de réactions chimiques sont:

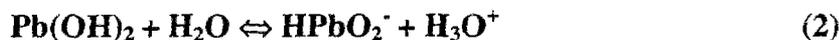


$$k_a = 10^{-13.64} \text{ [Pourbaix, 1963]} \quad \text{avec} \quad k_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]^2 \cdot [\text{Pb}(\text{OH})_2]}{[\text{Pb}^{2+}]}$$

$$\log[\text{Pb}^{2+}] = -\log k - 2 \text{ pH}_1$$

$$\log[\text{Pb}^{2+}] = +13.64 - 2 \text{ pH}_1$$

pH_1 : pH théorique de précipitation de l'hydroxyde



$$k_a = 10^{-14.38} \text{ [Pourbaix, 1963]}$$

$$\log[\text{HPbO}_2^-] = \log k_a + \text{pH}_2 = -14.38 + \text{pH}_2$$

pH_2 : pH théorique de fin de redissolution de l'hydroxyde

Nota: Pour une solution à 10^{-2}M , Charlot (1993) donne un pH de début de précipitation du plomb selon la réaction (1) égal à $\text{pH}_1 = 7.4$ et un pH de fin de redissolution selon la réaction (2) de $\text{pH}_2 = 12.5$ (cf figure 6).

La réaction (1) se déroule en milieu acide pour un pH inférieur ou égal au pH de l'hydroxyde $\text{Pb}(\text{OH})_2$. La réaction (2) se déroule en milieu basique pour un pH supérieur ou égal au pH de fin de redissolution de l'hydroxyde et conduit à la formation d'anions HPbO_2^- .

Les équilibres intermédiaires donnent des complexes chargés positivement ou négativement selon les conditions de pH (cf annexe I.b). Il faut garder à l'esprit que ces espèces peuvent intervenir dans les réactions de précipitation et de dissolution de l'hydroxyde.

La répartition est de plus influencée par la dilution qui a pour effet de restreindre le domaine de stabilité de l'hydroxyde $\text{Pb}(\text{OH})_2$.

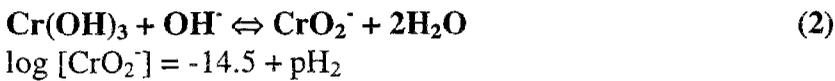
1.2.2. Le chrome

Le chrome (III) en solution se présente sous forme cationique: (Cr^{3+} , $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$), sous forme hydroxyde: ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) et sous forme anionique: (CrO_2^- , CrO_3^{3-}).

En considérant les espèces principales Cr^{3+} , $\text{Cr}(\text{OH})_3$, CrO_2^- , on peut écrire les équilibres suivants:



$$\begin{aligned} k_s &= 10^{-30} \text{ [Sarrazin, Verdaguer]} \\ \log [\text{Cr}^{3+}] &= 3 \text{ p}k_e + \log k_s - 3\text{pH}_1 \\ \log [\text{Cr}^{3+}] &= 12 - 3\text{pH}_1 \end{aligned}$$



Nota: Pour une solution à 10^{-2}M , Charlot donne un pH de début de précipitation du chrome selon la réaction (1) égal à $\text{pH}_1 = 5$ et un pH de fin de redissolution selon la réaction (2) de $\text{pH}_2 = 12.5$. L'hydroxyde de chrome $\text{Cr}(\text{OH})_3$ reste facilement colloïdal.

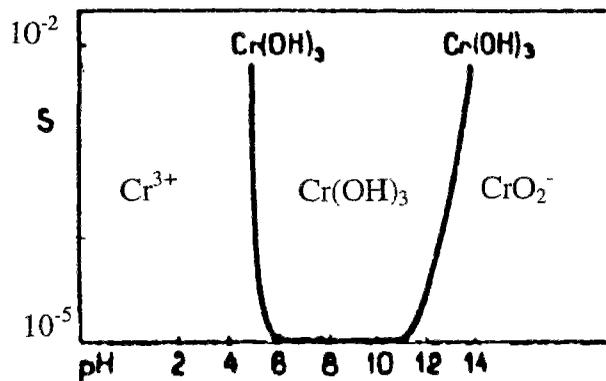


Figure 8 : Solubilité apparente du chrome(III) en fonction du pH [Charlot, 1993]

Des réactions secondaires d'oxydation des ions chromiques (Cr^{3+} , CrO_2^- ..) peuvent donner des ions chromates (HCrO_4^- , CrO_4^{2-} , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$..).

1.2.3. Le zinc

Le zinc en solution peut se présenter sous forme cationique: (Zn^{2+} , $\text{Zn}(\text{OH})^+$), hydroxyde ($\text{Zn}(\text{OH})_2$) et anionique: ($\text{Zn}(\text{OH})_3^-$ ou HZnO_2^- , ZnO_2^{2-}).

En considérant les espèces principales: Zn^{2+} , $Zn(OH)_2$, $HZnO_2^-$, on peut écrire les équilibres suivants:

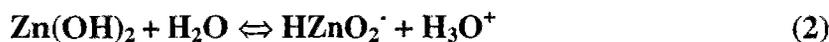


$k_a = 10^{-10.96}$ pour la forme hydroxyde amorphe la plus soluble [Pourbaix, 1963]

$$\log [Zn^{2+}] = -\log k - 2pH_1$$

$$\log [Zn^{2+}] = 10.96 - 2pH_1$$

$$\log [Zn^{2+}] = 12.26 - 2pH_1 \text{ (forme hydroxyde la plus soluble avec } k_a = 10^{-12.26}\text{)}$$



$k_a = 10^{-16.68}$ pour la forme hydroxyde amorphe la moins soluble [Pourbaix, 1963]

$$\log [HZnO_2^-] = -16.68 - 2pH_2$$

$$\log [HZnO_2^-] = -15.37 - 2pH_2 \text{ (forme hydroxyde la plus soluble avec } k_a = 10^{-15.37}\text{)}$$

L'hydroxyde de zinc peut se présenter sous différentes formes comprises entre l'hydroxyde blanc amorphe, phase la plus soluble et l'hydroxyde $Zn(OH)_2$, forme la plus stable.

La figure 9 présente les différentes espèces intermédiaires selon les domaines de pH (les équilibres sont reportés en annexe I.b).

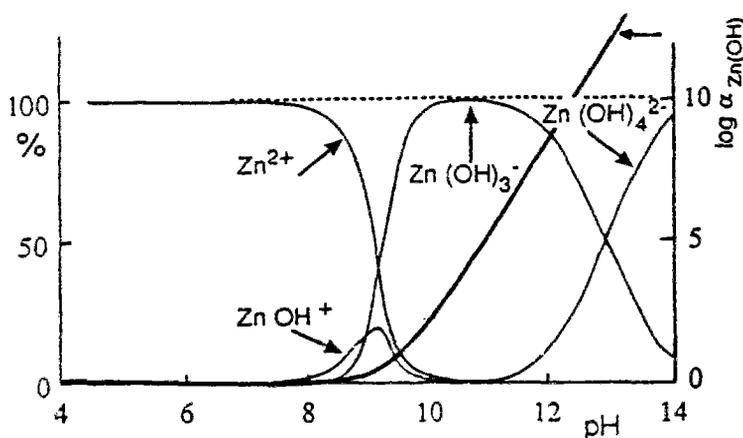


Figure 9 : Répartition des complexes hydroxydes des ions Zn^{2+} [Trémillon, 1993]

A partir de la courbe de répartition (figure 9), on peut dégager trois domaines de prédominance des espèces du zinc:

- pour un pH de 0 à 8, la majorité des espèces présentes sont des cations (Zn^{2+} , $ZnOH^+$) avec présence de l'hydroxyde de zinc $Zn(OH)_2$,
- pour un pH compris entre 8 et 10, il y a cohabitation des espèces Zn^{2+} , $ZnOH^+$ et $Zn(OH)_3^-$,
- à partir d'un pH de 9.28, 50 % des espèces sont représentées par le complexe $Zn(OH)_3^-$.

La figure 10 donne la solubilité apparente du zinc en fonction du pH:

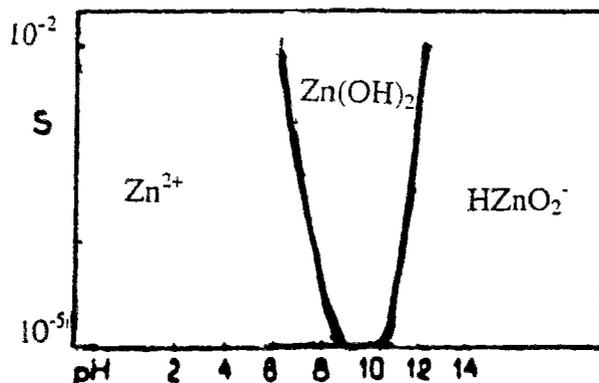


Figure 10 : Solubilité apparente du zinc en fonction du pH [Charlot, 1993].

Nota: Pour une solution à 10⁻²M, Charlot donne un pH de début de précipitation du zinc en hydroxyde Zn(OH)₂ selon la réaction (1) égal à pH₁ = 6.5 et un pH de fin de redissolution selon la réaction (2) de pH₂ = 12.

1.2.4. Domaine de concentrations utilisées

Les solutions polluantes sont préparées à partir de sels du métal correspondant. Les caractéristiques et les concentrations utilisées pour les cations étudiés sont les suivantes:

Tableau 8 : Caractéristiques et concentrations des cations polluants Pb²⁺, Cr³⁺ et Zn²⁺ étudiés.

Polluant métallique	Poids molaire (g/mol)	Rayon ionique ⁰ (Å)	Sels	Concentration initiale en métal (g/l)
Pb ²⁺	207.2	1.2	Pb(NO ₃) ₂	0.1 / 1 / 10
Cr ³⁺	52	0.65	CrCl ₃ , 6H ₂ O	0.1 / 0.5 / 1
Zn ²⁺	65.4	0.69	ZnSO ₄	1 / 3

Les concentrations en plomb ont été choisies de manière à obtenir une plage importante de valeurs de pH de fin de redissolution de l'hydroxyde (pH₂). En effet, à partir des équilibres des réactions chimiques définis ci-dessus (Chapitre 3, 1.2), on peut calculer des valeurs théoriques d'apparition ou de dissolution des hydroxydes des différents polluants étudiés en fonction de la concentration initiale utilisée (cf.tableau 9).

Tableau 9 : Valeurs calculées de pH de précipitation et de redissolution des hydroxydes en fonction de la concentration des cations polluants Pb^{2+} , Cr^{3+} et Zn^{2+} .

Polluant	Concentration en métal (g/l)	Concentration en métal (mol/l)	Force ionique ($0.5 \cdot z_i^2 \cdot C_i$)	pH ₁ calculé de précipitation de l'hydroxyde selon la réaction (1)	pH ₂ calculé de fin de redissolution de l'hydroxyde selon la réaction (2)
Plomb Pb[01]	0.1	$0.48 \cdot 10^{-3}$	$0.9 \cdot 10^{-3}$	8.47	11.06
Plomb Pb[1]	1	$4.83 \cdot 10^{-3}$	$0.9 \cdot 10^{-2}$	7.97	12.06
Plomb Pb[10]	10	$48.3 \cdot 10^{-3}$	$0.9 \cdot 10^{-1}$	7.47	13.06
Chrome Cr[01]	0.1	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$0.8 \cdot 10^{-2}$	4.90	11.77
Chrome Cr[05]	0.5	$9.6 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-2}$	4.67	12.48
Chrome Cr[1]	1	$19.2 \cdot 10^{-3}$	$0.8 \cdot 10^{-1}$	4.57	12.78
Zinc Zn[1]	1	$15.2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	6.38 (moins soluble)* 7.03 (plus soluble)*	14.8 (moins soluble)* 13.5 (plus soluble)* 12.18 [Charlot]
Zinc Zn[3]	3	$45.8 \cdot 10^{-3}$	$0.9 \cdot 10^{-1}$	6.1 6.7	15.3 * 14 * 12.6 [Charlot]

*: Les valeurs de pH de redissolution de l'hydroxyde de zinc données par Pourbaix sont plus élevées que celles de Charlot.

Les concentrations des polluants chrome et zinc ont été choisies en fonction de celles utilisées dans le cas du plomb. Ainsi, en rapportant les concentrations (c en g/l) en concentrations molaires (en mol/l), on peut mettre en évidence plusieurs domaines de concentration selon le polluant utilisé:

$C \approx (2-5) \cdot 10^{-2} M$	$C \approx (1-2) \cdot 10^{-2} M$	$C \approx 0.5 \cdot 10^{-2} M$	$C \approx 10^{-3} M$
Pb[10]	Cr[05]	Cr[01]	Pb[01]
Zn[3]	Zn[1]	Pb[1]	
	Cr[1]		

L'acidité des solutions des cations étudiés est donnée par les valeurs théoriques de précipitation du polluant. Ainsi, pour une concentration initiale de $10^{-2} M$, les valeurs sont: pH_i = 5 pour le chrome, pH₁ = 6,5 pour le zinc et pH₁ = 7,4 pour le plomb.

Les pH de fin de redissolution des hydroxydes sont: pH₂ = 12 pour le zinc et pH₂ = 12,5 pour le chrome et le plomb. Si on tient compte des espèces intermédiaires, l'apparition des anions peut survenir pour des pH plus faibles: 50 % des anions seraient déjà formés pour le plomb à pH=11 et pour le zinc à pH =9-13 (pour une concentration égale à $10^{-2} M$).

2. Plan de campagne des essais

2.1. Mise en place

Le sol pollué est réalisé à partir d'un mélange de sable de Fontainebleau et d'une solution cationique de polluant. Le rapport masse du sable/volume du liquide initial permet de travailler dans des conditions saturées. Par la suite, aucun apport de liquide n'est effectué pendant le déroulement de l'essai. Le sol est mis en place dans la cuve et une tension électrique constante est appliquée (cf caractéristiques Annexe I.a).

Chaque cuve fait l'objet de mesures des paramètres électriques et chimiques. En dehors de l'intensité électrique, les mesures du pH du sol, du pH de l'eau interstitielle et de la conductivité de l'eau interstitielle sont effectuées en considérant cinq zones de sol définies selon leur position par rapport aux électrodes.

Ainsi, la zone anodique (pole +) est repérée par la zone n°1 et la zone cathodique (pole -) par la zone n°5 selon la figure 11.

Pendant le traitement, la cuve est fermée par un couvercle ce qui permet de réduire l'évaporation de l'eau. Toutefois, il existe une lame d'air entre le sol en place et le couvercle dont l'épaisseur peut atteindre 1 cm. La cuve est ouverte chaque fois qu'il est nécessaire de réaliser les mesures de pH et de conductivité.

A l'arrêt du traitement, le sol de chaque cuve est prélevé suivant les 5 zones, séché et échantillonné. Le polluant est ensuite dosé par spectrométrie par absorption atomique après extraction du sol par une attaque à l'acide nitrique.

Pour chaque polluant étudié, un ensemble de cuves est monté suivant un dispositif électrique en parallèle selon le schéma de la figure 12. L'influence du temps d'application du champ électrique sur le transport du polluant est déterminée en arrêtant les cuves à des temps distincts.

2.2. Mesure des paramètres

2.2.1. Les paramètres électriques

L'intensité électrique est mesurée manuellement à l'aide d'un multimètre numérique. Sur certains essais, la tension électrique a été mesurée entre chaque collecteur de la cuve.

2.2.2. Le pH et la conductivité électrique

La mesure du pH du sol et de l'eau interstitielle est réalisée à l'aide d'une électrode combinée standard en verre avec solution de référence type Ag/AgCl.

Le pH du sol est mesuré directement en introduisant une électrode dans le sol à l'aide d'un pH-mètre numérique Consort ion/EC Meter C73 en l'absence de tension électrique.

Des collecteurs, constitués par une toile métallique perforée, en laiton dans le cas du plomb et du chrome, en acier inox dans le cas du zinc, sont insérés au centre de chacune des cinq zones (figure 11). Ils permettent la mesure du pH et de la conductivité électrique de l'eau interstitielle. La mesure de la conductivité électrique est réalisée à l'aide d'une cellule à 2 pôles et un conductimètre Knick 702 en l'absence de tension électrique.

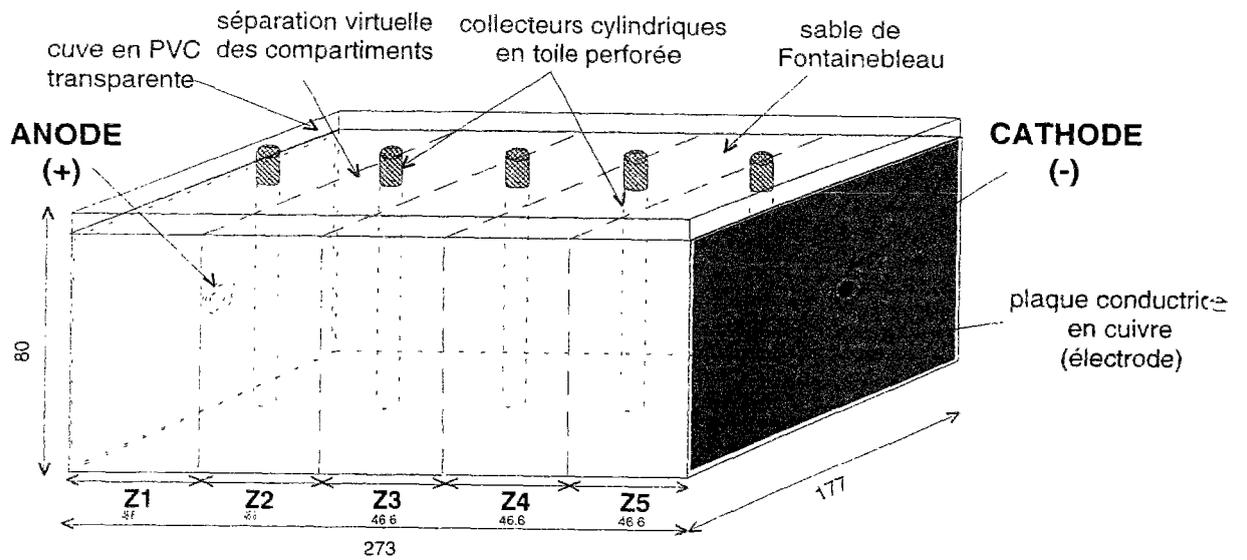


Figure 11 : Schéma de la cuve expérimentale

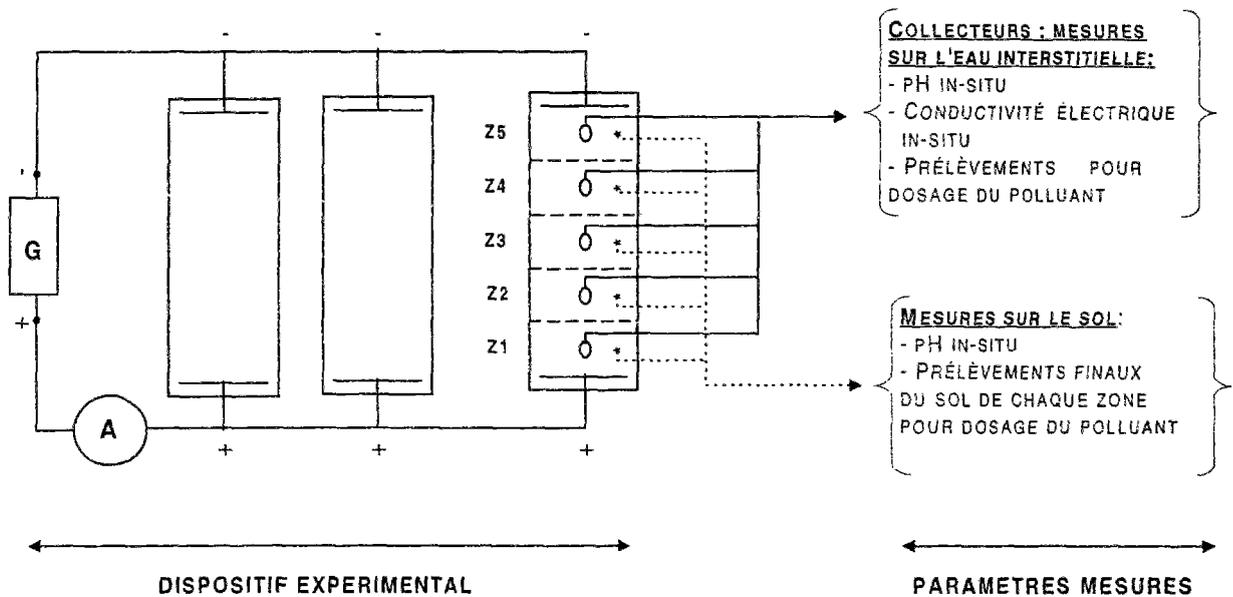


Figure 12 : Schéma du dispositif expérimental et paramètres mesurés.

Des mesures du pH du sol et du pH de l'eau interstitielle ainsi que de la conductivité électrique de l'eau interstitielle ont été réalisées sur un essai de référence constitué par du sable de Fontainebleau saturé avec de l'eau permutée légèrement acidifiée, et soumis à une tension de 60 volts. Les résultats sont présentés en annexe I.c (figures I-annexe I.c).

2.2.3. La concentration du polluant

Le dosage du polluant s'effectue, soit à partir de petites quantités d'eau interstitielle prélevées dans chaque collecteur en fonction des temps distincts, soit sur le sol après extraction du polluant par attaque acide.

- Prélèvement du sol et extraction du polluant

À l'arrêt de chaque essai, la totalité du sol de chaque zone de la cuve est prélevé et disposé dans des béchers. Après avoir pesé le sol humide (P_{humide}), les béchers sont mis à l'étuve pendant 24 h à 105 °C. Le sol sec (P_{sec}) est de nouveau pesé afin de calculer la teneur finale en eau ($w\%$ en poids):

$$w(\%) = [(P_{\text{humide}} - P_{\text{sec}}) / P_{\text{sec}}] * 100$$

Après avoir mélangé soigneusement le sol sec, on prélève 30 g de sol sur chacune des 5 zones. L'extraction du polluant s'effectue à partir des 30 g de sol prélevé après attaque acide du sol suivant deux étapes:

- dans un bécher, 10 ml d'acide nitrique dilué (1 partie d'acide nitrique à 69 % pour 1 partie d'eau permutée) sont mis au contact des 30 g de sol. Les béchers sont disposés dans un bac de sable chauffé à 60 °C par une plaque chauffante, le tout placé sous une hotte afin de faire évaporer l'acide lentement.
- après évaporation complète et refroidissement, 20 ml d'acide nitrique dilué (1 partie d'acide nitrique à 69 % pour 5 parties d'eau permutée) sont de nouveau introduit dans les béchers. Ces derniers sont mis à agiter sur une plaque d'agitation pendant une heure.

Les échantillons sont ensuite filtrés au moyen d'un papier filtre. Le filtrat est recueilli dans une fiole de contenance 100 cc et complété avec de l'eau permutée. Le filtrat est ensuite dosé par absorption atomique en technique flamme (modèle 3110 Perkin Elmer). Les longueurs d'onde utilisées sont égales à $\lambda = 283.3$ nm pour le plomb, $\lambda = 359.4$ nm pour le chrome et $\lambda = 213.9$ nm pour le zinc.

- Expression et représentation des résultats:

Les résultats sont exprimés en mg de polluant/litre pour le liquide interstitiel et en mg de polluant/kg pour le sol sec.

La première étape consiste à calculer la quantité de polluant (Q_j) provenant des 30 g d'échantillon de sol représentatif de chaque zone. On exprime ensuite la teneur en polluant (Tf_j) en mg/kg de sol sec (ppm) par échantillon selon:

$$Tf_j = \frac{Q_j}{30 \cdot 10^{-3}} \quad (a)$$

Tf_j : teneur moyenne en polluant (ppm)

Q_j : quantité de polluant apportée par les 30 g de sol (mg)

avec j : nombre de zones (j varie de 1 à 5)

Connaissant le poids initial de sable (P_i) et de polluant (Q_i) introduit dans chaque cuve, on peut définir une teneur initiale théorique en polluant (T_i) de la manière suivante:

$$T_i = \frac{Q_i}{P_i} \quad (b)$$

T_i : teneur initiale théorique en polluant (ppm)

Q_i : quantité totale initiale de polluant (mg)

P_i : poids total initial de sable sec (kg)

La quantité de polluant récupérée à la fin du traitement diffère de celle introduite au départ. Cet écart peut provenir:

- d'une perte par dépôt de polluant sur les bords de la cuve ou par électrodéposition sur les électrodes (de l'ordre de 1 à 2 % de la quantité finale totale),
- d'une dispersion des résultats provenant essentiellement de la technique de prélèvement (un sable pollué avec 1 g de Pb^{2+}/l et non traité électriquement a donné une erreur relative de 7%).

On peut donc évaluer les variations de la quantité de polluant dans la cuve pour chaque zone par le rapport des teneurs finales sur la teneur initiale théorique:

$$\sum_{j=1}^5 \left(\frac{Tf_j}{T_i} \right) = 5 \quad (c)$$

i = nombre de zones (i=5)

Le calcul de la somme de ces rapports permet d'effectuer un bilan sur la quantité finale de polluant récupérée en fin d'essai.

De plus, la quantité de sol sec prélevé étant différente pour chaque zone, le calcul de la répartition finale est ramené à 100 g de sable afin de comparer l'évolution de la teneur en polluant dans chaque zone d'un même essai et pour les essais réalisés sous des conditions différentes.

La répartition finale de polluant sera exprimée en pourcentage et devra être comparée à une valeur initiale théorique de 20% de polluant pour chaque zone.

2.2. Conditions des essais

L'ensemble des essais réalisés dans notre étude se présente en deux chapitres selon le paramètre étudié:

- l'influence de la nature et de la concentration initiale du polluant a été étudiée avec les cations métalliques Pb^{2+} , Cr^{3+} et Zn^{2+} . Ces essais ont été réalisés sous une tension constante maximum de 60 volts, soit un champ électrique de 2.6 V/cm. Le temps d'application du champ électrique s'étend sur une période moyenne de 2 mois pour le plomb et 1 mois pour le chrome et le zinc. Les essais ont été réalisés à teneur initiale constante en eau égale à 26 %. Ces résultats sont présentés dans le chapitre 4 sous la forme de trois parties correspondant dans l'ordre aux polluants plomb, chrome et zinc. Les caractéristiques des essais sont représentées dans le tableau 10.

- l'influence du champ électrique initial a été étudiée uniquement sur le plomb avec une concentration initiale de 1 g de Pb²⁺/l. Ces essais ont été réalisés avec des tensions électriques de 15, 30 et 60 Volts et pour des teneurs en eau initiales de 24.5 et 26 %.

Dans un souci de clarté dans la présentation des résultats, ces essais sont traités indépendamment et présentés en dernière partie dans le chapitre 5.

Pour chaque campagne d'essais, les résultats des paramètres électriques et chimiques sont représentés successivement en fonction de la concentration étudiée.

Tableau 10: Dénomination et caractéristiques des essais réalisés avec du sable pollué par du plomb, du chrome et du zinc pour une tension électrique de 60 Volts, soit un champ électrique de 2.6 V/cm (w initiale: 26 %).

Essais	Concentration initiale de l'eau en métal (g/l)	Temps d'application (heures)
Pb1[01]60	0.1	52
Pb2[01]60	0.1	195
Pb3[01]60	0.1	478
Pb4[01]60	0.1	695
Pb5[01]60	0.1	984
Pb6[01]60	0.1	1560
Pb1[1]60	1	32
Pb2[1]60	1	97
Pb3[1]60	1	194.5
Pb4[1]60	1	483
Pb5[1]60	1	694
Pb6[1]60	1	984
Pb7[1]60	1	1560
Pb1[10]60	10	30.3
Pb2[10]60	10	190.3
Pb3[10]60	10	478.3
Pb4[10]60	10	695
Pb5[10]60	10	1008
Pb6[10]60	10	1560
Cr1[01]60	0.1	72
Cr2[01]60	0.1	198
Cr3[01]60	0.1	549
Cr4[01]60	0.1	699
Cr1[05]60	0.5	52
Cr2[05]60	0.5	194
Cr1[1]60	1	72
Cr2[1]60	1	198
Cr3[1]60	1	550
Cr4[1]60	1	701
Zn1[1]60	1	31.5
Zn2[1]60	1	193
Zn3[1]60	1	482
Zn1[3]60	3	51.5
Zn2[3]60	3	192.5

CHAPITRE 4: INFLUENCE DE LA NATURE DU POLLUANT SUR LE TRANSPORT PAR MIGRATION ELECTRIQUE. APPLICATION AUX POLLUANTS PLOMB, CHROME ET ZINC.

1. Le plomb

Les essais réalisés sur des sables pollués avec les trois concentrations respectivement égales à 0.1, 1 et 10 g Pb^{2+}/l s'étendent sur une période variant de 24 heures à 65 jours.

Des mesures des paramètres électriques et chimiques sont effectuées pour chaque essai et sur les cinq zones de sol définies dans chaque cuve. L'ensemble des résultats est exprimé sous forme de moyennes lorsque le nombre d'essai le permet. Les tableaux des résultats bruts de chaque essai sont reportés en annexe II. La dénomination et les caractéristiques des essais sont reportés dans le tableau 10.

1.1. Etude des paramètres électriques en fonction du temps

L'intensité électrique est mesurée en fonction du temps pour chaque essai. Les résultats bruts sont reportés en annexe II (tableaux 1.a, 1.b et 1.c- Annexe II).

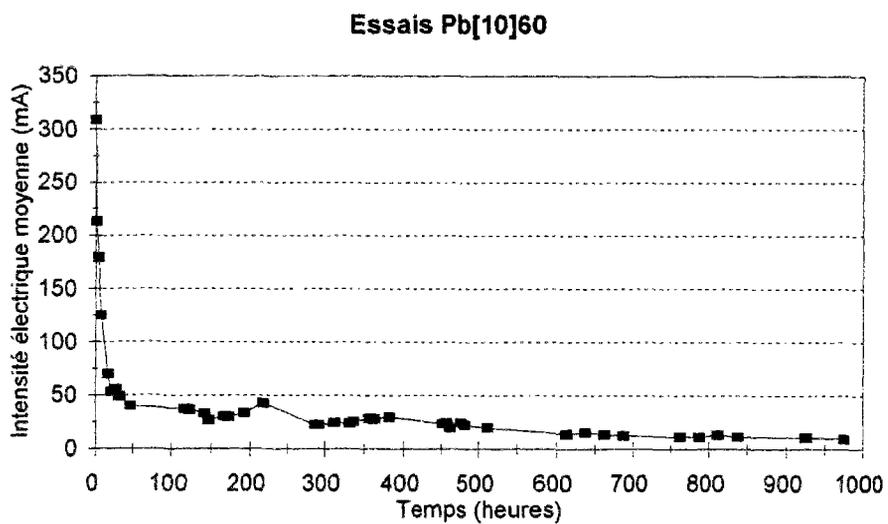
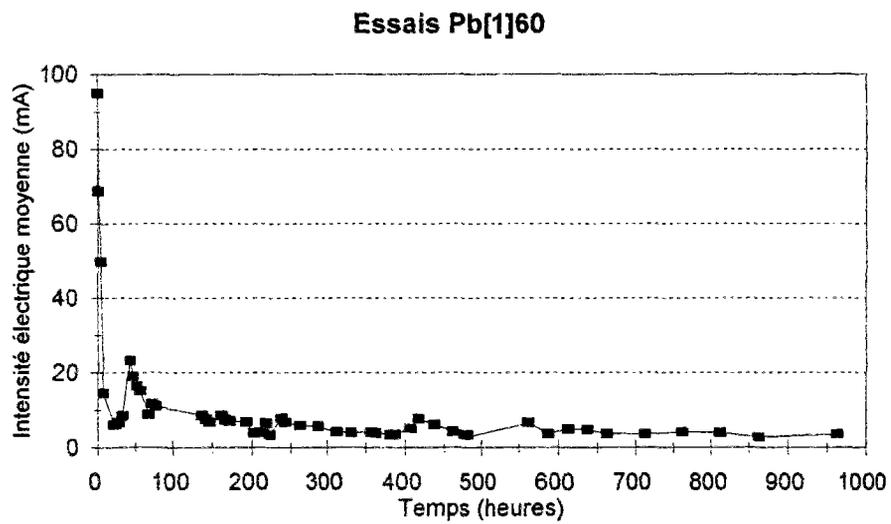
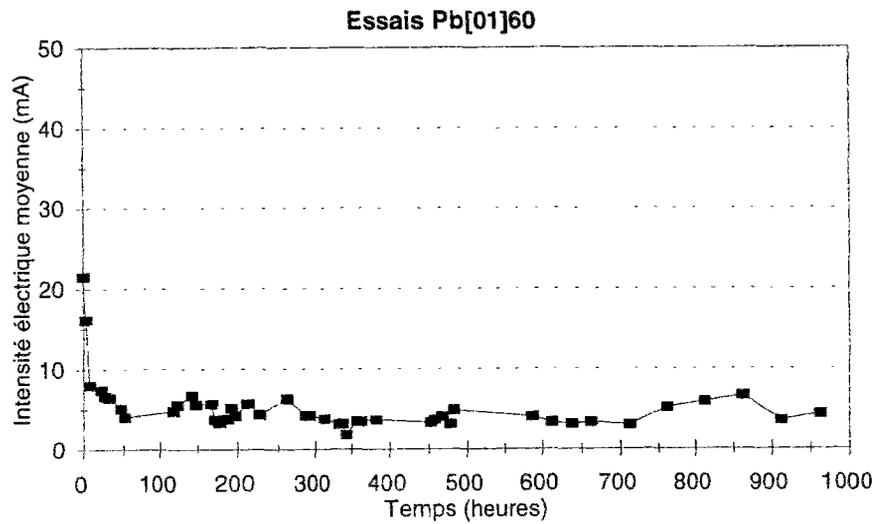
1.1.1. Evolution de l'intensité électrique

L'intensité électrique des essais Pb[01], Pb[1] et Pb[10] est représentée sous forme de moyenne pendant une période de 1000 heures par la figure 13 (Cf tableaux 1.d - Annexe II).

La valeur de départ de l'intensité augmente avec la concentration initiale du polluant: elle est égale à 21.5 mA pour 0.1 g de Pb^{2+}/l , 95 mA pour 1 g de Pb^{2+}/l et 309 mA pour 10 g de Pb^{2+}/l .

L'étude comparative des courbes temps-intensité en fonction de la concentration initiale montre:

- pour les essais Pb[01], l'intensité atteint une valeur minimale de 4 mA au bout de 52 heures et se stabilise autour d'une valeur de 5 mA vers 100 heures. Puis, l'intensité varie autour de cette valeur de 5 mA. La valeur finale à 1000 heures est égale à 5 mA (ce qui correspond à 20 % de la valeur de départ),
- pour les essais Pb[1], la décroissance de l'intensité électrique est rapide puisqu'elle passe d'une valeur initiale de 95 mA à une valeur de 6 mA au bout de 17 heures. Cette décroissance est suivie par une remontée rapide de l'intensité qui atteint au maximum de 23mA vers 42 heures. L'intensité décroît de nouveau pour se stabiliser vers 300 heures et atteint une valeur résiduelle finale de 4 mA à 1000 heures (correspondant à 4 % de la valeur de départ).
- pour les essais Pb[10], l'intensité atteint rapidement une valeur de 40 mA au bout de 47 heures mais la décroissance se poursuit plus lentement jusqu'à 1000 heures et atteint une valeur résiduelle finale de 10 mA (correspondant à 3 % de la valeur de départ).



Figures 13 : Intensité électrique moyenne (mA) pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de a) 0.1 g de Pb^{2+}/l , b) 1 g de Pb^{2+}/l , c) 10 g de Pb^{2+}/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).

L'ensemble des courbes temps-intensité tracées pour chaque concentration étudiée, permet de définir un intervalle de variation des valeurs égal à : +/- 2 mA pour 0.1 g de Pb²⁺/l, +/- 5 mA pour 1 g de Pb²⁺/l et +/- 10 mA pour 10 g de Pb²⁺/l.

Quelle que soit la concentration initiale, la décroissance de l'intensité est rapide et on observe une réduction de 50 % des valeurs par rapport à la valeur initiale au bout de 5 heures. Les essais Pb[10] présentent les intensités les plus fortes et ceci jusqu'à 1000 heures.

1.1.2. Consommation électrique

L'énergie et la puissance électrique consommées par volume de sol traité au cours des différents essais sont résumées dans le tableau 11.

Tableau 11: Consommation électrique des essais réalisés avec du sable pollué avec du plomb pour un champ électrique fixé à 2.6 V/cm.

Essais	Poids du sol (sable + liquide) (g)	Intensité électrique initiale (mA) (1)	W (kWh/m ³ sol traité) (2)	P (kWh/h.m ³ sol traité) (3)	Temps (Heures)
Pb1[01]60	5670	16.8	17.4	0.335	52
Pb2[01]60	5670	19.9	29.7	0.152	195
Pb3[01]60	5670	17	32.1	0.067	478
Pb4[01]60	5670	17.5	48	0.069	695
Pb5[01]60	6871	24.6	95.4	0.096	984
Pb6[01]60	6871	28.6	114.9	0.073	1560
Pb1[1]60	5670	92.5	17.3	0.542	32
Pb2[1]60	6871	86.6	11.6	0.119	97
Pb3[1]60	5670	101	67.8	0.348	194.5
Pb4[1]60	5670	92.3	72.0	0.148	483
Pb5[1]60	5670	90.3	118.2	0.170	694
Pb6[1]60	6871	85.7	115.8	0.117	984
Pb7[1]60	6871	117	168.5	0.107	1560
Pb1[10]60	5670	278.3	80.3	2.651	30.3
Pb2[10]60	5670	227	216.6	1.138	190.3
Pb3[10]60	5670	197	333.4	0.696	478.3
Pb4[10]60	5670	158	537.6	0.773	695
Pb5[10]60	6871	309	460.8	0.457	1008
Pb6[10]60	6871	137	798.8	0.511	1560

(2) : Energie : $[(I(\text{mA}) \cdot t(\text{heures}) \cdot U(\text{Volts})) / 10^{-3}] / \text{Volume de la cuve occupé par le sol (m}^3)$

(3) : Puissance : $[(I(\text{mA}) \cdot t(\text{heures}) \cdot U(\text{Volts})) / \text{temps (heures)}] \cdot \text{Volume de la cuve occupé par le sol (m}^3)$

Nota: Afin de réduire la perte en eau, le poids de sol est augmenté dans les essais réalisés à long terme afin de limiter l'épaisseur de la lame d'air (cf. chapitre 3-2.1.)

Les énergies consommées, en kWh par m³ de sol traité progressent régulièrement à mesure que le temps d'application du champ électrique augmente (tableau 11). Elles sont du même ordre de

grandeur pour les concentrations de 0.1 et 1 de Pb^{2+}/l et égales à environ 120- 170 kWh/m³ au bout de 1560 heures, soit 65 jours. Par contre, la consommation électrique, pour un temps donné, est multipliée par 5 environ lorsqu'on passe des concentrations de 0.1 et 1 g de Pb^{2+}/l à 10 g de Pb^{2+}/l pour atteindre environ 800 kWh/m³ au bout de 65 jours.

Les énergies consommées pendant les premiers essais avant stabilisation des intensités électriques, ne représentent qu'environ 10% des consommations finales à 65 jours.

La puissance électrique moyenne consommée, en kW par volume de sol traité se stabilise dès que la décroissance de l'intensité électrique devient faible et atteint un palier (palier observé au bout de 100 heures pour Pb[01] et 300 heures pour Pb[1]).

Les fortes énergies et puissances électriques observées pour les essais Pb[10] sont reliées aux valeurs importantes de l'intensité.

1.2. Etude des conditions de pH et de conductivité électrique en fonction du temps

Des mesures de pH et de conductivité électrique sont réalisées pour chacune des cinq zones de chaque essai. Les tableaux de résultats bruts sont reportés en annexe (cf tableaux 2.a, 2.b et 2.c - Annexe II).

Le pH et la conductivité électrique mesurés pour chaque concentration sont présentés graphiquement sous forme de moyennes par les figures 14, 15 et 16.

1.2.1. Evolution du pH du sol et de l'eau interstitielle

Les valeurs initiales du pH dans le sol et dans l'eau sont comparables au sein de chaque groupe de concentration (tableau 12). Mais, les valeurs initiales de pH obtenues pour l'ensemble des essais présentent des écarts importants. Ainsi, les différentes concentrations utilisées induisent des valeurs de pH neutres pour 0.1 g de Pb^{2+}/l (pH = 7-8), à acides pour 1 g de Pb^{2+}/l (pH= 4-6) et pour 10 g de Pb^{2+}/l (pH = 4,5-5,5).

Tableau 12: Valeurs initiales du pH du sol et de l'eau interstitielle pour des sables pollués avec du plomb et soumis à un champ électrique de 2.6 V/cm.

	0.1 g Pb^{2+}/l	1 g Pb^{2+}/l	10 g Pb^{2+}/l
pH eau interstitielle	7-7.3	5.4-5.7	5.4-5.5
pH du sol	7.6-7.9	4.8-5.1	4.5-4.6

L'analyse comparative du pH du sol et de l'eau interstitielle a été étudiée pour chaque zone et chaque concentration.

ESSAIS Pb[01]: solutions à 0.1 g de Pb^{2+}/l

Pour les essais Pb[01], les courbes temps-pH jusqu'à 200 heures (court terme) permettent de dégager les faits suivants (figures 14):

- la formation d'un compartiment anodique plutôt neutre dans le sol (pH = 6-7 en z1 et z2). Le pH de l'eau interstitielle passe de valeurs basiques à des valeurs neutres (pH=7-9) entre 50 et 200 heures,
- la formation d'une zone cathodique (z5) basique (pH = 11-12) bien marquée dans le sol et dans l'eau interstitielle. Dans un second temps, le pH devient moins basique (pH=10-11),

- les valeurs des zones centrales (z3 et z4) évoluent dans le domaine de pH correspondant à la précipitation de l'hydroxyde. Ces valeurs correspondent aux valeurs théoriques de pH de précipitation et de fin de redissolution de l'hydroxyde de plomb et sont respectivement égales à $pH_1 = 8.47$ et $pH_2 = 11.06$ (Cf. chapitre 3-1.2.1).

Le pH présente des écarts importants entre les valeurs du sol et celles de l'eau interstitielle au bout de 50 heures (pH de l'eau interstitielle > pH du sol). Au bout de 100 heures, le pH du sol du compartiment anodique augmente vers des valeurs neutres (pH = 8-9).

Au-delà de 200 heures, le pH évolue de la manière suivante,

- le pH du sol de l'ensemble des zones évolue entre un pH moyen égal à 7 à l'anode et un pH moyen égal à 11 à la cathode,
- le pH de l'eau interstitielle reste basique à la cathode (pH = 11-12) tandis que le reste des zones évolue dans un domaine de pH compris entre 7 et 9.

A partir de 500 heures, la tendance à long terme est une alcalinisation du sol. A long terme, le pH de l'eau présente des valeurs ultra-basiques (pH > 12 dans les zones centrales z2, z3 et z4).

En résumé, les variations les plus importantes du pH se situent entre 0 et 150 heures ce qui correspond à la période où la décroissance de l'intensité électrique est la plus forte (figure 12). Les augmentations des intensités électriques dans les essais Pb[01] correspondent aux écarts de pH entre le sol et l'eau interstitielle. L'augmentation de l'intensité entre 100 et 200 heures est expliquée par l'acidification du pH de l'eau interstitielle (pH = 10 qui évolue vers pH = 5.5). La production d'ions H_3O^+ dans la zone anodique (z1) et d'ions OH^- dans la zone cathodique (z5) vers 25 heures, contribue à augmenter la quantité d'ions présents en solution.

Les pH moyens (pH du sol et de l'eau interstitielle) observés dans ces essais sont de pH = 6-8 à l'anode et pH = 11-12 à la cathode. Les résultats bruts donnent des valeurs plus basiques dans le sol (pH = 11-12) et dans l'eau interstitielle (pH = 12-13) (cf tableaux 2.a-Annexe II). En accord avec les pH théoriques de précipitation et de fin de redissolution de l'hydroxyde, les pH mesurés dans ces essais sont compatibles avec la formation d'anions plombates à la cathode.

ESSAIS Pb[1]: solutions à 1 g de Pb^{2+} /l

Pour les essais Pb[1], l'évolution du pH jusqu'à 300 heures montre (figures 15):

- la formation d'un compartiment acide dans le sol et dans l'eau interstitielle, limité aux deux premières zones anodiques (pH = 4-6 pour z1 et z2),
- la formation d'un compartiment cathodique basique dans le sol (pH = 10-11 pour z4 et z5) dès le début du traitement. Le pH de l'eau interstitielle de ce compartiment cathodique augmente plus lentement et devient basique à partir de 300 heures seulement (pH = 11-12). Vers 45 heures, le pH de l'eau dans la zone 5 présente une diminution brusque des valeurs et le pH passe d'une valeur basique (pH = 9) à une valeur neutre (pH = 6.8). Un écart de pH important s'établit dans cette zone entre le pH du sol et celui de l'eau interstitielle. Puis, le pH de l'eau interstitielle augmente et atteint une valeur de pH = 12 au bout de 300 heures,
- le pH du sol et de l'eau interstitielle des zones centrales (z3 et z4) se situe dans le domaine de précipitation du plomb correspondant aux valeurs théoriques de pH de

précipitation et de fin de redissolution de l'hydroxyde respectivement égales à $pH_1 = 7.97$ et $pH_2 = 12.06$ (cf chapitre 3-1.2.1).

Les écarts de pH sont les plus importants vers 50 heures avec un pH du sol supérieur au pH de l'eau.

Au-delà de 300 heures, le pH du sol évolue entre un pH moyen $pH = 4-5$ à l'anode et un pH moyen $pH = 11-12$ à la cathode. Le pH de l'eau interstitielle dans le compartiment cathodique augmente vers des valeurs basiques ($pH = 11-12$ en z4 et z5).

Les variations importantes de pH de l'eau interstitielle se situent entre 0 et 300 heures, elles sont très prononcées à 50 heures et se manifestent par un écart élevé entre le pH du sol et de l'eau interstitielle (pH du sol $>$ pH de l'eau). Ces observations peuvent être corrélées aux remontées de l'intensité électrique vers 45 heures (figures 13).

Puis, le pH aux électrodes varie peu à partir de 300 heures avec la stabilisation de l'intensité électrique.

Les pH moyens (dans le sol et dans l'eau interstitielle) observés dans les essais Pb[1] sont de $pH = 4-6$ à l'anode et $pH = 11-12$ à la cathode. En accord avec les pH théoriques de précipitation et de fin de redissolution, il y a donc formation d'anions plombates à la cathode.

ESSAIS Pb[10]: solutions à 10 g de Pb^{2+}/l

Pour les essais Pb[10], les courbes temps-pH montrent jusqu'à 500 heures (figures 16):

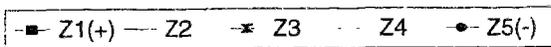
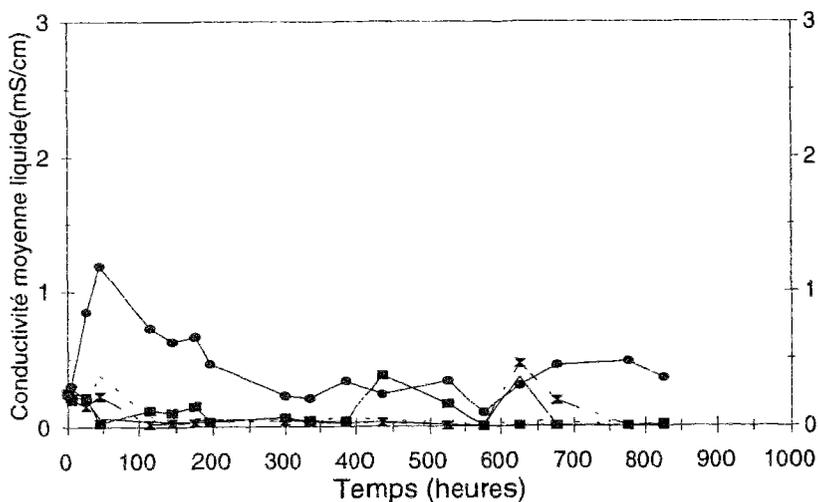
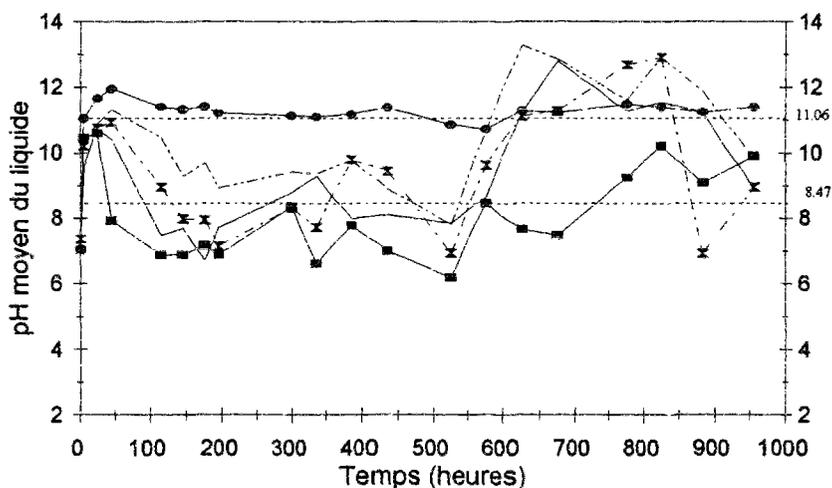
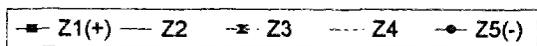
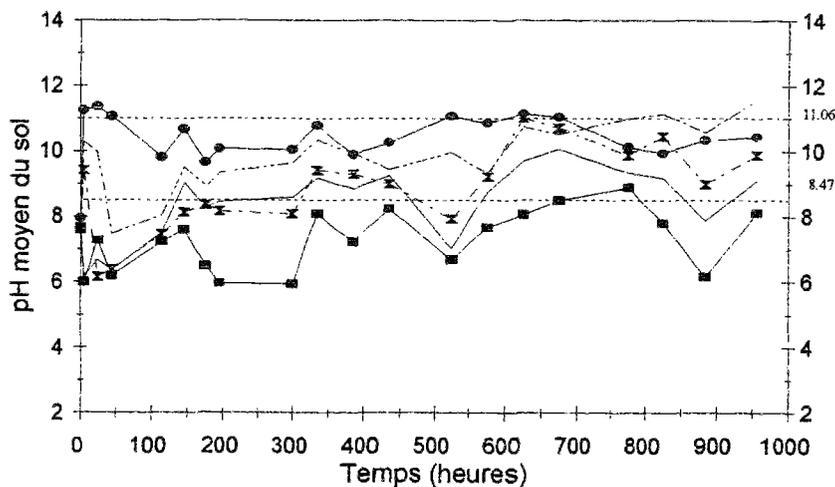
- la formation d'un compartiment acide ($pH = 3-5$) très marqué dans le sol et dans l'eau interstitielle comprenant les trois zones proches de l'anode (z1, z2 et z3),
- la formation d'une zone cathodique moyennement basique dans le sol ($pH = 11$), avec des valeurs plus faibles dans l'eau interstitielle ($pH = 10$),

Au-delà de 500 heures, la tendance à long terme est une augmentation légère du pH à l'anode dans le sol et dans l'eau interstitielle ($pH = 5$) et une stabilisation des valeurs à la cathode ($pH = 10$). Seules les zones 4 et 5 évoluent dans le domaine de précipitation de l'hydroxyde. Ces valeurs de précipitation et de fin de redissolution de l'hydroxyde sont respectivement égales à $pH_1 = 7.47$ et $pH_2 = 13.06$ (cf chapitre 3-1.2.1).

Les écarts de pH entre l'eau et le sol sont très faibles et les courbes de pH présentent les mêmes tendances dans l'eau que dans le sol. L'intensité électrique ne présente pas de remontée des valeurs (figure 13).

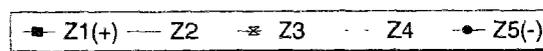
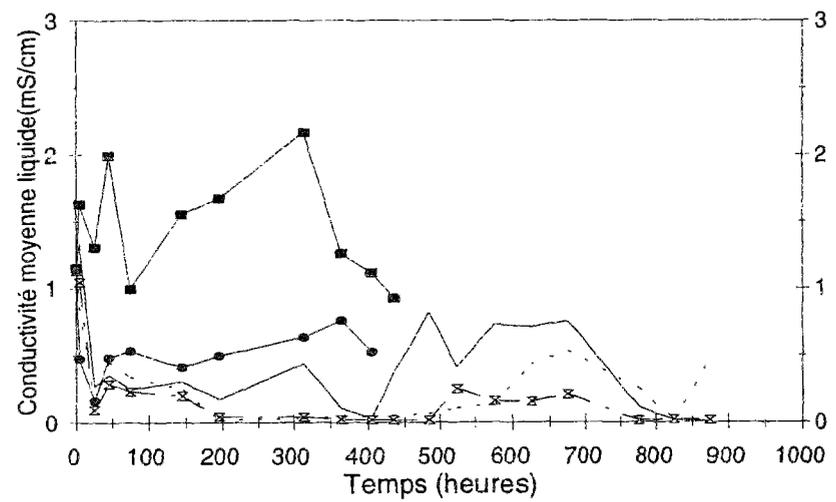
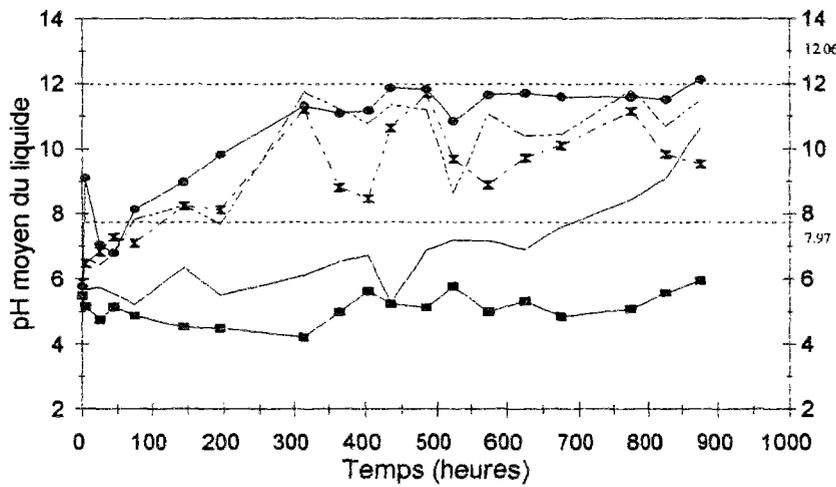
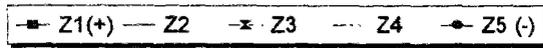
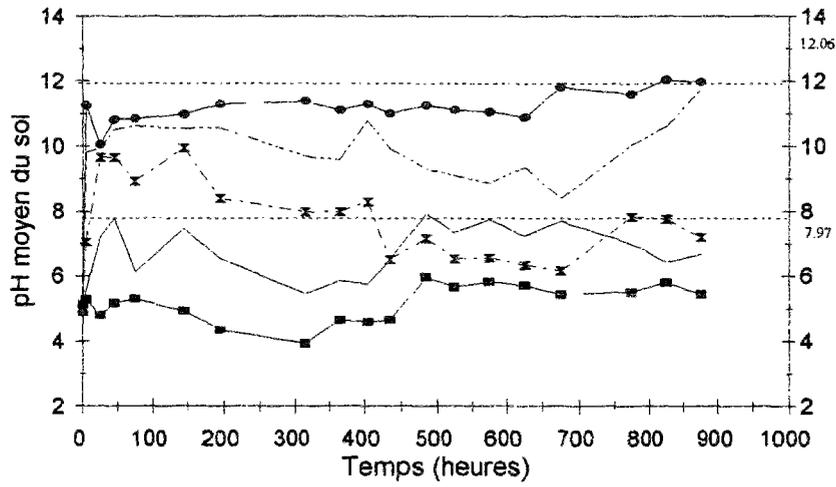
Les pH moyens (pH du sol et de l'eau interstitielle) observés dans ces essais sont de $pH = 3-5$ à l'anode et $pH = 9-11$ à la cathode.

Essais Pb[01]60

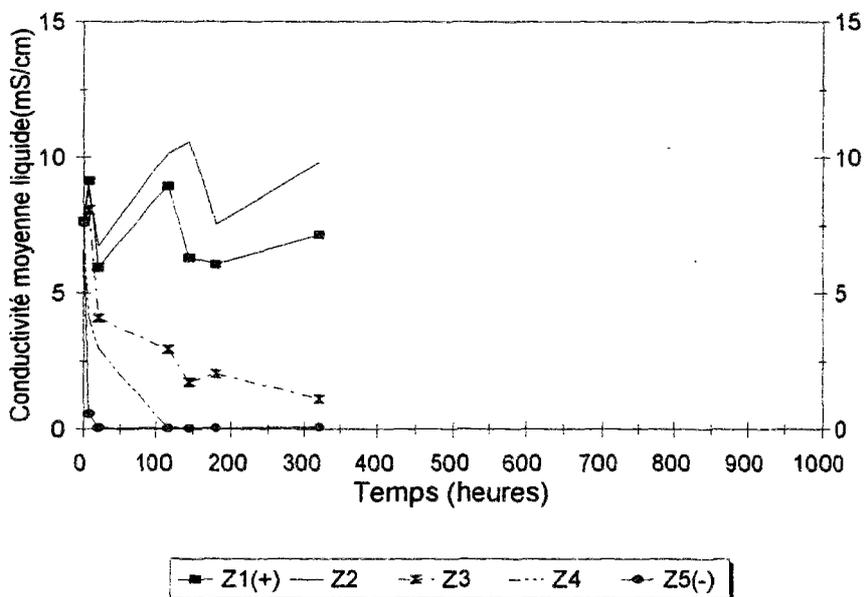
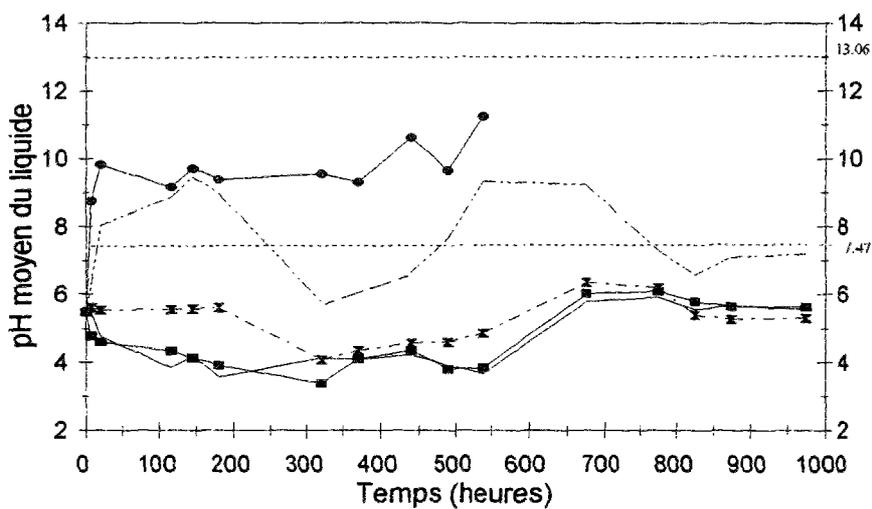
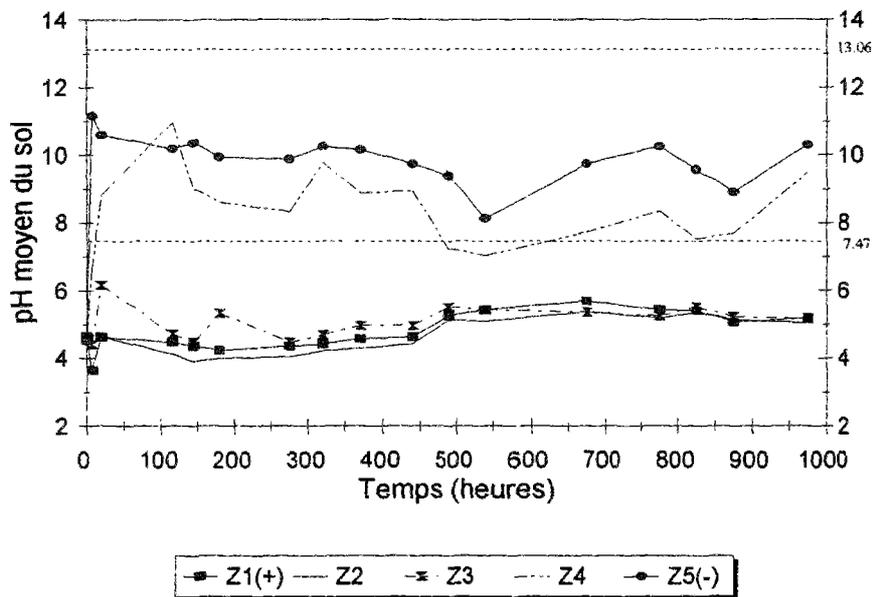


Figures 14 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 0.1 g de Pb^{2+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 2.d - Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1 = 8.47$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2 = 11.06$).

Essais Pb[1]60



Figures 15 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 2.d - Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1 = 7.97$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2 = 12.06$).



Figures 16 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 10 g de Pb^{2+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 2.d - Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1 = 7.47$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2 = 13.06$).

En résumé, quelle que soit la concentration initiale utilisée, le pH aux électrodes évolue vers une valeur acide à l'anode et basique à la cathode conformément aux réactions d'électrolyse de l'eau.

D'après les pH théoriques de fin de redissolution de l'hydroxyde, l'apparition d'anions plombates à partir de la redissolution de l'hydroxyde reste possible mais en quantité beaucoup plus faible que pour les concentrations de 0.1 et 1 g de Pb^{2+}/l .

Les pH moyens observés à l'anode sont pH = 6-8 pour les essais Pb[01], pH = 4-6 pour les essais Pb[1] et pH = 3-5 pour les essais Pb[10]. A la cathode, les pH sont pH = 11-12 pour Pb[01] et Pb[1] et pH = 9-11 pour Pb[10]. Le compartiment anodique est d'autant plus acide que la concentration du polluant est élevée (2 zones pour les essais Pb[1]60 et 3 zones pour Pb[10]60). Les valeurs initiales du pH dans le sol et dans l'eau interstitielle, pour les différentes concentrations utilisées, induisent des valeurs de pH neutres pour 0.1 g de Pb^{2+}/l (pH = 7-8) proches du pH de précipitation du plomb, et des valeurs acides pour 10 g de Pb^{2+}/l (pH= 4,5-5,5).

A l'inverse, les valeurs du compartiment cathodique sont plus basiques pour des concentrations faibles (essais Pb[01]60).

Les valeurs des zones centrales fluctuent dans un domaine de pH correspondant à la précipitation de l'hydroxyde.

L'écart observé entre les valeurs de pH du sol et du pH de l'eau interstitielle se manifeste pendant la période où l'intensité électrique est forte, autrement dit, la période pendant laquelle il y a électrolyse de l'eau. Ces écarts sont plus prononcés pour les concentrations faibles et sont observés entre 0 et 150 heures pour les essais Pb[01] et au bout de 50 heures pour les essais Pb[1]. Ils induisent des valeurs de pH de l'eau supérieures au pH du sol dans le premier cas et des valeurs de pH du sol supérieures à celles de l'eau interstitielle dans le second cas. Les écarts peuvent être corrélés avec les remontées de l'intensité électrique (figure 13). Dès que l'intensité se stabilise, le pH dans chaque zone varie peu.

Le pH moyen observé à la cathode, dans le sol et dans l'eau interstitielle, est égal ou supérieur au pH de fin de redissolution de l'hydroxyde dans les essais Pb[01] ($pH_2 = 11.06$) et très inférieur pour les essais Pb[10] ($pH_2 = 13.06$). Dans les essais Pb[1], le pH du sol est proche du pH de redissolution ($pH_2 = 12.06$). Pour l'eau interstitielle, les valeurs deviennent basiques seulement vers 300 heures. La tendance à long terme est une alcalinisation du milieu pour les essais Pb[01] et Pb[1].

D'après ces observations, les essais Pb[01] et Pb[1] permettent la formation d'anions en quantité importante par redissolution de l'hydroxyde à la cathode.

1.2.2. Evolution de la conductivité électrique

L'évolution de la conductivité électrique moyenne pour chaque concentration est représentée graphiquement par les figures 14c, 15c et 16c.

ESSAIS Pb[01]: solutions à 0.1 g de Pb^{2+}/l

Toutes les zones des cuves des essais Pb[01]60 sont rapidement déminéralisées mise à part la zone cathodique (z5) qui présente une augmentation importante de la conductivité vers 50 heures. Puis, celle-ci décroît jusqu'à 200 heures vers des valeurs de conductivité du même ordre de grandeur que la conductivité initiale (0.240 mS/cm).

Le pH très basique, supérieur ou égal au pH de redissolution du plomb (pH > ou = à 11,06), observé dans le sol et dans l'eau interstitielle en zone 5, peut expliquer l'augmentation de la conductivité par apport d'ions OH⁻ dans le milieu.

ESSAIS Pb[1]: solutions à 1 g de Pb²⁺/l

Les essais Pb[1] subissent entre 0 et 50 heures, une chute rapide de la conductivité pour l'ensemble des zones en dehors de la zone anodique (z1). Celle-ci présente une conductivité proche de la valeur initiale (1.15 mS/cm), puis elle diminue à partir de 300 heures.

Vers 50 heures, l'ensemble des zones présente une augmentation, de la conductivité plus prononcée dans la zone cathodique (z5) où les valeurs passent de 0.16 à 0.5 mS/cm entre 50 et 100 heures. Simultanément, la conductivité des zones 3 et 4 augmente légèrement (0.15 à 0.4 mS/cm) de 50 à 200 heures.

A partir de 400 heures, l'ensemble des zones est de nouveau déminéralisé, ce qui correspond à la période où l'intensité électrique est stabilisée.

ESSAIS Pb[10]: solutions à 10 g de Pb²⁺/l

La conductivité du compartiment cathodique (z4 et z5) diminue rapidement dès le début du traitement alors que le compartiment anodique conserve des fortes valeurs (7 à 8 mS/cm en z1 et z2). Cette augmentation est expliquée par l'apport d'ions H₃O⁺ dans le milieu par électrolyse de l'eau. En effet, l'acidification de l'eau des zones 1 et 2 entraîne des pH inférieurs au pH de précipitation du plomb (pH₁=7.47).

Les mesures de pH et de conductivité de l'eau interstitielle ne couvrent pas les 1000 heures de traitement électrique. En effet, une diminution du volume de liquide dans les collecteurs a été observée avec l'augmentation du temps de traitement. A long terme, le volume d'eau restant ne permet pas de réaliser des mesures correctes sur l'eau interstitielle.

En résumé, la comparaison des valeurs de conductivité pour l'ensemble des concentrations étudiées montre une diminution des valeurs dans les zones centrales z2, z3 et z4 pour les concentrations de 0.1 et 10 g de Pb²⁺/l. Pour la concentration intermédiaire de 1 g de Pb²⁺/l, les zones centrales présentent une remontée des valeurs à partir de 50 heures et ceci de manière plus marquée pour la zone 5. Cette hausse peut être reliée à la remontée de l'intensité électrique pendant la même période. L'augmentation de la conductivité correspond à un mécanisme de solubilisation.

La conductivité élevée, observée en zone 5 pour les essais Pb[01] est expliquée par les valeurs de pH basiques à la cathode. L'acidité du milieu augmente avec la concentration initiale du polluant. Ceci explique la conductivité élevée des zones 1 et 2 observée pour les essais Pb[10]. La production des ions H₃O⁺ et OH⁻ aux électrodes explique les variations des valeurs de conductivité. Ces ions présentent des mobilités importantes qui influencent de façon très significative la valeur de la conductivité (cf. chapitre 1- 1.5.1).

De plus, l'introduction de ces ions dans le milieu peut entraîner des phénomènes secondaires de solubilisation de polluants avec apparition de cations à l'anode et d'anions plombates à la cathode. Ces ions contribuent également à augmenter la conductivité du milieu. Les cations et anions formés peuvent se déplacer ou précipiter dans le milieu, ce qui entraîne une diminution de la conductivité dans les deux cas.

1.3. Etude de la concentration du polluant en fonction du temps

1.3.1. Répartition du polluant

Essais Pb[01]60: solutions à 0.1 g de Pb²⁺/l

La répartition du plomb est représentée graphiquement pour chaque essai par les figures 17. La quantité totale de plomb récupérée à l'arrêt du traitement est comparée à la masse initiale introduite dans le système. Les bilans sont aléatoires et la quantité de plomb finale récupérée diffère de celle introduite initialement d'environ 10 % (cf tableaux 3.a - Annexe II). Afin de pouvoir comparer la distribution du polluant dans les différents essais, la répartition sera pondérée à 100 (cf chapitre 3-2.2.3).

La répartition du plomb dans les différents essais est résumée dans le tableau 13.

Tableau 13 : Répartition du plomb (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 0.1 g Pb²⁺/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).

Essais	Zones Répartition pondérée du plomb (%)					Teneur moyenne en eau (w%)	Temps (h)
	1(+)	2	3	4	5(-)		
Pb1[01]60	12	19	24	24	21	24.4	52
Pb2[01]60	19	10	28	22	21	25.7	194.8
Pb3[01]60	15	21	26	22	16	24.8	478.3
Pb4[01]60	11	17	27	25	20	25.4	695
Pb5[01]60	27	16	23	18	16	22.5	984
Pb6[01]60	20	18	23	18	21	23.2	1560

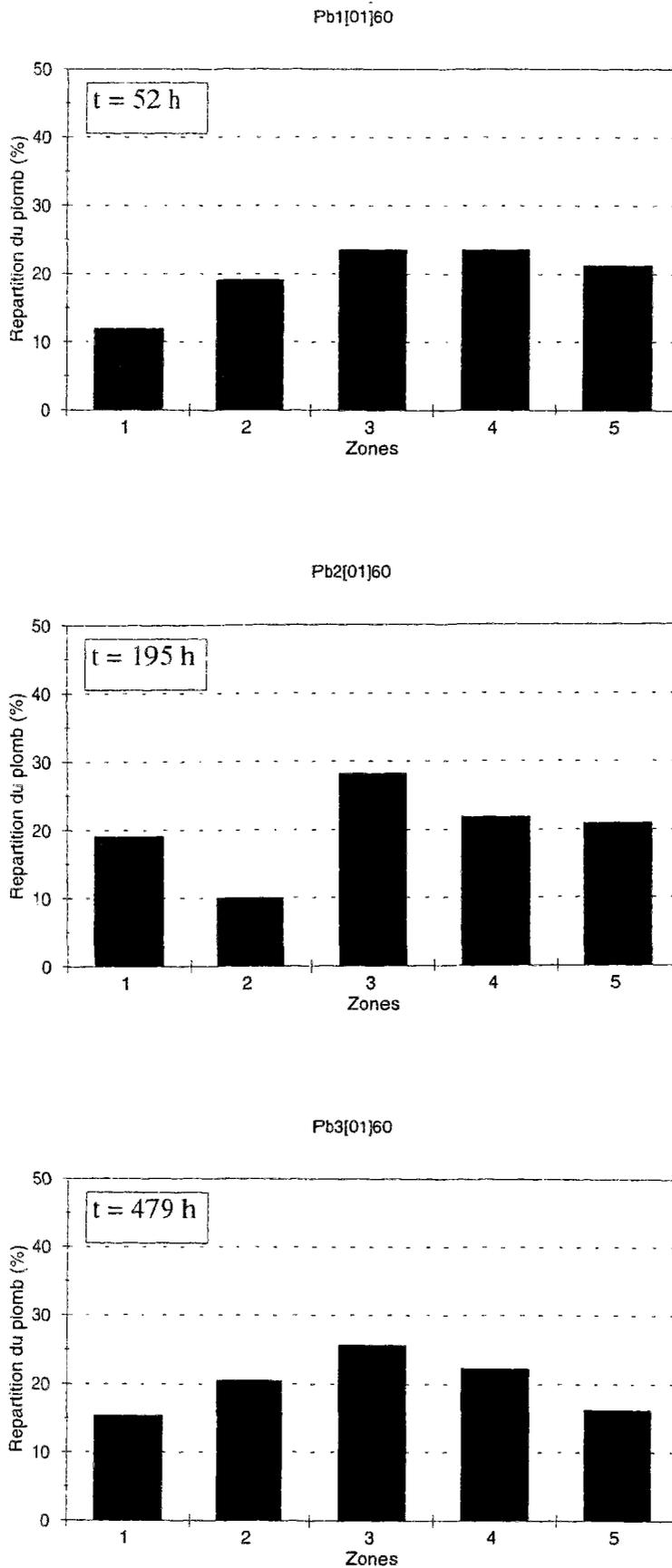
Le bilan en plomb est de 9 %.

La distribution du plomb dans la cuve en fonction du temps donne des profils fluctuant d'un essai à l'autre. D'une manière générale, l'application d'un champ électrique pour les essais Pb[01]60 ne permet pas d'obtenir un déplacement de polluant très important. La répartition du polluant est quasi homogène. Seuls les essais Pb1[01], Pb3[01] et Pb4[01] montrent un léger appauvrissement à l'anode (appauvrissement de 8 % de plomb en z1 par rapport à un état initial de 20 % de polluant dans chaque zone). Bien que le pH dans la zone 1 soit inférieur au pH de précipitation de l'hydroxyde, il n'y a pas de déplacement de polluant supplémentaire en fonction du temps.

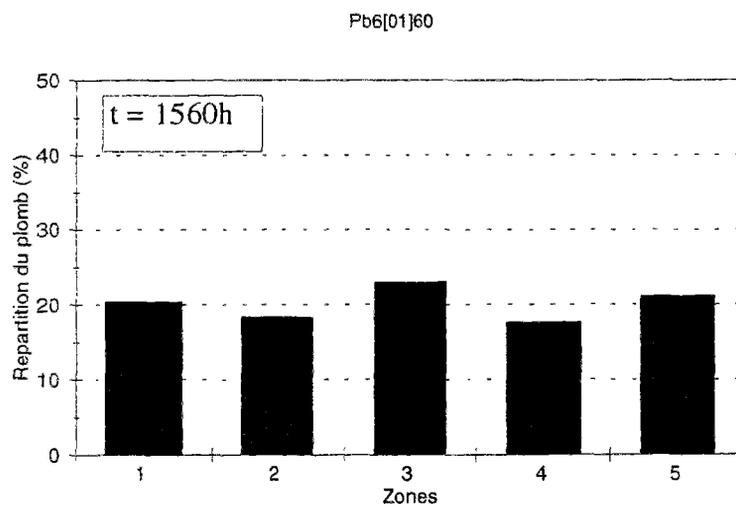
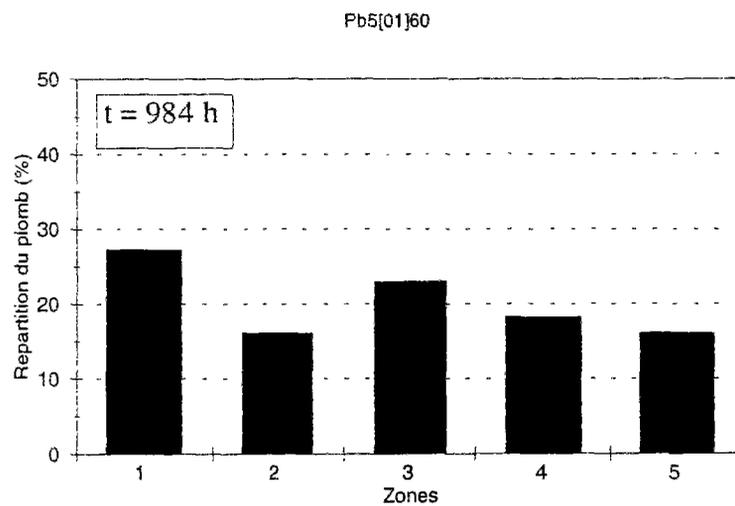
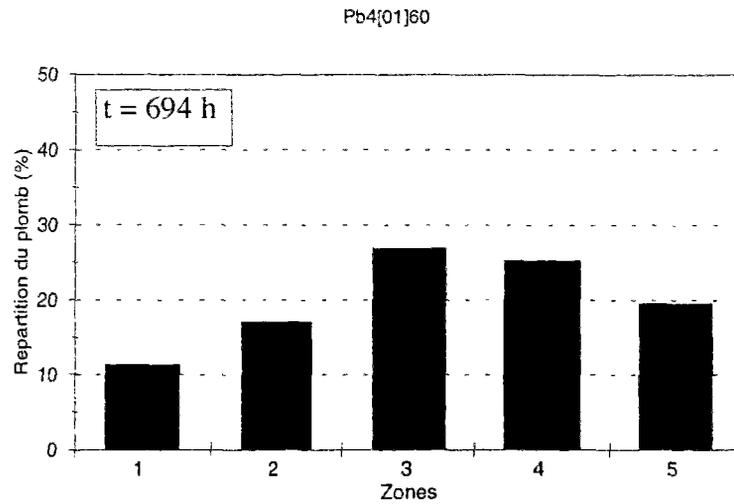
Les essais Pb3[01] et Pb5[01] présentent une zone cathodique (z5) très légèrement appauvrie en plomb (appauvrissement de 4 % de plomb). Il semble qu'il y ait une amorce de la « remobilisation » du polluant sous forme anionique.

L'application du champ électrique pendant une période de deux mois n'entraîne aucune amélioration sur le transport du polluant. Le déplacement du polluant se stabilise au bout de 50 heures avec une énergie électrique consommée de 17 kWh/m³ de sol traité.

Les valeurs de pH observées à l'anode et à la cathode permettaient d'envisager un transport du polluant par migration cationique et anionique. Les profils de répartition du plomb indiquent au contraire un faible taux de transport dans ces deux cas.



Figures 17 : Répartition du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g de Pb^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 3.a - Annexe II).



Figures 17 (suite): Répartition du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g de Pb₂₊₁ et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 3.a - Annexe II).

L'augmentation de la conductivité en zone 5 résulte de la présence d'ions OH⁻ et éventuellement d'anions plombates. Dans ce cas, il faut admettre que le déplacement de ces anions vers les zones centrales 3 et 4 reste faible. En effet, la chute de la conductivité dans les zones 1 à 4 témoigne de la précipitation du polluant.

Les valeurs moyennes de la teneur en eau finale de chaque essai sont regroupées dans le tableau 13. Les résultats de la teneur en eau mesurée sur chacune des cinq zones du sol montrent des valeurs plus élevées généralement du côté anodique tandis que la partie centrale de la cuve ainsi que la cathode restent plus asséchées (cf tableaux 3.a - Annexe II). Les essais réalisés pour des temps d'application importants (au-delà de 984 heures) subissent les pertes relatives en eau les plus fortes d'environ 10 %.

La perte en eau augmente avec le temps de traitement et peut être expliquée par deux mécanismes:

- d'une part, une évaporation liée aux conditions de température de la salle d'expérimentations. La lame d'air de la cuve se sature en eau puis s'évapore lors de l'ouverture de la cuve pendant la réalisation des mesures,
- d'autre part, une évaporation liée à l'échauffement du milieu du au passage du courant électrique. La dissipation de l'énergie sous une forme thermique est proportionnelle à la résistance électrique du milieu (R), au carré de l'intensité électrique (I) et au temps de traitement (t) suivant une relation de la forme $R \cdot I^2 \cdot t$.

Essais Pb[1]60: solutions à 1 g de Pb²⁺/l

La répartition finale de plomb pour les essais Pb[1]60 est représentée par les figures 18.

Tableau 14 : Répartition du plomb (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).

Essais	Zones Répartition pondérée du plomb (%)					Teneur moyenne en eau (w%)	Temps (h)
	1(+)	2	3	4	5(-)		
Pb1[1]60	5	13	26	28	28	24.3	32
Pb2[1]60	8	8	29	34	21	22.9	97
Pb3[1]60	5	16	38	27	14	25.3	194.5
Pb4[1]60	1	10	30	36	23	23.4	483
Pb5[1]60	1	6	25	43	25	23.0	694
Pb6[1]60	1	8	33	38	20	22.2	984
Pb7[1]60	2	10	29	39	20	22.5	1560

Le bilan de plomb est d'environ 7%.

L'essai Pb1[1] met en évidence, à 32 heures, un appauvrissement des deux zones du compartiment anodique (appauvrissement de 22% pour z1 et z2 par rapport à un état initial de 20% de polluant dans chaque zone). Au bout de 100 heures, le déplacement du polluant dans le compartiment anodique augmente légèrement (appauvrissement de 24 % pour z1 et z2). Cette observation est conforme aux valeurs de pH observées à l'anode puisque seules les zones 1 et 2

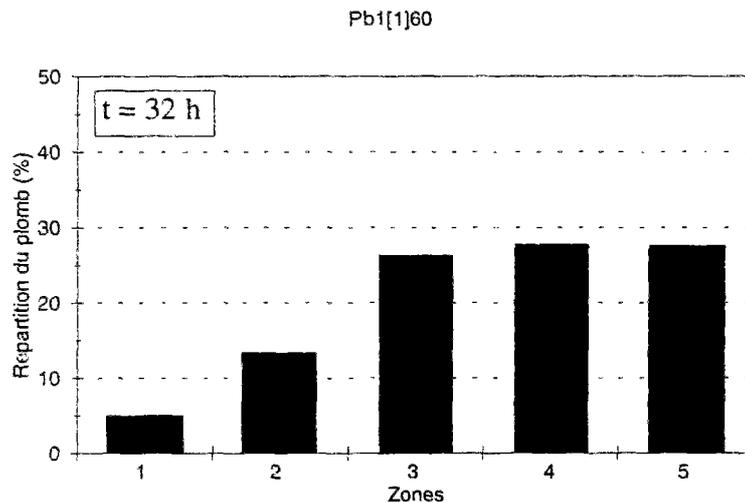
présentent des pH inférieurs au pH de précipitation du plomb. Le déplacement augmente au bout de 483 heures (appauvrissement de 29 % pour z1 et z2).

La répartition du plomb fait apparaître un nouvel appauvrissement dans la zone cathodique (z5) à partir de 97 heures. Ce phénomène est bien illustré avec l'essai Pb3[1] où le profil de répartition présente une forme en dôme caractérisant un enrichissement des zones centrales 3 et 4. L'apport de plomb ne peut provenir que de la cathode, puisque l'appauvrissement des zones 1 et 2 reste modéré entre 32 et 200 heures.

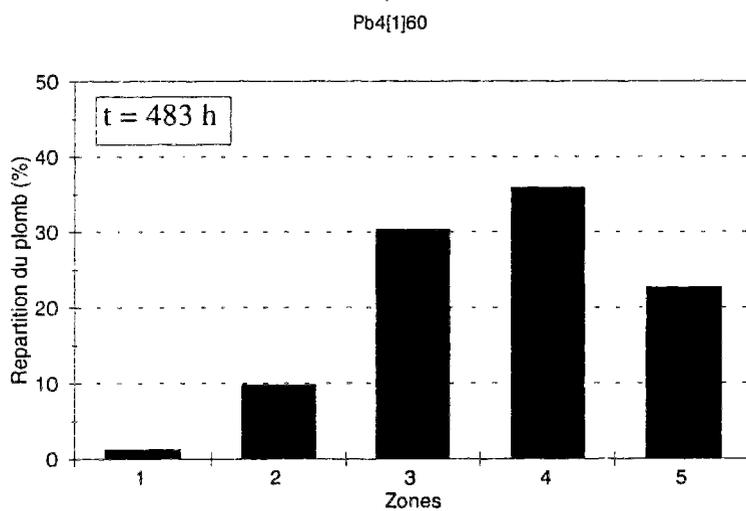
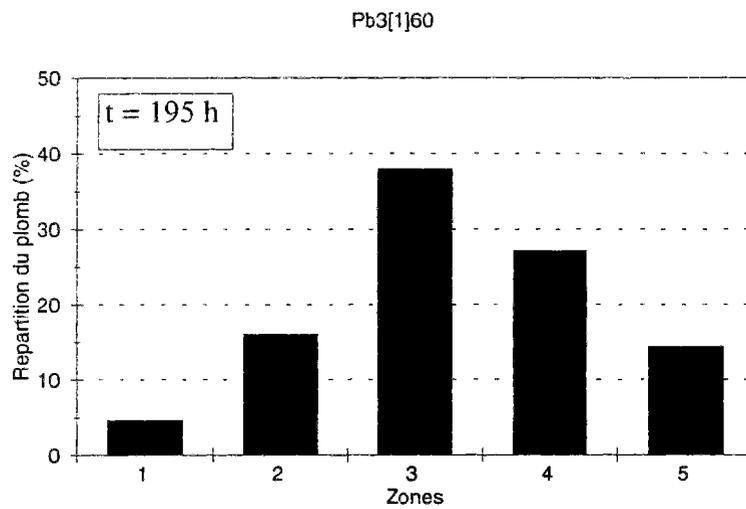
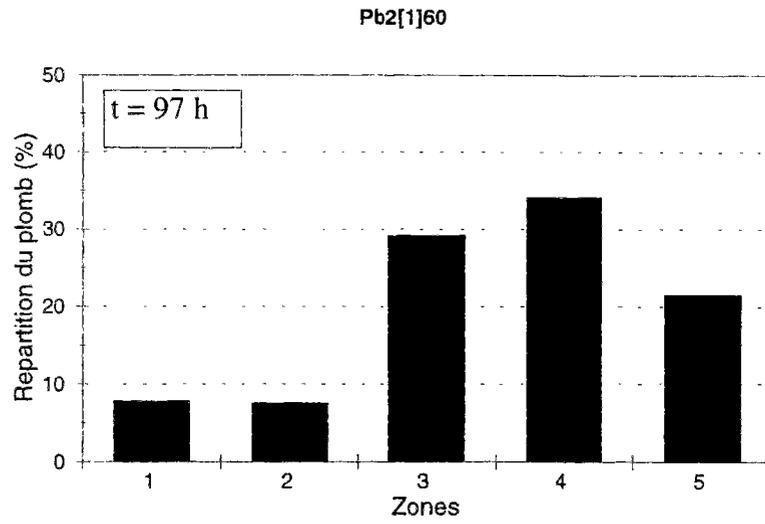
En comparant la teneur en plomb dans la zone 5 à celle de l'essai Pb1[1], on observe une diminution des valeurs ce qui implique un transport du polluant sous forme anionique de la cathode vers l'anode. Les pH du sol observés à la cathode (pH = 11-12), proches du pH de fin de redissolution de l'hydroxyde (pH = 12.06), sont compatibles avec la formation d'anions plombates dans ces essais.

Le transport par « remobilisation » du plomb débute à partir de 100 heures et semble se stabiliser dès 483 heures. Ce phénomène coïncide avec la présence d'écartés élevés entre le pH du sol et le pH de l'eau interstitielle (pH sol=10.8 et pH eau= 6.8) en zone 5 et, avec une augmentation de la conductivité dans les zones 3, 4 et 5 pendant la même période.

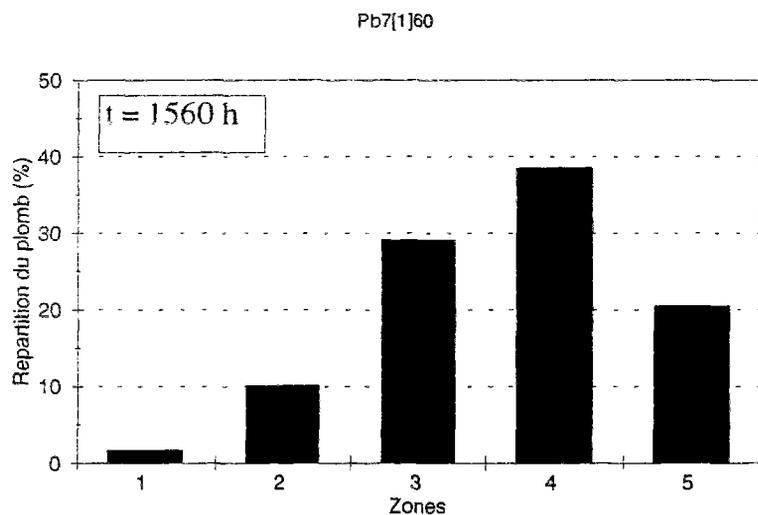
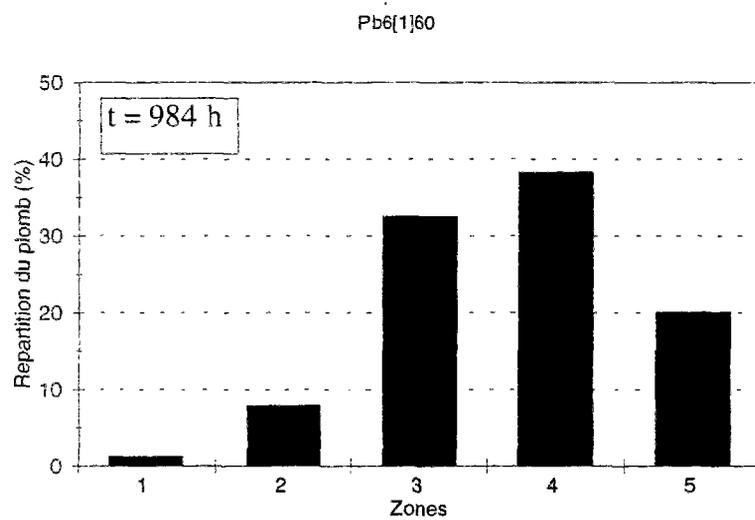
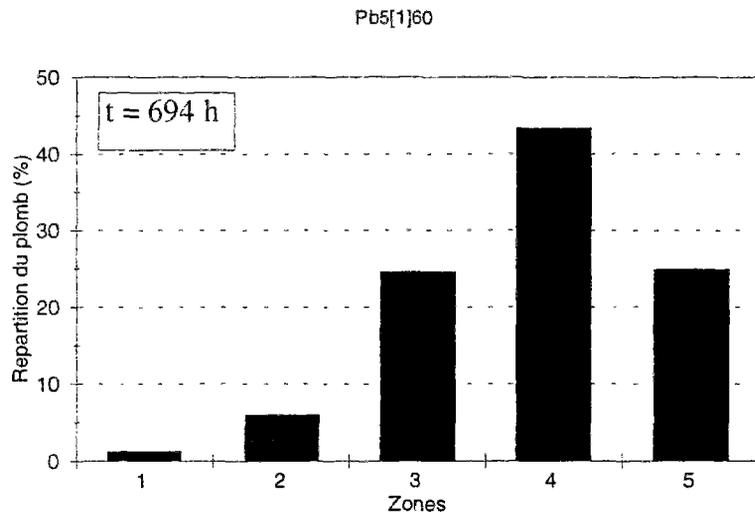
Au-delà de 483 heures, la « remobilisation » est moins active malgré des pH dans l'eau et dans le sol toujours favorables à la formation d'anions.



Figures 18 : Répartition du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+} /l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 3.b - Annexe II).



Figures 18 (suite): Répartition du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 3.b - Annexe II).



Figures 18 (suite): Répartition du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 3.b - Annexe II).

En résumé, le transport du plomb pour une concentration de 1 g de Pb^{2+}/l s'effectue selon deux mécanismes (tableau 14):

- un transport du plomb, dans un premier temps, sous une forme cationique Pb^{2+} vers la cathode qui conduit à un appauvrissement du compartiment anodique (z1 et z2),
- un transport du plomb, dans un second temps, sous une forme anionique du type $HPbO_2^-$, qui appauvrit la zone cathodique (z5). Ce mécanisme atteint son maximum d'efficacité au bout de 194 heures (14 % de teneur en plomb pour l'essai Pb3[1]). Le déplacement du plomb peut s'exprimer en terme de « remobilisation » relative en comparant la quantité de polluant déplacée par rapport à un état représenté par la valeur de 28 % de l'essai Pb1[1]. Avec 14 % de teneur en zone 5 à 195 h, l'essai Pb3[1] présente alors une « remobilisation » relative de 50 %.

Le transport cationique seul, limité aux zones 1 et 2, permet d'enrichir en plomb les zones centrales 3 et 4 d'une quantité égale à environ 14 % par rapport à la teneur initiale. Avec l'action combinée du transport cationique et de la « remobilisation » anionique, l'enrichissement des zones passe à 28 %. A partir de 483 heures, les variations des teneurs en polluant se localisent dans les zones 3 et 4 et la teneur en polluant dans les zones anodique et cathodique se stabilise. L'énergie électrique consommée au bout de cette période est de 72 kWh par volume de sol traité et la puissance se stabilise autour d'une valeur de 0.148 kW/m^3 .

Les valeurs moyennes de teneurs en eau finales indiquent une perte en eau d'environ 10 % pour des temps d'application supérieurs à 900 heures. Les profils de teneurs en eau montrent en général un compartiment cathodique plus appauvri en eau (cf tableaux 3.b- Annexe II).

Essais Pb[10]60: solutions à 10 g de Pb^{2+}/l

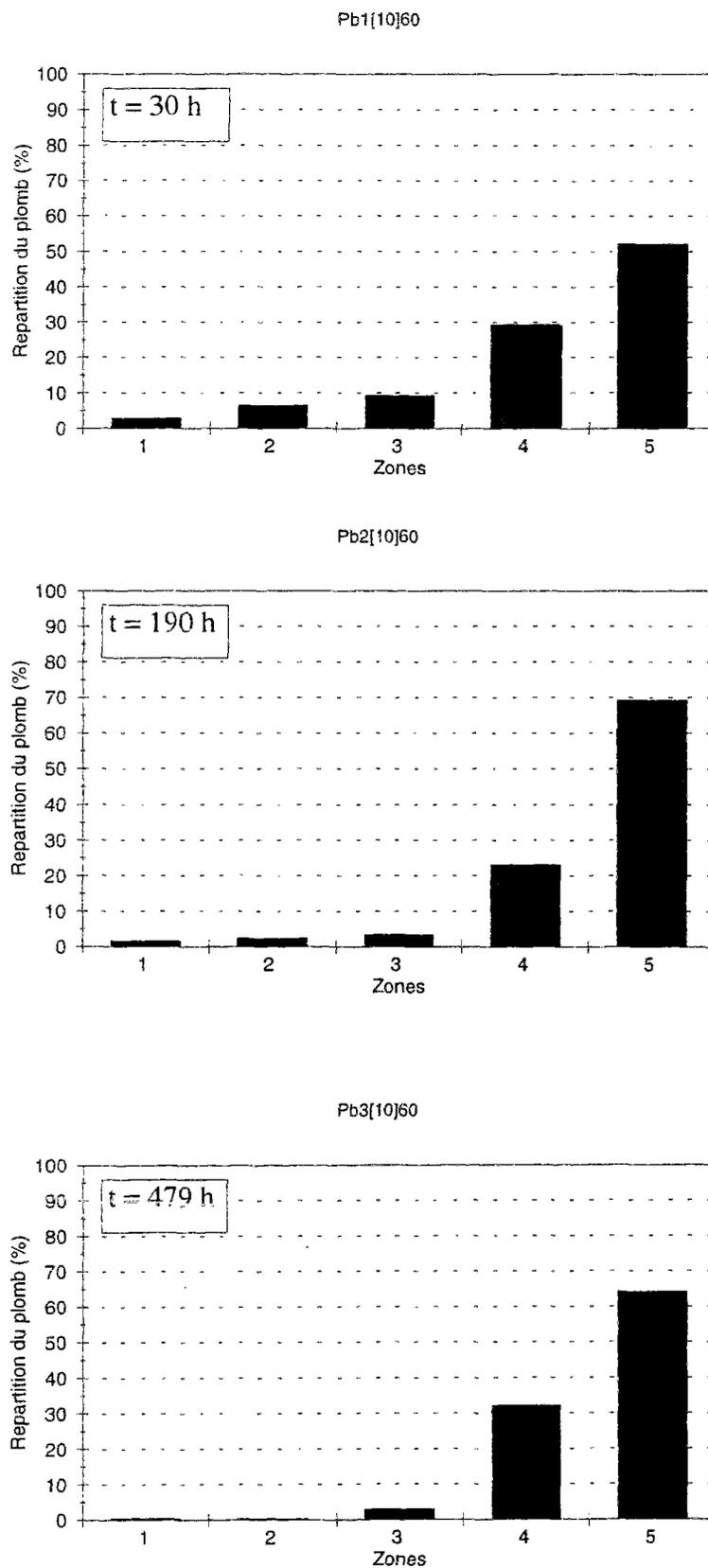
La répartition de plomb pour les essais Pb[10]60 est représentée par les figures 19.

Tableau 15 : Répartition du plomb (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 10 g Pb^{2+}/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).

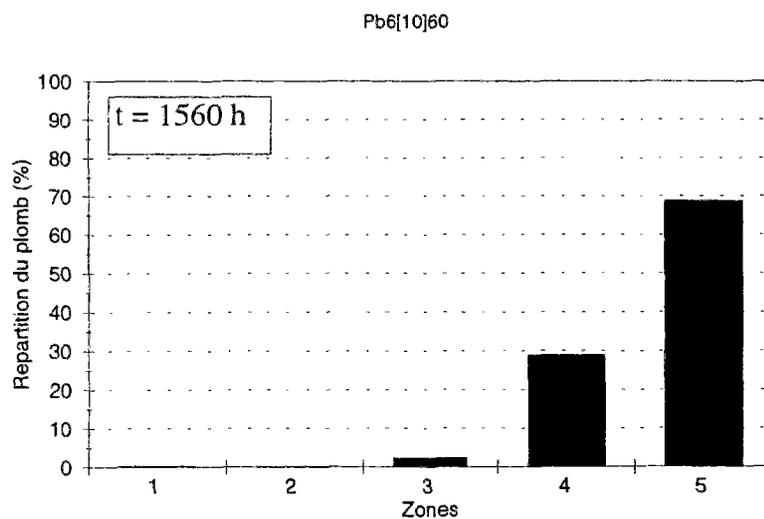
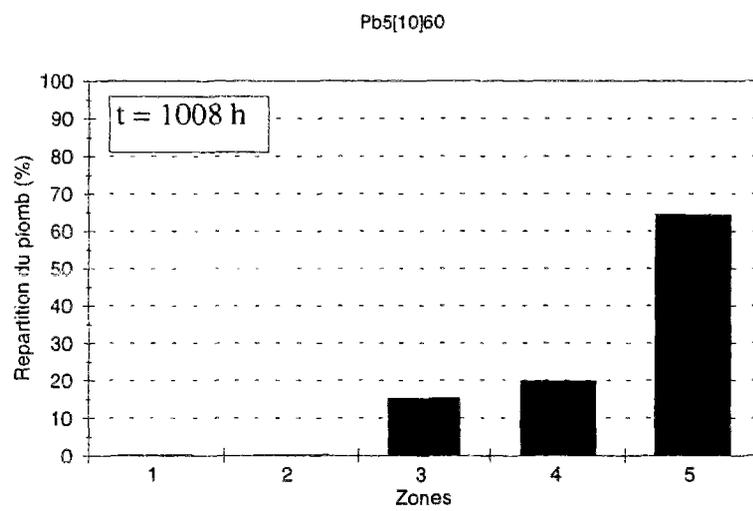
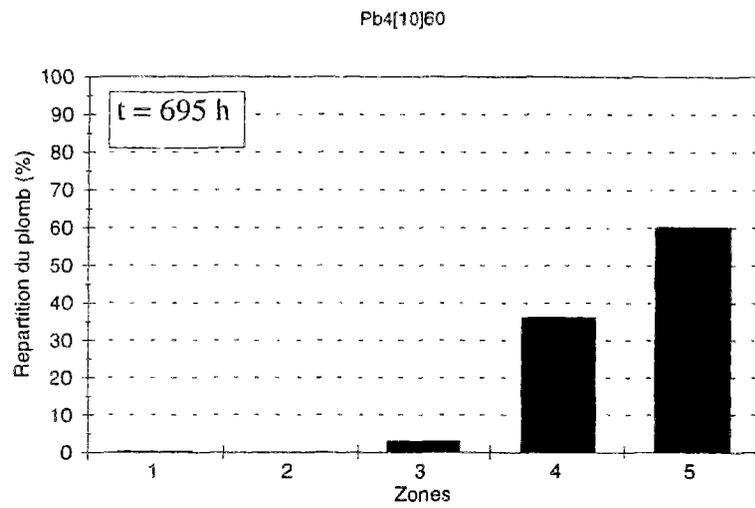
Essais	Zones Répartition pondérée du plomb (%)					Teneur moyenne en eau (w%)	Temps (h)
	1(+)	2	3	4	5(-)		
Pb1[10]60	3	7	9	29	52	24.1	30.3
Pb2[10]60	2	2	4	23	69	24.1	190.3
Pb3[10]60	1	<1 (0.3)	3	32	64	23.1	478.3
Pb4[10]60	<1 (0.3)	<1 (0.2)	3	36	60	21.5	695
Pb5[10]60	<1 (0.2)	<1 (0.2)	16	20	64	21	1008
Pb6[10]60	<1 (0.1)	<1 (0.1)	2	29	69	22.4	1560

Le bilan en plomb est de 6%

La distribution du plomb dans les différentes cuves montre que les trois zones du coté anodique sont très appauvries en plomb.



Figures 19 : Répartition du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 10 g de Pb^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 3.c - Annexe II).



Figures 19 (suite): Répartition du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 10 g de Pb^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 3.c - Annexe II).

Le transport électrique du plomb par migration cationique est très efficace puisque au bout de 30 heures, la moitié du polluant est concentrée dans la zone cathodique (z5) (teneur égale à 52 %). Le transport cationique du plomb augmente avec le temps et l'appauvrissement atteint une valeur de 52 % dans les zones 1, 2 et 3 au bout de 200 heures avec accumulation du polluant dans la zone 5. On peut considérer que la situation est stabilisée à partir de 478,3 heures.

Aucun phénomène de « remobilisation » n'est observé dans ces essais car la redissolution de l'hydroxyde est très peu développée pour cette concentration. Ces observations sont conformes aux valeurs de pH mesurées à la cathode, très inférieures au pH de fin de redissolution de l'hydroxyde.

Seul le mécanisme de transport du plomb sous forme cationique est présent dans les essais Pb[10]. L'énergie électrique consommée au bout de 478 heures est de 333 en kWh par m³ de sol et la puissance électrique est égale à 0.69 kW par m³ de sol (tableau 11).

Les essais Pb[10] présentent des pertes en eau de l'ordre de 15 à 17 % pour des temps d'application supérieurs à 700 heures. Un échauffement important de la cuve a été observé en début d'essai pour cette concentration. La perte en eau liée au passage du courant est plus importante dans le cas de cette concentration en raison de valeurs d'intensité électrique plus élevées (cf chapitre 4-1.3.1. / relation du type $R \cdot I^2 \cdot t$).

1.4. Conclusion

Des remontées des intensités électriques sont observées pour les concentrations de 0.1 et 1 g de Pb²⁺/l et correspondent à des écarts entre le pH du sol et celui de l'eau interstitielle. Par contre, les remontées de l'intensité et les écarts de pH sont peu marqués pour la concentration à 10 g de Pb²⁺/l.

La distribution finale du plomb dans le sol met en évidence trois types de répartition du polluant selon la concentration initiale:

- un léger appauvrissement dans la zone anodique consécutif à un faible déplacement du polluant pour une concentration de 0.1 g de Pb²⁺/l,
- un appauvrissement des zones anodique et cathodique, par rapport à la teneur initiale, avec accumulation du polluant dans les zones centrales du dispositif pour 1 g de Pb²⁺/l,
- un appauvrissement plus important des zones anodiques avec accumulation du polluant à la cathode pour 10 g de Pb²⁺/l.

Les valeurs des pH mesurés pendant le traitement font apparaître deux mécanismes de transport à l'origine de ces répartitions: la migration cationique sous forme Pb²⁺ vers la cathode et la migration anionique vers l'anode sous une forme du type HPbO₂⁻.

Le transport cationique est mis en évidence pour les trois concentrations étudiées. Le taux de déplacement du plomb et le nombre de zones touchées augmentent avec la concentration initiale en polluant, autrement dit avec l'acidité initiale du pH. Le déplacement est de 8 % en zone 1 pour la concentration de 0.1 g de Pb²⁺/l, 22 % en zones 1 et 2 pour 1 g de Pb²⁺/l et 41 % en zones 1, 2 et 3 pour 10 g de Pb²⁺/l au bout 30 à 50 heures. Ce transport se stabilise respectivement dans l'ordre, au bout de 52, 483 et 478 heures. L'efficacité du transport est d'autant plus importante que le pH mesuré à l'anode est inférieur au pH de précipitation de

l'hydroxyde. Le transport cationique se déroule au début de l'essai et se stabilise avec la formation de l'hydroxyde de plomb lorsque les pH correspondent au domaine de précipitation.

Le transport anionique du polluant est observé essentiellement pour une concentration de 1 g de Pb^{2+}/l au bout de 100 heures, bien qu'il semble y avoir une amorce du phénomène pour 0.1 g de Pb^{2+}/l . Dans le cas de 0.1 g de Pb^{2+}/l , l'apparition de pH basiques (proches du pH de fin de redissolution de l'hydroxyde) reste limitée à la cathode ce qui explique un faible développement du mécanisme de « remobilisation ».

Dans le cas de 1 g de Pb^{2+}/l , le pH mesuré dans les zones centrales de la cuve permet un transport important de plomb sous forme d'anions. Ce transport concentre le polluant dans les zones centrales 3 et 4 et double la quantité de polluant par rapport à celle déposée dans un premier temps par le transport cationique. Le transport anionique permet de « remobiliser » 50% du plomb déposé dans la zone 5 et de réduire sa teneur en plomb à 14 %. Ce phénomène se stabilise au bout de 483 heures.

L'application du traitement électrique pour des périodes plus longues reste sans effet. Cela signifie que soit la dissolution de l'hydroxyde à la cathode est une réaction trop lente à l'échelle de temps de nos essais, soit que cette dissolution n'a pas lieu.

La mesure du pH du sol permet par comparaison avec les pH théoriques de précipitation et de redissolution de l'hydroxyde, de prédire la formation de cations Pb^{2+} à l'anode et d'anions plombates à la cathode.

La mesure de la conductivité nous renseigne sur la charge ionique des différentes zones mais ne permet pas de distinguer celles provenant des ions H_3O^+ , OH^- et les autres ions bien que l'influence des espèces H_3O^+ et OH^- soit plus importante (en raison de leurs mobilités ioniques plus élevées).

L'augmentation de la conductivité dans les zones centrales observée pour la concentration de 1 g de Pb^{2+}/l permet de prédire un enrichissement des zones centrales par « remobilisation » anionique.

La mesure supplémentaire du pH de l'eau interstitielle met en évidence des écarts entre le pH du sol et l'eau. Ces écarts coïncident avec la période de « remobilisation » du plomb et il apparaît une augmentation du pH de l'eau interstitielle (pH = 6.8 à pH = 12) d'autre part entre 50 et 300 heures. L'origine de ces variations brutales du pH de l'eau interstitielle est mal définie: elle peut résulter d'une perturbation liée à la présence des collecteurs métalliques dans le sol mais elle peut être aussi liée au mécanisme de transport par « remobilisation ».

Les tableaux 16, 17 et 18 regroupent les différents paramètres chimiques mesurés à l'arrêt pour chaque série d'essais.

Tableau 16 : Synthèse des paramètres chimiques à l'arrêt pour les essais réalisés avec du sable pollué par du plomb pour une concentration initiale de 0.1 g de Pb²⁺/l et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (teneur en eau initiale de 26%).

ESSAIS	Paramètres mesurés à l'arrêt de l'essai		Zones de sol					Temps (heures)
			z1(+)	z2	z3	z4	z5(-)	
Pb1[01]60	Teneur en eau finale (w%)		27.8	23.8	23.4	24.2	23.3	52
	pH du sol		6.52	6.87	6.05	6.11	10.34	
	eau interstitielle	pH	4.07	10.07	11.29	11.30	11.90	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.054	0.024	0.365	0.335	0.982	
	Répartition du polluant (%)		12	19	24	24	21	
Pb2[01]60	Teneur en eau finale (w%)		28.7	25.5	24.2	24.5	26.1	195
	pH du sol		7.06	8.00	9.50	9.3	10.30	
	eau interstitielle	pH	7.10	9.00	11.50	10.60	11.40	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.356	0.052	0.017	0.034	0.723	
	Répartition du polluant (%)		19	10	28	22	21	
Pb3[01]60	Teneur en eau finale (w%)		26.7	25.1	24.1	23.9	24.3	478
	pH du sol		6.76	10.60	10.49	10.30	10.51	
	eau interstitielle	pH	6.40	9.50	9.00	9.00	11.20	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.049	0.039	0.014	0.102	0.555	
	Répartition du polluant (%)		15	21	26	22	16	
Pb4[01]60	Teneur en eau finale (w%)		26.1	23.7	23.8	23.7	29.7	695
	pH du sol		6.50	6.46	6.94	9.27	10.63	
	eau interstitielle	pH	-	-	-	-	-	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.045	0.021	0.034	0.026	0.042	
	Répartition du polluant (%)		11	17	27	25	20	
Pb5[01]60	Teneur en eau finale (w%)		23.7	22.2	22.4	22.3	22.2	984
	pH du sol		7.72	8.12	7.57	9.70	9.99	
	eau interstitielle	pH	10.37	8.68	7.83	11.26	11.20	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.002	0.002	0.001	0.002	0.003	
	Répartition du polluant (%)		27	16	23	18	16	
Pb6[01]60	Teneur en eau finale (w%)		24.5	22.6	22	24.8	22.5	1560
	pH du sol		7.70 ¹	8.40	7.86	9.13	10.40	
	eau interstitielle	pH	4.86	4.31	7.37	10.14	11.68	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.008	0.014	0.019	0.005	0.358	
	Répartition du polluant (%)		20	18	23	18	21	

¹ pH et conductivité mesurés jusqu'à 1052 heures

Tableau 17 : Synthèse des paramètres chimiques à l'arrêt pour les essais réalisés avec du sable pollué par du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb²⁺/l et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (teneur en eau initiale de 26%).

ESSAIS	Paramètres mesurés à l'arrêt de l'essai		Zones de sol					Temps (heures)
			z1(+)	z2	z3	z4	z5(-)	
Pb1[1]60	Teneur en eau finale (w%)		26	22	25	23.6	25.1	32
	pH du sol		5.03	10.53	10.71	10.20	10.66	
	eau interstitielle	pH	4.62	7.50	7.65	6.45	6.66	
		Conductivité électrique (mS/cm)	1.530	0.231	0.226	0.239	0.189	
	Répartition du polluant (%)		5	13	26	28	28	
Pb2[1]60	Teneur en eau finale (w%)		24.6	22.6	22.5	22.5	22.4	97
	pH du sol		5.64	5.79	7.40	10.45	11.16	
	eau interstitielle	pH	5.54	6.31	11.9	9.4	10.78	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.598	0.478	0.019	0.051	0.501	
	Répartition du polluant (%)		8	8	29	34	21	
Pb3[1]60	Teneur en eau finale (w%)		27.4	24.2	25.0	25.6	24.5	194.5
	pH du sol		6.33	10.5	10.42	11.02	10.55	
	eau interstitielle	pH	4.86	6.81	7.25	6.42	8.40	
		Conductivité électrique (mS/cm)	-	0.387	0.403	0.437	0.289	
	Répartition du polluant (%)		5	16	37	27	14	
Pb4[1]60	Teneur en eau finale (w%)		24.5	22.8	23.3	22.7	23.7	483
	pH du sol		3.70	5.10	8.88	10.50	10.97	
	eau interstitielle	pH	6.11	6.07	9.32	8.51	10.33	
		Conductivité électrique (mS/cm)	1.234	0.013	0.018	0.028	0.101	
	Répartition du polluant (%)		1	10	30	36	23	
Pb5[1]60	Teneur en eau finale (w%)		24.5	23.5	22.6	22.2	22.5	694
	pH du sol		3.31	5.24	5.90	10.74	11.40	
	eau interstitielle	pH	-	-	-	-	-	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.111	0.047	0.025	0.044	0.416	
	Répartition du polluant (%)		1	6	25	43	25	
Pb6[1]60	Teneur en eau finale (w%)		23.3	22	22.1	22.1	22.	984
	pH du sol		4.96	6.49	7.10	8.74	11.63	
	eau interstitielle	pH	5.20	8.40	10.13	9.15	11.05	
		Conductivité électrique (mS/cm)	2.460	0.021	0.16	0.016	0.128	
	Répartition du polluant (%)		1	8	32	38	20	
Pb7[1]60	Teneur en eau finale (w%)		23	22.5	22.3	22.2	22.6	1560
	pH du sol		6.55	5.64	6.30	12.10	12.40	
	eau interstitielle	pH	6.10 ²	9.33	11.04	12.10	11.91	
		Conductivité électrique (mS/cm)	-	0.017	0.076	0.615	0.991	
	Répartition du polluant (%)		2	10	29	39	20	

² pH et conductivité mesurés jusq'à 1080 heures

Tableau 18 : Synthèse des paramètres chimiques à l'arrêt pour les essais réalisés avec du sable pollué par du plomb pour une concentration initiale de 10 g de Pb²⁺/l et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (teneur en eau initiale de 26%).

ESSAIS	Paramètres mesurés à l'arrêt de l'essai		Zones de sol					Temps (heures)
			z1(+)	z2	z3	z4	z5(-)	
Pb1[10]60	Teneur en eau finale (w%)		25.9	23.9	23.7	24.2	23.3	30.3
	pH du sol		4.67	4.66	4.66	9.94	10.48	
	eau	pH	4.15	4.23	5.03	7.33	9.52	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	7.460	6.660	4.440	8.600	0.040	
	Répartition du polluant (%)		3	7	9	29	52	
Pb2[10]60	Teneur en eau finale (w%)		25.5	24.0	23.0	23.7	24.5	190.3
	pH du sol		4.50	4.29	4.80	10.20	11.41	
	eau	pH	3.88	3.64	-	13.00	10.61	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	9.480	9.890	-	0.018	0.054	
	Répartition du polluant (%)		2	2	4	23	69	
Pb3[10]60	Teneur en eau finale (w%)		24.6	22.2	22.2	23.2	23.3	478.3
	pH du sol		4.54	4.27	5.89	10.75	10.65	
	eau	pH	-	-	-	-	-	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	-	4.160	-	-	0.123	
	Répartition du polluant (%)		1	0.3	3	32	64	
Pb4[10]60	Teneur en eau finale (w%)		24.0	22	22.2	22.9	16.6	695
	pH du sol		4.40	4.10	5.01	6.51	9.80	
	eau	pH	-	-	-	-	-	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	-	8.200	-	-	0.113	
	Répartition du polluant (%)		0.3	0.2	4	36	60	
Pb5[10]60	Teneur en eau finale (w%)		22	21.1	20.6	20.5	20.8	1008
	pH du sol		5.04	4.89	4.88	5.69	7.13	
	eau	pH	-	-	-	-	-	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	-	-	-	-	-	
	Répartition du polluant (%)		0.2	0.2	16	20	64	
Pb6[10]60	Teneur en eau finale (w%)		22.1	21.7	21.1	22.9	24.6	1560
	pH du sol		5.25 ³	5.38	6.06	9.36	11.79	
	eau	pH	-	-	-	-	-	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	-	-	-	-	-	
	Répartition du polluant (%)		0.1	0.1	2	29	69	

³ pH et conductivité mesurés jusqu'à 1052 heures

Au vue des résultats obtenus avec le plomb, des essais ont été réalisés avec deux autres métaux toxiques, le chrome et le zinc, pouvant former des anions en conditions de pH basiques. Les concentrations ont été choisies par rapport à celles utilisées dans le cas du plomb (cf. Chapitre 3- 1.2.4).

2. Le chrome

Les essais sont réalisés avec des concentrations initiales en chrome de 0.1 g de Cr^{3+}/l (essais Cr[01]), 0.5 g de Cr^{3+}/l (essais Cr[05]) et 1 g de Cr^{3+}/l (essais Cr[1]) pour une période d'un mois. Les essais Cr[01] et Cr[1] ont été réalisés pendant 700 heures et les essais Cr[05] pendant 200 heures. La dénomination et les caractéristiques des essais sont reportés dans le tableau 10.

2.1. Etude des paramètres électriques en fonction du temps

2.1.1. Evolution de l'intensité électrique

Les mesures de l'intensité électrique des essais sont présentées sous forme de moyennes par les figures 20 (tableaux 4.d-Annexe II). Les tableaux de résultats bruts sont reportés en Annexe II (cf tableau 4.a, 4.b et 4.c-Annexe II).

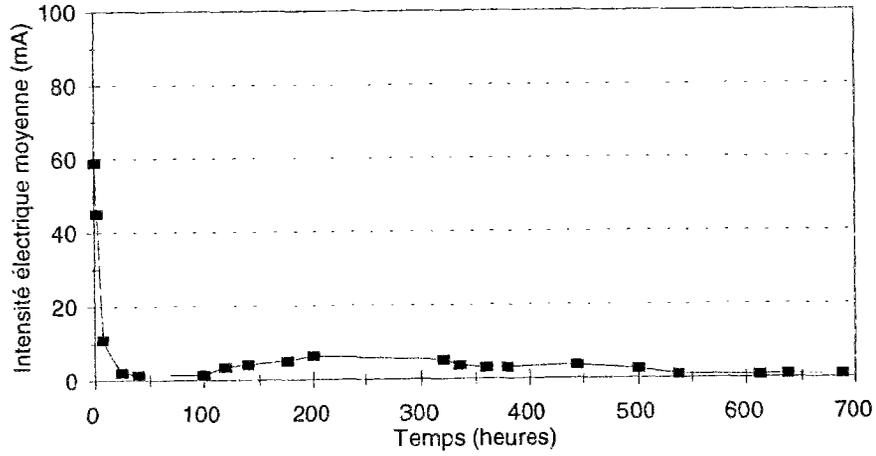
Les intensités de départ augmentent avec la concentration initiale du polluant lorsqu'on passe de 0.1 g de Cr^{3+}/l (58.9 mA), à 0.5 g de Cr^{3+}/l (84 mA) et 1 g de Cr^{3+}/l (166 mA).

La chute de l'intensité électrique est très rapide pour les trois concentrations et les valeurs sont réduites de 50 % par rapport à la valeur initiale au bout de 2 à 5 heures.

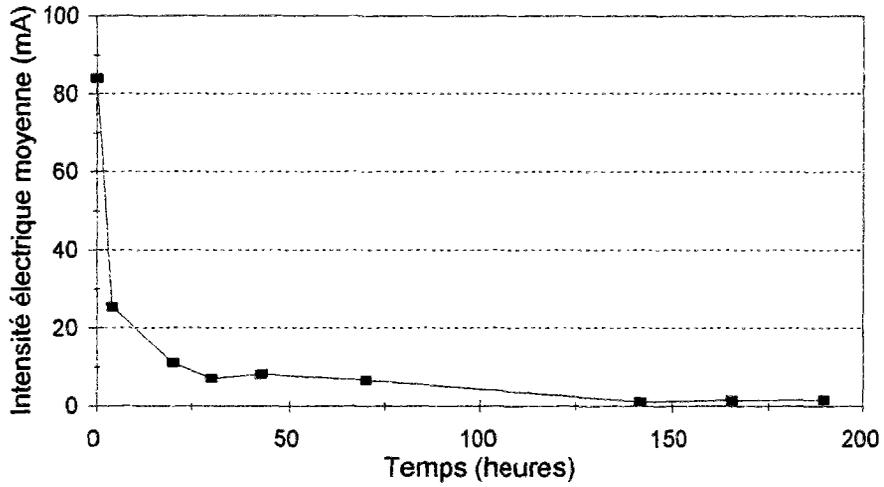
L'analyse comparative des courbes temps-intensité en fonction de la concentration initiale montre:

- pour les essais Cr[01], l'intensité atteint un minimum de 1.5 mA au bout de 40 heures. Les valeurs se stabilisent jusqu'à 100 heures, puis on observe une remontée de l'intensité d'une amplitude de 5 mA entre 100 et 500 heures. L'intensité tend alors vers une valeur finale résiduelle inférieure à 1 mA à 700 heures (correspondant à 1.4 % de la valeur de départ),
- pour les essais Cr[05], un minimum de 7 mA est atteint au bout de 30 heures. La décroissance continue lentement et l'intensité tend vers une valeur finale de 1.5 mA à 200 heures (correspondant à 1.4 % de la valeur initiale),
- pour les essais Cr[1], l'intensité atteint un minimum de 15 mA au bout de 25 heures. La décroissance est lente et continue jusqu'à 400 heures. L'intensité tend vers une valeur finale résiduelle inférieure à 1 mA à 700 heures (correspondant à 0.5 % de la valeur de départ).

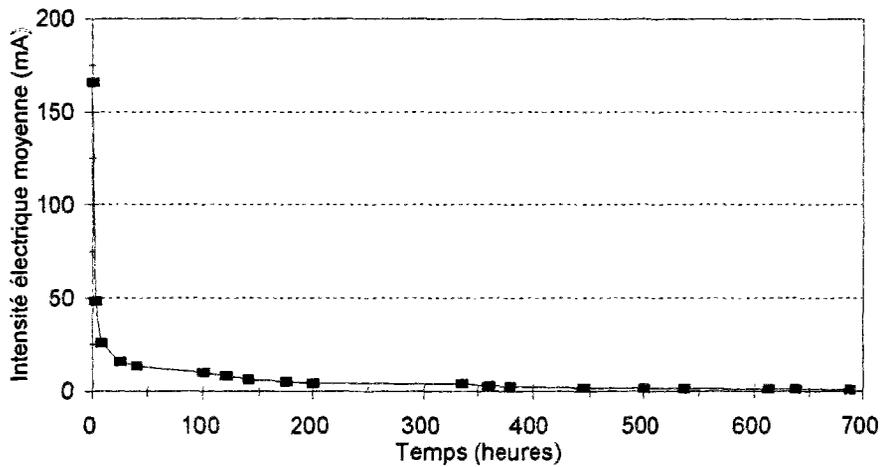
Essais Cr[01]60



Essais Cr[05]60



Essais Cr[1]60



Figures 20 : Intensité électrique moyenne pour des sables pollués avec du chrome pour un champ électrique de 2.6 V/cm et pour une concentration initiale de a) 0.1 g de Cr^{3+}/l , b) 0.5 g de Cr^{3+}/l , c) 1 g de Cr^{3+}/l (tableaux 4.d-Annexe II).

2.1.2 Evolution de la tension électrique

Des mesures de la tension électrique sont réalisées dans la cuve pour les essais à 0.5 g Cr³⁺/l. Elles consistent à mesurer la différence de potentiel électrique entre chaque collecteur de l'anode vers la cathode. L'évolution de la tension électrique (Volts) pour l'essai Cr2[05]60 est représentée par la figure 21.

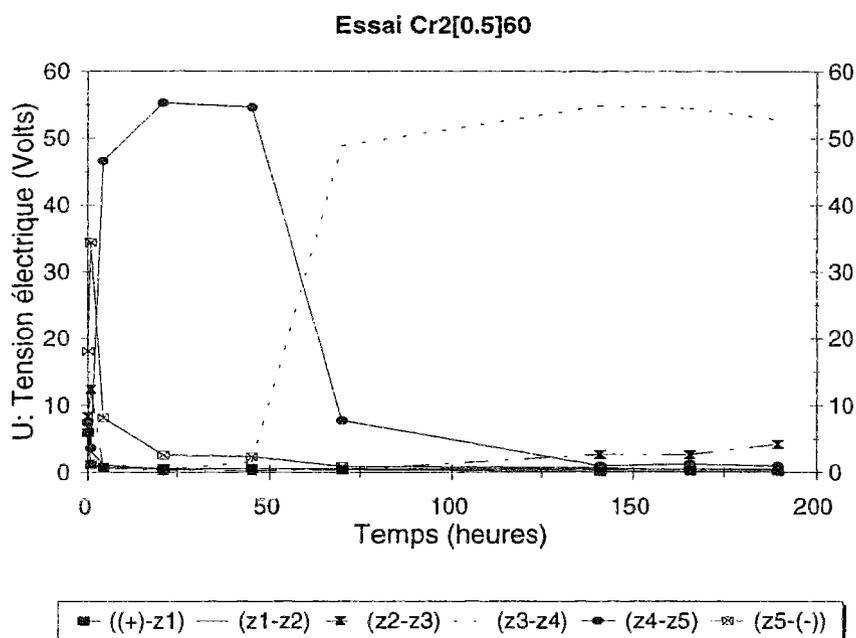


Figure 21 : Evolution de la tension électrique (Volts) pour du sable pollué par du chrome avec une concentration initiale de 0.5 g de Cr³⁺/l (tableaux 4.e.-Annexe II)

L'augmentation de la tension électrique près de la cathode [z4-z5] montre l'apparition d'une zone de forte résistance électrique. A partir de 50 heures, la résistance concerne alors la zone [z3-z4].

2.1.3. Consommation électrique

La consommation électrique des différents essais est présentée dans le tableau 19.

Les énergies électriques consommées en kWh par m³ de sol traité sont multipliées par un facteur 2 entre 0.1 et 1 g de Cr³⁺/l et elles passent d'une valeur de 40 à 75 kWh/m³ au bout de 700 heures.

La puissance électrique consommée en kWh par m³ de sol est plus élevée au départ pour les essais Cr[05] et Cr[1]. Elle se stabilise au bout de 550 heures lorsque l'intensité électrique devient pratiquement nulle. Pour les essais Cr[01], la puissance consommée est faible et varie peu pendant 700 heures (puissance d'environ 0.1 kWh/m³).

Les densités de courant moyennes sont égales à 4.6 A/m² pour les essais Cr[01], 6.5 A/m² pour Cr[05] et 13.1 A/m² pour Cr[1].

Tableau 19 : Consommation électrique des essais réalisés avec du sable pollué avec du chrome pour un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (W=26 %).

Essais	Poids du sol (sable + liquide) (g)	Intensité électrique initiale (mA) (1)	W (kWh/m ³ sol traité) (2)	P (kWh/h.m ³ sol traité) (3)	Temps (Heures)
Cr1[01]60	6300	61.8	8.1	0.112	72
Cr2[01]60	6871	62	17.9	0.09	198
Cr3[01]60	6300	54	37.6	0.07	549
Cr4[01]60	6871	61	41.4	0.06	699
Cr1[05]60	6871	62.5	14.75	0.283	52
Cr2[05]60	6871	105.5	25.04	0.129	194
Cr1[1]60	6300	178	22	0.305	72
Cr2[1]60	6300	140	47.1	0.237	198
Cr3[1]60	6300	175	51.4	0.093	550
Cr4[1]60	6300	173	73.2	0.104	701

(2) : $[(\text{Intensité (mA)} \times t \text{ (heures)} \times \text{tension électrique (Volts)}) / 10^{-3}] / \text{Volume de la cuve occupé par le sol (m}^3\text{)}$

(3) : Puissance : $[(\text{Intensité (mA)} \times t \text{ (heures)} \times \text{tension électrique (Volts)}) / \text{temps (heures)}] \times \text{Volume de la cuve occupé par le sol (m}^3\text{)}$

2.2. Etude des conditions de pH et de conductivité électrique en fonction du temps

2.2.1. Evolution du pH du sol et de l'eau interstitielle

Les mesures du pH et de la conductivité électrique sont exprimées sous forme de moyenne par les figures 22, 23 et 24 (tableaux 5.d-Annexe II). Les tableaux de résultats bruts sont reportés en Annexe II (cf tableaux 5.a, 5.b et 5.c-Annexe II).

Les valeurs moyennes initiales du pH de l'eau interstitielle et du pH du sol sont du même ordre de grandeur (pH = 4-5). Ces valeurs sont plus acides lorsque la concentration en polluant est plus élevée. C'est le cas des essais Cr[1] (pH = 3-4).

Tableau 20 : Valeurs initiales du pH du sol et de l'eau interstitielle pour des sables pollués par du chrome et soumis à un champ électrique de 2.6 V/cm.

	0.1 g de Cr ³⁺ /l	0.5 g de Cr ³⁺ /l	1 g de Cr ³⁺ /l
pH eau interstitielle	4.5-6	4-4.3	3.6
pH du sol	4.7-5	4-4.2	3.5-3.7

L'analyse comparative du pH du sol et de l'eau interstitielle est représentée pour chaque zone et chaque concentration.

ESSAIS Cr[01]: solutions à 0.1 g de Cr³⁺/l

L'évolution du pH jusqu'à 200 heures montre (figures 22):

- la formation d'un compartiment plutôt neutre dans le sol et dans l'eau interstitielle. Le pH augmente dans les zones 1 et 2 (pH = 6-7),
- la formation d'un compartiment cathodique basique dans le sol comprenant les zones 4 et 5 (pH = 10-11). Le même phénomène est observé dans l'eau interstitielle avec des valeurs plus basiques (pH = 11-12). Le pH est proche du pH de fin de redissolution de l'hydroxyde égal à pH₂ = 11.77 (cf chapitre 3-1.2.2),
- le pH des zones centrales z3 et z4 devient neutre à légèrement basique.

L'écart entre le pH du sol et de l'eau est peu marqué pour cette concentration. Les valeurs observées à l'anode sont supérieures au pH de précipitation de l'hydroxyde égal à pH₁ = 4.9. A la cathode, le pH devient inférieur au pH de fin de redissolution de l'hydroxyde.

Au-delà de 200 heures, le compartiment anodique évolue vers des pH neutres (pH = 7-9) tandis que le pH de la cathode passe d'une valeur de pH = 11-12 à pH = 10-11.

Les pH moyens observés (pH du sol et de l'eau interstitielle) sont pH = 5-7 à l'anode et pH = 10-11 à la cathode.

En accord avec les pH théoriques de précipitation et de fin de redissolution de l'hydroxyde, les pH mesurés sont peu favorables à la formation de cations Cr³⁺ à l'anode et permettent la formation d'anions chromites à la cathode entre 0 et 200 heures.

ESSAIS Cr[05]: solutions à 0.5 g de Cr³⁺/l

L'analyse des figures 23 montre:

- la formation d'un compartiment anodique acide bien marqué dans le sol et dans l'eau comprenant les trois premières zones (pH = 4-6 pour z1, z2 et z3),
- la formation d'une zone cathodique basique (z5) dans l'eau interstitielle dès le début de l'essai (pH = 12) et dans le sol au bout de 75 heures (pH = 11). Les valeurs du pH du sol et de l'eau interstitielle présentent alors des écarts importants entre 0 et 25 heures, localisés dans la zone 5 avec un pH de l'eau supérieur au pH du sol.

A partir de 100 heures, les pH du sol et de l'eau interstitielle à l'anode deviennent supérieurs au pH de précipitation de l'hydroxyde égal à pH₁ = 4.67. A la cathode, le pH reste inférieur au pH de fin de redissolution de l'hydroxyde égal à pH₂ = 12.48 (cf chapitre 3-1.2.2).

Les pH moyens observés (pH du sol et de l'eau interstitielle) sont de pH = 3-6 à l'anode et pH = 10-11 à la cathode.

D'après les pH théoriques correspondant aux pH de précipitation et de fin de redissolution de l'hydroxyde, on ne devrait pas observer la formation d'anions chromites en quantité importante à la cathode.

ESSAIS Cr[1]: solutions à 1 g de Cr³⁺/l

L'analyse des figures 24 jusqu'à 200 heures montre:

- la formation d'un compartiment anodique acide marqué comprenant les trois premières zones dans le sol et quatre dans l'eau interstitielle (pH = 3-5),
- la formation d'une zone cathodique basique vers 100 heures dans l'eau interstitielle et vers 200 heures dans le sol (pH = 10-11). Les écarts de pH entre le sol et l'eau deviennent importants pendant cette période et concernent les zones 4 et 5 avec des valeurs de pH de l'eau supérieures à celles du sol.

Au-delà de 200 heures, le pH de la zone anodique évolue vers des valeurs plutôt neutres (pH = 6-7) et devient supérieur au pH de précipitation de l'hydroxyde égal à $pH_1 = 4.57$. A la cathode, les valeurs sont moyennement basiques (pH = 8-10) et nettement inférieures au pH de fin de redissolution de l'hydroxyde égal à $pH_2 = 12.78$ (cf chapitre 3-1.2.2).

Les pH moyens observés (pH du sol et de l'eau interstitielle) sont pH = 3-5 à l'anode et pH = 9-11 à la cathode. Les pH mesurés à la cathode ne permettent pas une redissolution importante de l'hydroxyde de chrome en anions.

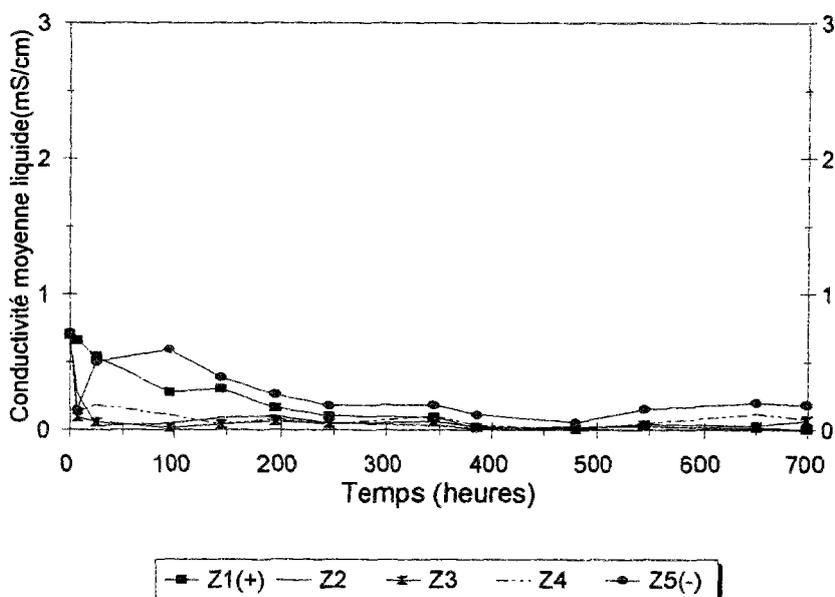
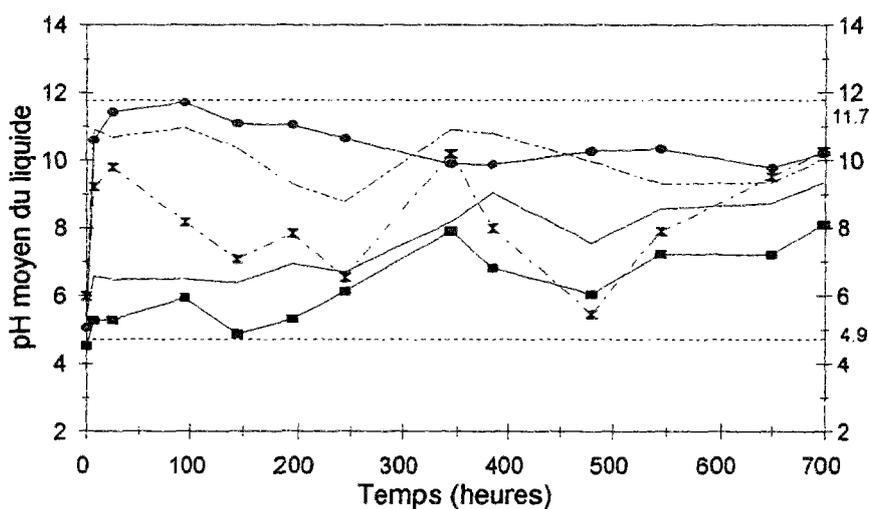
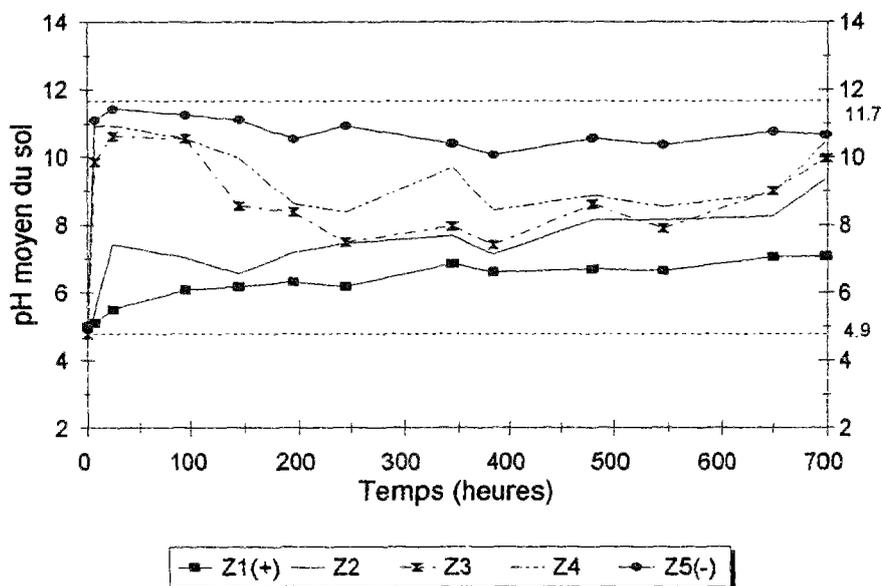
En résumé, les valeurs moyennes observées (pH du sol et de l'eau interstitielle) à l'anode sont pH = 5-7 pour Cr[01], pH = 3-6 pour Cr[05] et pH = 3-5 pour Cr[1]. A la cathode, le pH moyen est de pH = 10-11 pour Cr[01] et Cr[05], pH = 9-11 pour Cr[1]. Le compartiment anodique présente un nombre de zones plus important quand la concentration initiale augmente (2 zones pour Cr[01] et 3 zones pour Cr[05] et Cr[1]). L'alcalinisation du milieu à la cathode est plus marqué pour les faibles concentrations (essais Cr[01]).

Les écarts de pH sont importants en zone cathodique pour les essais Cr[05] et Cr[1] pendant la période où l'intensité électrique est la plus forte. Dans ces deux cas, les écarts induisent des valeurs du pH de l'eau supérieures au pH du sol.

Le pH moyen observé (pH du sol et de l'eau interstitielle) à la cathode est proche du pH de fin de redissolution de l'hydroxyde pour les essais Cr[01] (pH = 11.77) et inférieur pour Cr[05] ($pH_2 = 12.48$) et Cr[1] ($pH_2 = 12.78$). A l'anode, les pH moyens observés sont proches du pH de précipitation de l'hydroxyde et deviennent supérieurs à cette valeur au bout de 100 heures pour Cr[05] ($pH_1 = 4.67$) et 200 heures pour Cr[1] ($pH_1 = 4.57$).

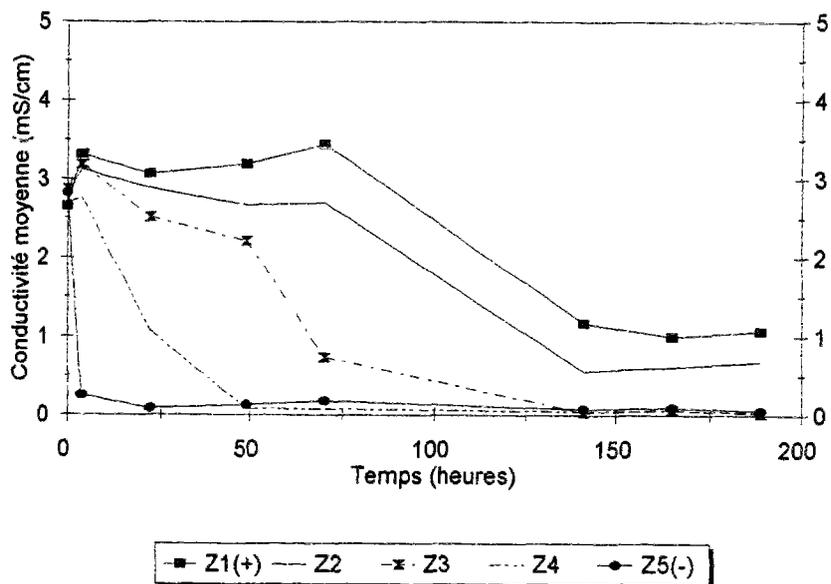
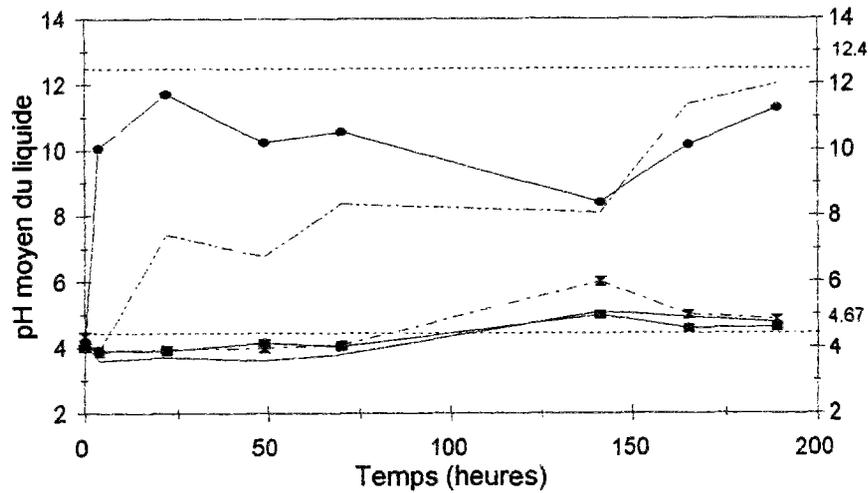
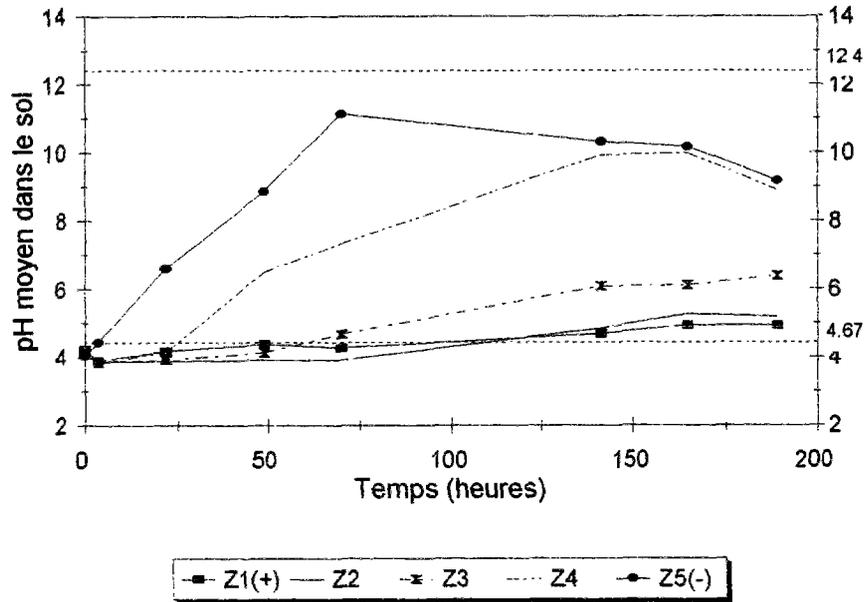
D'après ces considérations, seuls les essais Cr[01] doivent permettre d'observer une formation d'anions en quantité importante à la cathode.

Essais Cr[01]60

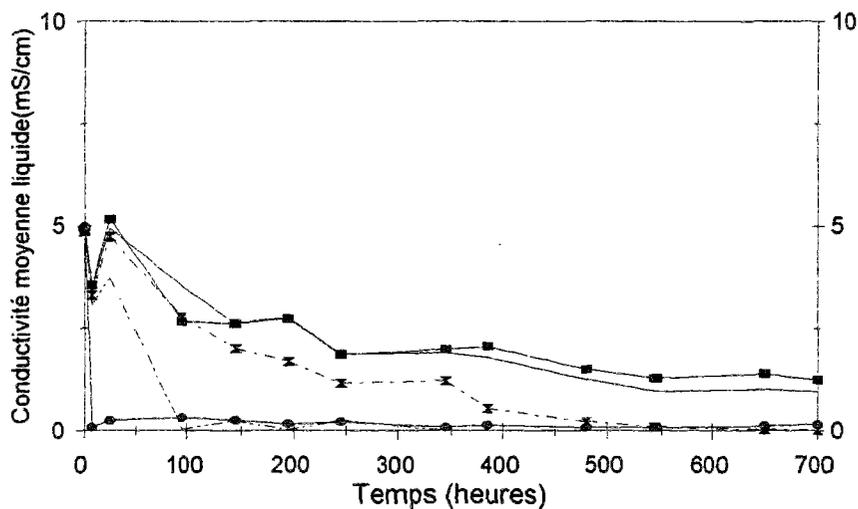
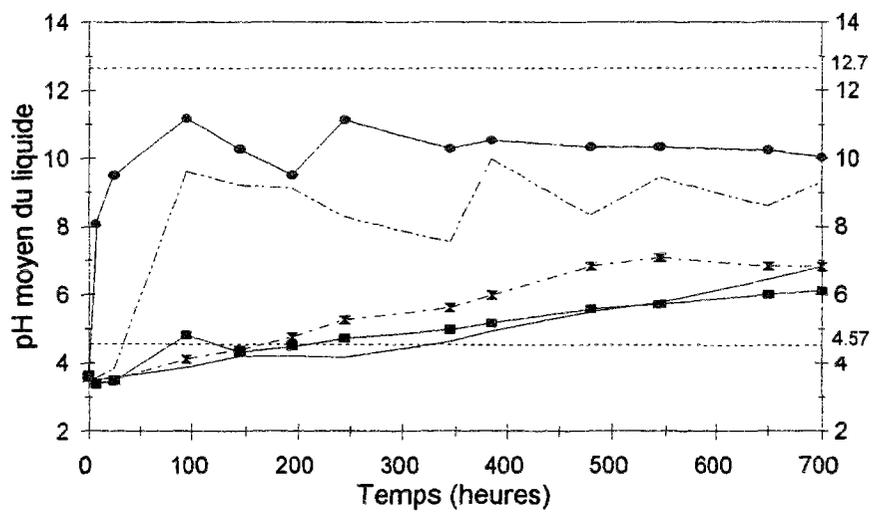
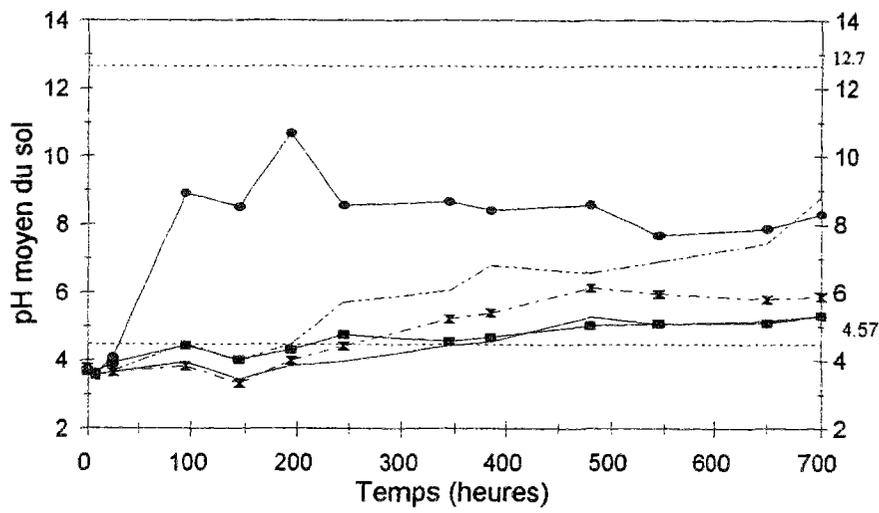


Figures 22 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du chrome pour une concentration initiale de 0.1 g de Cr^{3+} /l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 5.a-Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1 = 4.9$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2 = 11.77$).

Essais Cr[05]60



Figures 23 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du chrome pour une concentration initiale de 0.5 g de Cr^{3+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 5.b-Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $\text{pH}_1 = 4.67$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $\text{pH}_2 = 12.48$).



Figures 24 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du chrome pour une concentration initiale de 1 g de Cr^{3+} /l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 5.c-Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $\text{pH}_1 = 4.57$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $\text{pH}_2 = 12.78$).

2.2.2. Evolution de la conductivité électrique

L'évolution de la conductivité est représentée par les figures 22.c, 23.c et 24.c.

ESSAIS Cr[01]: solutions à 0.1 g de Cr³⁺/l

Les zones centrales, z2, z3 et z4 se déminéralisent rapidement dès le début de l'essai. La zone anodique (z1) présente une décroissance plus lente jusqu'à 200 heures.

La conductivité de la zone cathodique (z5) diminue vers 25 heures puis augmente immédiatement jusqu'à 100 heures (augmentation de 0.15 à 0.6 mS/cm). Ce phénomène correspond à la période où le sol et l'eau présentent des valeurs du pH très basiques. Toutes les zones sont déminéralisées au bout de 400 heures.

ESSAIS Cr[05]: solutions à 0.5 g de Cr³⁺/l

La chute de la conductivité progresse de la zone cathodique (z5) vers la zone anodique (z1). Le compartiment anodique reste le plus conducteur (3 mS/cm) puis décroît vers 75 heures. La chute des valeurs correspond à l'apparition de valeurs de pH supérieures au pH de début de précipitation du chrome ($pH_1 = 4.67$).

La comparaison de mesures de tension électrique et de conductivité pour l'essai Cr2[05]60 (cf tableaux 5.b-Annexe II) montre:

- une diminution de la conductivité en zone 5 entre 0 et 30 heures qui entraîne des valeurs inférieures à celle de la zone 4. Pour la même période, il y a augmentation de la tension électrique près de la cathode en zone [z4-z5] (cf figure 21). A partir de 50 heures, la conductivité en zone 5 devient de nouveau supérieure à celle de la zone 4,
- à partir de 30 heures, la conductivité de la zone 4 diminue et devient inférieure à celle de la zone 3. La tension électrique augmente alors dans la zone [z3-z4].

Les contrastes de conductivité de l'eau interstitielle entre les zones du compartiment cathodique correspondent aux variations de la tension électrique observées dans ces zones.

ESSAIS Cr[1]: solutions à 1 g de Cr³⁺/l

La décroissance de la conductivité est progressive dans les trois premières zones du compartiment anodique (diminution de 5 à 1 mS/cm). Les zones 5 et 4 sont rapidement déminéralisées.

En résumé, il y a diminution rapide de la conductivité des zones centrales z2, z3 et z4 quelle que soit la concentration étudiée. Ce phénomène est plus marqué pour les concentrations à 0.1 g de Cr³⁺/l en raison de valeurs de pH du sol et de l'eau interstitielle proches du pH de précipitation de l'hydroxyde.

La conductivité de la zone anodique z1 reste élevée pour les concentrations de 0.5 et 1 g de Cr³⁺/l ce qui correspond aux valeurs de pH acides mesurées dans le compartiment anodique.

La conductivité de la zone 5 est généralement faible sauf pour 0.1 g de Cr³⁺/l où elle augmente entre 0 et 100 heures ce qui correspond aux valeurs basiques du pH du sol et de l'eau

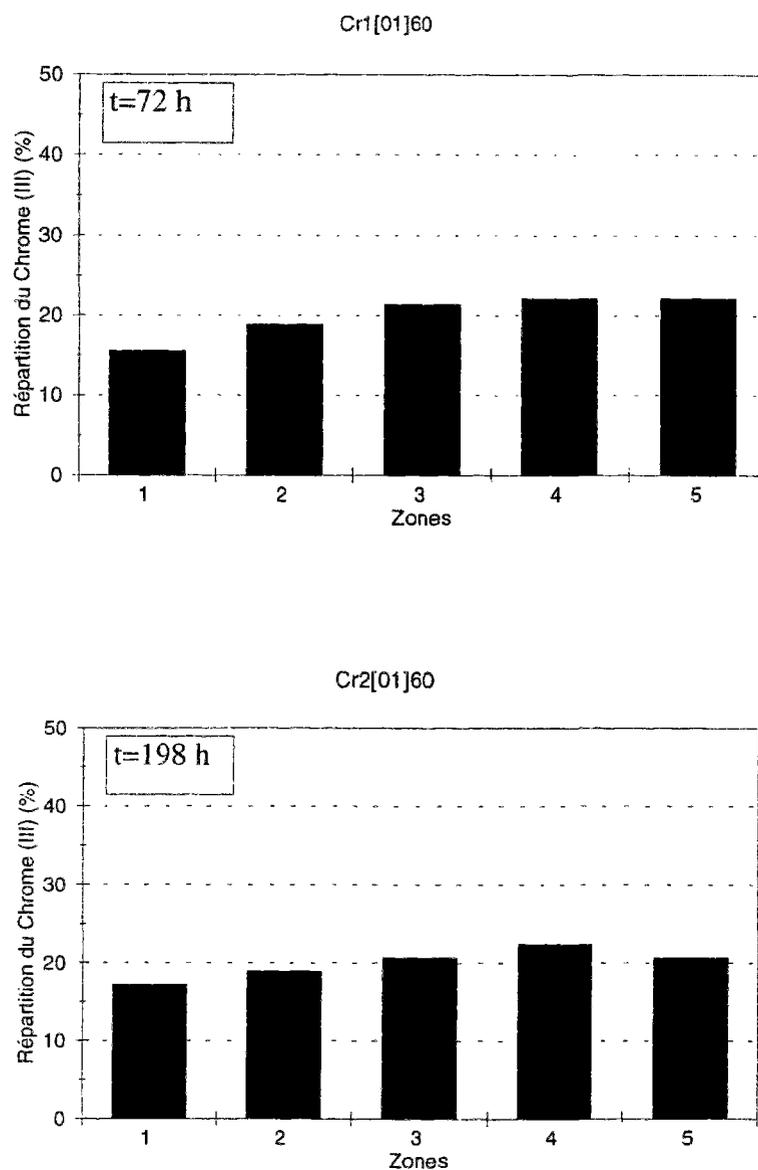
interstitielle proche du pH de fin de redissolution de l'hydroxyde. La présence d'ions OH^- , et éventuellement des ions chromites, peut expliquer cette augmentation de la conductivité.

2.3. Etude de la concentration du polluant en fonction du temps

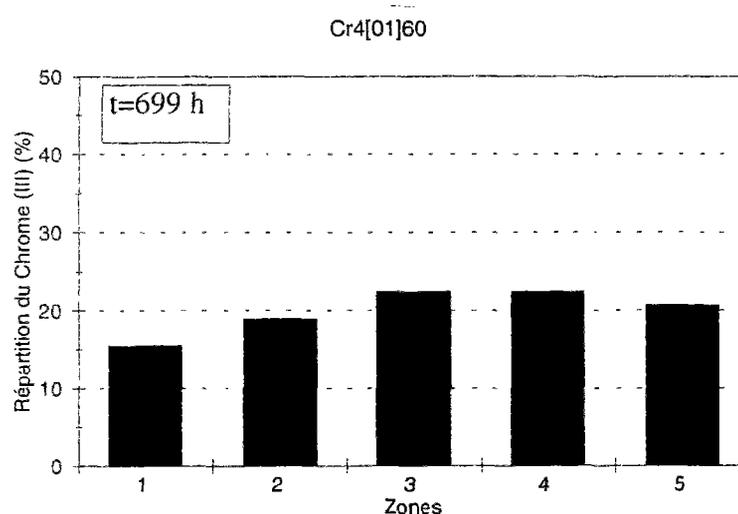
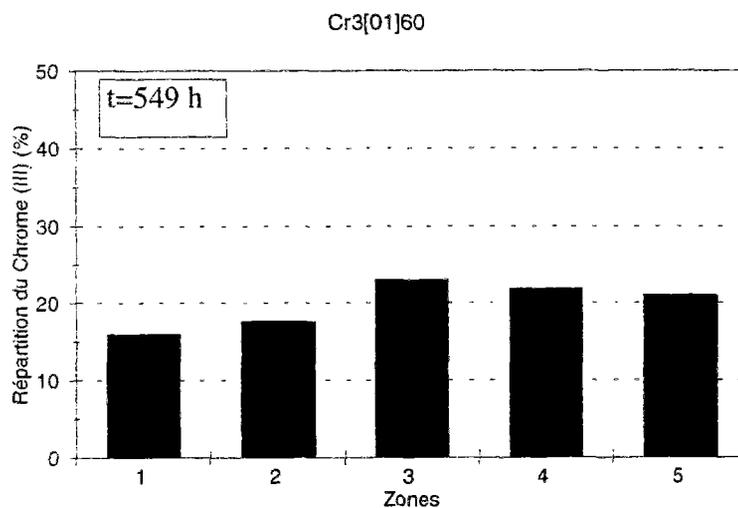
2.3.1. Répartition du polluant

Essais Cr[01]60: solutions à 0.1 g de Cr^{3+}/l

La répartition des essais réalisés avec une concentration initiale en chrome de 0.1 g de Cr^{3+}/l est représentée par les figures 25.



Figures 25 : Répartition du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g de Cr^{3+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 6.a-Annexe II)



Figures 25 (suite): Répartition du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g de Cr^{3+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 6.a-Annexe II)

La distribution du chrome dans les différents essais est résumée dans le tableau 21.

Tableau 21 : Répartition du chrome (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 0.1 g Cr^{3+}/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).

Essais	Zones					Teneur moyenne en eau (w%)	Temps (h)
	Répartition pondérée du chrome (%)						
	1(+)	2	3	4	5(-)		
Cr1[01]60	16	19	21	22	22	25.7	72
Cr2[01]60	17	19	21	22	21	23.7	198
Cr3[01]60	16	18	23	22	21	22.9	549
Cr4[01]60	16	19	22	22	21	23.5	699

Le bilan en chrome est de 9 %.

Le déplacement du polluant est très faible mis à part un léger appauvrissement en chrome dans les zones 1 et 2 dès 72 heures (appauvrissement de 5 % en polluant par rapport à 20 % de chrome initialement dans chaque zone). Les valeurs de pH observées à l'anode sont proches du pH de précipitation du chrome, ce qui explique le faible taux de transport du polluant.

Il n'existe pas de « remobilisation » anionique du chrome dans la zone cathodique (z5) bien que les valeurs du pH du sol et de l'eau soient basiques.

L'application d'un champ électrique pour des temps plus longs ne permet pas d'améliorer le taux de transport du chrome.

L'augmentation de la conductivité en zone 5 peut refléter un apport d'ions OH^- et /ou d'anions chromites mais dans ce dernier cas, il faut admettre que ces anions ne se déplacent pas.

Les teneurs moyennes en eau diminuent avec le temps de traitement. La perte en eau moyenne à long terme est environ de 10 %. Les profils de teneurs en eau en fonction de la position des électrodes montrent un assèchement du côté anodique (cf tableaux 6.a-Annexe II).

Essais Cr[05]60: solutions à 0.5 g de Cr^{3+}/l

La répartition finale des essais réalisés avec une concentration initiale en chrome de 0.5 g de Cr^{3+}/l est représentée par les figures 26.

La distribution du chrome dans les différents essais est résumée dans le tableau 22.

Tableau 22 : Répartition du chrome (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 0.5 g Cr^{3+}/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).

Essais	Zones Répartition pondérée du chrome (%)					Teneur moyenne en eau (w%)	Temps (h)
	1(+)	2	3	4	5(-)		
Cr1[05]60	4	9	12	24	51	25.7	52
Cr2[05]60	3	4	5	28	60	23.8	194

Le bilan en chrome est de 7 %.

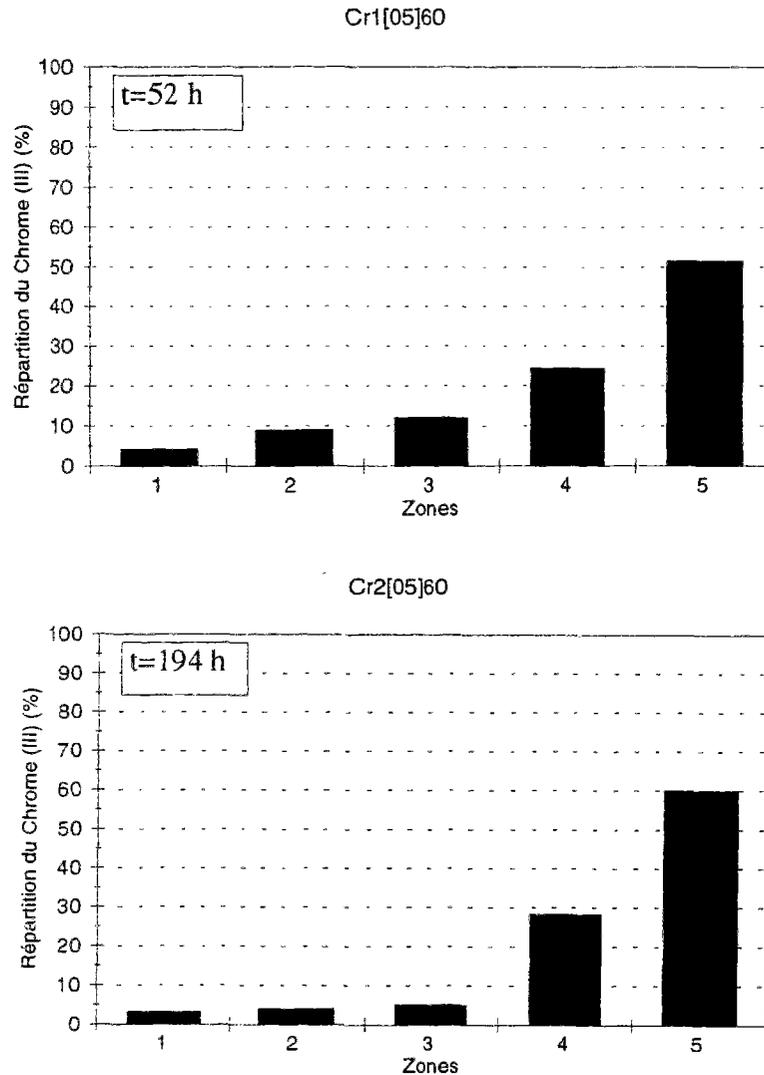
Pour la période de temps étudiée de 200 heures, trois zones côté anodique présentent un appauvrissement en chrome important (appauvrissement de 35 % à 52 heures et 48 % à 194 heures). Le chrome est redistribué vers les zones 4 et 5. Au bout de 8 jours, la moitié du chrome est concentrée dans la zone cathodique (tableau 22).

La conductivité dans ces mêmes zones indique des valeurs non nulles jusqu'à 150 heures ce qui témoigne toujours d'un transport de polluant vers la cathode. La décroissance de la conductivité dans les zones 4 et 5 indique un appauvrissement du liquide par précipitation du polluant.

Le transport du chrome par migration cationique touche les 3 zones du compartiment anodique conformément aux profils de pH qui donnent des valeurs inférieures au pH de précipitation du chrome. La conductivité diminue dans ces zones pendant la même période.

Aucun phénomène de « remobilisation » n'est observé à la cathode pour la période de temps étudiée ce qui est conforme aux valeurs de pH observées inférieures au pH de fin de redissolution de l'hydroxyde.

Les pertes en eau moyennes sont d'environ 8 % au bout de 200 heures.

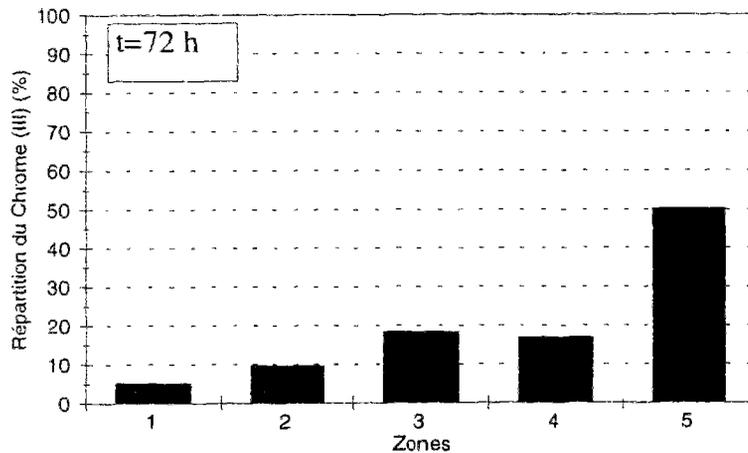


Figures 26 : Répartition du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.5 g de Cr^{3+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 6.b-Annexe II)

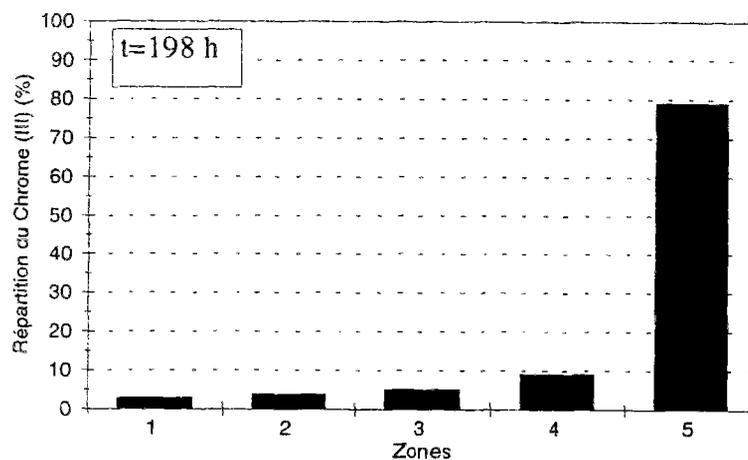
Essais Cr[1]60:

La répartition du chrome pour des sables pollués avec une concentration initiale en métal de 1 g de Cr^{3+}/l est représentée par les figures 27.

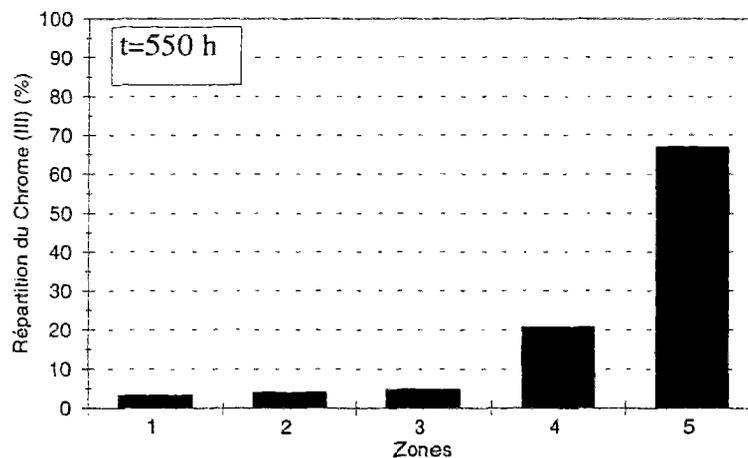
Cr1[1]60



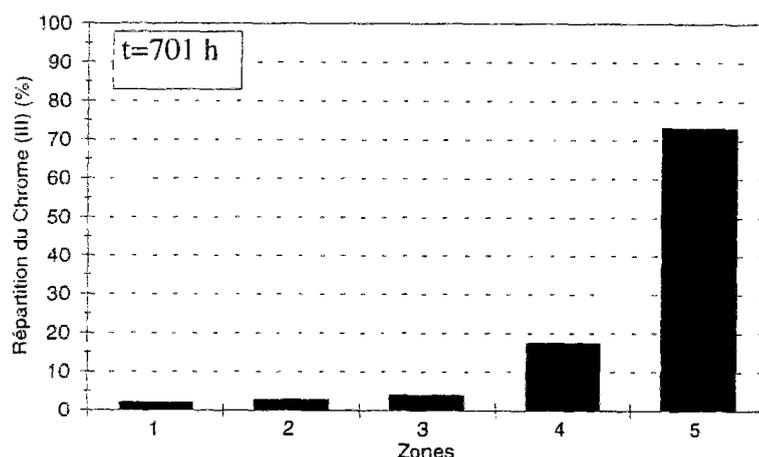
Cr2[1]60



Cr3[1]60



Figures 27 : Répartition du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g de Cr^{3+} /l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 6.c-Annexe II)



Figures 27 (suite): Répartition du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g de Cr^{3+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 6.c-Annexe II)

La distribution du chrome dans ces essais est résumée dans le tableau 23.

Tableau 23 : Répartition du chrome (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 1 g Cr^{3+}/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).

Essais	Zones Répartition pondérée du chrome (%)					Teneur moyenne en eau (w%)	Temps (h)
	1(+)	2	3	4	5(-)		
Cr1[1]60	5	10	18	17	50	25.2	72
Cr2[1]60	3	4	5	9	79	25.1	198
Cr3[1]60	3	4	5	21	67	24.5	550
Cr4[1]60	2	3	4	18	73	24.3	701

Le bilan en chrome est de 6 %.

Le transport cationique affecte un nombre plus important de zones et un appauvrissement de 30% est obtenu dans les zones 1, 2, 3 et 4 au bout de 72 heures. Ce transport se stabilise au bout de 200 heures et la quantité de chrome déplacée est de 59 % pour l'ensemble des quatre zones (tableau 23). Cette stabilisation correspond à la période où les valeurs de pH deviennent supérieures au pH de précipitation de l'hydroxyde dans le compartiment anodique. Le transport cationique permet d'obtenir un enrichissement localisé de la zone cathodique (z5) de plus de la moitié du chrome total à partir de 200 heures.

Les valeurs acides du pH du sol dans les 3 zones proches de l'anode expliquent le déplacement important du chrome. La zone 4 est plus ou moins touchée et seules les valeurs du pH de l'eau interstitielle indiquent des pH acides.

Aucun transport anionique n'est observé pour cette concentration.

Les pertes moyennes en eau sont environ de 6 % à long terme.

2.4. Conclusion

Les remontées des intensités électriques en cours d'essai sont observées pour la concentration de 0.1 g de Cr^{3+}/l .

La distribution du chrome dans le sol à l'arrêt du traitement fait apparaître deux types de répartition:

- une répartition finale du polluant quasi homogène proche de l'état initial (avant traitement électrique) pour la concentration de 0.1 g de Cr^{3+}/l ,
- un déplacement très important du polluant avec accumulation près de la cathode pour les concentrations de 0.5 et 1 g de Cr^{3+}/l .

Les mesures des pH mettent en évidence un seul mécanisme de transport par migration cationique. Le déplacement du polluant est plus important quand la concentration initiale est élevée, autrement dit, quand l'acidité initiale est plus forte. Il est de 5 % en zone 1 et 2 pour 0.1 g de Cr^{3+}/l , 35 % en zone 1, 2 et 3 pour 0.5 g de Cr^{3+}/l et de 30 % en zone 1, 2, 3 et 4 pour 1 g de Cr^{3+}/l au bout de 50-70 heures. Le déplacement se stabilise au bout de 72 heures pour 0.1 g de Cr^{3+}/l avec, alors, une consommation électrique égale à 8 kWh par m^3 de sol traité. Pour une concentration de 1g de Cr^{3+}/l , le transport se stabilise au bout de 200 heures avec, alors, une consommation électrique égale à 50 kWh par m^3 de sol. Les essais réalisés pour une concentration de 0.5 g de Cr^{3+}/l présentent une consommation électrique de 25 kwh/ m^3 au bout de 200 heures.

Il n'existe pas de transport par « remobilisation » anionique du chrome bien que les pH du sol et de l'eau interstitielle laissent présager la formation d'anions pour 0.1 g de Cr^{3+}/l . L'augmentation de la conductivité dans la zone 5 (et parfois en zone 4) peut provenir des ions OH^- et/ou d'anions chromites. La mesure du pH de l'eau interstitielle pour 0.1 g de Cr^{3+}/l fait apparaître des écarts de pH faibles avec le pH du sol. De plus, les valeurs des pH évoluent rapidement vers le domaine de précipitation de l'hydroxyde de chrome.

Les essais réalisés pour 0.5 g de Cr^{3+}/l et 1 g de Cr^{3+}/l présentent des écarts du pH importants dans la zone 5 (pH de l'eau > pH du sol). Toutefois, le pH mesuré sur le sol près de la cathode n'est pas suffisamment basique pour former des anions en quantité significative.

Le tableau 24 regroupe les différents paramètres chimiques mesurés à l'arrêt pour chaque série d'essais.

Tableau 24 : Synthèse des paramètres à l'arrêt des essais réalisés avec du sable pollué avec du chrome et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (teneur en eau initiale de 26%).

ESSAIS	Paramètres mesurés à l'arrêt de l'essai		Zones de sol					Temps (heures)
			z1(+)	z2	z3	z4	z5(-)	
Cr1[01]60	Teneur en eau finale (w%)		29	25.5	25.1	24.4	24.7	72
	pH du sol		6.04	9.21	10.00	10.40	10.90	
	eau interstitielle	pH	4.73	4.92	7.11	10.29	11.36	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.335	0.012	0.027	0.094	0.702	
	Répartition du polluant (%)		16	19	21	22	22	
Cr2[01]60	Teneur en eau finale (w%)		25.1	24.2	23.4	23	23.2	198
	pH du sol		6.49	7.75	9.35	9.88	10.56	
	eau interstitielle	pH	5.39	7.86	11.58	7.60	11.64	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.068	0.134	0.106	0.108	0.132	
	Répartition du polluant (%)		17	19	21	22	21	
Cr3[01]60	Teneur en eau finale (w%)		24.4	23.1	22.8	22.4	22.2	549
	pH du sol		6.75	8.58	9.00	10.31	10.70	
	eau interstitielle	pH	6.97	7.16	6.56	9.53	10.98	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.029	0.005	0.004	0.032	0.204	
	Répartition du polluant (%)		16	18	23	22	21	
Cr4[01]60	Teneur en eau finale (w%)		24.4	23.6	23.2	23.2	23	699
	pH du sol		7.08	9.35	9.98	10.45	10.67	
	eau interstitielle	pH	8.11	9.36	10.27	10.03	10.22	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.007	0.008	0.074	0.086	0.188	
	Répartition du polluant (%)		16	19	22	22	21	
Cr1[05]60	Teneur en eau finale (w%)		27.6	24.1	28	24.4	24.5	52
	pH du sol		4.42	3.90	4.52	5.57	9.47	
	eau interstitielle	pH	4.86	4.21	9.92	10.43	11.58	
		Conductivité électrique (mS/cm)	3.160	3.120	0.078	0.075	0.146	
	Répartition du polluant (%)		4	9	12	24	51	
Cr2[05]60	Teneur en eau finale (w%)		25	23.2	23	23.8	24	194
	pH du sol		4.94	5.19	6.40	8.91	9.20	
	eau interstitielle	pH	4.62	4.76	4.86	12.00	11.27	
		Conductivité électrique (mS/cm)	1.069	0.678	0.025	0.039	0.056	
	Répartition du polluant (%)		3	4	5	28	60	

Tableau 24 (suite): Synthèse des paramètres à l'arrêt des essais réalisés avec du sable pollué avec du chrome et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm (teneur en eau initiale de 26%).

Cr1[1]60	Teneur en eau finale (w%)		27.2	24.9	24.5	24.7	24.9	72
	pH du sol		4.04	3.93	4.07	4.40	7.93	
	eau interstitielle	pH	3.52	3.43	3.35	3.68	10.44	
		Conductivité électrique (mS/cm)	3.678	3.678	3.633	2.599	0.079	
	Répartition du polluant (%)		5	10	18	17	50	
Cr2[1]60	Teneur en eau finale (w%)		27.3	24.7	23.9	24.5	25	198
	pH du sol		4.40	3.88	3.65	3.96	7.18	
	eau interstitielle	pH	4.12	4.11	4.20	7.22	6.19	
		Conductivité électrique (mS/cm)	2.760	2.684	2.617	0.014	0.045	
	Répartition du polluant (%)		3	4	5	9	79	
Cr3[1]60	Teneur en eau finale (w%)		25.9	24.1	23.3	24.2	25.1	550
	pH du sol		5.08	5.25	6.80	7.21	7.79	
	eau interstitielle	pH	5.42	5.38	7.13	9.10	10.37	
		Conductivité électrique (mS/cm)	1.219	0.924	0.059	0.008	0.045	
	Répartition du polluant (%)		3	4	5	21	67	
Cr4[1]60	Teneur en eau finale (w%)		25.1	23.8	23.2	24.5	25	701
	pH du sol		5.32	5.31	5.88	8.83	8.32	
	eau interstitielle	pH	6.11	6.82	6.83	9.33	10.03	
		Conductivité électrique (mS/cm)	1.243	0.970	0.025	0.005	0.157	
	Répartition du polluant (%)		2	3	4	18	73	

3. Le Zinc

Les essais sont réalisés avec des concentrations initiales en zinc de 1 g de Zn^{2+}/l (essais Zn[1]) et 3 g de Zn^{2+}/l (essais Zn[3]) pendant une période variant de 24 à 485 heures, soit 20 jours. La dénomination et les caractéristiques des essais sont reportés dans le tableau 10.

3.1. Etude des paramètres électriques en fonction du temps

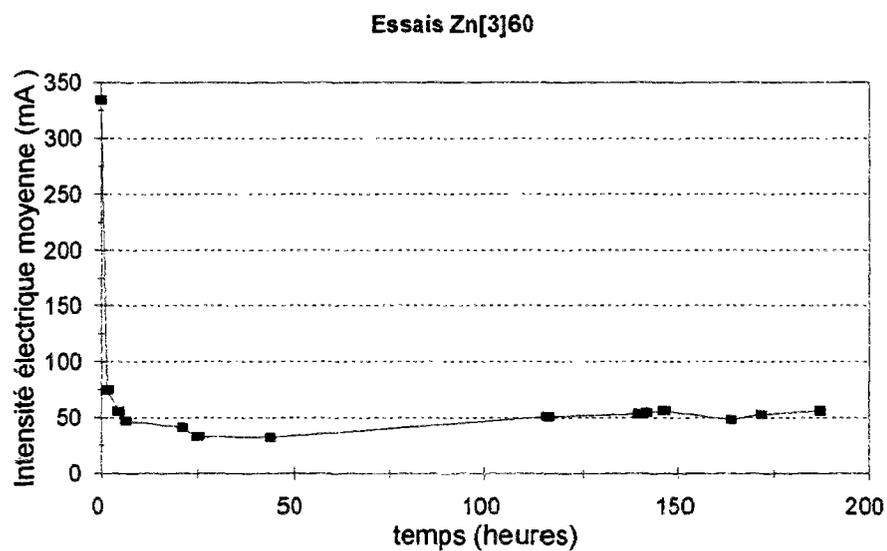
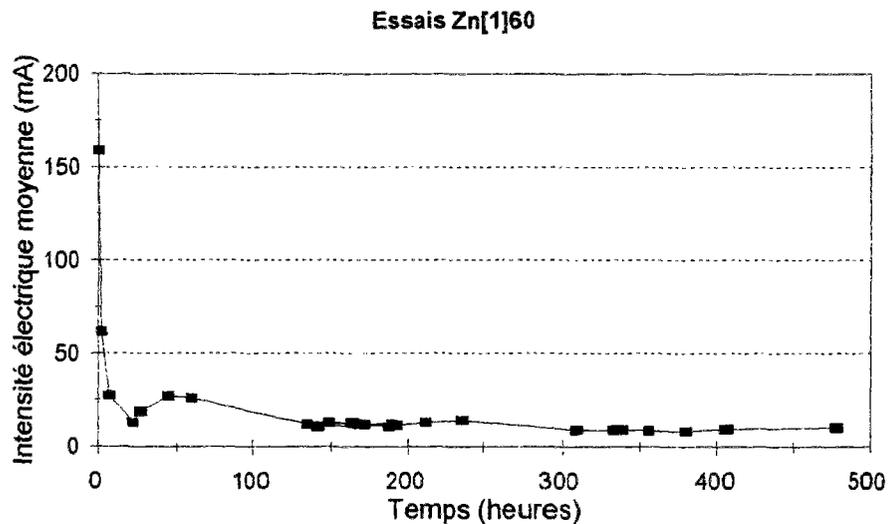
3.1.1. Evolution de l'intensité électrique

Les mesures de l'intensité électrique sont présentées sous forme de moyennes par les figures 28 (tableaux 7.c-Annexe II). Les tableaux des résultats bruts sont reportés en Annexe II (tableaux 7.a et 7.c -Annexe II).

L'analyse comparative des courbes temps-intensité montre:

- partant d'une valeur initiale de 159 mA pour les essais Zn[1], l'intensité électrique chute rapidement et atteint un minimum de 13 mA au bout de 25 heures. L'intensité présente ensuite une remontée des valeurs d'une amplitude de 10 mA jusqu'à 100 heures. L'intensité se stabilise ensuite autour d'une valeur finale de 10 mA à 500 heures (ce qui correspond à 6 % de la valeur de départ),
- partant d'une valeur initiale de 334 mA pour les essais Zn[3], la décroissance de l'intensité est rapide et un minimum de 50 mA est atteint au bout de 6 heures. L'intensité

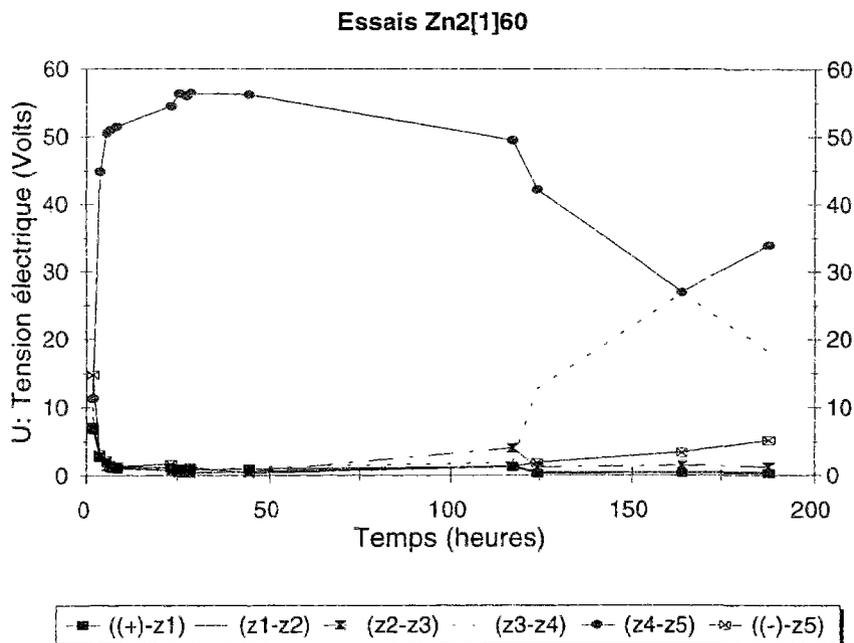
se stabilise ensuite jusqu'à 50 heures, puis remonte très progressivement jusqu'à des valeurs finales à 200 heures de 56 mA (ce qui correspond à 16 % de la valeur de départ).



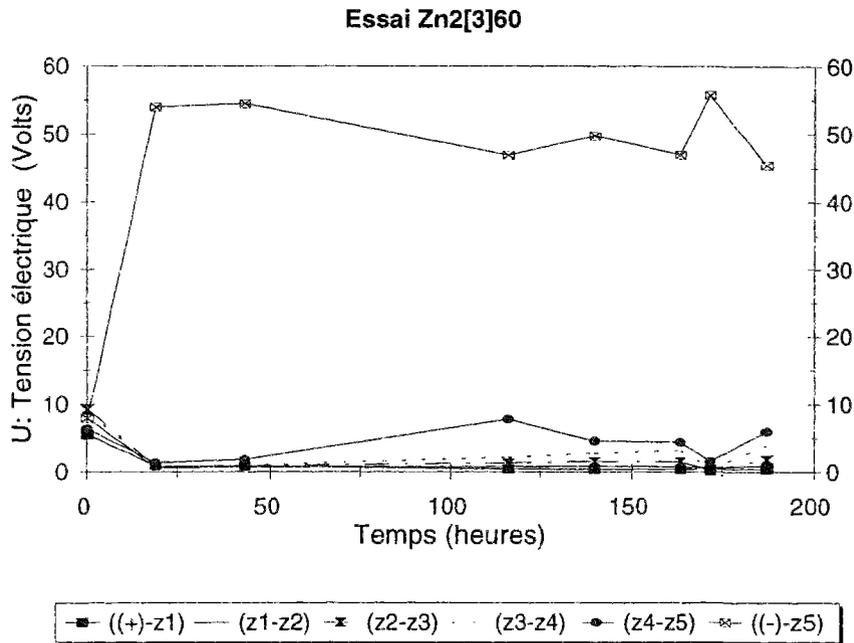
Figures 28 : Intensité électrique moyenne pour des sables pollués avec du zinc pour un champ électrique de 2.6 V/cm et pour une concentration initiale de a) 1 g de Zn^{2+}/l , b) 3 g de Zn^{2+}/l , (tableaux 7.b et 7.c-Annexe II).

3.1.2. Evolution de la tension électrique

Les mesures de tension électrique correspondant aux essais Zn2[1]60 et Zn2[3]60 sont représentées par les figures 29.



Figures 29.a : Evolution de la tension électrique (Volts) pour du sable pollué avec du zinc avec une concentration initiale de 1 g de Zn^{2+}/l et soumis à une tension électrique de 60 volts (Essai Zn2[1]60 tableaux 7.d.-Annexe II)



Figures 29.b : Evolution de la tension électrique (Volts) pour du sable pollué avec du zinc avec une concentration initiale de 3 g de Zn^{2+}/l et soumis à une tension électrique de 60 volts (Essai Zn2[3]60 -tableaux 7.e.-Annexe II)

L'évolution de la tension électrique présente les mêmes tendances pour les deux concentrations de 1 et 3 g de Zn^{2+}/l . Dès le début des essais, la zone proche de la cathode présente une tension

élevée en raison d'une augmentation de la résistance électrique dans cette partie de la cuve. Cette zone est comprise entre la zone 4 et 5 [z4-z5] pour l'essai Zn2[1]60, ou la zone comprise entre la zone 5 et la cathode [(-)-z5] pour l'essai Zn2[3]60. On peut noter que pour la concentration à 1 g de Zn²⁺/l, la résistance électrique touche la zone [z3-z4] au bout de 100 heures.

3.1.3. Consommation électrique

La consommation électrique des différents essais est résumée dans le tableau 25.

Tableau 25 : Consommation électrique des essais réalisés avec du sable pollué avec du zinc pour un champ électrique fixé à 2.6 V/cm.

Essais	Poids du sol (sable + liquide) (g)	Intensité électrique initiale (mA) (1)	W (kWh/m ³ sol traité) (2)	P (kWh/h.m ³ sol traité) (3)	Temps (Heures)
Zn1[1]60	6871	149	13.4	0.426	31.5
Zn2[1]60	6871	150	56.7	0.294	193
Zn3[1]60	6871	178	165.6	0.343	482
Zn1[3]60	6871	344.9	46.6	0.904	51.5
Zn2[3]60	6871	324.1	163.1	0.847	192.5

Les puissances électriques en kW par m³ de sol traité sont deux fois plus fortes pour les essais Zn[3] en raison d'une intensité électrique initiale égale à un facteur de 2 environ. Pour une période de temps donnée, les énergies consommées sont de 55 kWh par m³ pour les essais Zn[1] contre 160 kWh par m³ pour Zn[3] au bout de 193 heures.

Les densités de courant sont égales à 12.4 A/m² pour les essais Zn[1] et 26.2 A/m² pour les essais Zn[3].

3.2. Etude des conditions de pH et de conductivité électrique en fonction du temps

L'évolution du pH et de la conductivité est représentée sous forme de moyennes par les figures 29 et 30. Les tableaux de résultats bruts sont reportés en Annexe II (tableaux 8.a, 8.b et 8.c-AnnexeI).

3.2.1. Evolution du pH du sol et de l'eau interstitielle

Les pH mesurés dans le sol et dans l'eau interstitielle présente des valeurs initiales proches et légèrement acides (pH = 5,5 - 6,5):

Tableau 26 : Valeurs initiales du pH du sol et de l'eau interstitielle pour des sables pollués par du zinc et soumis à un champ électrique de 2.6 V/cm.

	1 g de Zn ²⁺ /l	3 g de Zn ²⁺ /l
pH eau interstitielle	6.2-6.5	6.1-6.4
pH du sol	5.7-6.1	5.4-5.9

L'analyse comparative du pH du sol et de l'eau interstitielle pour chaque zone et chaque concentration montre:

Essais Zn[1]60: solutions à 1 g de Zn²⁺/l

L'analyse des figures 30 jusqu'à 200 heures montre:

- la formation d'un compartiment anodique légèrement acide, comprenant 3 zones dans le sol et seulement deux zones dans l'eau interstitielle. Les valeurs diminuent d'un pH = 6 vers un pH = 5. Ces valeurs sont inférieures au pH de précipitation de l'hydroxyde égal à $pH_1 = 6.38$ (cf chapitre 3-1.2.3),
- l'apparition d'une zone cathodique basique dans le sol jusqu'à 100 heures (pH = 10-11). Dans l'eau, l'augmentation du pH touche un nombre plus important de zones et atteint un maximum au bout de 100 heures (pH = 11-12 pour z3, z4 et z5). Les valeurs sont alors proches du pH de fin de redissolution de l'hydroxyde égal à $pH_2 = 12.18$. Le pH diminue ensuite vers des valeurs neutres.

Des écarts de pH entre le sol et l'eau interstitielle sont observés entre 0 et 100 heures dans les essais Zn[1] (pH eau > pH du sol), ce qui coïncide avec les remontées de l'intensité électrique (figure 28).

A long terme, la tendance est une acidification générale du milieu et les valeurs de l'ensemble des zones se retrouvent pratiquement inférieures au pH de précipitation de l'hydroxyde.

Dans ces essais, les pH moyens (pH du sol et de l'eau interstitielle) observés sont pH = 5-6 à l'anode et pH = 11-12 à la cathode. Seuls les pH de l'eau interstitielle mesurés dans les essais Zn[1] à la cathode entre 0 et 100 heures présentent des valeurs proches du pH de redissolution de l'hydroxyde (pH = 12.18) et peuvent permettre la formation d'anions à la cathode.

Essais Zn[3]60: solutions à 3 g de Zn²⁺/l

De 0 à 50 heures, le pH du sol et de l'eau interstitielle ne varie pas et reste proche des valeurs de départ (figures 31). Puis, à partir de 50 heures, on peut observer:

- la formation d'un compartiment anodique acide comprenant 4 zones (pH = 4-5). Ces valeurs deviennent inférieures au pH de précipitation de l'hydroxyde de zinc égal à $pH_1=6.1$ (cf chapitre 3-1.2.3),
- la formation d'une zone cathodique faiblement basique dans le sol et dans l'eau (pH = 8). Au bout de 150 heures, le pH décroît vers des valeurs acides (pH = 5-6).

Les écarts entre les valeurs du pH du sol et de l'eau restent faibles et concernent uniquement la zone 5.

Les pH moyens observés (pH du sol et de l'eau interstitielle) sont de pH = 5-6 à l'anode et pH = 8-9 à la cathode. Les valeurs à la cathode sont très inférieures au pH de fin de redissolution de l'hydroxyde égal à $pH_2=12.6$.

En résumé, quelle que soit la concentration initiale utilisée, la tendance à long terme est une acidification générale du milieu.

Les pH moyens observés (pH du sol et de l'eau interstitielle) à l'anode sont pH = 5-6 pour 1 g de Zn^{2+}/l et pH = 4-5 pour 3 g de Zn^{2+}/l . A la cathode, les valeurs sont de pH = 11-12 pour 1 g de Zn^{2+}/l pendant les 100 premières heures et pH = 8 -9 pour 3 g de Zn^{2+}/l .

L'acidité du compartiment anodique touche 3 zones pour 1 g de Zn^{2+}/l] et 4 zones pour Zn[3]. A long terme, les valeurs se retrouvent pratiquement inférieures au pH de précipitation de l'hydroxyde.

Les écarts de pH observés entre 0 et 100 heures concernent les essais Zn[1] avec un pH supérieur au pH du sol, ce qui correspond aux remontées de l'intensité électrique.

3.2.2. Evolution de la conductivité électrique

Les profils de conductivité sont représentés par les figures 30.c et 31.c.

Essais Zn[1]60: solutions à 1 g de Zn^{2+}/l

A la cathode, il y a une diminution de la conductivité dans les zones 4 et 5 entre 0 et 50 heures (diminution de 1.2 à 0.4 mS/cm). L'apparition de valeurs basiques dans l'eau interstitielle ne provoque pas d'augmentation de la conductivité.

La conductivité à l'anode reste élevée pendant 300 heures (1.2 à 1.9 mS/cm), puis diminue.

Si on compare les valeurs de conductivité de l'essai Zn2[1] (cf tableaux 8.a-Annexe II) avec les mesures de la tension électrique (figure 29.a), on peut observer que la conductivité diminue en zone 5 dès le début du traitement et devient inférieure à celle de la zone 4. A partir de 50 heures, la conductivité de la zone 4 diminue à son tour et devient inférieure à celle de la zone 3. Ces observations correspondent à l'apparition d'une zone électriquement résistante proche de la cathode [(-)-z5] puis d'une seconde zone [z3-z4] vers 100 heures.

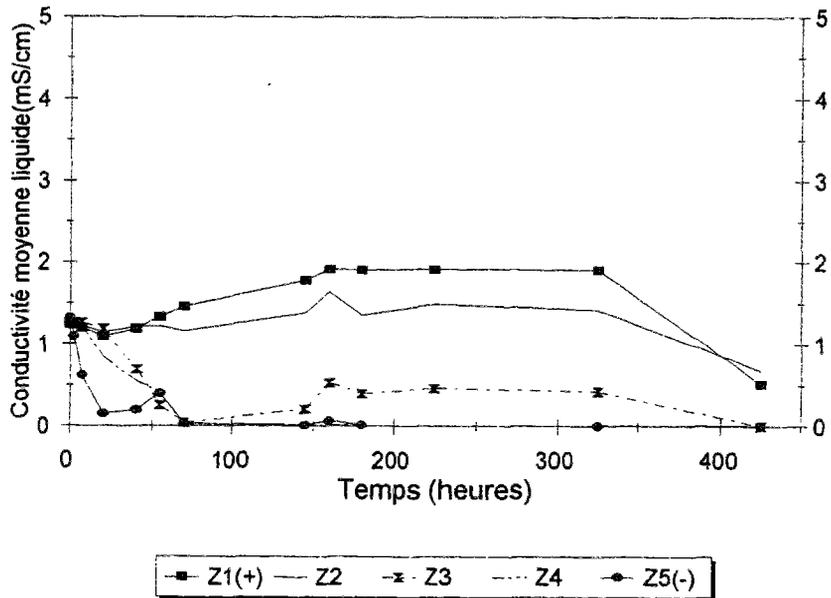
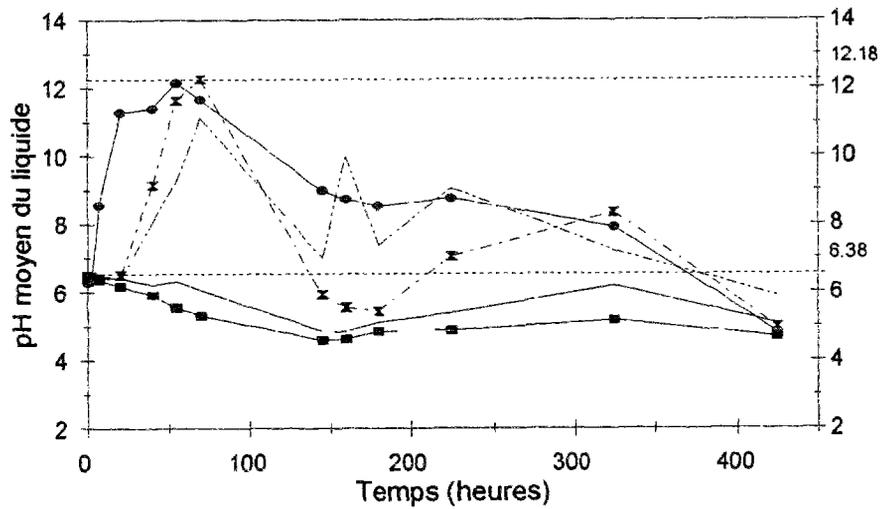
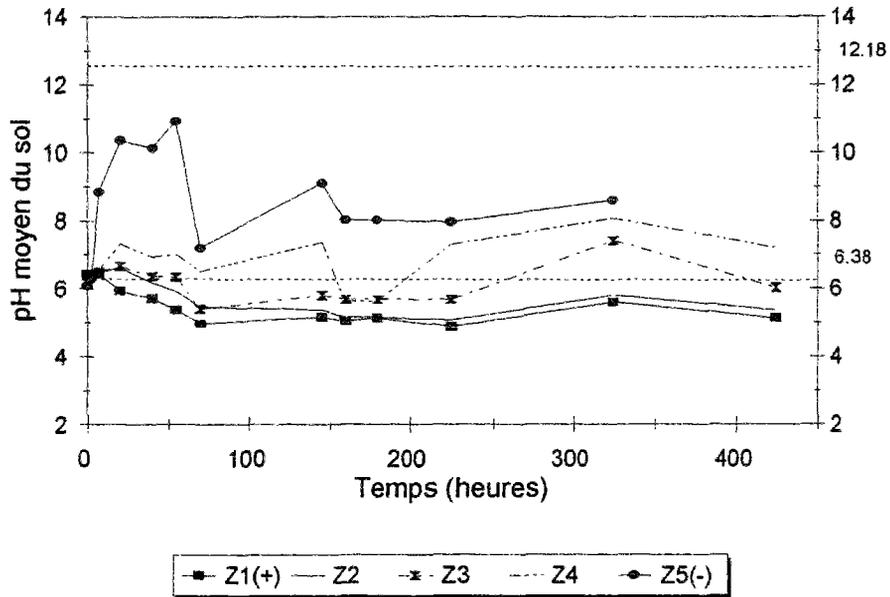
Essais Zn[3]60: solutions à 3 g de Zn^{2+}/l

La conductivité diminue dans la zone 5 entre 0 et 50 heures. A l'anode, les valeurs restent élevées et augmentent à partir de 100 heures pour les zones 1 et 2 (augmentation de 4.2 à 7.6 mS/cm).

Les valeurs de la conductivité de l'essai Zn2[3]60 (cf tableaux 8.b-Annexe II) montrent une baisse de la conductivité en zone 5 au bout de 20 heures. Les valeurs des zones restantes restent élevées et sont du même ordre de grandeur. Par comparaison avec la mesure de la tension électrique (figure 29.b), on peut constater l'apparition d'une zone résistante limitée à la cathode.

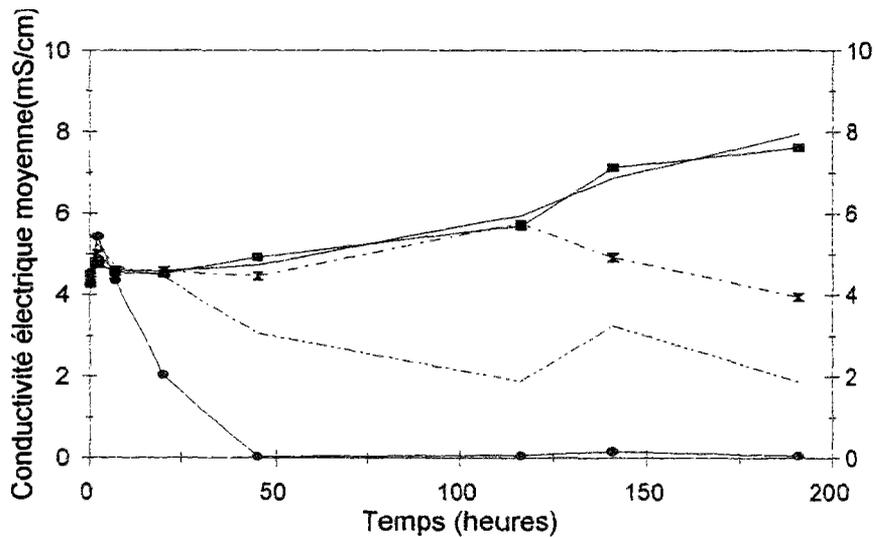
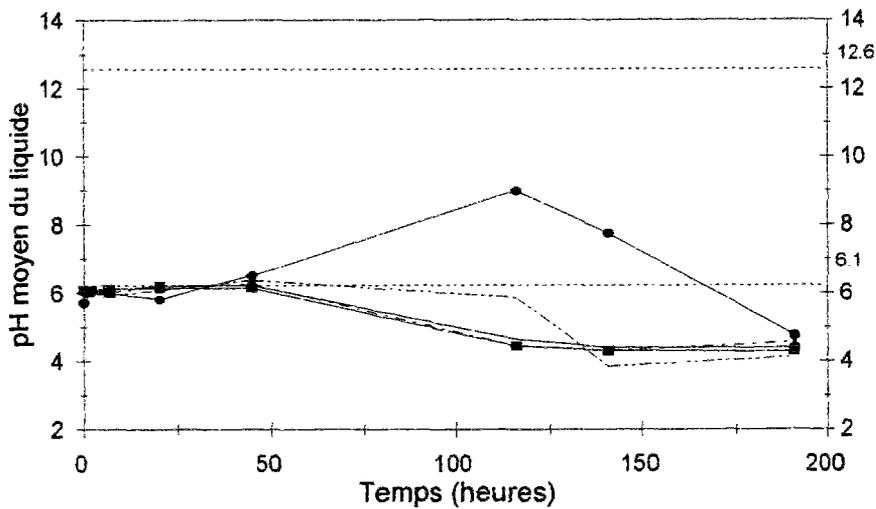
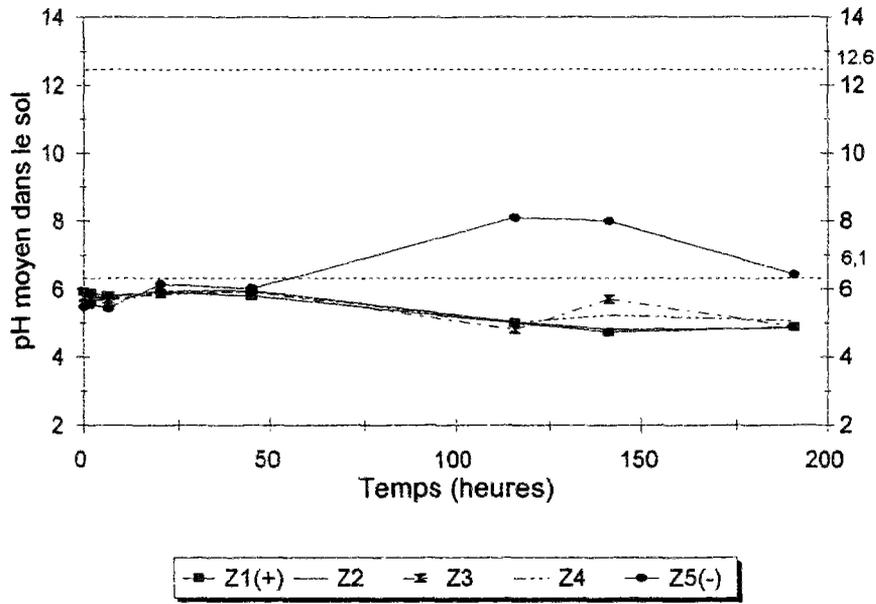
En résumé, l'acidité du compartiment anodique explique les fortes valeurs de la conductivité observées dans ces zones. A la cathode, la chute de la conductivité laisse présager la précipitation du polluant.

Essais Zn[1]60



Figures 30 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du zinc pour une concentration initiale de 1 g de Zn^{2+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 8.a-Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1=6.38$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2=12.18$).

Essais Zn[3]60



Figures 31 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du zinc pour une concentration initiale de 3 g de Zn^{2+}/l a) pH du sol, b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 8.b-Annexe II) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1=6$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2= 12.6$).

3.3. Etude de la concentration du polluant en fonction du temps

3.3.1. Répartition du polluant

Essais Zn[1]60: solutions à 1 g de Zn²⁺/l

La répartition du zinc pour les sables pollués avec une concentration de 1 g de Zn²⁺/l est représentée par les figures 32.

La distribution du zinc dans les différents essais est résumée dans le tableau 27.

Tableau 27 : Répartition du zinc (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 1 g Zn²⁺/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).

Essais	Zones Répartition pondérée du zinc (%)					Teneur moyenne en eau (w%)	Temps (h)
	1(+)	2	3	4	5(-)		
Zn1[1]60	9	13	19	18	41	25.8	31.5
Zn2[1]60	2	3	7	24	64	22.6	193
Zn3[1]60	<1 (0.3)	1	8	16	75	22.5	482

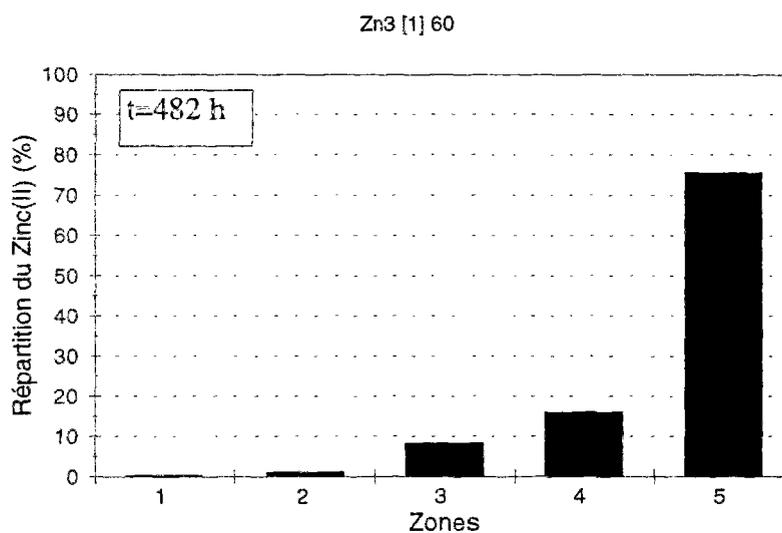
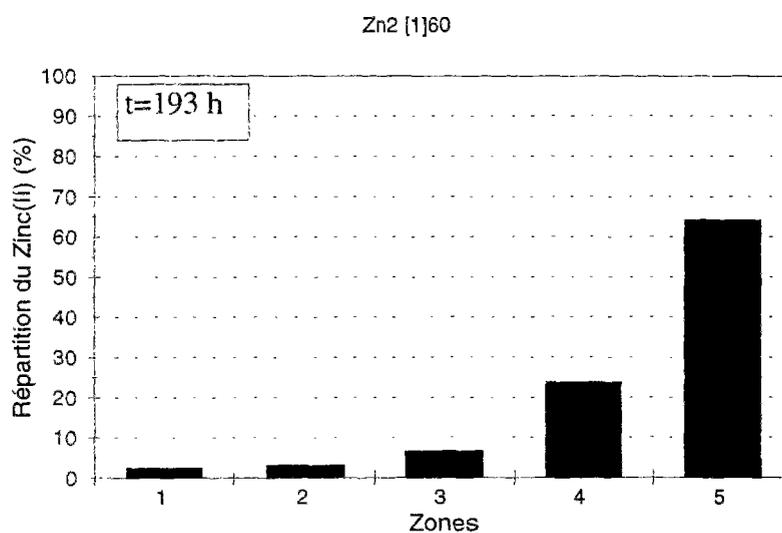
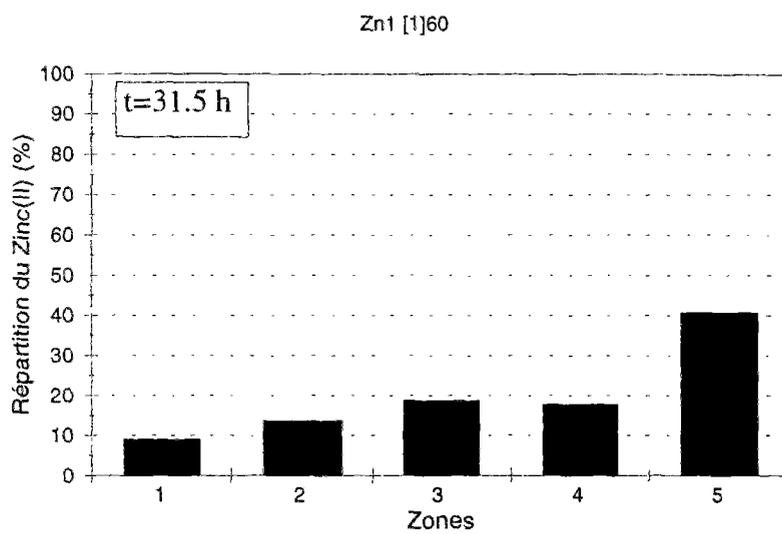
Le bilan en zinc est environ de 3 %.

Dès 31 heures, le compartiment anodique présente trois zones appauvries en zinc (appauvrissement de 19 % par rapport à 20 % de zinc initial dans chaque zone). L'augmentation du temps de traitement permet d'améliorer le taux de transport qui passe à 55% au bout de 482 heures.

Plus de la moitié du polluant se trouve concentrée dans la zone cathodique au bout de 200 heures (64 % de teneur en zinc).

Aucun transport par « remobilisation » anionique n'est observé dans ces essais.

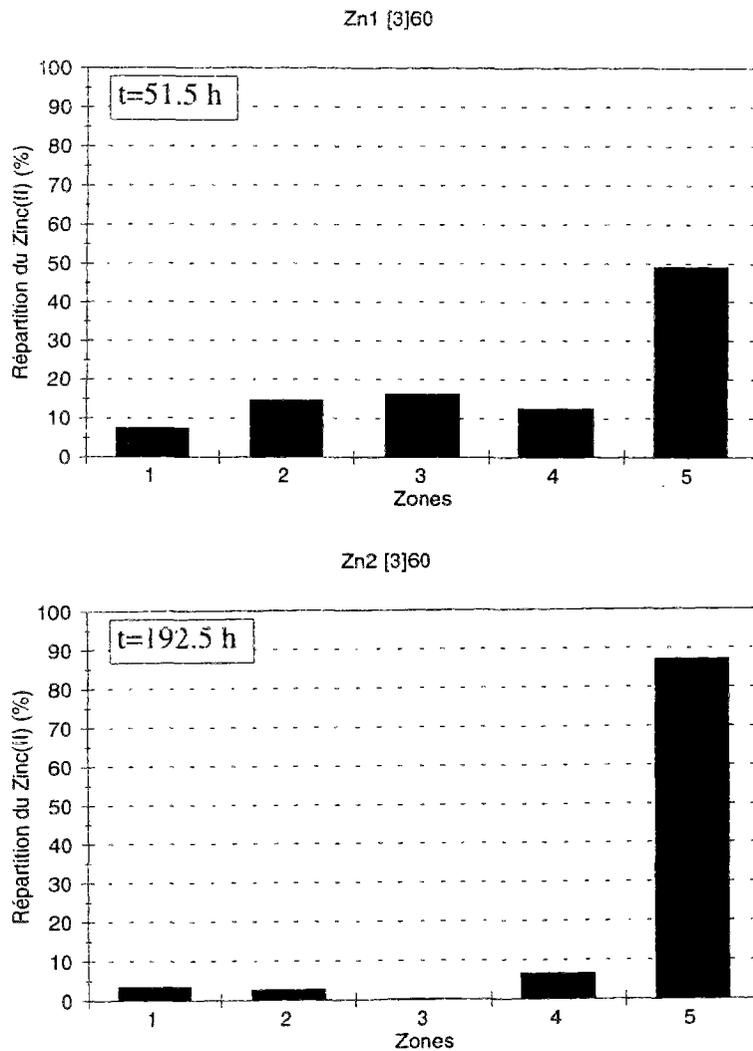
La perte en eau moyenne dans ces essais est environ de 13 %.



Figures 32 : Répartition du zinc (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g de Zn^{2+}/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 9.a - Annexe II)

Essais Zn[3]60: solutions à 3 g de Zn²⁺/l

La répartition du zinc dans les sables pollués avec une concentration de 3 g de Zn²⁺/l est représentée par les figures 33.



Figures 33 : Répartition du zinc (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 3 g de Zn²⁺/l et pour un champ électrique de 2.6 V/cm (tableaux 9.b - Annexe II)

La distribution du zinc dans les différents essais est résumée dans le tableau 28.

Dès 50 heures, le déplacement du zinc est important et touche 4 zones (appauvrissement de 29%). Pourtant, les valeurs de pH présentent peu de variations pendant la même période. Seule la décroissance de la conductivité en zone 5 indique une précipitation du polluant.

L'augmentation du temps d'application entraîne un taux de transport plus fort (appauvrissement de 67 % au bout de 200 heures). Ce phénomène est dû à l'acidification des valeurs provoquée par le début de l'électrolyse de l'eau vers 50 heures et explique la remontée des intensités électriques (figure 27). Au bout de 200 heures, plus de 75% du polluant est concentré dans la zone cathodique.

Pour la période de temps étudiée, aucun phénomène de « remobilisation » n'a été observé.

Tableau 28 : Répartition du zinc (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 3 g Zn²⁺/l (champ électrique fixé à 2.6 V/cm).

Essais	Zones Répartition pondérée de zinc (%)					Teneur moyenne en eau (w%)	Temps (h)
	1(+)	2	3	4	5(-)		
Zn1[3]60	7	15	16	13	49	23.3	51.5
Zn2[3]60	3	3	<1 (0.2)	7	87	22.02	192.5

Le bilan en zinc est environ de 7 %.

Les pertes moyennes en eau sont de 15 % à long terme.

3.4. Conclusion

L'augmentation de l'intensité électrique pour la concentration de 1 g de Zn²⁺/l entre 25 et 150 heures peut être mise en relation avec le caractère très acide du compartiment anodique.

Le nombre de zones touchées par la dépollution est important pour les deux concentrations étudiées: l'appauvrissement moyen est de 18 % pour les zones z1, z2 et z3 pour 1 g de Zn²⁺/l et 29% dans les zones z1 à z4 pour 3 g de Zn²⁺/l entre 30 et 50 heures. Pour les essais réalisés avec 1 g de Zn²⁺/l, l'augmentation du temps de traitement permet d'améliorer le taux de transport qui passe à 54 % au bout de 482 heures, ce qui correspond à une énergie électrique de 165 kwh/m³ de sol (tableau 25).

Pour les essais réalisés avec 3 g de Zn²⁺/l, près des 4/5 de la cuve présentent un taux de dépollution très fort (appauvrissement de 67%) au bout de 200 heures pour une énergie consommée de 163 kwh/m³ de sol. Ceci est dû au caractère acide du compartiment anodique où les valeurs de pH sont inférieures au pH de précipitation du zinc (pH < 6.1). Pour les périodes de temps étudiées dans ces essais, le transport n'est toujours pas stabilisé.

Les valeurs moyennes du pH du sol ne permettent pas d'observer des pH très basiques à la cathode. L'évolution à long terme est une acidification générale du milieu. Ce phénomène est d'autant plus marqué que la concentration initiale en zinc est élevée.

Les concentrations initiales utilisées égales à 1 et 3 g de Zn²⁺/l n'ont pas permis d'observer la redissolution de l'hydroxyde de zinc. Il est possible que ce phénomène soit possible pour des concentrations inférieures.

Le tableau 29 regroupe les différents paramètres chimiques mesurés à l'arrêt pour chaque série d'essai.

Tableau 29 : Synthèse des paramètres à l'arrêt des essais réalisés avec du sable pollué par du Zinc et sous un champ électrique fixé à 2.6 V/cm.

ESSAIS	Paramètres mesurés à l'arrêt de l'essai		Zones de sol					Temps (heures)
			z1(+)	z2	z3	z4	z5(-)	
Zn1[1]60	Teneur en eau finale (w%)		27.1	25.5	22.1	29.2	25.4	31.5
	pH du sol		5.63	6.12	6.14	6.15	9.58	
	eau	pH	6.24	6.46	6.57	6.36	11.26	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	1.386	1.470	1.484	1.444	0.087	
	Répartition du polluant (%)		9	13	19	18	41	
Zn2[1]60	Teneur en eau finale (w%)		23.6	22.2	22.5	22.6	22.4	193
	pH du sol		5.04	5.24	5.44	5.60	8.83	
	eau	pH	4.73	5.02	5.45	7.26	10.7	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	2.030	1.485	0.524	0.022	0.016	
	Répartition du polluant (%)		2	3	7	24	64	
Zn3[1]60	Teneur en eau finale (w%)		23.2	21.9	22.4	22.8	22.7	482
	pH du sol		5.13	5.37	6.03	7.20		
	eau	pH	4.69	5.08	4.98	5.90	4.82	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	0.519	0.688	0.005	0.005	0.010	
	Répartition du polluant (%)		0.3	1	8	16	75	
Zn1[3]60	Teneur en eau finale (w%)		24.9	23.3	23.2	22.8	22.7	51.5
	pH du sol		5.28	6.33	6.17	6.22	6.6	
	eau	pH	5.43	6.09	6.29	6.22	7.1	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	4.525	4.817	4.737	3.968	0.086	
	Répartition du polluant (%)		7	15	16	13	49	
Zn2[3]60	Teneur en eau finale (w%)		22.3	21.6	25.6	21.1	19.5	192.5
	pH du sol		4.88	4.84	4.9	5.07	6.43	
	eau	pH	4.29	4.39	4.57	4.13	4.76	
	interstitielle	Conductivité électrique (mS/cm)	7.617	7.962	3.954	1.879	0.060	
	Répartition du polluant (%)		3	3	0.2	7	87	

CHAPITRE 5 : INFLUENCE DU CHAMP ELECTRIQUE SUR LA MIGRATION DU PLOMB.

Des essais complémentaires ont été réalisés en faisant varier la valeur de la tension électrique initiale. Il s'agissait d'étudier l'influence du champ électrique sur l'évolution des paramètres électriques et chimiques sur des sables pollués avec du plomb. La concentration initiale en plomb utilisée est de 1 g de Pb^{2+}/l et les teneurs en eau initiales varient de 24.5 à 26 % selon les essais. La tension initiale imposée est égale à 15 V ou 30V, soit un champ électrique respectivement égal à 0.65 V/cm ou 1.3 V/cm. La dénomination et les caractéristiques des essais sont résumées dans le tableau 30.

Tableau 30 : Dénomination et caractéristiques des essais réalisés avec du sable pollué avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l pour une tension électrique initiale de 15 et 30 volts.

Essais	Tension électrique initiale (Volts)	Champ électrique (Volts/cm)	Teneur en eau initiale (W %)	Temps d'application (heures)
Pb1[1]15	15	0.65	24.5	215
Pb2[1]15	15	0.65	24.5	215
Pb3[1]15	15	0.65	24.5	215
Pb1[1]30	30	1.3	24.5	25
Pb2[1]30	30	1.3	26	222
Pb3[1]30	30	1.3	26	296
Pb4[1]30	30	1.3	24.5	496.7
Pb5 [1]30	30	1.3	24.5	688

Nota: La série Pb[1]15 est constituée par trois essais dont le traitement électrique est appliqué simultanément pendant 215 heures. Les différents paramètres mesurés concernent:

- l'intensité électrique sur les essais Pb1, Pb2 et Pb3
- le pH et la conductivité de l'eau interstitielle sur l'essai Pb2,
- la mesure de la concentration de polluant dans l'eau interstitielle et dans le sol pour l'essai Pb3.

1. Etude des paramètres électriques en fonction du temps

1.1. Evolution de l'intensité électrique

L'évolution de l'intensité moyenne pour une tension électrique de 15 volts (essais Pb[1]15) et de 30 volts (essais Pb[1]30) est représentée respectivement par la figure 34 (tableaux 10.c-Annexe III). Les résultats obtenus pour des sables soumis à une tension de 60 volts sont également représentés de manière à comparer l'influence du champ électrique. Les tableaux de résultats bruts sont reportés dans l'Annexe III (tableaux 10.a et 10.b - Annexe III).

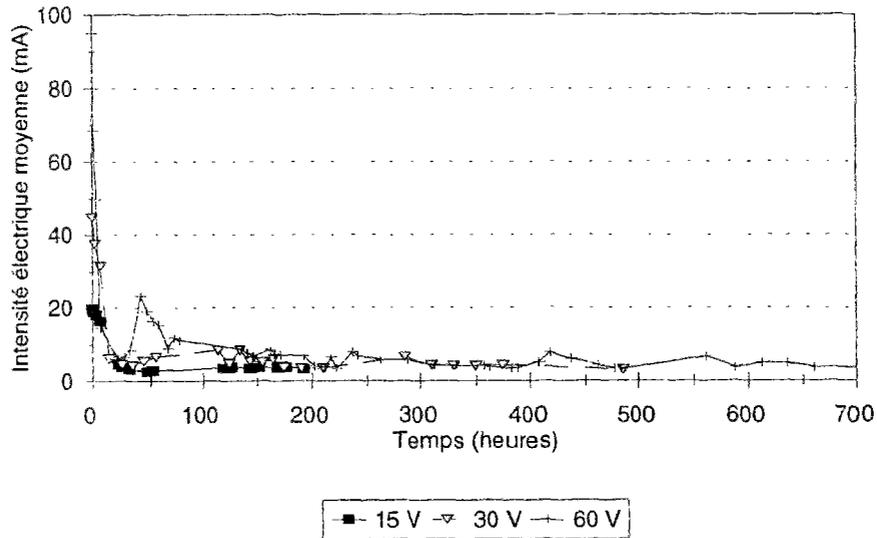


Figure 34 : Intensité électrique moyenne (mA) pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l soumis à une tension électrique de 15 , 30 et 60 Volts (tableaux 10.a-Annexe III).

L'analyse comparative des courbes temps-intensité en fonction du champ électrique initial montre:

- l'intensité moyenne initiale des essais Pb[1]15 est de 20 mA. Elle atteint un minimum de 3mA au bout de 50 heures puis l'intensité se stabilise autour de cette valeur (ce qui correspond à 15 % de la valeur initiale),
- partant d'une valeur moyenne initiale de 45 mA, l'intensité des essais Pb[1]30 atteint un minimum de 4 mA au bout de 50 heures. L'intensité présente une remontée des valeurs d'une amplitude de 4 mA pendant une période de 50 à 150 heures. L'intensité tend ensuite vers une valeur finale résiduelle à 700 heures de 2.3 mA (ce qui correspond à 5 % de la valeur initiale).

En comparant les résultats obtenus à partir de sables pollués avec une concentration de 1 g de Pb^{2+}/l et soumis à des tensions électriques de 15 V, 30 V ou 60 V, on peut constater une décroissance rapide de l'intensité, et un minimum de 4-6 mA est atteint au bout de 20 à 50 heures. Les essais réalisés sous 30 et 60 volts présentent des remontées des valeurs de l'intensité.

La valeur de l'intensité électrique initiale est proportionnelle à la tension appliquée et égale à un facteur 2. Les densités électriques moyennes observées dans ces essais sont de 1.5 A/m² pour 15 V, 3.5 A/m² pour 30 V et 7.4 A/m² pour 60 V.

1.2. Consommation électrique

La consommation électrique au cours des différents essais est résumée dans le tableau 31.

Tableau 31 : Consommation électrique des essais réalisés avec du sable pollué avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+} /l et pour une tension électrique de 15 ,30 et 60V.

Essais	Poids du sol (sable + liquide) (g)	Intensité électrique initiale (mA) (1)	W3 (kWh/m ³ sol traité) (2)	P (Wh/h. m ³ sol traité) (3)	Temps (heures)
Pb1[1]15	5602	20.3	4.3	0.02	215
Pb2[1]15	5602	19.9	4.3	0.02	215
Pb3[1]15	5602	19.4	4.3	0.02	215
Pb1[1]30	5602	38.8	9.4	0.376	25
Pb2[1]30	6871	45.6	13.3	0.059	222
Pb3[1]30	6871	44.1	19.6	0.066	296
Pb4[1]30	5602	39.4	32.7	0.065	496.7
Pb5[1]30	5602	39.2	49.3	0.071	688
Pb1[1]60	5670	92.5	17.3	0.542	32
Pb3[1]60	5670	101	67.8	0.348	194.5
Pb4[1]60	5670	92.3	72.0	0.148	483
Pb5[1]60	5670	90.3	118.2	0.170	694

La puissance électrique consommée par volume de sol traité augmente avec le champ électrique initial. Pour une période donnée, elle est égale à un facteur 2 lorsqu'on passe de 1.3 V/cm à 2.6 V/cm. L'intensité électrique initiale est multipliée par 2 lorsqu'on double le champ électrique.

2. Etude des conditions de pH et de conductivité électrique en fonction du temps

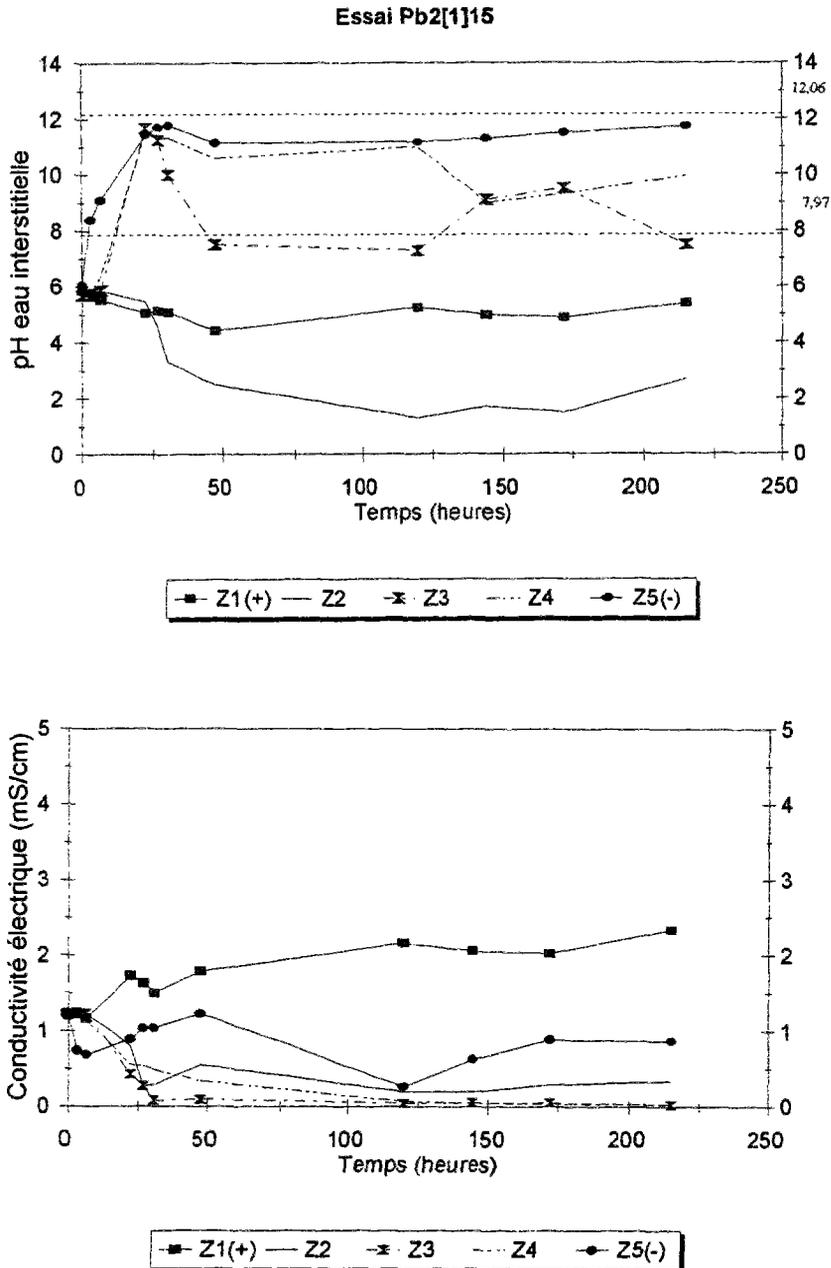
La série Pb[1]15 est représentée par l'essai Pb2[1]15 pour lequel, seules des mesures de pH et de conductivité dans l'eau interstitielle ont été réalisées (figures 35). Les mesures du pH et de la conductivité électrique des essais Pb[1]30 sont représentées sous forme de moyennes par les figures 36 (tableaux 11.c-Annexe III).

Les tableaux de résultats bruts sont reportés en Annexe III (tableaux 11.a, 11. b-Annexe III).

2.1. Evolution du pH du sol et de l'eau interstitielle

Essai Pb[1]15: champ électrique de 0.65 V/cm.

Partant de valeurs initiales légèrement acides (pH = 6), l'évolution du pH de l'eau interstitielle fait apparaître la formation d'un compartiment anodique acide formé par les zones 1 et 2 (pH = 2-6). Du côté cathodique, les valeurs deviennent basiques (pH = 11-12) tandis que les zones centrales évoluent dans le domaine de précipitation du plomb ($pH_1=7.97$ - $pH_2=12.06$).



Figures 35 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l soumis à un champ électrique de 0.65 V/cm a) pH de l'eau interstitielle, b) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 11.a-Annexe III) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1=7.97$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2 = 12.06$).

Essais Pb[1]30: champ électrique de 1.3 V/cm.

Les valeurs initiales du pH du sol et de l'eau interstitielle sont similaires (pH = 5-6). Les profils de pH montrent (figures 36):

- la formation d'un compartiment anodique acide dans le sol et dans l'eau interstitielle, constitué par les zones 1 et 2 (pH = 4-6),

- la formation d'un compartiment cathodique basique dans le sol et dans l'eau interstitielle entre 0 et 25 heures: le pH du sol est de pH = 10-11 (dans les zones 4 et 5) et le pH de l'eau est de pH = 11-12 (dans la zone 5 uniquement).
Entre 25 et 50 heures, le pH de l'eau interstitielle de la zone 5 diminue et passe d'une valeur basique (pH = 11.5) à une valeur neutre (pH = 6.7). A partir de 50 heures, le pH de l'eau interstitielle de cette même zone évolue de nouveau vers une valeur basique (pH = 10).

Des écarts importants entre le pH du sol et de l'eau interstitielle sont observés entre 0 et 25 heures dans les zones 4 et 5. On observe alors des pH du sol plus basiques que ceux de l'eau interstitielle.

Les pH moyens observés (pH du sol et de l'eau interstitielle) sont de pH = 4-5 à l'anode et pH = 10-12 à la cathode. Ces valeurs sont en accord avec la formation d'anions plombates à la cathode.

En résumé, en tenant compte des résultats obtenus sur des sables pollués avec 1 g de Pb²⁺/l et soumis à des champs électriques différents, on peut constater:

- la formation d'un compartiment anodique acide constitué par les deux premières zones z1 et z2. Les pH moyens (pH du sol et de l'eau interstitielle) sont de pH = 4-6,

- la formation d'une zone cathodique basique (z5) avec des pH moyens de pH = 11-12.

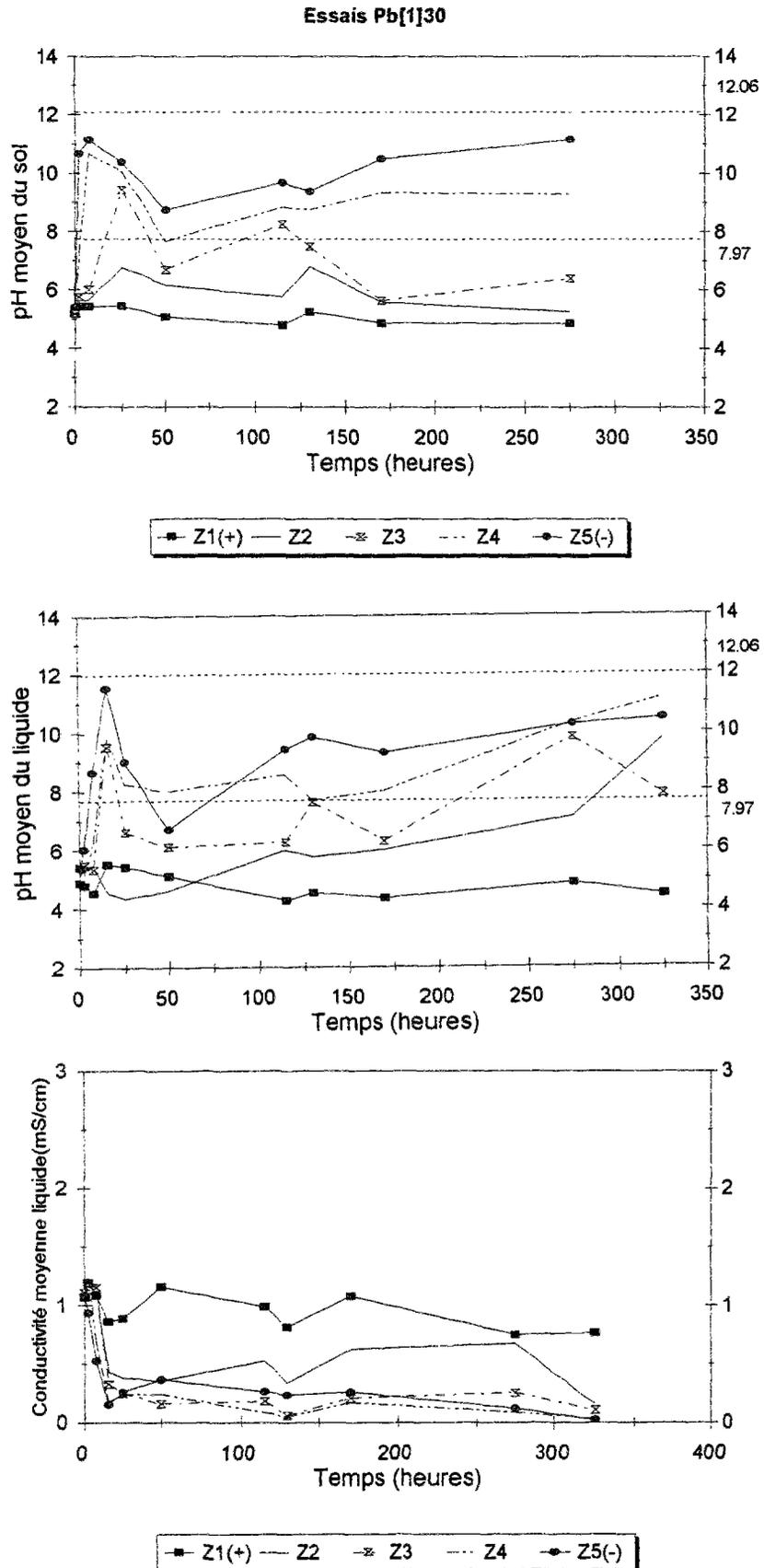
L'évolution du pH de l'eau interstitielle est similaire dans les essais Pb[1]30 et Pb[1]60: les écarts entre le pH du sol et le pH de l'eau interstitielle sont observés vers 25 heures pour 30 V et vers 50 heures pour 60 V (cf. figures 15). Ils correspondent à la période de décroissance de l'intensité électrique.

Ces écarts correspondent à des variations des valeurs du pH de l'eau interstitielle à la cathode: entre 25 et 50 heures, le pH dans la zone 5 diminue rapidement d'une valeur basique vers une valeur neutre. Puis, les valeurs augmentent de nouveau et deviennent basiques entre 150 et 300 heures. Le phénomène n'a pas été observé pour 15 Volts.

L'apparition de valeurs acides et basiques aux électrodes est plus rapide pour une tension électrique initiale élevée:

- l'apparition de valeurs acides à l'anode dans le sol est observée au bout de 100 heures sous 15 et 30 V et au bout de 50 heures pour 60 V,

- l'apparition de valeurs basiques à la cathode dans le sol est observée au bout de 5 heures pour 30 et 60 V. La progression des ions OH⁻ vers l'anode est plus rapide pour 60 V ce qui induit des valeurs de pH dans les zones centrales plutôt neutres, voire basiques.



Figures 36 : Evolution des valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+} /l soumis à un champ électrique de 1.3 V/cm a) pH du sol b) pH de l'eau interstitielle, c) conductivité électrique de l'eau interstitielle (tableaux 11.b-Annexe III) (pH de précipitation de l'hydroxyde $pH_1=7.97$ et pH de fin de redissolution de l'hydroxyde $pH_2=12.06$).

2.2. Evolution de la conductivité électrique

L'évolution de la conductivité électrique moyenne est représentée par les figures 35.b et 36.c.

Essai Pb[1]15: champ électrique de 0.65 V/cm.

La conductivité des zones centrales diminue jusqu'à 25 heures. La conductivité de la zone 5, après une première phase de décroissance, présente une remontée des valeurs jusqu'à 50 heures. Seule, la zone anodique présente une augmentation de la conductivité en accord avec les pH acides mesurés à l'anode (1.2 à 2.3 mS/cm).

Essais Pb[1]30: champ électrique de 1.3 V/cm.

On peut observer les mêmes tendances que pour l'essai Pb2[1]15. La zone anodique reste conductrice et les valeurs augmentent légèrement vers 25 heures. La zone cathodique, après une première phase de déminéralisation, présente une légère augmentation de la conductivité à partir de 25 heures (0.15 à 0.36 mS/cm).

Quelle que soit la tension électrique initiale, les profils de conductivité obtenus pour des sables pollués avec 1 g de Pb^{2+}/l sont comparables. On observe une zone anodique (z1) ayant une conductivité élevée. La zone cathodique (z5), après une première phase de déminéralisation présente une remontée des valeurs au bout de 50 heures, puis diminue. Les zones centrales (z2, z3, z4) sont rapidement déminéralisées.

3. Etude de la concentration du polluant en fonction du temps

3.1. Evolution de la concentration du polluant dans l'eau interstitielle

Des prélèvements de liquide sont réalisés sur les essais Pb3[1]15 et Pb5[1]30. L'évolution de la concentration du polluant dans l'eau interstitielle est représentée par les figures 37 et 38 (tableaux 12.a-Annexe III).

L'évolution de la concentration du plomb dans le liquide dans le cas de l'essai Pb3[1]15 montre une chute rapide de la concentration au bout de 30 heures. La zone anodique (z1) reste la plus minéralisée (concentration moyenne de 100 -150 mg/l de Pb^{2+}).

Pour l'essai Pb5[1]30, l'ensemble des zones présente une diminution rapide de la concentration dans l'eau. A partir de 50 heures, la concentration en plomb de la zone anodique (z1) augmente et passe de 100 à 300 mg/l de Pb^{2+} . La zone cathodique (z5) présente également une augmentation de la concentration en plomb du même ordre de grandeur au bout de 100 heures. Cette observation coïncide avec l'augmentation de la conductivité observée dans la zone cathodique. A partir de 250 heures, la concentration en plomb pour l'ensemble des zones présente des valeurs très faibles.

La concentration en plomb de la phase liquide donne des valeurs initiales moyennes de 650 mg de Pb^{2+}/l . La concentration initiale en plomb de la solution cationique polluante étant égale à 1g de Pb^{2+}/l , il semblerait qu'une partie du plomb soit déjà piégée dans le sol avant le traitement électrique.

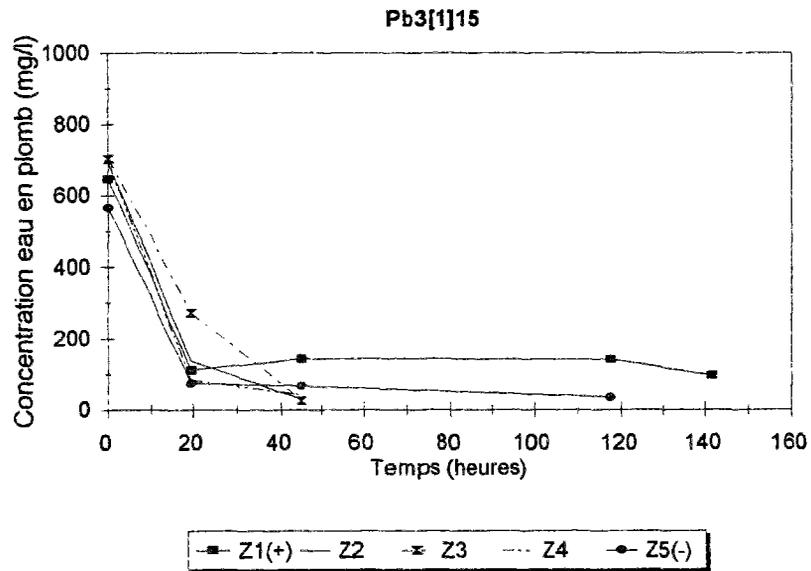


Figure 37 : Evolution de la concentration en plomb de l'eau interstitielle pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et soumis à un champ électrique de 0.65 V/cm (tableaux 12.a-Annexe III).

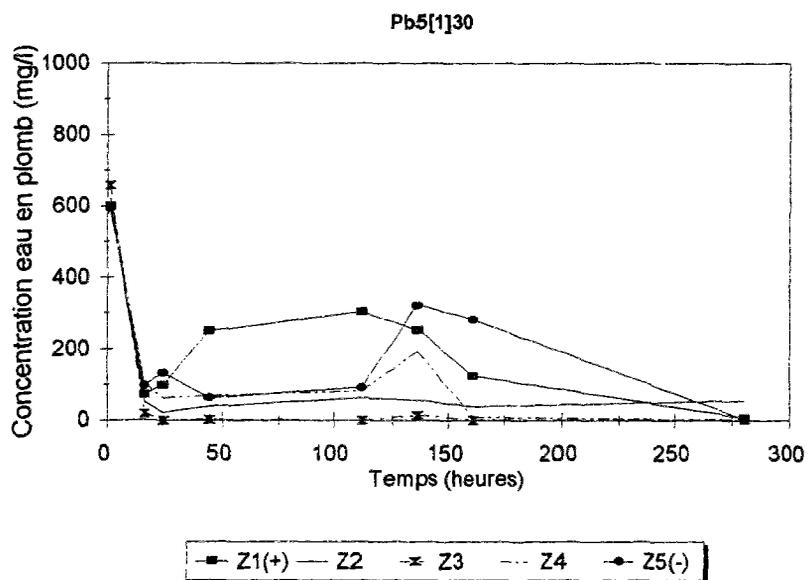


Figure 38 : Evolution de la concentration en plomb de l'eau interstitielle pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et soumis à un champ électrique de 1.3 V/cm (tableaux 12.a-Annexe III).

3.2. Répartition du polluant

Essai Pb[1]15: champ électrique de 0.65 V/cm.

La répartition finale du plomb est représentée pour l'essai Pb3[1]15 par la figure 39 (tableaux 12.b-Annexe III).

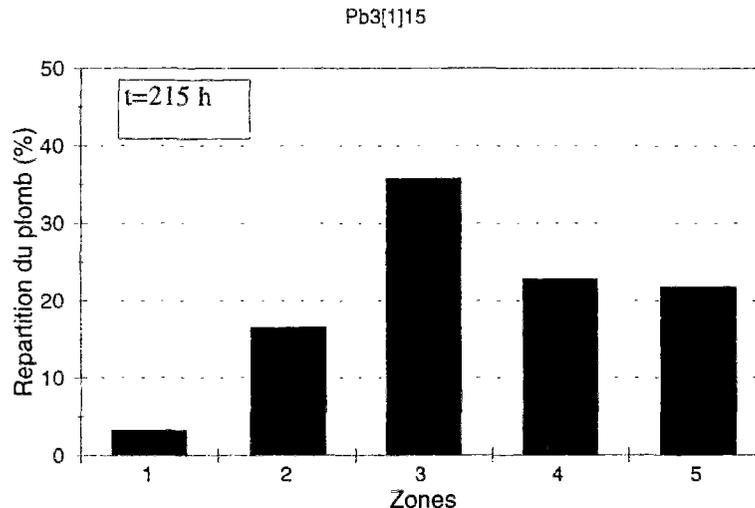


Figure 39 : Répartition de plomb (%) pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et soumis à un champ électrique de 0.65 V/cm (tableaux 12.b-Annexe III).

Au bout de 215 heures, l'essai Pb3[1]15 indique un appauvrissement en plomb des zones 1 et 2 du compartiment anodique (appauvrissement de 21 %) avec un enrichissement des zones centrales 3 et 4 de 19 %.

Essais Pb[1]30: champ électrique de 1.3 V/cm.

La répartition du plomb pour les essais Pb[1]30 est représentée par les figures 40 (tableaux 12.c-Annexe III).

En ce qui concerne les essais Pb[1]30, on peut constater dès 25 heures, un appauvrissement important des zones 1 et 2 du compartiment anodique par transport cationique (appauvrissement de 33 %). Le plomb est redistribué dans le reste de la cuve avec une accumulation plus importante dans la zone cathodique (teneur finale de 37 % en zone 5). Le transport cationique permet un enrichissement en polluant des zones centrales z3 et z4 de 16%.

A partir de 222 heures, le plomb accumulé dans la zone 4 et 5 du compartiment cathodique est déplacé vers le centre de la cuve (enrichissement de 26 % des zones 3 et 4). Il y a donc une « remobilisation » du plomb de la zone 5 vers les zones centrales 3 et 4, ce qui réduit la teneur finale en plomb de la zone 5 à 22 %. La quantité de plomb déplacée par « remobilisation » est de 40 % (calculée à partir de la teneur de 37 % en zone 5 de l'essai Pb1[1]30).

Le phénomène se stabilise dès 220 heures ce qui correspond avec les faibles valeurs de concentration en plomb observées dans l'eau interstitielle.

L'application de temps de traitement plus longs n'apporte aucune amélioration importante sur le taux de déplacement du polluant.

La répartition finale du plomb pour des sables pollués avec une concentration de 1 g de Pb^{2+}/l , sous 15, 30 ou 60 V, pour des périodes de temps comparable, est résumée dans le tableau 32.

Tableau 32 : Répartition du plomb (%) et des teneurs moyennes en eau en fonction du temps et des zones de la cuve pour une concentration initiale de 1 g Pb^{2+}/l et pour une tension électrique initiale de 15 V, 30 V et 60 V.

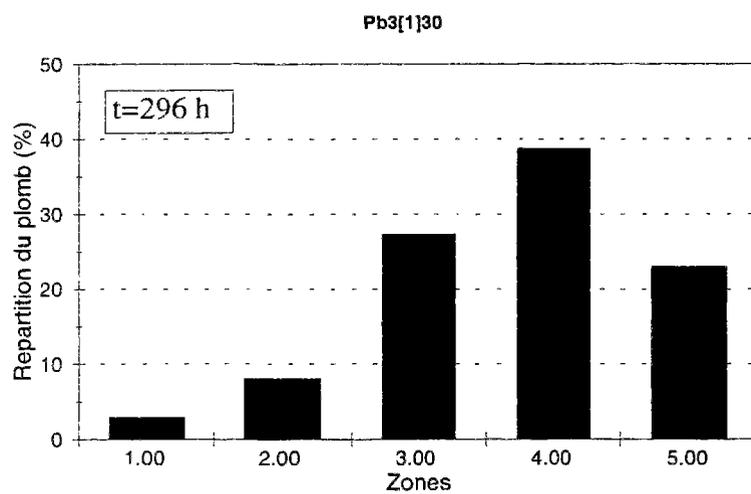
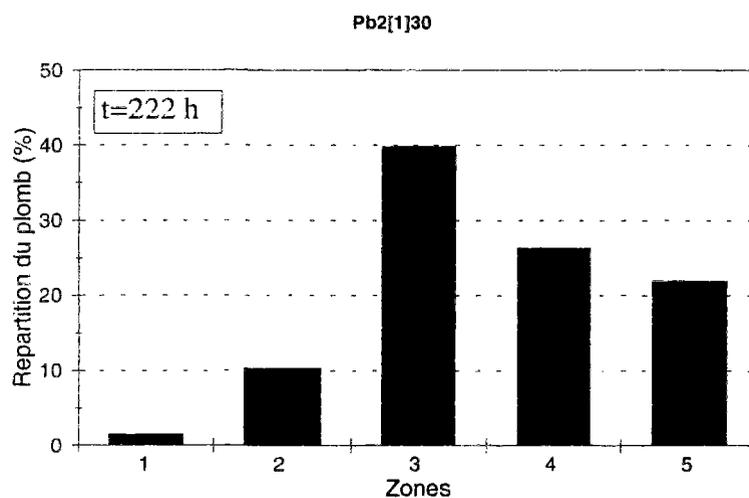
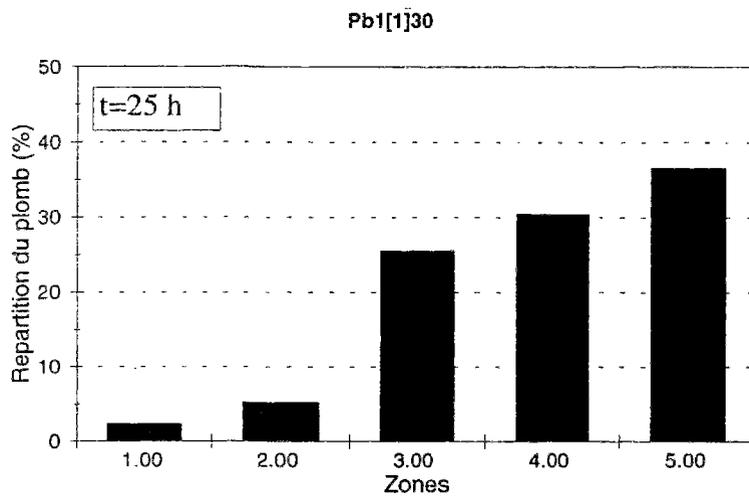
Essais	Zones Répartition pondérée du plomb (%)					Teneur moyenne en eau (w%)	Temps (h)
	1(+)	2	3	4	5(-)		
Pb3[1]15	3	16	36	23	22		215
Pb1[1]30	2	5	26	30	37	23.4	25
Pb2[1]30	2	10	40	26	22	23.4	222
Pb3[1]30	3	6	28	44	19	22.3	296
Pb4[1]30	2	16	39	23	20	21.7	496.7
Pb5[1]30	3	17	37	25	18	21.6	688
Pb1[1]60	5	13	26	28	28	24.3	32
Pb3[1]60	5	16	38	27	14	25.3	194.5
Pb4[1]60	1	10	30	36	23	23.4	483
Pb5[1]60	1	6	25	43	25	23.0	694

Le bilan en plomb est de 9 % pour la série Pb[1]30.

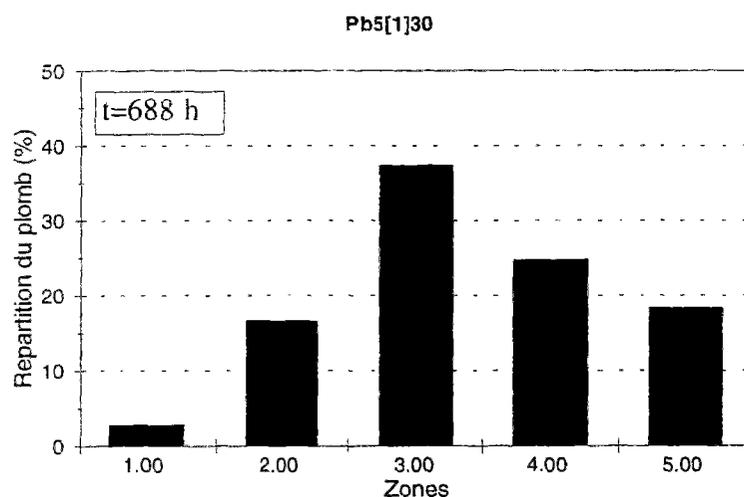
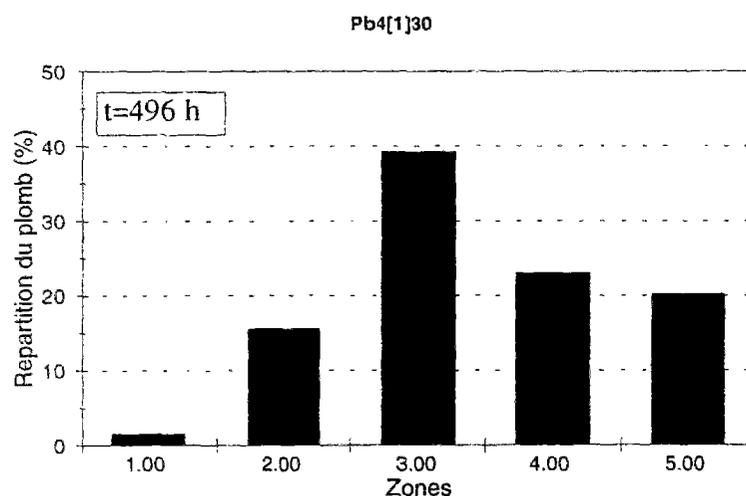
En résumé, en comparant la répartition du polluant dans des sables pollués avec une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et pour des tensions électriques de 15, 30 et 60 volts, on peut dégager les faits suivant (tableau 32):

- à court terme (0-200 heures), l'appauvrissement des zones 1 et 2 du compartiment anodique est plus élevé sous 30 volts (appauvrissement en plomb de 33 % pour 30 Volts et de 22 % pour 60 Volts). A long terme (496 heures), la quantité de polluant déplacée dans les zones 1 et 2 est du même ordre de grandeur pour 30 et 60 volts, (elle est de 22% sous 30 V et 29% sous 60 V),
- l'enrichissement des zones centrales 3 et 4 par migration cationique du plomb est similaire pour les essais Pb[1]30 et Pb[1]60 en début d'essai (de l'ordre de 15 % au bout de 25-30 heures). L'accumulation du plomb dans la zone cathodique est plus forte pour la tension de 30 V (teneur de 37 % pour 30 V et 28 % pour 60 V). A long terme (483 heures), l'enrichissement des zones 3 et 4 est plus important pour 60 volts,
- vers 195-220 heures, la zone cathodique s'appauvrit en plomb. Le polluant est « remobilisé » sous une forme anionique et se dépose dans les zones centrales 3 et 4 dans les essais Pb[1]30 et Pb[1]60.

Le transport anionique permet de doubler la quantité de polluant déposée initialement par le transport cationique dans les zones centrales (augmentation de 15 à 30 %).



Figures 40 : Répartition de plomb (%) pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et soumis à un champ électrique de 1.3 V/cm (tableaux 12.c-Annexe III).



Figures 40 (suite): Répartition de plomb (%) pour des sables pollués avec du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb^{2+}/l et soumis à un champ électrique de 1.3 V/cm (tableaux 12.c-Annexe III).

A court terme (0-200 heures), la « remobilisation » est plus marquée pour une tension électrique de 60 V (« remobilisation » anionique de 40 % pour 30 V contre 50 % pour 60 V). De plus, elle permet d'obtenir une teneur en polluant plus faible dans la zone cathodique (teneur en plomb finale de 22 % pour 30 V contre 14 % pour 60 V).

Les essais réalisés pour 15 V montrent un appauvrissement des zones 1 et 2 de 21 % contre 33 % pour 30 V et 22 % pour 60 V. Compte tenu du manque de données sur la répartition du polluant pour des temps inférieurs à 220 heures, on ne peut pas conclure sur l'existence d'un phénomène de « remobilisation » sous 15 V.

Il semble qu'un temps d'application compris entre 200 et 400 heures en moyenne soit suffisant pour obtenir une accumulation maximum du polluant dans la zone centrale de la cuve au moyen de l'action combinée du transport cationique et anionique du plomb.

4. Conclusion

Quel que soit le champ électrique initial appliqué, les essais réalisés avec la concentration de 1 g de Pb^{2+} /l montrent un transport par migration cationique et anionique (on ne tient pas compte de l'essai réalisé sous 15 V pour le transport anionique). La mesure de la concentration en polluant de l'eau interstitielle pendant le traitement met en évidence un phénomène de solubilisation dans le compartiment cathodique. Ce phénomène peut être relié avec l'augmentation observée sur les profils de conductivité et confirme la redissolution de l'hydroxyde en anions plombates.

A court terme, l'augmentation de la tension électrique ne permet pas d'obtenir un enrichissement en plomb plus important dans les zones centrales 3 et 4. Pour une période donnée de 200 heures, cet enrichissement est de l'ordre de 26-28 % avec une énergie consommée de 13 kWh/m³ de sol pour 30 volts contre 67 kWh/m³ sous 60 volts.

L'utilisation d'une tension plus forte permet d'augmenter le taux de plomb remobilisé dans la zone 5 sous forme d'anions et de réduire la teneur finale en polluant dans cette même zone. La « remobilisation » est de 40 % avec une teneur finale en zone 5 égale à 22 % sous 30 volts contre une « remobilisation » de 50 % sous 60 volts avec une teneur finale de 14 %.

L'application d'une tension électrique élevée permet d'observer un transport sous forme d'anions plus important mais entraîne une consommation électrique plus élevée.

L'augmentation du champ électrique permet un déplacement rapide des ions OH^- jusque dans le compartiment anodique. On favorise ainsi le transport du plomb sous forme d'anions mais en contrepartie le taux de déplacement par migration cationique est réduit. L'enrichissement des zones centrales 3 et 4 est identique pour 30 et 60 V.

Le tableau 33 regroupe les différents paramètres chimiques mesurés à l'arrêt pour chaque série d'essais:

Tableau 33 : Synthèse des paramètres chimiques à l'arrêt pour les essais réalisés avec du sable pollué par du plomb pour une concentration initiale de 1 g de Pb²⁺/l et sous un champ électrique fixé à 0.65 V/cm ou 1.3 V/cm.

ESSAIS	Paramètres mesurés à l'arrêt de l'essai		Zones de sol					Temps (heures)
			z1(+)	z2	z3	z4	z5(-)	
Pb1[1]15	pH de l'eau interstitielle		5.40	2.71	7.51	9.96	11.75	215
	Conductivité électrique de l'eau interstitielle (mS/cm)		2.340	0.341	0.025	0.030	0.868	
Pb2[1]15	pH de l'eau interstitielle		5.4	2.7	7.5	9.96	11.75	215
	Conductivité électrique de l'eau interstitielle (mS/cm)		2.34	0.341	0.025	0.030	0.868	
Pb3[1]15	Répartition du polluant (%)		3	16	36	23	22	215
Pb1[1]30	Teneur en eau finale (w%)		26.4	23.1	22.6	22.5	22.6	25
	pH du sol		-	-	-	-	-	
	eau interstitielle	pH	-	-	-	-	-	
		Conductivité électrique (mS/cm)	-	-	-	-	-	
	Répartition du polluant (%)		2	5	26	30	37	
Pb2[1]30	Teneur en eau finale (w%)		25.3	23.1	23.1	22.7	22.7	222
	pH du sol		5.89	6.63	8.57	7.90	10.10	
	eau interstitielle	pH	4.11	5.32	6.59	9.31	8.71	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.596	0.419	0.013	0.026	0.119	
	Répartition du polluant (%)		2	10	40	26	22	
Pb3[1]30	Teneur en eau finale (w%)		23.9	21.7	22.0	21.9	21.8	296
	pH du sol		4.86	5.27	6.40	9.29	11.16	
	eau interstitielle	pH	5.01	5.70	9.67	11.17	10.05	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.703	0.789	0.017	0.016	0.173	
	Répartition du polluant (%)		3	6	28	44	19	
Pb4[1]30	Teneur en eau finale (w%)		22.5	21.3	21.4	21.6	21.7	496.7
	pH du sol		-	-	-	-	-	
	eau interstitielle	pH	3.81	8.66	9.75	10.57	11.75	
		Conductivité électrique (mS/cm)	0.740	0.121	0.070	0.025	0.020	
	Répartition du polluant (%)		2	16	39	23	20	
Pb5[1]30	Teneur en eau finale (w%)		22.5	21.3	21.5	21.1	21.8	688
	pH du sol		-	-	-	-	-	
	eau interstitielle	pH	-	-	-	-	-	
		Conductivité électrique (mS/cm)	-	-	-	-	-	
	Répartition du polluant (%)		3	17	37	25	18	

CONCLUSION GENERALE

L'application d'un champ électrique à un sol saturé et pollué par des cations métalliques a permis d'étudier les conditions du transport de ces polluants.

La mesure des paramètres électriques du milieu d'une part, et des paramètres chimiques du sol et de l'eau interstitielle d'autre part, ont montré l'existence de mécanismes de transport différents selon la nature et la concentration initiale du polluant.

Les essais ont été réalisés avec du sable de Fontainebleau pollué par une solution cationique dans un rapport poids de sable/ poids de liquide fixé. Les polluants utilisés sont le plomb, le chrome et le zinc. Le sol est mis en place dans une cuve de petites dimensions à laquelle on applique une tension électrique constante.

Les profils de distribution du polluant dans le sol en fonction du temps de traitement ont permis de mettre en évidence plusieurs types de répartition selon la nature et la concentration initiale du polluant.

Dans le cas du plomb, l'utilisation de trois gammes de concentration égales à 0.1, 1 et 10 g de Pb^{2+}/l , montre trois types de répartitions:

- un léger appauvrissement du compartiment anodique consécutif à un faible déplacement pour une concentration initiale faible égale à 0.1 g/l de Pb^{2+} (soit 26 mg de Pb^{2+}/kg de sol sec),
- un appauvrissement des zones anodique et cathodique, par rapport à la teneur initiale, avec accumulation du polluant au centre du dispositif, pour une concentration intermédiaire de 1g/l de Pb^{2+} (soit 260 mg/kg de sol sec),
- un appauvrissement plus important des zones anodiques avec accumulation du polluant à la cathode pour une concentration élevée de 10 g de Pb^{2+}/l (soit 2600 mg/kg de sol sec).

Le suivi des paramètres physico-chimiques au cours du traitement électrique a permis de mettre en évidence l'importance du pH sur le déplacement du polluant dans le sol.

En effet, le passage du courant électrique entraîne la formation d'une zone acide à l'anode et d'une zone basique à la cathode par décomposition de l'eau en ions H_3O^+ et OH^- .

La mesure du pH dans le sol et dans l'eau interstitielle met en évidence deux types de mécanismes de transport:

Premier mécanisme de transport:

Un transport du polluant sous une forme cationique Pb^{2+} vers la cathode. Ce transport est favorisé par des valeurs de pH acides dans le compartiment anodique. Lorsque le pH devient égal ou supérieur au pH de précipitation du plomb, le polluant précipite sous forme d'hydroxydes qui deviennent insensibles au champ électrique. Le transport du polluant sous forme cationique existe pour les trois concentrations étudiées et la quantité de plomb déplacée augmente avec la concentration du polluant, ou autrement dit, avec l'acidité initiale du milieu.

Second mécanisme de transport:

Un transport du polluant sous une forme anionique vers l'anode par redissolution de l'hydroxyde précipité en présence de pH basiques. En effet, l'apparition à la cathode de pH basiques comparables au pH de fin de redissolution de l'hydroxyde permet la

formation d'anions plombates. Le polluant est alors de nouveau potentiellement « remobilisable » par le champ électrique.

Dans le cas du plomb, le mécanisme de « remobilisation » anionique à la cathode est plus développé pour la concentration de 1 g de Pb^{2+}/l . Le transport anionique permet de doubler la quantité de polluant initialement déposée dans les zones centrales du dispositif par le transport cationique.

L'action combinée de ces deux mécanismes permet de concentrer le polluant dans ces zones centrales.

En accord avec les pH théoriques de redissolution de l'hydroxyde, les valeurs de pH mesurées dans le sol sont compatibles avec la formation d'anions plombates dans le compartiment cathodique. Les mesures de la conductivité électrique de l'eau interstitielle indiquent dans ce cas une augmentation de la charge ionique dans les zones concernées par le phénomène de « remobilisation ». Cela se traduit également par une remontée des valeurs de l'intensité électrique pour la même période.

Pour la concentration de 0.1 g de Pb^{2+}/l , les pH favorables à la formation d'anions plombates sont mesurés essentiellement à la cathode, ce qui explique une « remobilisation » limitée du plomb.

Dans le cas du chrome, les concentrations utilisées nous ont permis de constater un déplacement de polluant par transport cationique. Ce transport est quasi nul pour une concentration initiale de 0.1g de Cr^{3+}/l en raison de valeurs de pH supérieures au pH de précipitation de l'hydroxyde à l'anode. L'appauvrissement du compartiment anodique est important pour les concentrations de 0.5 et 1 g de Cr^{3+}/l , avec accumulation du polluant dans le compartiment cathodique.

Dans le cas du zinc, l'utilisation des concentrations de 1 et 3 g de Zn^{2+}/l indique un transport cationique du polluant élevé avec accumulation à la cathode. Ceci s'explique par l'acidité des valeurs du compartiment anodique. La production d'ions OH^- à la cathode ne suffit pas à neutraliser l'acidité initiale du milieu et ne provoque pas de conditions suffisamment basiques favorables à la redissolution de l'hydroxyde de zinc.

Cette étude a permis d'établir des corrélations entre les paramètres électriques et chimiques. La mesure des paramètres chimiques a mis en évidence l'importance du pH du sol comme paramètre majeur dans l'efficacité du transport du polluant. En effet, le transport cationique est observé à l'anode pour des pH inférieurs au pH de précipitation de l'hydroxyde. Inversement, le transport anionique est observé à la cathode pour des pH proches du pH de fin de redissolution de l'hydroxyde.

La mesure de la conductivité électrique de l'eau interstitielle rend compte de la présence d'ions en solution. Cette mesure permet en corrélation avec celle du pH du sol d'envisager soit un transport de polluant vers la cathode (ex: baisse de la conductivité et pH du sol inférieur au pH de précipitation à l'anode), soit un transport vers l'anode (ex: augmentation de la conductivité et pH du sol proche du pH de redissolution de l'hydroxyde), soit une précipitation du polluant (ex: baisse de la conductivité et pH du sol compris dans le domaine de précipitation de l'hydroxyde).

La mesure du pH de l'eau interstitielle met en évidence des écarts des valeurs avec celle du sol pendant l'électrolyse de l'eau. De plus, les augmentations de l'intensité sont généralement associées avec les écarts de pH entre le sol et l'eau interstitielle.

Quel que soit le polluant étudié, on peut considérer que le taux de transport du polluant devient négligeable au-delà d'un temps d'application de 480 heures. Les quantités de polluant déplacées les plus élevées sont de l'ordre de 50-65 % pour les concentrations de 10 g de Pb^{2+}/l , et 1 et 3 g de Zn^{2+}/l au bout de 200 à 500 heures. Les taux de transport les plus faibles sont de l'ordre de 5-7 % et ont été obtenus avec des concentrations de 0.1 g de Pb^{2+}/l et 0.1 g de Cr^{3+}/l .

Les implications de ce travail sont de deux ordres:

- d'un point de vue pratique, il ressort de cette étude que le transport de polluants métalliques par électro-migration est obtenu préférentiellement pour des concentrations initiales élevées. C'est le cas des concentrations de 10 g de Pb^{2+}/l , 3 g de Zn^{2+}/l . Dans ce cas, le polluant se concentre à la cathode. Néanmoins, les teneurs en polluant mesurées sur les sites pollués correspondent plutôt à des concentrations moins élevées, de l'ordre de 1 g de Pb^{2+}/l , 0.5 et 1 g de Cr^{3+}/l , et 1 g de Zn^{2+}/l . Dans le cas du plomb, il faut tenir compte du mécanisme de « remobilisation » anionique et prévoir le lieu de précipitation du polluant par le suivi de paramètres électriques et chimiques,
- d'un point de vue économique, l'application du traitement électrique pour des temps importants ne permet pas d'améliorer le taux de transport.

Le transport du polluant est donc un compromis entre la concentration initiale du polluant, les réactions d'électrolyse de l'eau et le temps d'application du champ électrique.

Il serait intéressant d'approfondir les connaissances en matière de transport des polluants métalliques en utilisant d'une part, des matériaux argileux, et d'autre part, en utilisant des mélanges de polluants de concentration variable afin de se rapprocher des conditions observées dans les sites pollués. De plus, dans le cas du chrome et du zinc, une recherche complémentaire des conditions de concentrations favorisant la « remobilisation » est souhaitable.

BIBLIOGRAPHIE

ACAR Yalcin.B., ALSHAWABKEH Akram.N. (1993)

« Electrokinetic remediation. I: pilot-scale tests with lead-spiked kaolinite. II: theoretical model »

Journal of geotechnical engineering, March, 173-?

ACAR Yalcin.B., ALSHAWABKEH Akram.N. (1993)

« Principles of electrokinetics remediation »

Environmental Science Technology, Vol 27, N°13

ACAR Yalcin.B., ALSHAWABKEH Akram.N., GALE Robert.J. (1992)

« A review of fundamentals of removing contaminants from soils by electrokinetic soil processing »

Environmental geotechnology, Usmen&Acar (eds), 1992 Balkema, Rotterdam

ACAR Yalcin.B., HAMED Jihad.T., ALSHAWABKEH Akram.N., GALE Robert.J. (1994)

« Removal of cadmium (II) from saturated kaolinite by the application of electrical current »

Géotechnique 44, N°2, 239-254

AMBAR S.A., CHILINGAR G.V., BEESON C.M. (1964)

« Use of direct current for increasing the flow rate of reservoir fluids during petroleum recovery »

Journal of Canadian Petroleum, Technology, Spring, Calgary, 8-14

BJERRUM.L., MOUM.J., EIDE.O (1967)

« Application of electroosmosis to a foundation problem in a norvegiean quick clay »

Géotechnique, 17, 214-235

BUDDEMEIR Robert.W. (1988)

« Transport of colloidal contaminants in groundwater: radionucleide migration at the Nevada site test

Applied geochemistry, Vol 3, 535-548

CABRERA-GUZMAN Diana., SWARTZAUGH J.T., WEISMAN Andrew.W. (1990)

« The use of electrokinetics for hazardous waste site remediation »

J Air Waste Manag Assoc, 40, 1670-1676

CASAGRANDE.L. (1983)

« Stabilization of soils by electroosmosis: state of the art »

ASCE

CHARLOT.G. (1993)

« Les réactions chimiques en solution aqueuse »

DAVIS James.E. (1992)

« DOE workshop on evaluation of electrokinetic technologies-electrokinetic treatment of mineral industry wastes »

National Electrokinetics Workshop, Atlanta, January 22

DE MARSILY G., LANCELOT F., LONDICHE.H. (1992)

« Récupération assistée d'hydrocarbures dans les milieux poreux par application d'un champ électrique »

RGE, N°3/92, Mars

EYKHOLT Gerard.R., DANIEL David.E. (1994)

« Impact of system chemistry on electroosmosis in contaminated soil »

Journal of Geotechnical Engineering, Vol 120, N°5, may

FLEUREAU J.M. (1979)

« Influence d'un champ électrique ou électrique sur les phénomènes d'interaction solide-liquide dans les milieux poreux »

Thèse de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures

HAMED Jihad.T., ACAR Yalcin.B., GALE Robert.J. (1991)

« Pb(II) removal from kaolinite by electrokinetics »

Journal of Geotechnical Engineering, Vol 117, N°2, february

JACOBS Richard.A., SENGUN Mehmet.Z., HICKS Edwin.R. (1994)

« Model and experiment on soil remediation by electric fields »

J. Environ. Sci. Health, A29(9), 1933-1995

KOZAK Matthew.W. (1992)

« Fundamentals of electrokinetic »

Sandia National Laboratory

LAGEMAN Reinout.(1993)

« Applications in the Netherlands »

Environm Sci Technol, 27, n°13

LINDGREN E.R., MATTSON E.D., KOZAK M.W. (1991)

« Electrokinetic remediation of contaminated soils »

Environmental remediation '91, sept 8-11, 1991, Pasco Washington

LOCKART N.C. (1983)

« Electroosmotic dewatering of clays II: influence of salt, acid and flocculants. III: Influence of clay type, exchangeable cations, and electrode materials »

Colloids and surfaces, 6, 239-251, 253-269

MATTSON E.D., LINDGREN E.R. (1993)

« Electrokinetic extraction of chromate from unsaturated soils »

ACS-IE&C Special Symposium 9/27-30/93

MITCHELL James.K. (1976)

« Fundamentals of soil behavior »

John Wiley & Sons, Inc.

PAMUKCU Sibel., WITTLE J.Kenneth. (1992)

« Electrokinetic removal of selected heavy metals from soil »
Environmental Progress, Vol 11, N°3, 241-250

POURBAIX .M. (1963)

« Atlas d'équilibres électrochimiques à 25 °C »
Paris, Gauthier-Villars

PROBSTEIN Ronald.F., HICKS Edwin.R. (1993)

« Removal of contaminants from soils by electric fields »
Science, Vol 260, 498-503

REPORT N°EK-BR-009-0292, july 10, 1992

« Feasibility of removing uranium, thorium and radium from kaolinite by electrochemical soil processing »
Final Report Phase I by USEPA

SARRAZIN J., VERDAGUER M.

« L'oxydoréduction: concepts et expériences »

SAUER J.E., DAVIS. James. E. (1994)

« Electrokinetically enhanced sedimentation of colloidal contaminants »
Environm. Sci. Technol, 194, 28, 737-745

SEGALL Burton.A., BRUELL Clifford.J. (1992)

« Electroosmotic contaminant-removal processes »
Journal of Environmental Engineering, Vol 118, N°1,

SHAPIRO Andrew.P., PROBSTEIN R.F. (1992)

« Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis »
Environm.Sci Technol, 27, 283-291

SHAPIRO Andrew.P., RENAUD Patricia.C., PROBSTEIN R.F. (1989)

« Preliminary studies on the removal of chemical species from saturated porous media by electroosmosis »
Physico chemical hydrodynamics, V11, n°5/6, 785-802

SHMAKIN.B.M (1985)

« The method of partial extraction of metals in a constant current electrical field for geochemical exploration »
Journal of geochemical exploration,

TREMILLON.B. (1993)

« Electrochimie analytique et réactions en solution »
Masson.

TURNER Ralph.R. (1992)

« Field application of electro-reclamation to mercury in soils: a skeptics view »
National Electrokinetics Workshops, Atlanta, January 22

WORKSHOP (1986)

« Electro-kinetic treatment and its application in environmental geotechnical engineering for hazardous waste site remediation »

University of Washington, Department of civil engineering, Seattle, WA 98195

YEUNG A.T., SADEK S.M., MITCHELL J.K. (1993)

« Waste containment using electro-kinetics »

Geoconfine'93

YEUNG A.T., SADEK A.T., MITCHELL J.K. (1992)

« A new apparatus of the evaluation of electro-kinetic processes in hazardous waste management »

Geotechnical testing journal, vol 15, n°3, September, 207-216

YOSHIDA H., SHINKAWA. (1980)

« Comparaison between electroosmotic dewatering efficiencies under conditions of constant electric current and constant voltage »

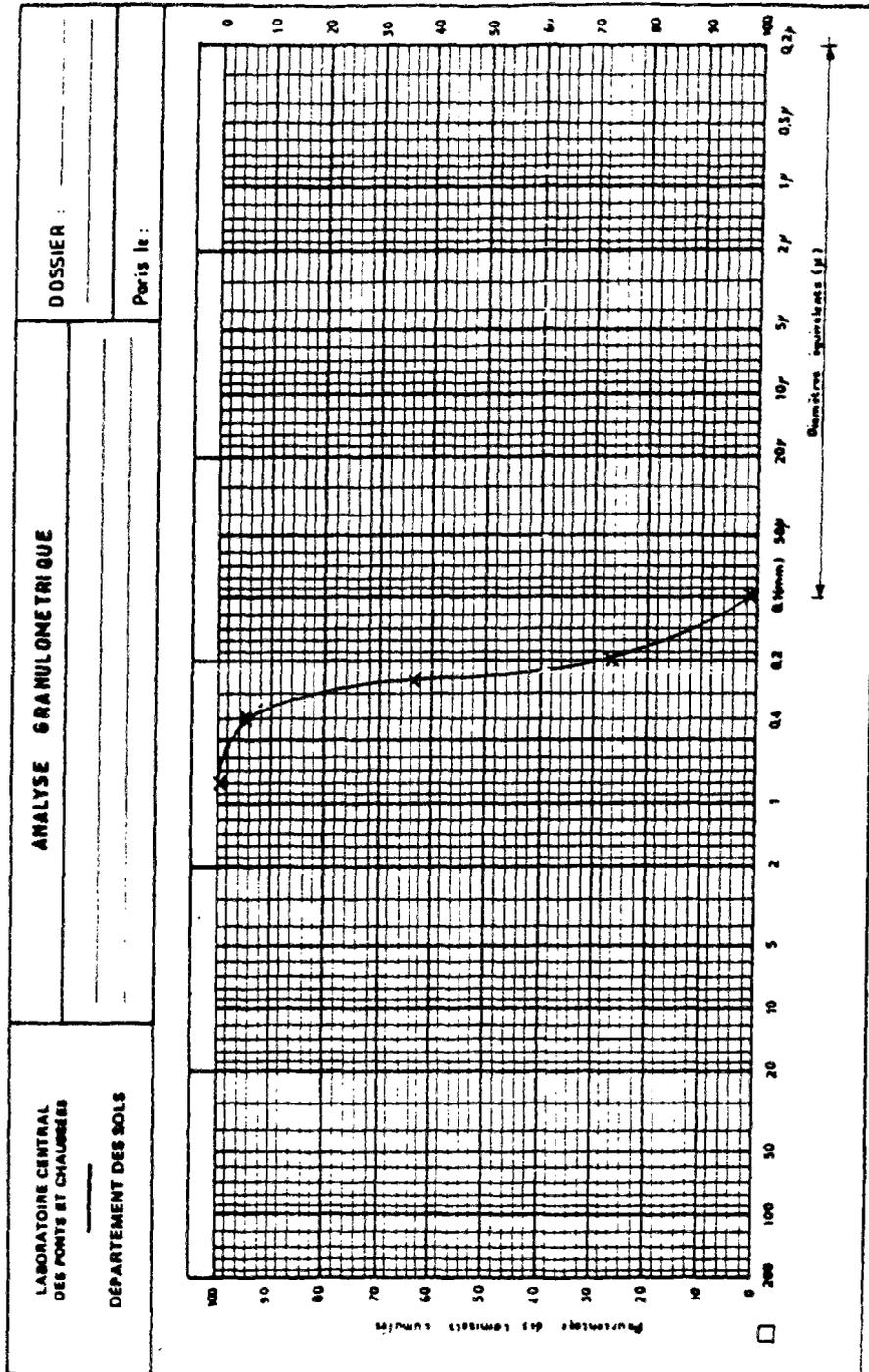
J of Chemical Engineering of Japan, Vol 13, N°5

ANNEXES I

ANNEXE I.a:

CARACTERISTIQUES DU SABLE DE FONTAINEBLEAU :

1. Courbe granulométrique



2. Caractéristiques du sable de Fontainebleau en place

Soit:

V : volume total de l'échantillon (ou de la cuve) en cm³

W : poids du sol (sable + solution polluante) en g

Wd : poids du sol sec (sable) en g

densité des grains: 2.66

e_{max} : 0.94 et e_{min} : 0.54

d₆₀ : 0.25 mm et d₁₀ : 0.14 mm

Caractéristiques	Formules	Résultats
Teneur en eau (w en %)	$[(Ph - Ps) / Ps] * 100$	26 %
Indice des vides (e)	$e = \frac{V - \frac{Wd}{d}}{\frac{Wd}{d}}$	0.6
Porosité (n)	$n = \frac{e}{1 + e}$	0.37
Densité sèche	$\gamma d = \frac{Wd}{V}$	1.65
Densité humide	$\gamma h = \frac{W}{V}$	2.08
Indice de densité	$Id = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$	0.85
Coefficient de Hazen	$\frac{d_{60}}{d_{10}}$	1.78

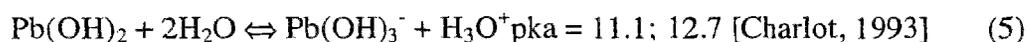
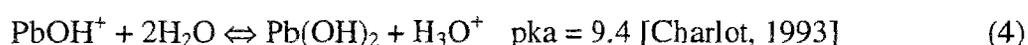
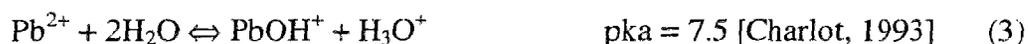
ANNEXE I.b:

COMPLEMENT SUR LES REACTIONS CHIMIQUES ET D'OXYDOREDUCTION DES ELEMENTS : PLOMB, CHROME ET ZINC.

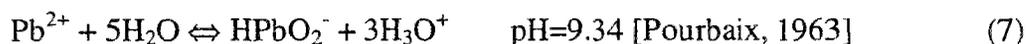
A. LE PLOMB:

- les réactions chimiques:

Si on tient compte des espèces intermédiaires, les équilibres successifs sont donnés ci-dessous avec des pka correspondant aux limites de prédominance des formes dissoutes:

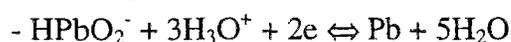
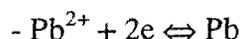


L'équilibre (7) permet de déterminer le pH correspondant au minimum de solubilité:



- les réactions d'oxydoréduction:

Les réactions d'oxydoréduction principales sont les suivantes:



D'après les potentiels rédox des couples (chapitre 1, 2.1.1, tableau 4) et les réactions d'électrolyse de l'eau (chapitre 1, 2.2.1), on peut envisager plusieurs réactions d'oxydoréduction. Soient les couples suivants $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$, $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2$, Cu^{2+}/Cu , Pb^{2+}/Pb et trois domaines de pH (pH <7, pH=7 et pH>7, on obtient:

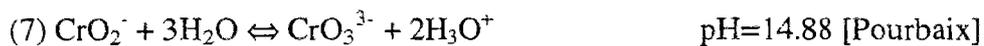
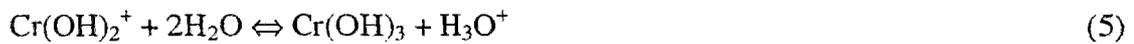
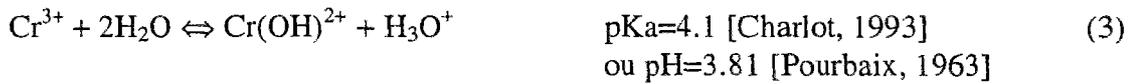
	pH < 7	pH=7	pH >7
A l'anode	$\text{Pb} \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}$ ou $\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}$	$\text{Pb} \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}$ ou $\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}$	$\text{Pb} \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}$ ou $\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}$ ou la réaction (2) de dissociation de l'eau avec consommation des ions OH^- .
A la cathode	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Cu}$ ou réaction (3) de dissociation de l'eau avec dégagement de H_2 et consommation des ions H_3O^+ .	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Cu}$	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e} \rightleftharpoons \text{Cu}$

D'après les réactions établies ci-dessus, les réactions à l'anode sont des réactions d'oxydation du cuivre ou de consommation d'ions OH⁻ en milieu basique. A la cathode, la réaction principale est la réduction du cuivre ou consommation des ions H₃O⁺ en milieu acide.

B. LE CHROME:

- les réactions chimiques:

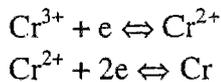
En tenant compte des espèces intermédiaires, les équilibres successifs sont:



Le pH correspondant au minimum de solubilité est obtenu à partir de l'équilibre (8):



- les réactions d'oxydoréduction:



De plus, des réactions d'oxydation à l'anode en milieu acide entraînent l'apparition de la valence (+6) du chrome (HCrO₄⁻, Cr₂O₇²⁻).

En considérant les réactions d'oxydoréduction et les couples O₂/H₂O, H₃O⁺/H₂, Cu²⁺/Cu, Cr³⁺/Cr (Cr³⁺/Cr²⁺ et Cr²⁺/Cr), les réactions sont les suivantes:

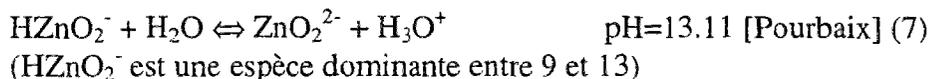
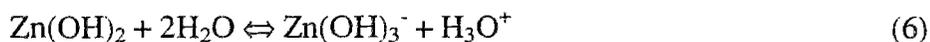
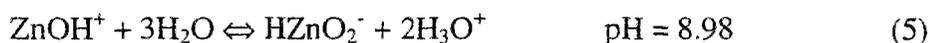
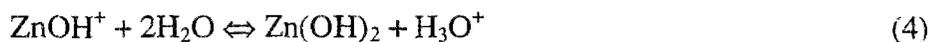
	pH < 7	pH=7	pH > 7
A l'anode	Cr ²⁺ ⇌ Cr ³⁺ + e ou Cr ⇌ Cr ²⁺ + 2e	Cr ²⁺ ⇌ Cr ³⁺ + e ou Cr ⇌ Cr ²⁺ + 2e	Cr ²⁺ ⇌ Cr ³⁺ + e ou Cr ⇌ Cr ²⁺ + 2e
A la cathode	Cu ²⁺ + 2e ⇌ Cu ou réaction (3) de dissociation de l'eau avec dégagement de H ₂	Cu ²⁺ + 2e ⇌ Cu	Cu ²⁺ + 2e ⇌ Cu

Les réactions principales sont des réactions d'oxydation des ions Cr²⁺ à l'anode ou de consommation d'ions H₃O⁺ en milieu acide et des réactions de réduction du cuivre à la cathode.

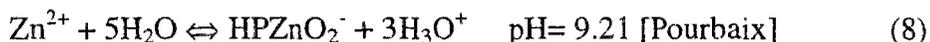
C. LE ZINC:

- les réactions chimiques:

En tenant compte des équilibres successifs, on peut écrire:

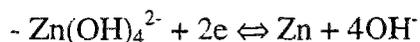
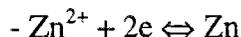


Le pH du minimum de solubilité est donné par l'équilibre (8):



- les réactions d'oxydoréduction:

Les réactions principales sont:



En considérant les réactions d'oxydoréduction et les couples O₂/H₂O, H₃O⁺/H₂, Cu²⁺/Cu, Zn²⁺/Zn présents, on peut écrire:

	pH < 7	pH=7	pH >7
A l'anode	$\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2e$	$\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2e$	$\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2e$
A la cathode	$\text{Cu}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cu}$ ou réaction (3) de dissociation de l'eau avec dégagement de H ₂	$\text{Cu}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cu}$	$\text{Cu}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cu}$

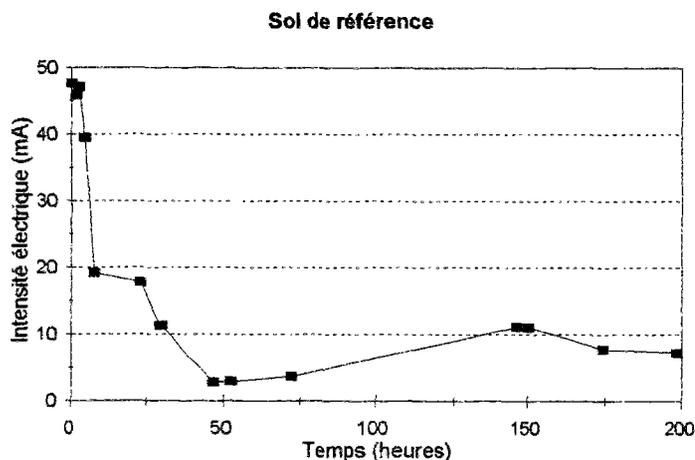
Les réactions d'oxydoréduction principales sont l'oxydation du zinc à l'anode ou consommation des ions H₃O⁺ en milieu acide et la réduction du cuivre à la cathode.

ANNEXE I.C:

SOL DE REFERENCE :

Sable de Fontainebleau mélangé à un volume d'eau permutée, additionné d'acide nitrique (pH initial : 2.66 ; conductivité électrique initiale : 1.418 mS/cm).

1. Evolution de l'intensité électrique



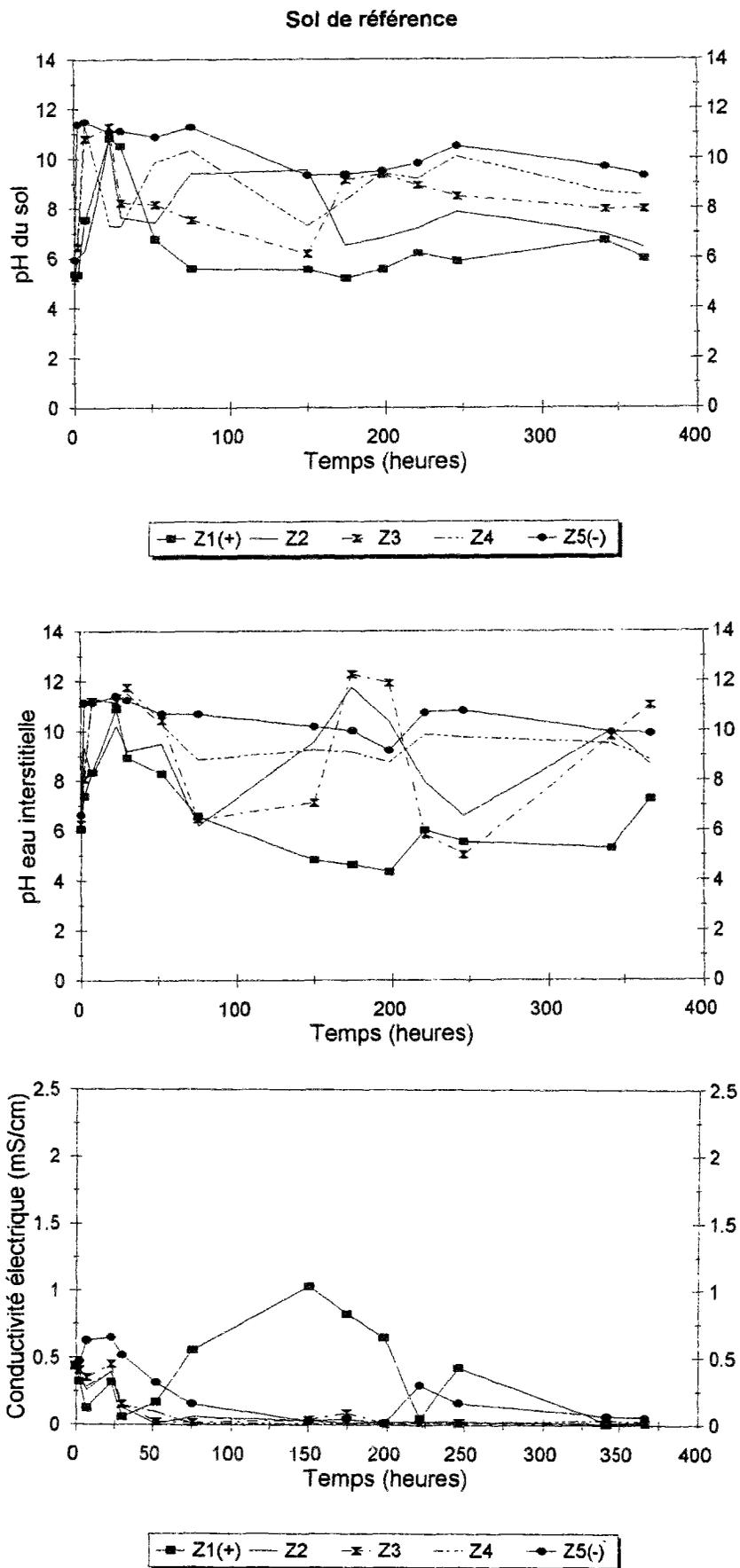
Intensité électrique (mA) pour le sol de référence

Temps (heures)	Intensité (mA)
0.0	47.6
1.5	45.9
2.5	47.1
4.5	39.4
7.5	19.2
23.0	17.8
30.0	11.3
47.0	2.8
52.5	3.0
72.0	3.7
146.5	11.1
150.5	11.1
174.5	7.8
198.5	7.3

2. Résultats du pH du sol, du pH de l'eau interstitielle et de la conductivité électrique

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle					pH du sol					Conductivité eau interstitielle (mS/cm)						
	Zones (cm)					Zones (cm)					Zones (cm)						
	+	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	+	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	+	0-5	5-10	10-15	15-20
0	-	-	-	-	-	5.38	5.35	5.28	6.05	5.94	0.443	0.441	0.438	0.450	0.445		
3	6.07	5.81	6.28	6.40	6.64	5.36	6.05	6.48	6.81	11.40	0.322	0.384	0.407	0.348	0.473		
8	7.40	9.37	8.10	8.26	11.17	7.58	6.33	10.82	11.36	11.49	0.126	0.262	0.354	0.284	0.628		
8	8.36	8.22	11.22	11.31	11.15	7.58	6.33	10.82	11.36	11.49	0.126	0.262	0.354	0.284	0.628		
23	10.89	10.21	11.20	11.14	11.42	10.85	10.79	11.30	7.30	11.09	0.320	0.399	0.453	0.395	0.651		
30	8.92	9.20	11.77	11.53	11.25	10.53	7.65	8.24	7.30	11.13	0.060	0.127	0.155	0.148	0.519		
53	8.30	9.50	10.44	10.29	10.70	6.78	7.47	8.18	9.87	10.90	0.170	0.011	0.024	0.101	0.316		
76	6.57	6.18	6.46	8.86	10.68	5.59	9.43	7.55	10.34	11.28	0.557	0.061	0.018	0.010	0.156		
151	4.83	9.54	7.12	9.25	10.17	5.56	9.54	6.18	7.32	9.34	1.032	0.030	0.039	0.013	0.030		
175	4.64	11.76	12.28	9.14	10.00	5.21	6.53	9.15	8.36	9.39	0.829	0.015	0.090	0.013	0.043		
199	4.35	10.37	11.93	8.73	9.22	5.57	6.83	9.37	9.41	9.51	0.651	0.022	0.011	0.008	0.014		
222	6.03	7.95	5.85	9.86	10.74	6.22	7.21	8.95	9.22	9.84	0.047	0.026	0.018	0.014	0.297		
247	5.56	6.58	5.04	9.74	10.81	5.88	7.89	8.50	10.10	10.51	0.425	0.024	0.015	0.010	0.163		
342	5.30	10.02	9.78	9.50	9.95	6.71	6.97	7.98	8.66	9.68	0.016	0.012	0.008	0.035	0.067		
367	7.27	8.66	11.05	8.85	9.91	5.99	6.44	8.00	8.52	9.31	0.016	0.009	0.012	0.024	0.055		

3. Evolution du pH du sol, du pH de l'eau interstitielle et de la conductivité électrique



ANNEXES II:
Tableaux de résultats du chapitre 4

Temps (heures)	Essai Pb1[01]60	Temps (heures)	Essai Pb2[01]60	Temps (heures)	Essai Pb3[01]60	Temps (heures)	Essai Pb4[01]60	Temps (heures)	Essai Pb5[01]60	Temps (heures)	Essai Pb6[01]60
0.0	-	0.0	19.9	0.0	17.0	0.0	17.5	0.0	24.6	0.0	28.6
3.0	16.8	2.8	20.0	3.0	16.9	3.0	17.0	1.0	23.5	5.0	18.4
5.8	12.1	9.0	10.7	5.8	9.44	5.8	10.9	22.0	5.3	19.0	6.0
7.5	9.3	21.3	11.4	7.5	6.51	7.5	8.1	27.0	6.1	29.0	7.6
9.3	8.4	26.3	9.6	9.3	5.78	9.3	7.2	140.0	11.2	44.0	4.5
22.8	8.3	31.8	9.5	22.8	5	22.8	8.8	148.7	11.1	49.0	5.4
25.3	7.5	119.3	2.4	25.3	4.78	25.3	7.9	164.5	8.0	51.0	5.9
27.0	7.2	123.8	2.6	27.0	4.5	27.0	7.0	172.5	5.7	115.0	7.0
29.5	7.3	142.3	2.6	29.5	4.1	29.5	6.1	190.5	4.0	125.5	9.2
32.8	7.0	148.3	2.8	32.8	3.9	32.8	5.5	194.5	4.0	140.5	10.7
46.8	6.2	166.3	2.9	46.8	8.1	46.8	2.9	261.5	5.4	164.5	10.2
49.8	5.3	170.8	3.1	49.8	3.1	49.8	2.6	265.5	6.0	191.5	8.1
52.0	4.8	174.8	4.9	55.0	3.2	55.0	2.3	285.5	7.6	192.5	7.8
-	-	190.3	3.3	119.3	8.0	119.3	1.9	291.5	7.4	213.5	5.7
-	-	194.75	2.8	125.8	8.7	125.8	1.7	309.5	6.8	218.5	4.4
-	-	-	-	143.8	7.7	143.8	1.4	315.5	7.5	331.5	3.6
-	-	-	-	148.5	7.1	148.5	1.4	334.1	5.2	340.2	4.0
-	-	-	-	166.8	6.3	166.8	1.3	338.9	5.4	356.0	4.1
-	-	-	-	170.3	5.5	170.3	1.3	357.6	6.4	364.0	4.4
-	-	-	-	176.5	5.3	176.5	1.5	361.8	6.3	382.0	5.3
-	-	-	-	188.8	6.5	188.8	1.5	411.1	7.3	386.0	5.7
-	-	-	-	193.8	6.7	193.8	1.6	417.2	6.9	453.0	5.5
-	-	-	-	199.3	6.8	199.3	1.6	435.8	6.7	457.0	5.7
-	-	-	-	286.8	2.8	286.8	2.4	440.8	6.8	477.0	5.7
-	-	-	-	291.3	2.7	291.3	2.5	460.4	4.9	483.0	6.2
-	-	-	-	309.8	1.8	309.8	2.6	468.2	4.1	501.0	4.8
-	-	-	-	315.8	1.5	315.8	2.6	484.6	3.6	507.0	4.8
-	-	-	-	333.8	1.4	333.8	2.4	507.1	3.1	525.6	4.2
-	-	-	-	338.3	1.3	338.3	2.3	513.1	3.0	530.4	5.0
-	-	-	-	342.3	1.3	342.3	2.4	579.9	2.5	549.1	5.1
-	-	-	-	357.8	1.1	357.8	2.5	583.5	2.5	553.3	5.2
-	-	-	-	362.3	1.1	362.3	2.5	604.2	3.0	602.6	2.8
-	-	-	-	382.3	1.3	382.3	2.4	611.2	3.5	608.7	2.9
-	-	-	-	454.3	1.7	454.3	3.0	628.9	3.9	627.3	3.4
-	-	-	-	459.3	1.6	459.3	2.6	633.2	3.1	632.3	2.9
-	-	-	-	478.3	1.7	478.3	2.1	652.9	2.6	651.9	3.7
-	-	-	-	-	-	510.3	4.5	658.9	2.9	657.7	3.0
-	-	-	-	-	-	623.3	3.6	681.5	4.3	676.1	3.1
-	-	-	-	-	-	630.3	3.6	748.0	6.4	698.6	3.8
-	-	-	-	-	-	654.3	2.7	755.0	6.0	704.6	4.0
-	-	-	-	-	-	670.9	2.6	771.6	6.4	771.4	4.6
-	-	-	-	-	-	694.9	1.6	778.8	6.3	775.0	4.8
-	-	-	-	-	-	-	-	796.7	7.2	795.7	6.2
-	-	-	-	-	-	-	-	802.2	6.5	802.7	6.5
-	-	-	-	-	-	-	-	821.1	6.9	820.4	7.9
-	-	-	-	-	-	-	-	826.9	7.6	824.7	6.0
-	-	-	-	-	-	-	-	845.1	6.6	844.4	5.7
-	-	-	-	-	-	-	-	849.5	6.6	850.4	6.4
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	873.0	5.0
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	939.5	3.7
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	946.5	3.5
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	963.1	3.7
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	970.3	3.3
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	988.2	3.4
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	993.7	3.4
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1012.6	2.9
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1018.4	2.9
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1036.6	3.4
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1041.0	3.4

Tableaux 1.a. Résultats de l'intensité électrique (mA) en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 0.1 g Pb²⁺/l (d.d.p=60 Volts)

Temps (heures)	Essai Pb1[1]60	Temps (heures)	Essai Pb2[1]60	Temps (heures)	Essai Pb3[1]60	Temps (heures)	Essai Pb4[1]60	Temps (heures)	Essai Pb5[1]60	Temps (heures)	Essai Pb6[1]60	Temps (heures)	Essai Pb7[1]60
0.00	92.5	0.00	86.60	0.0	101.0	0.0	92.3	0.0	90.3	0.0	85.7	0.0	117.0
1.25	78.1	2.00	64.20	2.0	75.1	1.3	74.4	1.3	73.6	1.0	78.3	5.0	50.9
2.50	67.7	5.50	11.55	4.8	42.2	2.5	63.6	2.5	60.1	22.0	6.2	19.0	5.8
4.50	55.1	21.50	3.93	23.0	8.3	4.5	53.2	4.5	48.4	27.0	7.4	24.0	6.6
7.50	18.0	24.00	4.62	28.6	10.7	7.5	16.6	7.5	12.3	140.0	5.6	29.0	7.8
24.50	8.6	25.00	4.08	32.8	20.6	24.5	7.0	24.5	3.4	148.7	5.6	43.0	25.6
27.50	8.0	27.00	3.85	45.0	21.0	27.5	9.1	27.5	2.9	164.5	5.6	53.0	30.5
30.25	8.8	30.00	3.85	50.0	20.2	30.3	10.9	30.3	2.9	172.5	5.8	68.0	14.8
32.00	9.6	45.50	3.09	55.5	22.0	32.0	11.8	32.0	2.8	190.5	5.9	73.0	18.5
32.75	7.0	52.50	3.00	143.0	12.2	33.8	12.7	33.8	2.8	194.5	6.4	75.0	18.2
-	-	69.50	2.87	147.5	14.9	47.3	20.7	47.3	4.9	261.5	6.7	139.0	11.6
-	-	75.00	2.94	166.0	12.9	49.8	17.8	49.8	5.4	265.5	5.1	149.5	11.2
-	-	94.50	2.78	172.0	13.3	51.5	16.8	51.5	5.8	285.5	5.7	164.5	11.6
-	-	-	-	190.0	12.9	54.0	16.4	54.0	6.2	291.5	5.7	188.5	11.1
-	-	-	-	194.5	13.5	56.5	16.7	56.5	6.9	309.5	5.4	215.5	9.6
-	-	-	-	-	-	70.5	14.3	70.5	8.0	315.5	5.6	216.5	9.4
-	-	-	-	-	-	73.5	15.3	73.5	7.7	334.1	6.1	237.5	7.9
-	-	-	-	-	-	78.8	15.3	78.8	7.0	338.9	6.5	242.5	6.8
-	-	-	-	-	-	143.0	3.8	143.0	6.5	357.6	6.1	355.5	4.4
-	-	-	-	-	-	149.5	3.9	149.5	6.5	361.8	6.2	364.2	4.5
-	-	-	-	-	-	167.5	3.7	167.5	5.7	411.1	7.7	380.0	3.8
-	-	-	-	-	-	172.3	3.9	172.3	5.8	417.2	7.7	388.0	3.9
-	-	-	-	-	-	190.5	3.9	190.5	4.5	435.8	6.4	406.0	3.7
-	-	-	-	-	-	194.1	3.8	194.1	4.1	440.8	5.8	410.0	3.9
-	-	-	-	-	-	200.3	3.9	200.3	4.2	460.4	4.4	477.0	4.0
-	-	-	-	-	-	212.5	3.9	212.5	3.9	466.2	4.3	481.0	3.9
-	-	-	-	-	-	217.5	3.7	217.5	3.5	484.6	5.5	501.0	3.8
-	-	-	-	-	-	223.0	3.7	223.0	3.3	507.1	6.2	507.0	3.9
-	-	-	-	-	-	310.5	3.4	310.5	3.5	513.1	6.1	525.0	3.5
-	-	-	-	-	-	315.0	3.4	315.0	4.1	579.9	9.4	531.0	3.6
-	-	-	-	-	-	333.5	2.9	333.5	3.2	583.5	9.1	549.6	4.0
-	-	-	-	-	-	357.5	2.8	357.5	3.2	604.2	6.1	554.4	4.3
-	-	-	-	-	-	362.0	3.1	362.0	3.0	611.2	5.1	573.1	3.8
-	-	-	-	-	-	366.0	3.1	366.0	2.9	628.9	6.8	577.3	3.7
-	-	-	-	-	-	381.5	3.2	381.5	3.5	633.2	5.2	626.6	3.8
-	-	-	-	-	-	386.0	3.6	386.0	3.3	652.9	4.7	632.7	3.7
-	-	-	-	-	-	406.0	3.5	406.0	3.1	658.9	5.1	651.3	3.7
-	-	-	-	-	-	478.0	3.4	478.0	2.9	681.5	5.1	656.3	3.3
-	-	-	-	-	-	483.0	3.5	483.0	2.9	748.0	5.1	675.9	3.3
-	-	-	-	-	-	-	-	502.0	3.2	755.0	5.2	681.7	3.5
-	-	-	-	-	-	-	-	534.0	3.8	771.6	4.6	700.1	3.4
-	-	-	-	-	-	-	-	647.0	3.4	778.8	4.9	722.6	3.1
-	-	-	-	-	-	-	-	654.0	3.5	796.7	5.7	728.6	3.0
-	-	-	-	-	-	-	-	678.0	2.5	802.2	4.9	795.4	2.5
-	-	-	-	-	-	-	-	694.0	2.6	821.1	5.2	799.0	2.5
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	826.9	4.7	819.7	3.0
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	845.1	4.2	826.7	3.5
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	849.5	4.2	844.4	3.9
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	848.7	3.1
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	868.4	2.6
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	874.4	2.9
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	897.0	3.0
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	963.5	3.3
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	970.5	4.0
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	987.1	3.5
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	994.3	3.8
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1012.2	3.3
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1017.7	3.1
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1036.8	3.3
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1042.4	3.8
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1060.6	2.8
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1065.0	3.0

Tableaux 1.b. Résultats de l'intensité électrique (mA) en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l (d.d.p=60 Volts)

Temps (heures)	Essai Pb1[10]60	Temps (heures)	Essai Pb2[10]60	Temps (heures)	Essai Pb3[10]60	Temps (heures)	Essai Pb4[10]60	Temps (heures)	Essai Pb5[10]60	Temps (heures)	Essai Pb6[10]60
0.0	-	0.0	-	0.0	-	0.0	-	0.0	309.0	0.0	-
2.0	278.3	2.8	227.0	3.0	197.0	3.0	158.0	1.0	148.2	5.0	137.0
3.8	215.0	9.0	120.8	5.8	131.4	5.8	130.7	22.0	59.6	19.0	87.8
5.5	204.0	21.3	44.2	7.5	104.3	7.5	122.6	27.0	60.5	29.0	68.5
19.0	52.6	26.3	44.9	9.3	89.3	9.3	99.5	140.0	24.0	44.0	64.0
23.3	59.0	31.8	47.3	22.8	55.2	22.8	49.4	148.7	25.9	49.0	65.2
25.8	64.6	119.3	28.8	25.3	55.9	25.3	-	164.5	23.1	51.0	62.2
26.5	61.9	123.8	29.5	27.0	51.6	27.0	47.0	172.5	22.1	115.0	56.1
-	-	142.3	22.3	29.5	51.9	29.5	48.5	190.5	23.2	125.5	53.2
-	-	148.3	22.3	32.8	51.8	32.8	48.0	194.5	22.4	140.5	54.5
-	-	166.3	24.5	46.8	34.6	46.8	39.6	261.5	16.4	164.5	51.9
-	-	170.8	25.3	49.8	38.4	49.8	40.4	265.5	13.2	191.5	52.7
-	-	174.8	27.2	55.0	35.0	55.0	36.1	285.5	14.7	192.5	51.2
-	-	190.3	28.4	119.3	32.5	119.3	33.2	291.5	13.8	213.5	43.1
-	-	-	-	125.8	31.1	125.8	34.3	309.5	15.6	218.5	48.9
-	-	-	-	143.8	32.5	143.8	34.1	315.5	17.9	331.5	25.1
-	-	-	-	148.5	28.3	148.5	31.8	334.1	13.6	340.2	27.1
-	-	-	-	166.8	28.1	166.8	32.1	338.9	14.3	356.0	31.5
-	-	-	-	170.3	30.2	170.3	33.0	357.6	17.0	364.0	34.3
-	-	-	-	176.5	34.2	176.5	38.0	361.8	15.3	382.0	30.7
-	-	-	-	188.8	28.7	188.8	36.6	411.1	12.7	386.0	31.2
-	-	-	-	193.8	26.6	193.8	33.6	417.2	10.7	453.0	31.2
-	-	-	-	199.3	28.5	199.3	34.2	435.8	13.4	457.0	32.4
-	-	-	-	286.8	23.5	286.8	29.8	440.8	12.5	477.0	34.8
-	-	-	-	291.3	25.4	291.3	29.0	460.4	13.2	483.0	34.5
-	-	-	-	309.8	24.8	309.8	34.2	466.2	9.9	501.0	25.2
-	-	-	-	315.8	26.1	315.8	30.1	484.6	10.9	507.0	23.0
-	-	-	-	333.8	27.7	333.8	30.4	507.1	14.3	525.6	21.2
-	-	-	-	338.3	27.7	338.3	33.4	513.1	12.1	530.4	22.7
-	-	-	-	342.3	28.6	342.3	34.9	579.9	11.5	549.1	19.6
-	-	-	-	357.8	31.5	357.8	36.6	583.5	12.6	553.3	18.4
-	-	-	-	362.3	28.4	362.3	34.7	604.2	10.1	627.3	18.6
-	-	-	-	382.3	28.4	382.3	29.5	611.2	11.2	632.3	16.6
-	-	-	-	454.3	16.6	454.3	-	628.9	19.9	651.9	17.2
-	-	-	-	459.3	15.8	459.3	25.2	633.2	10.5	657.7	17.3
-	-	-	-	478.3	17.4	478.3	22.6	652.9	10.4	676.1	14.0
-	-	-	-	-	-	510.3	26.1	658.9	11.8	698.6	10.6
-	-	-	-	-	-	623.3	16.9	681.5	14.0	704.6	11.3
-	-	-	-	-	-	630.3	14.3	748.0	11.7	771.4	11.9
-	-	-	-	-	-	654.3	13.3	755.0	10.8	775.0	11.9
-	-	-	-	-	-	670.9	13.0	771.6	10.5	795.7	10.7
-	-	-	-	-	-	694.9	13.3	778.8	12.4	802.7	11.5
-	-	-	-	-	-	-	-	796.7	11.7	820.4	18.0
-	-	-	-	-	-	-	-	802.2	11.4	824.7	13.9
-	-	-	-	-	-	-	-	821.1	12.9	844.4	10.3
-	-	-	-	-	-	-	-	826.9	14.6	850.4	11.0
-	-	-	-	-	-	-	-	845.1	10.2	873.0	9.4
-	-	-	-	-	-	-	-	849.5	12.6	939.5	10.2
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	946.5	11.9
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	963.1	10.2
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	970.3	10.9
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	988.2	8.5
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	993.7	8.6
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1012.6	9.1
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1018.4	9.3
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1036.6	9.0
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1041.0	9.4

Tableaux 1.c. Résultats de l'intensité électrique (mA) en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 10 g Pb²⁺/l (d.d.p=60 Volts)

Moyenne des valeurs de
Intensité Essais Pb[01]60

Temps(heures)	Moyenne de I(mA)
0.0	21.5
2.5	16.1
7.5	8.0
22.5	7.5
27.5	6.6
32.5	6.5
47.5	5.1
52.5	4.1
117.5	4.8
122.5	5.6
142.5	6.7
147.5	5.6
167.5	5.7
172.5	3.8
177.5	3.4
187.5	3.8
192.5	5.2
197.5	4.2
212.5	5.7
227.5	4.4
262.5	6.3
287.5	4.3
292.5	4.2
312.5	3.8
332.5	3.2
337.5	3.3
342.5	1.9
357.5	3.5
362.5	3.6
382.5	3.7
452.5	3.4
457.5	3.7
467.5	4.1
477.5	3.2
482.5	4.9
587.5	4.1
612.5	3.4
637.5	3.2
662.5	3.4
712.5	3.0
762.5	5.2
812.5	5.9
862.5	6.7
912.5	3.6
962.5	4.4

Moyenne des valeurs
de Intensité Essais Pb[1]60

Temps(heures)	Moyenne de I(mA)
0.0	95.1
1.3	68.6
3.8	49.7
7.5	14.6
22.5	6.1
27.5	6.7
32.5	8.5
42.5	23.3
47.5	19.1
52.5	16.5
57.5	15.2
67.5	8.8
72.5	11.8
77.5	11.2
137.5	8.6
142.5	7.5
147.5	6.8
162.5	8.6
167.5	7.4
172.5	7.2
192.5	6.9
202.5	4.1
212.5	3.9
217.5	6.6
222.5	3.5
237.5	7.9
242.5	6.8
262.5	5.9
287.5	5.7
312.5	4.2
332.5	4.1
357.5	4.1
362.5	3.8
382.5	3.5
387.5	3.6
407.5	5.1
417.5	7.7
437.5	6.1
462.5	4.4
477.5	3.4
482.5	3.4
512.5	4.3
562.5	6.7
587.5	3.7
612.5	5.0
637.5	4.8
662.5	3.7
712.5	3.7
762.5	4.2
812.5	4.1
862.5	2.8
962.5	3.7
962.5	3.7

Moyenne des valeurs de
l'Intensité Essais Pb[10]60

Temps(heures)	Moyenne de I(mA)
0.0	309.0
1.3	213.2
3.8	179.7
7.5	125.3
17.5	70.2
22.5	53.5
27.5	55.5
32.5	49.0
47.5	40.4
117.5	37.7
122.5	37.0
142.5	33.5
147.5	27.1
167.5	30.6
172.5	30.0
192.5	33.7
217.5	43.1
287.5	22.7
292.5	22.7
312.5	24.8
332.5	24.2
337.5	25.6
357.5	29.2
362.5	28.2
382.5	30.0
452.5	23.9
457.5	24.5
462.5	20.2
477.5	24.9
482.5	22.7
512.5	20.1
612.5	14.2
637.5	15.7
662.5	13.3
687.5	12.6
762.5	11.4
787.5	11.6
812.5	13.5
837.5	11.7
925.0	11.1
975.0	9.5

Tableaux 1.d. Valeurs moyennes des intensités électriques (mA) en fonction du temps pour des sables pollués avec du plomb avec une concentration de 0.1, 1 et 10 g de Pb²⁺/l (d.d.p= 60 volts)

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)										
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
0.00	7.03	7.33	7.37	7.32	7.08	7.08	7.67	7.63	7.62	7.60	7.95	7.95	0.213	0.213	0.210	0.224	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
4.75	10.15	8.90	11.14	10.57	11.08	11.08	6.00	5.74	10.61	10.86	11.02	11.02	0.313	0.281	0.132	0.270	0.296	0.296	0.296	0.296	0.296	0.296	0.296
23.75	11.13	11.04	10.75	10.70	11.76	11.76	9.50	9.70	5.90	9.70	11.19	11.19	0.378	0.229	0.127	0.106	0.812	0.812	0.812	0.812	0.812	0.812	0.812
51.75	4.07	10.07	11.29	11.30	11.90	11.90	6.52	6.87	6.05	6.11	10.34	10.34	0.054	0.024	0.365	0.335	0.982	0.982	0.982	0.982	0.982	0.982	0.982

Pb1[0-1]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)										
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
0.00	11.27	10.58	9.98	10.45	11.53	11.53	6.85	6.07	6.42	7.82	11.24	11.24	0.443	0.174	0.144	0.115	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
123.75	7.21	7.00	10.15	10.62	11.69	11.69	6.30	6.19	6.91	6.45	10.46	10.46	0.257	0.034	0.050	0.127	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040
171.75	4.86	4.31	7.35	10.14	11.68	11.68	7.70	8.40	7.86	9.13	10.40	10.40	0.356	0.052	0.017	0.034	0.723	0.723	0.723	0.723	0.723	0.723	0.723

Pb2[0-1]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)										
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
0.00	9.70	8.78	8.49	10.87	11.10	11.10	5.92	5.85	10.77	10.98	11.11	11.11	0.288	0.239	0.233	0.236	0.229	0.229	0.229	0.229	0.229	0.229	0.229
4.75	10.14	10.70	10.49	10.96	11.65	11.65	6.30	5.83	6.33	10.84	11.52	11.52	0.072	0.155	0.103	0.216	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983
23.75	11.28	10.66	10.40	11.18	12.09	12.09	6.05	6.03	6.21	9.30	11.54	11.54	0.020	0.109	0.085	0.380	1.520	1.520	1.520	1.520	1.520	1.520	1.520
123.75	7.29	5.60	6.50	11.00	11.30	11.30	-	8.99	7.54	9.49	10.56	10.56	0.081	0.056	0.013	0.047	0.347	0.347	0.347	0.347	0.347	0.347	0.347
147.75	6.81	5.62	5.88	10.32	11.52	11.52	6.69	9.75	8.74	9.56	10.30	10.30	0.077	0.069	0.048	0.081	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531
171.75	7.06	4.31	6.69	10.55	11.15	11.15	7.06	9.46	9.90	8.96	10.28	10.28	0.080	0.049	0.034	0.044	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282
193.75	7.71	4.91	6.44	9.75	10.59	10.59	5.43	10.41	7.08	8.52	9.73	9.73	0.030	0.048	0.054	0.028	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058
291.75	8.77	9.12	8.63	8.40	10.73	10.73	5.87	11.57	10.33	10.48	11.00	11.00	0.026	0.031	0.010	0.016	0.173	0.173	0.173	0.173	0.173	0.173	0.173
339.75	7.82	9.11	7.84	10.12	11.11	11.11	6.50	8.50	9.20	11.40	11.35	11.35	0.022	0.014	0.013	0.043	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161
387.75	8.55	7.90	9.45	11.40	11.50	11.50	6.80	7.40	10.20	10.19	11.52	11.52	0.037	0.012	0.014	0.211	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550
459.75	7.10	9.00	11.50	10.60	11.40	11.40	7.06	8.00	9.50	9.30	10.30	10.30	0.049	0.039	0.014	0.102	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555	0.555

Pb3[0-1]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)										
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
0.00	10.55	10.68	10.46	11.29	11.20	11.20	6.08	5.90	10.69	10.94	11.70	11.70	0.153	0.363	0.279	0.255	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288
4.75	10.26	11.19	11.24	11.42	11.85	11.85	6.40	5.96	5.98	10.93	11.42	11.42	0.124	0.425	0.485	0.346	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970
48.00	8.45	10.53	11.15	11.48	11.86	11.86	6.08	6.25	6.95	7.04	11.34	11.34	0.011	0.062	0.234	0.430	1.070	1.070	1.070	1.070	1.070	1.070	1.070
120.00	5.21	6.59	9.45	10.56	11.49	11.49	5.87	6.16	6.98	10.14	11.38	11.38	0.082	0.070	0.017	0.131	1.329	1.329	1.329	1.329	1.329	1.329	1.329
147.75	4.79	8.30	9.02	10.74	11.67	11.67	6.01	6.55	6.89	10.04	11.44	11.44	0.022	0.024	0.013	0.145	1.229	1.229	1.229	1.229	1.229	1.229	1.229
171.75	6.85	8.70	10.08	10.38	11.69	11.69	5.95	6.71	7.14	9.78	11.22	11.22	0.023	0.018	0.023	0.081	0.982	0.982	0.982	0.982	0.982	0.982	0.982
193.75	4.23	7.00	6.53	10.05	11.66	11.66	5.86	7.70	7.90	9.86	11.10	11.10	0.037	0.038	0.025	0.097	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
291.75	5.90	5.97	6.34	10.45	11.28	11.28	6.50	8.15	6.74	8.68	10.92	10.92	0.129	0.084	0.078	0.065	0.283	0.283	0.283	0.283	0.283	0.283	0.283
334.50	5.29	9.13	5.44	6.82	11.00	11.00	10.20	10.06	8.90	9.11	10.37	10.37	0.063	0.063	0.062	0.015	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195	0.195
382.50	5.80	7.40	9.10	7.00	10.90	10.90	9.39	9.96	9.20	9.54	10.29	10.29	0.085	0.055	0.048	0.027	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175
454.50	5.40	6.50	8.00	6.73	10.84	10.84	10.17	10.20	9.15	9.00	10.31	10.31	0.131	0.050	0.072	0.034	0.144	0.144	0.144	0.144	0.144	0.144	0.144
574.50	7.00	7.50	9.00	6.80	7.80	7.80	9.06	10.40	7.51	7.75	9.20	9.20	0.060	0.030	0.057	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
694.50	6.40	9.50	9.00	9.00	11.20	11.20	6.76	10.60	10.49	10.30	10.51	10.51	0.045	0.021	0.034	0.026	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042

Pb4[0-1]60

Temps (heures)	pH de l'eau Interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)											
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		-					
	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.00	10.95	9.64	8.07	8.27	10.55	8.27	5.92	7.69	8.03	7.64	11.08	11.08	0.292	0.275	0.298	0.286	0.238	0.238	0.292	0.275	0.298	0.286	0.238	
3.16	10.90	9.85	12.92	10.98	11.32	10.98	6.14	5.79	6.97	11.06	11.36	11.06	0.182	0.011	0.019	0.010	0.125	0.125	0.182	0.011	0.019	0.010	0.125	
144.00	9.09	9.20	9.07	6.84	10.80	10.80	10.10	10.80	8.81	8.95	10.36	10.36	0.059	0.013	0.059	0.032	0.290	0.290	0.059	0.013	0.059	0.032	0.290	
192.00	9.45	11.40	8.04	8.05	11.39	11.39	7.72	6.59	9.27	9.97	10.71	10.71	0.014	0.019	0.032	0.030	0.081	0.081	0.014	0.019	0.032	0.030	0.081	
264.00	10.14	9.70	8.36	13.01	11.15	13.01	7.60	6.45	8.65	8.02	7.18	7.18	0.009	0.023	0.013	0.007	0.094	0.094	0.009	0.023	0.013	0.007	0.094	
312.00	10.43	11.25	10.04	9.41	11.41	11.41	5.50	6.06	7.22	9.78	8.20	8.20	0.006	0.009	0.011	0.009	0.020	0.020	0.006	0.009	0.011	0.009	0.020	
360.00	9.84	10.07	8.83	10.17	11.61	11.61	6.02	6.71	6.48	9.74	9.45	9.45	0.095	0.021	0.005	0.005	0.012	0.012	0.095	0.021	0.005	0.005	0.012	
432.00	6.44	7.19	8.41	7.75	11.85	11.85	6.62	6.71	7.35	8.33	10.60	10.60	0.043	0.013	0.006	0.050	0.034	0.034	0.043	0.013	0.006	0.050	0.034	
480.00	8.45	7.95	6.95	7.99	10.12	10.12	5.62	5.47	7.90	10.55	10.92	10.92	0.065	0.007	0.007	0.005	0.088	0.088	0.065	0.007	0.007	0.005	0.088	
528.00	6.66	8.30	7.07	8.55	10.22	10.22	7.85	7.27	7.69	9.85	10.96	10.96	0.071	0.009	0.007	0.051	0.052	0.052	0.071	0.009	0.007	0.051	0.052	
600.00	8.92	8.64	8.80	9.96	10.61	10.61	8.28	8.82	10.00	9.06	10.89	10.89	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	
648.00	-	-	-	-	-	-	7.33	9.64	12.01	10.46	11.45	11.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
696.00	-	-	-	-	-	-	7.38	9.09	10.45	9.92	11.00	11.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
768.00	-	-	-	-	-	-	7.50	7.98	8.50	10.26	9.95	9.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
816.00	-	-	-	-	-	-	7.03	8.14	9.90	10.48	9.74	9.74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
864.00	-	-	-	-	-	-	6.50	6.46	6.94	9.27	10.63	10.63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Pb5[0.1]60

Temps (heures)	pH de l'eau Interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)											
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		-		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20.00	10.26	10.25	9.30	10.90	11.60	11.60	7.47	5.88	6.20	10.58	11.46	11.46	0.238	0.198	0.111	0.111	0.814	0.814	0.238	0.198	0.111	0.111	0.814	
116.00	7.85	10.79	9.85	9.74	11.16	11.16	6.81	8.80	6.44	6.19	6.87	6.87	0.068	0.017	0.014	0.010	0.192	0.192	0.068	0.017	0.014	0.010	0.192	
188.00	9.90	9.54	7.69	7.66	11.10	11.10	5.28	8.57	9.00	7.79	6.71	6.71	0.046	0.074	0.043	0.038	0.229	0.229	0.046	0.074	0.043	0.038	0.229	
212.00	6.16	7.58	7.60	7.91	11.27	11.27	4.90	9.12	8.45	9.05	8.76	8.76	0.032	0.008	0.005	0.005	0.633	0.633	0.032	0.008	0.005	0.005	0.633	
332.00	6.75	9.62	9.93	11.20	11.21	11.21	7.57	9.00	10.16	10.56	10.67	10.67	0.005	0.021	0.073	0.045	0.271	0.271	0.005	0.021	0.073	0.045	0.271	
360.00	9.07	8.74	10.86	10.96	11.17	11.17	5.53	9.20	8.49	10.09	7.89	7.89	0.007	0.018	0.039	0.019	0.285	0.285	0.007	0.018	0.039	0.019	0.285	
452.00	9.12	9.76	9.90	10.52	11.40	11.40	7.50	9.56	8.35	10.02	10.19	10.19	0.012	0.006	0.007	0.004	0.319	0.319	0.012	0.006	0.007	0.004	0.319	
500.00	5.74	7.39	6.80	7.09	11.49	11.49	5.54	6.80	8.20	10.08	11.21	11.21	0.265	0.018	0.011	0.004	0.622	0.622	0.265	0.018	0.011	0.004	0.622	
548.00	8.03	8.68	10.45	11.35	10.85	10.85	7.06	8.72	8.45	9.62	10.75	10.75	0.008	0.007	0.003	0.003	0.202	0.202	0.008	0.007	0.003	0.003	0.202	
620.00	7.86	11.20	11.11	13.30	11.28	11.28	8.81	9.77	10.04	11.03	10.85	10.85	0.007	0.363	0.462	0.040	0.300	0.300	0.007	0.363	0.462	0.040	0.300	
668.00	7.48	12.80	11.26	12.86	11.24	11.24	9.60	11.02	10.97	11.13	11.09	11.09	0.007	0.009	0.192	0.036	0.450	0.450	0.007	0.009	0.192	0.036	0.450	
716.00	5.61	8.83	9.66	10.75	11.11	11.11	9.49	10.56	11.04	10.35	11.15	11.15	0.004	0.007	0.017	0.021	0.256	0.256	0.004	0.007	0.017	0.021	0.256	
768.00	9.25	11.27	12.70	11.60	11.48	11.48	10.27	10.70	11.26	11.71	10.30	10.30	0.003	0.004	0.005	0.003	0.480	0.480	0.003	0.004	0.005	0.003	0.480	
836.00	10.22	11.54	12.92	12.92	11.40	11.40	8.60	10.20	11.01	11.82	10.14	10.14	0.008	0.014	0.019	0.005	0.358	0.358	0.008	0.014	0.019	0.005	0.358	
864.00	9.09	11.23	6.92	11.87	11.24	11.24	5.83	9.32	11.05	11.85	10.06	10.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
956.00	9.91	8.88	8.96	9.80	11.40	11.40	8.12	9.12	9.89	11.58	10.44	10.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1004.00	10.10	8.50	7.31	8.12	11.56	11.56	8.67	9.22	8.83	9.93	10.34	10.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1052.00	10.37	8.68	7.83	11.26	11.20	11.20	7.72	8.12	7.57	9.70	9.99	9.99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Pb6[0.1]60

Tableaux 2.a. Résultats des mesures de pH et de conductivité électrique en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 0.1 g Pb²⁺ / (pH initial de la solution de Pb(NO₃)₂ à 0.1 g Pb²⁺/l; 5.13 et conductivité électrique initiale: 0.127 mS/cm; d.d.p=60 Volts)

Temps (heures)	pH de l'eau Interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)															
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		-					
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25		
0.00	5.71	5.86	5.96	5.88	5.82		5.32	5.14	5.3	5.05	5.11	1.149	1.148	1.174	1.172	1.176												
3.00	5.20	5.00	5.21	7.70	9.29		5.26	4.99	4.88	11.12	11.47	1.783	1.625	1.524	1.291	0.314												
7.00	4.20	7.24	8.75	8.89	12.88		5.18	8.80	11.23	11.42	11.48	2.080	0.876	0.377	0.260	0.231												
24.00	4.73	7.04	6.29	5.45	6.86		5.18	9.93	11.96	11.36	11.00	2.010	0.202	0.178	0.211	0.145												
28.75	4.62	7.50	7.65	6.45	6.66		5.03	10.53	10.71	10.20	10.66	1.530	0.231	0.226	0.239	0.189												

Pb1(1)60

Temps (heures)	pH de l'eau Interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)															
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		-					
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25		
0.00	4.72	6.06	6.46	5.60	5.96		5.10	5.68	5.13	5.10	10.26	1.134	1.009	1.008	0.963	0.710												
0.75	5.58	5.28	5.80	5.40	9.02		5.52	5.36	5.44	10.46	11.05	1.452	1.258	1.082	0.485	0.504												
8.00	5.31	5.68	8.21	9.71	11.19		5.97	6.10	9.50	11.16	11.14	1.257	1.286	0.173	0.388	0.534												
24.00	5.21	5.83	9.99	10.88	9.75		6.15	6.28	8.10	11.09	11.23	0.969	0.012	0.010	0.088	0.258												
48.00	5.77	5.45	9.05	10.91	11.04		5.99	6.12	7.38	10.66	11.22	0.631	0.024	0.021	0.042	0.357												
71.50	4.94	4.74	7.06	9.31	10.99		5.75	5.75	7.35	10.80	11.22	0.548	0.166	0.021	0.041	0.516												
79.00	5.58	5.41	8.38	10.65	10.78		5.60	5.69	7.40	10.45	11.16	0.774	0.369	0.017	0.040	0.525												
96.50	5.54	6.31	11.90	9.40	10.78		5.64	5.79	7.40	10.45	11.16	0.588	0.478	0.019	0.051	0.501												

Pb2(1)60

Temps (heures)	pH de l'eau Interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)															
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		-					
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25		
0.00	5.06	5.35	7.73	6.97	6.01		5.15	5.60	11.39	11.04	11.30	2.410	0.065	0.095	0.130	0.095												
24.00	4.78	6.69	6.62	6.24	6.58		6.37	10.38	10.53	10.32	10.63	0.881	0.254	0.381	0.597	0.418												
144.00	4.86	6.81	7.25	6.42	8.40		6.33	10.50	10.42	11.02	10.55	0.367	0.403	0.437	0.289													

Pb3(1)60

Temps (heures)	pH de l'eau Interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)															
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		-					
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25		
0.00	5.40	5.58	5.95	5.69	5.82		5.14	4.97	4.87	4.85	4.85	1.175	1.147	1.120	1.139	1.158												
3.00	4.68	5.24	5.06	5.17	7.13		5.03	4.94	4.81	10.93	11.27	1.850	1.627	1.900	1.369	0.581												
7.00	4.40	5.17	5.91	5.29	9.47		5.27	4.95	10.96	11.20	11.34	2.040	1.220	0.406	0.560	0.381												
24.00	4.97	5.38	6.35	5.98	4.89		5.28	7.23	11.16	11.51	11.51	1.970	0.193	0.094	0.115	0.122												
28.75	4.76	5.01	6.41	5.27	4.71		5.13	9.00	11.02	10.74	10.83	1.675	0.192	0.091	0.156	0.163												
48.00	4.35	5.28	5.33	4.76	5.20		5.06	8.50	10.33	10.43	10.98	1.890	0.448	0.614	0.797	0.683												
71.50	4.62	4.92	6.71	5.92	5.49		5.19	10.65	10.84	10.41	10.41	1.530	0.364	0.631	0.740	0.539												
143.75	4.84	9.10	9.89	9.58	9.67		4.24	5.71	10.36	10.64	11.63	1.497	0.027	0.040	0.030	0.080												
167.50	5.04	9.02	9.77	10.11	9.61		3.76	5.53	8.66	10.64	11.52	1.114	0.021	0.045	0.033	0.067												
191.50	4.94	5.99	8.95	6.38	9.16		3.75	5.29	5.68	10.53	11.33	1.160	0.014	0.050	0.038	0.064												
369.50	5.83	6.67	9.86	8.35	10.25		3.80	4.70	9.10	10.91	11.20	1.165	0.010	0.026	0.024	0.041												
407.50	6.11	6.07	9.32	8.51	10.33		3.70	5.10	8.88	10.50	10.97	1.234	0.013	0.018	0.028	0.101												
479.50	-	-	-	-	-		3.38	5.17	5.57	10.21	10.07	-	-	-	-	-												

Pb4(1)60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)					
	+		-		-		+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
0.00	5.36	5.80	5.80	5.61	5.66	-	4.96	4.90	4.79	4.71	4.70	-	1.145	1.065	1.102	1.117	1.101	
3.00	6.34	5.83	5.90	5.99	8.58	-	5.04	4.84	4.70	10.61	11.25	-	1.548	1.515	1.516	1.115	0.244	
7.00	4.76	5.35	8.78	7.51	11.69	-	5.21	5.00	10.76	11.06	11.34	-	1.731	1.373	0.603	0.323	0.290	
24.00	5.66	7.60	8.75	6.08	9.11	-	5.49	6.25	11.04	11.35	11.55	-	1.031	0.074	0.159	0.291	0.211	
28.75	5.70	7.56	8.94	6.05	6.44	-	5.39	8.37	10.98	11.26	11.45	-	0.767	0.065	0.089	0.278	0.235	
48.00	5.27	5.97	7.54	5.11	4.98	-	5.03	8.10	11.08	10.99	11.40	-	1.530	0.063	0.130	0.434	0.603	
71.50	4.38	5.80	6.24	5.40	5.32	-	4.70	6.92	10.34	10.43	10.61	-	1.123	0.100	0.264	0.544	0.553	
143.75	4.88	5.80	8.80	6.04	5.20	-	4.17	5.40	10.42	11.02	10.71	-	1.805	0.080	0.096	0.322	0.669	
167.50	5.31	6.50	9.96	6.58	5.42	-	3.69	6.05	10.51	11.52	11.42	-	1.660	0.101	0.080	0.235	0.435	
191.50	4.40	4.61	8.31	6.77	9.77	-	3.80	4.94	10.32	10.88	11.52	-	2.230	0.102	0.061	0.015	0.093	
311.50	4.68	7.47	10.08	12.12	10.81	-	3.42	5.28	10.13	10.85	11.81	-	2.230	0.007	0.030	0.044	0.240	
359.50	4.64	8.00	9.80	12.88	10.60	-	3.37	5.20	9.75	10.65	11.63	-	1.735	0.009	0.032	0.044	0.356	
407.50	4.83	6.77	6.42	10.59	11.20	-	3.61	4.85	9.20	10.72	11.71	-	1.820	0.065	0.030	0.058	-	
599.50	-	-	-	-	-	-	3.16	4.15	6.80	10.72	11.01	-	0.111	0.047	0.025	0.044	0.416	
	-	-	-	-	-	-	3.31	5.24	5.90	10.74	11.40	-	-	-	-	-	-	

Pbs[1]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)					
	+		-		-		+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
0.00	6.33	6.16	6.20	6.11	7.70	-	5.52	5.52	5.44	5.34	11.83	-	1.403	1.332	1.417	1.346	1.044	
2.00	6.22	6.49	6.73	10.63	11.40	-	5.24	6.14	10.68	10.74	10.85	-	1.928	1.008	0.071	0.078	0.269	
24.00	3.77	4.46	9.24	9.80	11.25	-	3.92	5.21	9.96	9.75	11.07	-	2.450	0.589	0.008	0.012	0.690	
144.00	3.76	4.62	8.01	9.10	11.98	-	3.60	5.45	7.20	9.85	11.82	-	1.974	0.350	0.019	0.074	1.665	
264.00	3.70	4.52	10.75	11.72	11.60	-	5.20	6.11	5.99	7.68	11.30	-	1.627	0.409	0.027	0.012	1.399	
312.00	3.74	4.76	12.35	11.37	11.82	-	4.44	5.64	5.84	8.50	10.95	-	2.110	0.876	0.060	0.028	1.030	
360.00	4.27	5.14	6.56	10.54	11.76	-	5.05	6.31	5.82	7.03	11.24	-	1.961	0.380	0.028	0.007	0.830	
432.00	4.50	5.50	9.54	12.03	11.26	-	4.96	6.09	6.02	7.00	10.96	-	2.190	0.320	0.018	0.006	0.280	
480.00	4.30	4.62	8.40	10.60	11.80	-	5.05	7.88	7.28	8.35	11.37	-	2.380	1.041	0.023	0.005	0.852	
528.00	4.04	4.64	10.20	10.80	11.20	-	4.75	7.11	7.36	7.90	10.68	-	2.910	1.617	0.027	0.005	0.264	
600.00	4.37	4.63	5.91	5.93	9.50	-	4.41	5.80	6.50	7.50	10.37	-	1.680	0.820	0.483	0.014	0.073	
648.00	3.94	4.46	6.84	10.80	11.28	-	5.16	5.92	6.21	6.88	10.57	-	2.290	1.447	0.297	0.020	0.204	
696.00	4.02	4.66	7.22	8.95	11.17	-	4.70	5.70	6.32	7.83	9.81	-	2.710	1.409	0.303	0.028	0.480	
768.00	3.92	5.62	7.19	9.02	10.94	-	4.75	6.82	6.43	5.50	11.83	-	2.200	1.500	0.405	0.032	0.960	
816.00	4.10	8.59	11.68	12.45	11.18	-	4.73	6.10	6.65	8.46	11.19	-	2.760	0.216	0.018	0.013	0.237	
864.00	5.20	8.40	10.13	9.15	11.05	-	4.96	6.49	7.10	8.74	11.63	-	2.460	0.021	0.016	0.016	0.128	

Pbs[1]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)					
	+		-		-		+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.00	5.20	5.34	5.00	5.48	7.35	7.35	5.05	4.79	4.82	9.69	11.44	11.44	1.649	1.579	1.601	1.395	0.405	
24.00	5.66	5.10	7.27	7.62	10.69	10.69	5.12	8.07	11.20	11.10	11.42	11.42	1.197	0.770	0.081	0.067	0.100	
48.00	5.21	5.52	7.23	6.35	5.97	5.97	4.64	8.51	9.92	9.96	9.70	9.70	3.920	0.887	0.387	0.544	0.301	
144.00	4.37	5.69	6.70	9.64	12.20	12.20	6.00	10.56	8.55	11.02	10.88	10.88	1.127	0.583	0.475	0.288	0.202	
216.00	4.83	5.80	7.65	8.62	12.30	12.30	6.17	10.41	6.77	10.81	10.87	10.87	1.230	0.338	0.281	0.289	1.880	
300.00	4.75	5.53	7.26	8.15	12.91	12.91	5.73	10.56	-	11.00	10.79	10.79	0.762	0.207	0.088	0.134	1.800	
360.00	5.21	6.30	9.05	13.11	11.72	11.72	6.40	7.25	7.30	9.85	10.38	10.38	0.202	0.024	0.014	0.096	1.799	
408.00	5.97	7.35	9.71	13.25	11.99	11.99	6.45	7.30	6.77	11.15	11.21	11.21	0.300	0.020	0.016	0.059	1.468	
480.00	6.17	5.90	12.90	12.10	11.95	11.95	7.03	9.02	6.37	10.45	11.60	11.60	0.279	0.020	0.009	0.109	2.100	
528.00	6.23	9.14	13.20	11.62	12.47	12.47	7.19	8.76	6.97	10.72	11.83	11.83	0.260	0.016	0.013	0.126	1.560	
576.00	7.14	9.73	13.47	11.35	12.18	12.18	6.93	8.88	6.57	10.72	11.88	11.88	-	0.009	0.024	0.209	2.040	
648.00	6.07	9.88	10.96	11.30	12.02	12.02	6.50	9.59	6.92	10.90	11.56	11.56	-	0.011	0.027	0.260	2.330	
696.00	6.63	9.15	12.25	11.85	12.24	12.24	6.74	8.80	6.99	10.89	11.98	11.98	-	0.012	0.013	0.840	2.350	
744.00	5.77	9.58	13.04	11.83	12.25	12.25	6.12	8.59	5.89	11.30	11.81	11.81	-	0.011	0.021	1.035	2.150	
816.00	6.06	8.30	10.65	11.16	12.00	12.00	6.30	7.91	9.03	11.60	12.02	12.02	-	0.009	0.012	0.490	1.495	
864.00	5.92	9.76	9.55	12.22	11.96	11.96	6.66	6.35	8.43	12.46	12.48	12.48	-	0.015	0.035	-	2.100	
912.00	5.95	10.65	9.53	11.50	12.13	12.13	5.45	6.67	7.22	11.75	11.99	11.99	-	0.017	0.038	0.933	2.320	
984.00	5.86	9.01	13.01	11.69	11.92	11.92	6.21	6.64	7.35	11.73	12.10	12.10	-	0.021	0.043	0.780	2.650	
1032.00	7.24	8.40	8.41	11.37	11.68	11.68	5.73	6.48	8.01	11.22	11.59	11.59	-	0.008	0.032	0.543	0.766	
1080.00	6.10	9.33	11.04	12.10	11.91	11.91	6.55	5.64	6.30	12.10	12.40	12.40	-	0.017	0.076	0.615	0.991	

Pb71160

Tableaux 2.b. Résultats des mesures de pH et de conductivité électrique en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l (pH initial de la solution de Pb(NO₃)₂ à 1 g Pb²⁺/l: 4.98 et conductivité électrique initiale: 1.090 mS/cm; d.d.p=60 volts)

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)											
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	-	
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.75	5.22	5.27	5.63	7.96	10.06	-	4.80	4.37	4.45	9.90	10.87	8.300	8.900	6.880	2.850	0.308	7.750	6.650	5.080	0.170	0.079	-	-	-
15.00	4.32	4.30	4.99	8.70	11.30	-	4.77	4.56	9.40	9.78	10.87	7.460	6.660	4.440	8.600	0.040	4.67	4.66	9.94	10.48	-	-	-	-
21.25	4.15	4.23	5.03	7.33	9.52	-	4.67	4.66	4.66	9.94	10.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Pb1[10]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)											
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	-	
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.83	5.12	5.58	5.47	5.43	6.25	-	4.45	4.37	4.29	4.21	11.59	9.620	8.820	6.150	1.370	-	6.820	3.820	3.150	0.091	0.047	-	-	-
21.33	4.54	5.84	5.62	9.78	9.29	-	4.48	4.57	4.95	7.09	10.74	8.470	8.640	3.900	0.043	-	4.50	4.37	4.98	10.11	11.24	-	-	-
47.33	3.75	3.87	6.30	11.01	7.31	-	4.50	4.37	4.98	10.11	11.24	9.480	9.890	0.018	0.054	-	4.50	4.29	4.80	10.20	11.41	-	-	-
95.33	3.88	3.64	-	13.00	10.61	-	4.50	4.29	4.80	10.20	11.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Pb2[10]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)											
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	-	
0.00	5.48	5.47	5.50	5.47	5.49	-	4.66	4.62	4.55	4.56	4.51	7.680	7.620	7.650	7.600	7.600	9.370	8.780	7.870	3.370	0.449	-	-	-
5.25	4.10	5.50	5.65	6.38	9.53	-	4.60	4.50	4.43	9.90	10.61	9.370	8.780	7.870	3.370	0.449	7.430	5.240	3.110	2.100	0.107	-	-	-
24.50	4.91	5.24	6.55	8.67	10.05	-	4.84	4.69	9.41	10.29	10.53	8.980	6.910	5.580	0.130	0.054	4.72	4.70	-	-	-	-	-	-
47.50	4.81	4.73	5.23	9.60	10.80	-	4.72	4.70	-	10.54	10.61	6.670	10.130	2.880	0.180	0.061	4.38	4.14	4.88	11.21	11.24	-	-	-
120.00	4.66	4.23	6.26	9.50	8.90	-	4.38	4.34	4.60	10.73	11.05	6.000	12.840	0.800	0.020	0.048	4.34	3.80	4.60	10.73	11.05	-	-	-
144.00	3.64	3.84	5.70	10.03	9.90	-	4.16	3.73	7.50	10.93	10.31	4.850	7.330	1.800	0.034	0.058	4.34	3.96	4.81	10.20	10.05	-	-	-
189.50	4.05	3.75	6.50	9.80	10.13	-	4.16	3.73	7.50	10.93	10.31	4.850	7.330	1.800	0.034	0.058	4.34	3.96	4.81	10.20	10.05	-	-	-
333.50	-	4.68	-	-	9.74	-	4.34	3.96	4.81	10.20	10.05	7.170	11.380	1.121	0.035	0.061	4.50	4.20	4.51	9.84	9.86	-	-	-
381.50	-	4.70	-	-	7.80	-	4.50	4.20	4.51	9.84	9.86	-	-	-	-	-	4.160	-	-	-	-	-	-	-
370.17	-	-	-	-	-	-	4.54	4.27	5.89	10.75	10.65	-	-	-	-	-	7.200	-	-	-	-	-	-	-

Pb3[10]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)											
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	-	
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.25	4.39	5.38	5.61	6.09	9.33	-	4.49	4.47	4.57	4.90	10.82	9.320	8.690	8.610	4.260	0.193	4.63	5.01	4.88	9.32	10.68	-	-	-
24.50	4.89	5.31	6.08	6.75	8.15	-	4.63	4.38	4.50	6.50	10.49	10.000	6.470	6.730	0.077	0.037	4.58	4.38	4.50	6.50	10.49	-	-	-
47.50	4.84	5.20	4.53	6.56	7.55	-	4.58	4.38	4.50	6.50	10.49	10.410	6.730	0.077	0.037	0.037	4.58	4.00	4.83	10.49	10.85	-	-	-
120.00	4.89	4.33	6.50	8.00	7.56	-	4.23	3.74	4.66	10.44	10.65	6.670	8.350	0.056	0.043	0.043	4.23	3.74	4.66	10.44	10.65	-	-	-
144.00	3.97	4.14	5.69	8.90	9.53	-	4.14	3.71	4.74	10.13	10.79	7.290	7.750	2.300	0.035	0.042	4.14	3.71	4.74	10.13	10.79	-	-	-
190.50	3.81	3.80	6.00	8.00	8.00	-	4.22	3.93	4.55	9.69	10.60	3.800	-	-	-	-	4.22	3.93	4.55	9.69	10.60	-	-	-
286.50	5.39	4.72	-	-	9.60	-	4.25	3.87	4.70	10.60	11.07	8.280	-	-	-	-	4.25	3.87	4.70	10.60	11.07	-	-	-
334.50	-	4.54	-	-	9.03	-	4.27	3.83	4.99	10.06	10.70	-	-	-	-	-	4.27	3.83	4.99	10.06	10.70	-	-	-
382.50	-	-	-	-	9.40	-	4.08	3.44	4.58	10.20	9.95	-	-	-	-	-	4.08	3.44	4.58	10.20	9.95	-	-	-
454.50	-	-	-	-	-	-	4.40	4.10	5.01	6.51	9.80	-	-	-	-	-	4.40	4.10	5.01	6.51	9.80	-	-	-
574.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Pb4[10]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol					
	+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2.00	5.07	5.81	5.69	5.61	8.64	8.64	4.51	4.45	4.35	4.30	11.96	
24.00	4.32	4.05	5.96	8.91	10.63	10.63	4.48	4.63	4.85	5.18	10.12	
144.00	4.82	4.57	5.37	-	-	-	4.44	4.20	4.23	5.85	9.43	
192.00	-	-	-	-	-	-	4.44	4.22	4.45	7.63	9.28	
264.00	-	-	-	-	-	-	4.51	4.40	4.42	6.97	9.18	
312.00	-	-	-	-	-	-	4.71	4.60	4.61	8.99	11.79	
360.00	-	-	-	-	-	-	5.07	4.83	4.87	6.08	11.16	
432.00	-	-	-	-	-	-	5.61	5.38	5.35	6.93	7.12	
480.00	-	-	-	-	-	-	6.08	5.54	5.75	7.39	10.07	
528.00	-	-	-	-	-	-	6.16	5.63	5.55	5.30	7.35	
600.00	-	-	-	-	-	-	6.33	5.70	5.72	8.62	6.25	
648.00	-	-	-	-	-	-	6.52	5.50	5.50	5.95	10.77	
696.00	-	-	-	-	-	-	5.89	5.50	5.40	9.16	9.73	
768.00	-	-	-	-	-	-	5.32	5.10	4.90	8.50	10.32	
816.00	-	-	-	-	-	-	5.43	5.03	5.00	5.84	8.42	
864.00	-	-	-	-	-	-	5.04	4.89	4.88	5.69	7.13	

Pb5[10]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol					
	+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15.20	20-25	
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
20.00	5.08	4.53	4.60	6.20	-	-	4.66	4.45	5.10	10.30	10.80	
116.00	3.44	3.10	3.94	9.12	11.05	11.05	4.50	4.26	4.45	11.20	8.52	
188.00	3.87	3.18	4.34	10.04	10.04	10.04	4.24	4.34	4.74	5.78	9.42	
212.00	3.84	3.70	4.15	11.05	12.25	12.25	4.09	4.30	4.70	5.14	8.52	
332.00	3.38	3.18	4.09	5.76	9.90	9.90	4.45	4.47	4.70	9.30	8.13	
380.00	4.11	3.47	4.35	10.15	10.70	10.70	4.55	4.35	4.63	7.69	8.52	
452.00	4.36	4.22	4.57	6.64	10.63	10.63	4.25	4.47	4.98	9.69	9.20	
500.00	3.80	3.91	4.60	7.65	9.66	9.66	4.42	4.71	5.30	7.14	8.70	
548.00	3.85	3.68	4.87	9.35	11.25	11.25	4.75	4.57	5.35	8.78	8.93	
668.00	6.03	5.79	6.36	9.25	-	-	5.51	5.26	5.32	6.30	9.75	
716.00	5.54	5.38	6.29	7.90	-	-	5.52	5.23	5.56	7.27	10.20	
788.00	6.09	5.91	6.20	7.30	-	-	5.55	5.28	5.63	8.20	10.21	
836.00	5.79	5.56	5.40	6.58	-	-	5.40	5.67	6.05	9.23	10.73	
894.00	5.65	5.68	5.27	7.10	-	-	5.08	5.41	5.58	9.70	10.68	
956.00	5.63	5.56	5.30	7.18	-	-	5.20	5.03	5.18	9.49	10.30	
1004.00	5.35	5.07	4.61	5.30	-	-	5.63	5.45	5.47	6.60	11.20	
1052.00	5.81	5.61	5.22	4.78	-	-	5.25	5.38	6.06	9.36	11.79	

Pb6[10]60

Tableaux 2.c. Résultats des mesures de pH et de conductivité électrique en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 10 g Pb²⁺/l (pH initial de la solution de Pb(NO3)₂ à 10 g Pb²⁺/l; 4.63g conductivité électrique initiale: 8 mS/cm; d.d.p=60 volts)

Temps (h)	pH moyen dans le liquide					pH moyen dans le sol des Essais Pb[0]160					Conductivité moyenne (mS/cm) dans le liquide				
	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)
0	7.03	7.33	7.37	7.32	7.08	7.67	7.63	7.62	7.60	7.95	0.257	0.240	0.247	0.248	0.239
5	10.45	9.57	10.21	10.39	11.05	6.01	6.19	9.41	10.29	11.25	0.216	0.291	0.200	0.221	0.299
25	10.61	10.75	10.76	10.88	11.67	7.30	6.68	6.16	9.97	11.36	0.220	0.202	0.153	0.174	0.849
45	7.93	10.42	10.94	11.32	11.95	6.21	6.38	6.40	7.48	11.07	0.028	0.065	0.228	0.381	1.190
115	6.89	7.49	8.96	10.48	11.41	7.25	7.53	7.46	8.06	9.81	0.122	0.044	0.023	0.078	0.727
145	6.89	7.70	7.99	9.30	11.33	7.60	9.03	8.14	9.51	10.68	0.107	0.036	0.026	0.074	0.628
175	7.16	6.71	7.95	9.68	11.43	6.50	8.28	8.36	8.91	9.65	0.153	0.039	0.029	0.053	0.662
195	6.89	7.72	7.15	8.94	11.22	5.97	8.45	8.17	9.35	10.07	0.039	0.056	0.037	0.050	0.463
300	8.36	8.78	8.33	9.42	11.14	5.95	8.59	8.09	9.64	10.04	0.070	0.057	0.044	0.040	0.228
335	6.62	9.28	7.73	9.38	11.10	8.09	9.18	9.42	10.35	10.79	0.040	0.032	0.049	0.034	0.209
385	7.80	8.01	9.80	9.78	11.19	7.24	8.85	9.29	9.94	9.90	0.043	0.028	0.033	0.080	0.336
435	7.01	8.11	9.45	8.90	11.37	8.24	9.25	9.00	9.44	10.26	0.377	0.036	0.030	0.046	0.237
525	6.20	7.85	6.94	7.82	10.56	6.70	7.04	7.95	9.97	11.09	0.168	0.013	0.009	0.027	0.337
575	8.48	8.66	9.63	10.66	10.73	7.67	8.77	9.23	9.34	10.87	0.005	0.005	0.003	0.003	0.102
625	7.66	11.20	11.11	13.30	11.28	8.07	9.71	11.03	10.75	11.15	0.007	0.363	0.462	0.040	0.300
675	7.48	12.80	11.28	12.86	11.24	8.49	10.06	10.71	10.53	11.05	0.007	0.009	0.192	0.036	0.450
775	9.25	11.27	12.70	11.60	11.48	8.89	9.34	9.88	10.99	10.13	0.003	0.004	0.005	0.003	0.480
825	10.22	11.54	12.92	12.92	11.40	7.82	9.17	10.46	11.15	9.94	0.008	0.014	0.019	0.005	0.358
884	9.09	11.23	6.92	11.87	11.24	6.17	7.89	9.00	10.56	10.35	-	-	-	-	-
956	9.91	8.88	8.96	9.80	11.40	8.12	9.12	9.89	11.58	10.44	-	-	-	-	-

Temps (h)	pH moyen dans le liquide					pH moyen dans le sol des Essais Pb[1]60					Conductivité moyenne (mS/cm) dans le liquide				
	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)
0	5.49	5.75	5.90	5.73	5.77	5.14	5.00	4.93	4.87	4.89	1.156	1.120	1.132	1.143	1.145
5	5.16	5.67	6.48	6.62	9.11	5.29	5.54	7.06	9.83	11.26	1.631	1.335	1.046	0.864	0.476
25	4.75	5.75	6.84	6.44	7.05	4.80	7.18	9.66	9.94	10.05	1.308	0.274	0.100	0.152	0.168
45	5.15	5.56	7.29	6.78	6.80	5.18	7.81	9.67	10.51	10.83	1.993	0.356	0.288	0.454	0.486
75	4.88	5.22	7.10	7.82	8.15	5.31	6.12	8.94	10.63	10.85	0.994	0.250	0.233	0.341	0.533
145	4.53	6.35	8.25	8.26	8.96	4.94	7.45	9.96	10.55	10.98	1.552	0.307	0.200	0.250	0.412
195	4.49	5.51	8.13	7.67	9.63	4.37	6.55	8.41	10.57	11.31	1.672	0.175	0.046	0.022	0.499
315	4.21	6.12	11.22	11.75	11.32	3.93	5.46	7.99	9.68	11.38	2.170	0.442	0.045	0.036	0.635
365	4.99	6.53	8.82	11.22	11.08	4.66	5.87	7.99	9.61	11.11	1.263	0.106	0.025	0.043	0.757
405	5.64	6.73	8.48	10.78	11.17	4.59	5.75	8.28	10.79	11.30	1.118	0.033	0.021	0.048	0.523
435	5.24	5.26	10.65	11.35	11.88	4.66	6.50	6.51	9.93	11.01	0.923	0.369	0.019	0.053	1.123
485	5.14	6.89	11.70	11.21	11.84	5.97	7.94	7.17	9.31	11.26	1.585	0.817	0.020	0.065	-
525	5.76	7.18	9.69	8.64	10.84	5.67	7.34	6.54	9.11	11.13	-	0.415	0.254	0.112	-
575	5.01	7.17	8.90	11.05	11.65	5.83	7.76	6.57	8.89	11.07	-	0.729	0.162	0.140	-
625	5.33	6.91	9.74	10.40	11.71	5.72	7.25	6.36	9.36	10.90	-	0.711	0.158	0.434	-
675	4.85	7.60	10.11	10.43	11.60	5.44	7.71	6.16	8.40	11.82	-	0.755	0.213	0.534	-
775	5.08	8.45	11.16	11.81	11.59	5.52	7.01	7.84	10.03	11.61	-	0.112	0.015	0.252	-
825	5.56	9.08	9.84	10.69	11.51	5.81	6.42	7.77	10.60	12.06	-	0.018	0.026	0.016	-
875	5.95	10.65	9.53	11.50	12.13	5.45	6.67	7.22	11.75	11.99	-	0.009	0.019	0.467	-

Tableaux 2.d. Valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique en fonction du temps pour des sables pollués avec du plomb avec une concentration de 0.1 et 1 de Pb²⁺/l (d.d.p= 60 volts)

pH moyen dans le liquide										pH moyen dans le sol des Essais Pb[10]60										Conductivité moyenne (mS/cm) dans le liquide													
pH moyen dans le liquide		zone 2		zone 3		zone 4		zone 5(-)		Temps (h)		Zone 1(+)		zone 2		zone 3		zone 4		zone 5(-)		Temps (h)		Zone 1(+)		zone 2		zone 3		zone 4		zone 5(-)	
0	5.48	5.47	5.50	5.47	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	0	4.66	4.62	4.55	4.56	4.51	7.680	7.620	7.650	7.600	7.600	0	4.66	4.62	4.55	4.56	4.51	7.680	7.620	7.650	7.600	7.600		
7.5	4.78	5.50	5.61	6.29	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	7.5	3.65	4.43	4.41	6.64	11.17	9.150	8.790	8.080	4.150	0.580	20	4.60	4.78	5.54	8.04	9.82	5.960	6.740	4.090	2.940	0.063		
115	4.33	3.85	5.56	8.87	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	115	4.48	4.13	4.72	10.96	10.20	8.950	10.140	2.940	0.081	0.050	145	4.14	4.18	5.58	9.46	9.71	6.330	10.590	1.760	0.038	0.045		
180	3.91	3.57	5.61	8.97	9.39	9.39	9.39	9.39	9.39	180	4.24	4.00	5.35	8.61	9.95	6.070	7.540	2.050	0.034	0.050	320	4.36	4.05	4.48	8.33	9.89	7.170	9.830	1.120	0.035	0.087		
320	3.38	4.13	4.09	5.76	9.55	9.55	9.55	9.55	9.55	320	4.43	4.22	4.70	9.77	10.26	-	-	-	-	-	370	4.11	4.08	4.35	-	9.30	-	-	-	-	-		
440	4.36	4.22	4.57	6.64	10.63	10.63	10.63	10.63	10.63	440	4.64	4.43	4.97	8.88	10.17	-	-	-	-	-	490	3.80	3.91	4.60	7.65	9.66	-	-	-	-	-		
540	3.85	3.68	4.87	9.35	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	540	5.45	5.10	5.45	7.04	8.14	-	-	-	-	-	675	6.03	5.79	6.36	9.25	9.74	-	-	-	-	-		
675	6.09	5.91	6.20	7.30	-	-	-	-	-	675	5.44	5.19	5.27	8.35	10.27	-	-	-	-	-	775	5.79	5.56	5.40	6.58	9.58	-	-	-	-	-		
825	5.65	5.68	5.27	7.10	-	-	-	-	-	825	5.06	5.15	5.23	7.70	8.91	-	-	-	-	-	875	5.63	5.56	5.30	7.18	10.30	-	-	-	-	-		
875	5.65	5.68	5.27	7.10	-	-	-	-	-	875	5.06	5.15	5.23	7.70	8.91	-	-	-	-	-	975	5.20	5.03	5.18	9.49	10.30	-	-	-	-	-		
975	5.63	5.56	5.30	7.18	-	-	-	-	-	975	5.20	5.03	5.18	9.49	10.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Tableaux 2.d (suite). Valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique en fonction du temps pour des sables pollués avec du plomb avec une concentration de 10 de Pb^{2+}/l (d.d.p= 60 volts)

ESSAI Pb1 [01]60: Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 0.1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 4500 g
 Poids initial de liquide: 1170 g
 Poids initial de plomb: 0.117 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 52 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=26 ppm)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en %	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	987.1	27.8	17	0.7	13	12
2	817.9	23.8	26	1.0	20	19
3	926.9	23.4	32	1.2	25	24
4	751.2	24.2	32	1.2	25	24
5	907.8	23.3	29	1.1	22	21
(-)						
	4390.8	Moy= 24.4	136	5.2	105	100

- (2): Poids réel de sol prélevé sur chaque zone
 (3): Teneur en eau finale mesurée sur chaque zone
 (4): Teneur moyenne mesurée à partir de 30 g d'échantillon prélevé sur chaque fraction de sol sec (2)
 (5): Tf/Ti avec Ti=teneur initiale théorique (117 g de plomb /4.5 kg de sable=26 ppm)
 (6): Répartition finale de plomb calculée par (5)*100/5
 (7): Répartition pondérée de plomb rapportée à 100 g de sable ((4)*(100)/136)

ESSAI Pb2 [01]60: Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 0.1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 4500 g
 Poids initial de liquide: 1170 g
 Poids initial de plomb: 0.117 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 195 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=26 ppm)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en %	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	750.5	28.7	21	0.8	16	19
2	994.6	25.5	11	0.4	8	10
3	995.1	24.2	31	1.2	24	28
4	991.0	24.5	24	0.9	18	22
5	678.1	26.1	23	0.9	18	21
(-)						
	4409.2	Moy = 25.7	110	4.2	85	100

Tableaux 3.a. Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g Pb²⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Pb3 [01]60: Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 0.1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm
 Poids initial sable: 4500 g
 Poids initial de liquide: 1170 g
 Poids initial de plomb: 0.117 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 478 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=26 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	919.9	26.7	18	0.7	14	15
2	814.4	25.1	24	0.9	18	21
3	861.4	24.1	30	1.2	23	26
4	888.3	23.9	26	1.0	20	22
5	912.2	24.3	19	0.7	15	16
(-)	4396.1	Moy= 24.8	117	4.5	90	100

ESSAI Pb4 [01]60: Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 0.1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm
 Poids initial sable: 4500 g
 Poids initial de liquide: 1170 g
 Poids initial de plomb: 0.117 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 695 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=26 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	942.5	26.1	14	0.5	11	11
2	733.8	23.7	21	0.8	16	17
3	1084.9	23.8	33	1.3	25	27
4	842.6	23.7	31	1.2	24	25
5	843.2	29.7	24	0.9	18	20
(-)	4446.9	Moy=25.4	123	4.7	95	100

Tableaux 3.a.(suite) Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g Pb²⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Pb5 [01]60: Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 0.1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de plomb: 0.1418 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 984 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=26 ppm)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en %	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1070.5	23.7	39	1.5	30	27
2	969.8	22.2	23	0.9	18	16
3	1023.3	22.4	32	1.2	25	23
4	1153.4	22.3	26	1.0	20	18
5	1153.5	22.2	23	0.9	18	16
(-)	5370.5	Moy=22.5	143	5.5	110	100

ESSAI Pb6 [01]60: Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 0.1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de plomb: 0.1418 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 1560 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=26 ppm)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en %	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1087.8	24.5	30	1.2	23	20
2	1169.6	22.6	27	1.0	21	18
3	974.1	22.0	33	1.3	25	23
4	1234.9	24.8	26	1.0	20	18
5	922.3	22.5	31	1.2	24	21
(-)	5388.7	Moy=23.2	147	5.7	113	100

Tableaux 3.a.(suite) Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g Pb²⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Pb1 [1]60:

Element: plomb(II)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 4500g
Poids initial de liquide:1170 g
Poids initial de plomb:1.170 g
Teneur initiale eau:26 %
Durée de l'essai: 32 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en %	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	961.4	26.0	66	0.3	5	5
2	979.2	22.0	176	0.7	14	13
3	973.4	25.0	346	1.3	27	26
4	735.3	23.6	365	1.4	28	28
5	742.0	25.1	363	1.4	28	28
(-)						
	4391.3	Moy=24.3	1316	5.1	101	100

ESSAI Pb2 [1]60:

Element: plomb(II)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5453g
Poids initial de liquide:1418 g
Poids initial de plomb:1.418 g
Teneur initiale eau:26 %
Durée de l'essai: 97 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en %	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1093.0	24.6	95	0.4	7	8
2	1126.3	22.6	92	0.4	7	8
3	1164.4	22.5	357	1.4	27	29
4	884.1	22.5	418	1.6	32	34
5	1062.7	22.4	263	1.0	20	21
(-)						
	5330.4	Moy=22.9	1225	4.7	94	100

Tableaux 3.b. Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Pb3[1]60:

Element: plomb(II)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 4500g
Poids initial de liquide: 1170 g
Poids initial de plomb: 1.170 g
Teneur initiale eau: 26 %

Durée de l'essai: 194.5 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	876.9	27.4	54	0.2	4	5
2	908.8	24.2	186	0.7	14	16
3	924.8	25.0	441	1.7	34	38
4	735.2	25.6	315	1.2	24	27
5	978.6	24.5	167	0.6	13	14
(-)	4424.3	Moy=25.3	1163	4.5	89	100

ESSAI Pb [1]60:

Element: plomb(II)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 4500g
Poids initial de liquide: 1170 g
Poids initial de plomb: 1.170 g
Teneur initiale eau: 26 %

Durée de l'essai: 483 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	876.0	24.5	15	0.1	1	1
2	815.1	22.8	116	0.4	9	10
3	871.7	23.3	358	1.4	28	30
4	904.7	22.7	424	1.6	33	36
5	932.1	23.7	267	1.0	21	23
(-)	4399.6	Moy=23.4	1180	4.5	91	100

Tableaux 3.b.(suite) Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Pb5 [1]60: Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm
 Poids initial sable: 4500g
 Poids initial de liquide:1170 g
 Poids initial de plomb:1.170 g
 Teneur initiale eau:26 %
 Durée de l'essai: 694 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	737.7	24.5	14	0.1	1	1
2	955.0	23.5	68	0.3	5	6
3	906.5	22.6	279	1.1	21	25
4	982.7	22.2	493	1.9	38	43
5	813.0	22.5	283	1.1	22	25
(-)	4394.9	Moy=23.0	1137	4.4	87	100

ESSAI Pb6 [1]60: Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm
 Poids initial sable: 5453g
 Poids initial de liquide:1418 g
 Poids initial de plomb:1.418 g
 Teneur initiale eau:26 %
 Durée de l'essai: 984 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	1073.4	23.3	15	0.1	1	1
2	897.0	22.0	97	0.4	7	8
3	1019.5	22.1	399	1.5	31	33
4	1046.6	22.1	469	1.8	36	38
5	1354.0	22.0	246	0.9	19	20
(-)	5390.6	Moy=22.2	1226	4.7	94	100

Tableaux 3.b.(suite) Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Pb7 [1]60:

Element: plomb(II)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5453g
Poids initial de liquide:1418 g
Poids initial de plomb:1.418 g
Teneur initiale eau:26 %
Durée de l'essai: 1560 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=280 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	1227.4	23.0	23	0.1	2	2
2	959.1	22.5	134	0.5	10	10
3	1262.4	22.3	386	1.5	30	29
4	963.9	22.2	510	2.0	39	39
5	968.9	22.6	271	1.0	21	20
(-)	5381.8	Moy=22.5	1324	5.1	102	100

Tableaux 3.b.(suite) Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Pb1 [10]60: Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 10 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 4500 g
 Poids initial de liquide:1170 g
 Poids initial de plomb:11.700 g
 Teneur initiale eau:26 %
Durée de l'essai: 30 heures

Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=2600 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
864.0	25.9	360	0.14	3	3
963.4	23.9	805	0.31	6	7
811.9	23.7	1142	0.44	9	9
848.3	24.2	3618	1.39	28	29
883.8	23.3	6433	2.47	49	52
4371.4	Moy=24.1	12358	4.75	95	100

ESSAI Pb2 [10]60: Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 10 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 4500 g
 Poids initial de liquide:1170 g
 Poids initial de plomb:11.700 g
 Teneur initiale eau:26 %
Durée de l'essai: 190.3 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=2600 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	982.7	25.5	197	0.08	2	2
2	640.3	24.0	280	0.11	2	2
3	943.8	23.0	418	0.16	3	4
4	742.7	23.7	2762	1.06	21	23
5	1109.5	24.5	8267	3.18	64	69
(-)						
	4419.0	Moy=24.1	11924	4.59	92	100

Tableaux 3.c. Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 10 g Pb²⁺/l l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Pb3 [10]60: Elément: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 10 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 4500 g
 Poids initial de liquide: 1170 g
 Poids initial de plomb: 11.700 g
 Teneur initiale eau: 26 %
Durée de l'essai: 478.3 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=2600 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	921.2	24.6	48	0.02	0.4	1
2	767.5	22.2	31	0.01	0.2	0.3
3	933.0	22.2	302	0.12	2	3
4	861.7	23.2	3283	1.26	25	32
5	916.1	23.3	6558	2.52	50	64
(-)						
	4399.5	Moy=23.1	10222	3.93	79	100

ESSAI Pb4 [10]60: Elément: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 10 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 4500 g
 Poids initial de liquide: 1170 g
 Poids initial de plomb: 11.700 g
 Teneur initiale eau: 26 %
Durée de l'essai: 695heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=2600 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	864.8	24.0	38	0.01	0.3	0.3
2	792.6	22.0	22	0.01	0.2	0.2
3	998.9	22.2	362	0.14	3	3
4	911.9	22.9	4145	1.59	32	36
5	930.0	16.6	6900	2.65	53	60
(-)						
	4498.2	Moy=21.5	11467	4.41	88	100

Tableaux 3.c.(suite) Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 10 g Pb²⁺/l l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Pb5 [10]60: Elément: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 10 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de plomb: 14.180 g
 Teneur initiale eau: 26 %
Durée de l'essai: 1008 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=2600 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	1239.3	22.0	31	0.01	0.2	0.2
2	1073.5	21.1	28	0.01	0.2	0.2
3	1058.3	20.6	2037	0.78	16	16
4	1085.8	20.5	2632	1.01	20	20
5	981.9	20.8	8550	3.29	66	64
(-)	5438.7	Moy=20.9	13278	5.11	102	100

ESSAI Pb6 [10]60: Elément: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 10 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de plomb: 14.180 g
 Teneur initiale eau: 26 %
Durée de l'essai: 1560 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=2600 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1	1094.4	22.1	16	0.01	0.1	0.1
2	1113.3	21.7	10	0.00	0.1	0.1
3	1112.5	21.1	290	0.11	2	2
4	1187.0	22.9	3657	1.41	28	29
5	942.9	24.6	8712	3.35	67	69
(-)	5450.1	Moy=22.4	12685	4.88	98	100

Tableaux 3.c.(suite) Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 10 g Pb²⁺/l l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

Temps (heures)	Essai Cr1[0.1]60	Temps (heures)	Essai Cr2[0.1]60	Temps (heures)	Essai Cr3[0.1]60	Temps (heures)	Essai Cr4[0.1]60
0.0	61.8	0.0	62.0	0.0	54.0	0.0	61.0
4.0	37.4	1.0	60.0	1.0	48.0	1.0	56.0
20.0	2.3	2.5	50.1	2.5	39.8	2.5	47.7
26.0	1.9	4.0	40.4	4.0	34.5	4.0	38.0
44.0	1.7	5.0	16.1	5.0	11.7	5.0	17.8
52.0	2.1	7.0	7.0	7.0	5.8	7.0	7.7
69.0	1.4	21.0	2.0	21.0	2.0	21.0	2.2
-	-	25.0	1.9	25.0	1.9	25.0	1.8
-	-	33.0	1.6	33.0	1.6	33.0	1.4
-	-	93.0	1.3	93.0	1.5	93.0	0.9
-	-	98.0	1.5	98.0	1.6	98.0	1.0
-	-	103.0	1.9	103.0	1.6	103.0	1.1
-	-	123.0	3.1	123.0	4.5	123.0	2.0
-	-	127.0	3.8	127.0	4.2	127.0	3.1
-	-	142.0	5.6	142.0	5.0	142.0	1.6
-	-	145.0	5.6	145.0	5.5	145.0	1.4
-	-	166.0	6.7	166.0	5.9	166.0	0.9
-	-	174.0	8.4	174.0	5.8	174.0	1.0
-	-	189.0	7.8	189.0	5.7	189.0	3.2
-	-	198.0	10.0	198.0	6.1	198.0	3.3
-	-	-	-	318.0	5.1	318.0	5.4
-	-	-	-	334.0	2.5	334.0	5.4
-	-	-	-	340.0	2.0	340.0	4.7
-	-	-	-	358.0	3.0	358.0	2.7
-	-	-	-	366.0	3.0	366.0	3.4
-	-	-	-	383.0	2.4	383.0	3.8
-	-	-	-	434.5	0.8	434.5	6.8
-	-	-	-	457.0	0.7	457.0	6.7
-	-	-	-	481.0	0.6	481.0	5.3
-	-	-	-	510.0	0.7	510.0	3.3
-	-	-	-	549.0	0.7	549.0	1.3
-	-	-	-	-	-	621.0	0.8
-	-	-	-	-	-	649.0	0.9
-	-	-	-	-	-	700.0	0.9

Tableaux 4.a. Résultats de l'intensité électrique (mA) en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 0.1 g Cr³⁺/l (d.d.p = 60 volts)

Intensité électrique (mA) pour les essais Cr[05]

Moyenne des intensités
Essais Cr[05]60

Temps (heures)	Essai Cr1[0.5]60	Temps (heures)	Essai Cr2[0.5]60
1.7	62.5	0.8	105.5
3.8	30.6	4.3	20.2
19.5	14.3	21.3	7.85
40.0	8.64	29.6	7.08
-	-	45.2	7.73
-	-	70.3	6.61
-	-	141.6	1.15
-	-	165.6	1.53
-	-	189.6	1.56

Temps (h)	Moyenne
0.0	84.0
4.0	25.4
20.0	11.1
30.0	7.1
42.5	8.2
70.3	6.6
141.6	1.2
165.6	1.5
189.6	1.6

Tableaux 4.b. Résultats de l'intensité électrique brute et des valeurs moyennes (mA) en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 0.5 g Cr³⁺/l (d.d.p = 60 volts)

Temps (heures)	Essai Cr1[1]60	Temps (heures)	Essai Cr2[1]60	Temps (heures)	Essai Cr3[1]60	Temps (heures)	Essai Cr4[1]60
0.0	178.0	0.0	140.0	0.0	175.0	0.0	173.0
3.0	31.1	1.0	59.0	1.0	103.0	1.0	70.0
7.0	22.8	2.5	26.0	2.5	56.1	2.5	35.1
23.0	12.1	4.0	31.3	4.0	36.1	4.0	34.7
29.0	11.9	5.0	20.5	5.0	28.4	5.0	35.2
47.0	13.1	7.0	19.1	7.0	23.4	7.0	32.8
55.0	9.3	21.0	19.6	21.0	13.5	21.0	13.9
72.0	8.4	25.0	18.5	25.0	23.4	25.0	14.2
-	-	33.0	12.4	33.0	15.3	33.0	13.3
-	-	93.0	7.7	93.0	6.4	93.0	9.8
-	-	98.0	11.2	98.0	7.3	98.0	16.2
-	-	103.0	11.4	103.0	5.6	103.0	15.5
-	-	123.0	10.7	123.0	6.3	123.0	10.7
-	-	127.0	9.4	127.0	5.8	127.0	6.9
-	-	142.0	7.3	142.0	5.4	142.0	5.1
-	-	145.0	7.1	145.0	7.0	145.0	6.4
-	-	166.0	7.3	166.0	5.2	166.0	4.4
-	-	174.0	6.8	174.0	4.9	174.0	4.4
-	-	189.0	5.9	189.0	4.2	189.0	4.5
-	-	198.0	4.8	198.0	3.7	198.0	4.6
-	-	-	-	318.0	2.3	334.0	6.0
-	-	-	-	334.0	2.4	340.0	5.2
-	-	-	-	340.0	2.5	358.0	3.6
-	-	-	-	358.0	2.3	366.0	3.8
-	-	-	-	366.0	2.3	383.0	3.2
-	-	-	-	383.0	2.0	434.5	2.2
-	-	-	-	434.5	1.6	457.0	2.0
-	-	-	-	457.0	1.4	481.0	2.0
-	-	-	-	481.0	1.4	510.0	1.9
-	-	-	-	510.0	1.5	549.0	1.6
-	-	-	-	549.0	1.2	621.0	1.2
-	-	-	-	-	-	649.0	1.3
-	-	-	-	-	-	700.0	0.9

Tableaux 4.c. Résultats de l'intensité électrique (mA) en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 1 g Cr³⁺/l (d.d.p = 60 volts)

Moyenne des intensités
Essais Cr[01]60

Temps (h)	Moyenne
0.0	58.9
2.5	45.2
7.5	11.0
25.0	2.0
40.0	1.6
100.0	1.5
120.0	3.4
140.0	4.1
175.0	5.1
200.0	6.4
320.0	5.2
335.0	3.7
360.0	3.1
380.0	3.1
445.0	3.7
500.0	2.5
537.5	1.0
612.5	0.8
637.5	0.9
687.5	0.9

Moyenne des intensités
Essais Cr[1]60

Temps (h)	Moyenne
0.0	166.0
2.5	48.2
7.5	26.0
25.0	15.9
40.0	13.5
100.0	10.1
120.0	8.3
140.0	6.4
175.0	5.3
200.0	4.4
335.0	4.0
360.0	3.0
380.0	2.6
445.0	1.8
500.0	1.7
537.5	1.4
612.5	1.2
637.5	1.3
687.5	0.9

Tableaux 4.d. Valeurs moyennes des intensités électriques (mA) en fonction du temps pour des sables pollués avec du chrome avec une concentration de 0.1 et 1 g de Cr³⁺/l (d.d.p= 60 volts)

Tension électrique (Volts) dans l'essai Cr2[05]

	Temps (heures)	0-Z1	z1-z2	z2-z3	z3-z4	z4-z5	z5-0	Total
Cr2[0.5]60	0.0	6.0	10.1	8.4	9.7	7.4	18.1	59.7
	0.8	1.2	3.2	12.4	3.1	3.7	34.4	58.0
	4.3	0.8	1.1	0.7	1.3	46.6	8.2	58.6
	21.3	0.6	0.5	0.3	0.6	55.3	2.6	59.7
	45.2	0.6	0.6	0.3	1.5	54.6	2.3	59.9
	70.3	0.5	0.6	0.4	48.9	7.7	0.9	58.9
	141.2	0.1	0.5	2.7	54.8	1.0	0.7	59.9
	165.6	0.2	0.5	2.7	54.5	1.3	0.4	59.6
	189.6	0.2	0.5	4.2	52.8	1.0	0.4	59.1

Tableaux 4.e. Résultats de la tension électrique (V) mesuré sur un sable pollué par du chrome avec une concentration initiale de 0.5 g de Cr³⁺/l (essai Cr2[05]60).

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle										pH du sol										Conductivité électrique (mS/cm)										
	+					-					+					-					+					-					
	0-5		5-10		15-20		20-25		10-15		15-20		20-25		5-10		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25
0.00	4.53	5.40	6.00	5.88	5.06	5.10	4.41	4.68	4.80	5.23	0.708	0.675	0.702	0.684	0.717																
7.50	6.31	5.51	6.72	10.81	9.10	4.88	4.95	8.55	10.72	11.10	1.520	0.787	0.214	0.275	0.120																
31.00	5.53	6.15	9.95	10.50	10.95	5.79	9.60	10.37	10.66	11.34	0.536	0.057	0.029	0.133	0.396																
72.00	4.73	4.92	7.11	10.29	11.36	6.04	9.21	10.00	10.40	10.90	0.335	0.012	0.027	0.094	0.702																

Cr1[0-1]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle										pH du sol										Conductivité électrique (mS/cm)												
	+					-					+					-					+					-							
	0-5		5-10		15-20		20-25		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25
0.00	5.10	6.70	10.14	10.63	11.42	5.24	5.91	10.08	11.04	10.94	0.272	0.026	0.055	0.041	0.157																		
8.00	6.13	7.31	11.50	10.04	11.55	5.50	6.67	10.86	11.10	11.35	0.530	0.019	0.122	0.202	0.366																		
23.00	6.13	7.31	11.50	10.04	11.55	5.50	6.67	10.86	11.10	11.35	0.530	0.019	0.122	0.202	0.366																		
94.00	4.01	6.97	7.08	10.33	11.26	6.65	6.64	8.24	9.85	11.07	0.139	0.133	0.101	0.041	0.130																		
143.00	5.39	7.86	11.58	7.60	11.64	6.49	7.75	9.35	9.88	10.56	0.068	0.134	0.106	0.108	0.132																		

Cr2[0-1]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle										pH du sol										Conductivité électrique (mS/cm)												
	+					-					+					-					+					-							
	0-5		5-10		15-20		20-25		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25
0.00	3.80	4.83	8.24	10.95	11.40	5.40	6.04	9.58	10.96	11.45	0.705	0.037	0.035	0.133	0.251																		
23.00	6.00	6.50	7.31	10.84	11.51	5.88	6.49	9.65	10.44	11.16	0.244	0.155	0.023	0.044	0.346																		
94.00	4.99	6.83	5.84	10.31	10.43	6.11	5.78	7.71	9.98	10.79	0.362	0.125	0.015	0.023	0.161																		
197.00	5.10	7.50	5.38	10.08	10.05	6.52	6.02	6.14	6.32	10.43																							
245.00	5.90	7.64	6.51	8.01	10.30	6.19	7.47	7.51	8.39	10.94	0.102	0.008	0.020	0.018	0.078																		
341.00	8.44	8.96	11.49	9.41	9.41	6.89	7.79	7.20	10.00	10.26	0.109	0.032	0.023	0.048	0.148																		
382.00	6.63	10.53	6.64	9.05	9.17	6.69	6.89	7.50	8.87	10.24	0.020	0.012	0.008	0.013	0.095																		
480.00	6.33	7.54	5.87	10.11	10.38	6.95	9.11	10.36	10.85	10.96	0.010	0.006	0.010	0.009	0.061																		
548.00	6.97	7.16	6.56	9.53	10.98	6.75	6.58	9.00	10.31	10.70	0.029	0.005	0.004	0.032	0.204																		

Cr3[0-1]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle										pH du sol										Conductivité électrique (mS/cm)												
	+					-					+					-					+					-							
	0-5		5-10		15-20		20-25		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25
0.00	4.47	7.56	8.85	11.33	11.33	5.22	5.52	10.99	11.03	11.28	0.204	0.021	0.019	0.101	0.176																		
23.00	5.70	7.63	9.51	11.25	11.85	5.96	7.47	10.66	11.07	11.62	0.412	0.021	0.054	0.286	0.997																		
94.00	5.90	6.50	9.08	11.06	12.16	6.24	8.05	9.85	10.53	11.40	0.349	0.013	0.010	0.186	1.037																		
141.00	5.68	5.35	8.35	10.49	11.56	5.82	7.33	9.80	10.08	11.48	0.422	0.018	0.017	0.074	0.865																		
197.00	5.47	5.51	6.59	10.24	11.09	5.97	7.80	9.72	9.75	10.64	0.267	0.078	0.031	0.060	0.401																		
245.00	6.36	5.75	6.59	9.56	11.00	6.74	7.57	8.74	9.38	10.57	0.110	0.096	0.083	0.075	0.287																		
341.00	7.38	8.19	11.45	10.33	10.39	6.53	7.37	7.35	8.01	9.91	0.083	0.043	0.110	0.160	0.223																		
382.00	7.02	7.60	9.37	10.10	10.59	6.55	7.22	6.87	6.91	10.16	0.042	0.019	0.019	0.013	0.058																		
480.00	5.77	5.15	5.10	9.83	10.19	6.56	7.73	6.82	6.81	10.07	0.032	0.009	0.089	0.074	0.110																		
548.00	7.22	8.73	9.52	9.35	9.78	7.06	8.28	9.01	8.92	10.76	0.016	0.009	0.032	0.122	0.205																		
648.00	8.11	9.36	10.27	10.03	10.22	7.08	9.35	9.98	10.45	10.67	0.007	0.008	0.074	0.096	0.189																		

Cr4[0-1]60

Tableaux 5.a. Résultats des mesures de pH et de conductivité électrique en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 0.1 g Cr³⁺ / (pH initial de la solution de CrCl₃, 6H₂O à 0.1 g Cr³⁺/l; 3.36 et conductivité électrique initiale: 0.755 mS/cm; d.d.p=60 Volts)

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)					
	+		-		-		+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.75	4.42	3.63	3.85	3.96	4.69	3.91	3.91	3.88	3.87	4.30	3.200	3.130	3.160	2.680	0.243	-	-	-
23.50	4.19	3.76	3.98	10.92	10.51	4.18	3.92	3.93	4.31	6.50	3.110	2.980	2.350	0.117	0.049	-	-	-
40.00	4.86	4.21	9.92	10.43	11.58	4.42	3.90	4.52	5.57	9.47	3.160	3.120	0.078	0.075	0.146	-	-	-

Cr1[0-5]60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)					
	+		-		-		+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
0.00	4.00	4.10	4.35	4.20	4.09	4.23	4.08	4.23	4.09	4.05	2.650	2.790	2.870	2.700	2.620	-	-	-
4.17	3.42	3.61	3.91	3.77	10.45	3.90	3.90	3.85	3.81	4.82	3.420	3.110	3.210	2.940	0.263	-	-	-
21.17	3.60	3.64	3.93	3.95	12.92	4.21	3.89	3.96	4.05	6.74	3.020	2.790	2.690	2.030	0.133	-	-	-
29.42	3.10	3.37	3.81	4.00	9.65	4.12	3.84	3.94	4.57	8.97	3.150	2.880	2.730	0.938	0.098	-	-	-
49.17	4.14	3.61	3.98	6.77	10.24	4.39	3.92	4.14	6.50	8.88	3.190	2.670	2.210	0.081	0.130	-	-	-
69.92	4.04	3.79	4.08	8.36	10.56	4.28	3.92	4.69	7.33	11.14	3.440	2.690	0.736	0.074	0.178	-	-	-
141.17	4.99	5.08	6.02	8.10	3.41	4.70	4.86	6.09	9.93	10.33	1.168	0.555	0.040	0.047	0.077	-	-	-
165.66	4.59	4.93	5	11.4	10.16	4.94	5.27	6.12	9.98	10.18	0.998	0.614	0.069	0.059	0.098	-	-	-
189.66	4.62	4.76	4.86	12	11.27	4.94	5.19	6.4	8.91	9.2	1.069	0.678	0.025	0.039	0.056	-	-	-

Cr2[0-5]60

Tableaux 5.b. Résultats des mesures de pH et de conductivité électrique en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 0.5 g Cr³⁺ / ((pH initial de la solution de CrCl₃, 6H₂O à 0.5 g Cr³⁺/l: 3.08 et conductivité électrique initiale: 2.610 mS/cm; d.d.p=60 Volts)

pH moyen dans le liquide											pH moyen dans le sol des Essais Cr[0]60					Conductivité moyenne (mS/cm) dans le liquide				
temps (h)	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5	temps (h)	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5				
0	4.53	5.40	6.00	5.88	5.06	5.00	4.74	4.77	4.78	5.03	0	0.708	0.675	0.702	0.684	0.717				
7.5	5.29	6.59	9.23	10.92	10.61	5.11	5.46	9.87	10.93	11.10	7.5	0.665	0.278	0.096	0.139	0.151				
25	5.29	6.48	9.80	10.68	11.43	5.51	7.44	10.63	10.93	11.44	25	0.546	0.034	0.060	0.189	0.503				
95	5.95	6.50	8.19	10.96	11.72	6.09	7.05	10.56	10.56	11.26	95	0.279	0.047	0.020	0.111	0.593				
145	4.89	6.38	7.09	10.37	11.08	6.19	6.58	8.58	9.97	11.11	145	0.308	0.092	0.044	0.046	0.392				
195	5.32	6.95	7.85	9.30	11.05	6.32	7.19	8.40	8.65	10.54	195	0.168	0.106	0.068	0.084	0.266				
245	6.13	6.69	6.55	8.78	10.65	6.19	7.47	7.51	8.39	10.94	245	0.706	0.052	0.051	0.047	0.182				
345	7.91	8.19	10.20	10.91	9.90	6.86	7.68	7.97	9.69	10.41	345	0.096	0.038	0.067	0.104	0.186				
385	6.82	9.06	8.00	10.79	9.88	6.61	7.13	7.42	8.44	10.07	385	0.018	0.011	0.025	0.038	0.115				
480	6.05	7.57	5.48	9.97	10.28	6.70	8.16	8.62	8.88	10.56	480	0.026	0.013	0.014	0.011	0.060				
545	7.23	8.59	7.90	9.32	10.34	6.65	8.15	7.91	8.56	10.38	545	0.030	0.007	0.047	0.053	0.157				
650	7.22	8.73	9.52	9.35	9.78	7.06	8.28	9.01	8.92	10.76	650	0.016	0.009	0.032	0.122	0.205				
699	8.11	9.36	10.27	10.03	10.22	7.08	9.35	9.98	10.45	10.67	699	0.007	0.008	0.074	0.086	0.188				

pH moyen dans le liquide											pH moyen dans le sol des Essais Cr[05]60					Conductivité moyenne (mS/cm) dans le liquide				
temps (h)	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5	temps (h)	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5				
0	4.00	4.10	4.35	4.20	4.09	4.21	4.08	4.23	4.09	4.05	0	2.650	2.790	2.870	2.700	2.820				
4	3.92	3.62	3.88	3.67	10.07	3.91	3.91	3.87	3.64	4.46	3.310	3.120	3.185	2.760	2.253					
22	3.90	3.70	3.96	7.44	11.72	4.20	3.91	3.94	4.18	6.62	3.065	2.885	2.520	1.074	0.091					
49	4.14	3.61	3.98	6.77	10.24	4.39	3.92	4.14	6.50	8.88	3.190	2.670	2.210	0.081	0.130					
70	4.04	3.79	4.08	8.36	10.56	4.28	3.92	4.69	7.33	11.14	3.440	2.690	0.736	0.074	0.178					
141	4.99	5.08	6.02	8.10	8.41	4.70	4.86	6.09	9.93	10.33	1.168	0.555	0.040	0.047	0.077					
165	4.59	4.93	5.00	11.40	10.16	4.94	5.27	6.12	9.98	10.18	0.998	0.614	0.069	0.059	0.098					
169	4.62	4.76	4.86	12.00	11.27	4.94	5.19	6.40	8.91	9.20	1.069	0.678	0.025	0.039	0.056					

pH moyen dans le liquide											pH moyen dans le sol des Essais Cr[1]60					Conductivité moyenne (mS/cm) dans le liquide				
Temps (h)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(+)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(+)	Temps (h)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(+)				
0	3.66	3.61	3.60	3.62	3.58	3.68	3.59	3.78	3.61	3.72	0	4.858	5.013	4.882	5.004	4.980				
7.5	3.37	3.51	3.39	3.57	8.09	3.63	3.58	3.56	3.54	3.58	7.5	3.551	3.456	3.306	3.061	0.080				
25	3.46	3.59	3.51	3.83	9.51	3.93	3.66	3.66	3.69	4.08	25	5.165	4.942	4.748	3.738	0.258				
95	4.83	3.88	4.13	9.63	11.19	4.44	3.96	3.84	4.49	8.92	95	2.677	3.528	2.776	0.049	0.335				
145	4.33	4.20	4.40	9.23	10.28	4.01	3.45	3.33	4.00	8.53	145	2.621	2.639	2.023	0.252	0.266				
195	4.48	4.20	4.76	9.13	9.51	4.31	3.85	4.00	4.47	10.68	195	2.734	2.768	1.694	0.022	0.168				
245	4.73	4.18	5.27	8.30	11.13	4.76	3.97	4.43	5.71	8.57	245	1.871	1.886	1.178	0.267	0.227				
345	4.98	4.63	5.62	7.55	10.29	4.56	4.45	5.22	6.06	8.68	345	1.988	1.905	1.221	0.015	0.086				
385	5.18	4.94	6.00	9.99	10.54	4.69	4.55	5.41	6.81	8.42	385	2.063	1.795	0.563	0.012	0.143				
480	5.58	5.51	6.84	8.35	10.35	5.03	5.29	6.14	6.59	8.59	480	1.512	1.269	0.230	0.009	0.079				
545	5.73	5.78	7.09	9.45	10.34	5.08	5.06	5.96	6.91	7.68	545	1.289	0.974	0.100	0.006	0.080				
650	6.01	6.46	6.84	8.62	10.25	5.09	5.16	5.80	7.45	7.68	650	1.398	1.012	0.033	0.006	0.119				
700	6.11	6.82	6.83	9.33	10.03	5.32	5.31	5.88	8.83	8.32	700	1.243	0.970	0.025	0.005	0.157				

Tableaux 5.d. Valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique en fonction du temps pour des sables pollués avec du chrome avec une concentration de 0.1, 0.5 et 1 g de Cr³⁺/l (d.d.p= 60 volts)

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle										pH du sol										Conductivité électrique (mS/cm)									
	+					-					+					-					+					-				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25					
0.00	3.40	3.40	3.41	3.46	3.46	3.48	3.45	3.45	3.62	3.61	3.48	3.45	3.45	3.62	3.61	4.858	5.013	4.882	5.004	4.980	4.858	5.013	4.882	5.004	4.980					
7.50	3.34	3.53	3.50	3.61	9.35	3.44	3.42	3.39	3.41	3.52	3.44	3.42	3.39	3.41	3.52	5.156	5.007	4.910	4.846	0.080	5.156	5.007	4.910	4.846	0.080					
31.00	3.48	3.42	3.38	3.46	10.40	3.60	3.43	3.50	3.56	4.31	3.60	3.43	3.50	3.56	4.31	4.645	4.633	4.311	3.572	0.068	4.645	4.633	4.311	3.572	0.068					
72.00	3.52	3.43	3.35	3.68	10.44	4.04	3.93	3.93	4.40	7.93	4.04	3.93	3.93	4.40	7.93	3.678	3.678	3.633	2.599	0.079	3.678	3.678	3.633	2.599	0.079					

Cr1(1)60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle										pH du sol										Conductivité électrique (mS/cm)									
	+					-					+					-					+					-				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25					
0.00	3.93	3.82	3.80	3.81	3.70	3.89	3.74	4.11	3.61	3.83	3.89	3.74	4.11	3.61	3.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
23.00	3.36	3.61	3.56	3.56	5.75	3.98	3.74	3.69	3.74	3.72	3.98	3.74	3.69	3.74	3.72	5.329	5.138	5.262	4.530	0.597	5.329	5.138	5.262	4.530	0.597					
141.00	3.97	4.18	4.21	5.27	8.41	4.16	3.44	3.22	3.38	8	4.16	3.44	3.22	3.38	8	2.988	2.991	2.696	0.899	0.045	2.988	2.991	2.696	0.899	0.045					
197.00	4.12	4.11	4.20	7.22	6.19	4.40	3.88	3.65	3.96	7.18	4.40	3.88	3.65	3.96	7.18	2.760	2.684	2.617	0.014	0.045	2.760	2.684	2.617	0.014	0.045					

Cr2(1)60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle										pH du sol										Conductivité électrique (mS/cm)									
	+					-					+					-					+					-				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25					
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
8.00	3.06	3.50	3.38	3.61	10.74	3.69	3.71	3.65	3.61	3.63	3.69	3.71	3.65	3.61	3.63	1.946	1.906	1.702	1.277	0.080	1.946	1.906	1.702	1.277	0.080					
23.00	3.36	3.72	3.51	4.37	10.51	4.10	3.69	3.70	3.71	4.46	4.10	3.69	3.70	3.71	4.46	5.442	5.056	4.672	3.113	0.109	5.442	5.056	4.672	3.113	0.109					
94.00	4.86	3.92	4.10	9.80	10.95	4.51	4.03	3.69	4.84	10.02	4.51	4.03	3.69	4.84	10.02	2.876	3.453	2.782	0.038	0.310	2.876	3.453	2.782	0.038	0.310					
143.00	4.47	3.97	4.22	10.68	11.17	3.94	3.31	3.34	4.64	8.72	3.94	3.31	3.34	4.64	8.72	2.815	2.366	1.623	0.028	0.211	2.815	2.366	1.623	0.028	0.211					
199.00	4.55	4.08	4.92	9.11	11.21	4.27	3.80	4.51	6.18	8.46	4.27	3.80	4.51	6.18	8.46	2.888	2.988	1.046	0.030	0.113	2.888	2.988	1.046	0.030	0.113					
246.00	4.90	4.52	5.48	9.46	11.16	4.36	3.89	4.62	6.33	6.50	4.36	3.89	4.62	6.33	6.50	2.070	2.003	1.085	0.018	0.120	2.070	2.003	1.085	0.018	0.120					
343.00	4.62	4.34	6.15	8.60	10.17	4.49	4.40	5.76	5.93	9.49	4.49	4.40	5.76	5.93	9.49	1.900	1.657	0.268	0.014	0.061	1.900	1.657	0.268	0.014	0.061					
384.00	4.68	4.67	6.03	9.99	10.48	4.75	4.64	6.01	5.99	7.55	4.75	4.64	6.01	5.99	7.55	2.116	1.620	0.568	0.011	0.067	2.116	1.620	0.568	0.011	0.067					
482.00	5.30	5.30	6.70	7.90	10.15	5.10	5.57	6.67	6.56	7.90	5.10	5.57	6.67	6.56	7.90	1.541	1.274	0.251	0.009	0.041	1.541	1.274	0.251	0.009	0.041					
550.00	5.42	5.38	7.13	9.10	10.37	5.08	5.25	6.80	7.21	7.79	5.08	5.25	6.80	7.21	7.79	1.219	0.924	0.059	0.008	0.045	1.219	0.924	0.059	0.008	0.045					

Cr3(1)60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle										pH du sol										Conductivité électrique (mS/cm)									
	+					-					+					-					+					-				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25					
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
8.00	3.73	3.50	3.30	3.50	4.20	3.78	3.82	3.64	3.61	3.60	3.78	3.82	3.64	3.61	3.60	1.946	1.915	1.745	1.593	0.492	1.946	1.915	1.745	1.593	0.492					
23.00	3.65	3.61	3.61	3.95	11.38	4.05	3.78	3.76	3.75	3.86	4.05	3.78	3.76	3.75	3.86	5.153	5.113	4.958	3.216	0.132	5.153	5.113	4.958	3.216	0.132					
94.00	4.81	3.84	4.17	9.46	11.44	4.37	3.89	3.79	4.14	7.83	4.37	3.89	3.79	4.14	7.83	2.478	3.602	2.769	0.060	0.359	2.478	3.602	2.769	0.060	0.359					
143.00	4.55	4.47	4.78	11.74	11.27	3.93	3.60	3.45	4.00	8.88	3.93	3.60	3.45	4.00	8.88	2.061	2.569	1.748	0.032	0.544	2.061	2.569	1.748	0.032	0.544					
199.00	4.79	4.43	5.16	11.08	11.15	4.26	3.87	3.84	4.82	9.23	4.26	3.87	3.84	4.82	9.23	2.554	2.633	1.420	0.022	0.345	2.554	2.633	1.420	0.022	0.345					
246.00	4.54	3.84	5.07	7.14	11.11	5.17	4.05	4.24	5.10	10.64	5.17	4.05	4.24	5.10	10.64	1.672	1.769	1.271	0.516	0.335	1.672	1.769	1.271	0.516	0.335					
343.00	5.34	4.92	5.10	6.51	10.41	4.63	4.50	4.69	6.20	7.88	4.63	4.50	4.69	6.20	7.88	2.076	2.152	2.174	0.016	0.112	2.076	2.152	2.174	0.016	0.112					
384.00	5.49	5.22	5.97	8.80	10.60	4.64	4.47	4.82	6.66	6.34	4.64	4.47	4.82	6.66	6.34	2.009	1.970	0.568	0.013	0.220	2.009	1.970	0.568	0.013	0.220					
482.00	5.86	5.72	6.99	8.80	10.55	4.97	5.01	5.61	7.63	9.29	4.97	5.01	5.61	7.63	9.29	1.484	1.265	0.209	0.009	0.117	1.484	1.265	0.209	0.009	0.117					
550.00	6.04	6.18	7.06	9.81	10.31	5.09	4.88	5.13	6.61	7.57	5.09	4.88	5.13	6.61	7.57	1.359	1.024	0.142	0.005	0.115	1.359	1.024	0.142	0.005	0.115					
650.00	6.01	6.46	6.84	8.62	10.25	5.09	5.16	5.80	7.45	7.88	5.09	5.16	5.80	7.45	7.88	1.398	1.012	0.033	0.006	0.119	1.398	1.012	0.033	0.006	0.119					
701.00	6.11	6.82	6.83	9.33	10.03	5.32	5.31	5.88	8.83	8.32	5.32	5.31	5.88	8.83	8.32	1.243	0.970	0.025	0.005	0.157	1.243	0.970	0.025	0.005	0.157					

Cr4(1)60

Tableaux 5.c. Résultats des mesures de pH et de conductivité électrique en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 1 g Cr³⁺ / (pH initial de la solution de CrCl₃, 6H₂O à 1 g Cr³⁺/l; 2.93 et conductivité électrique initiale: 4.74 mS/cm; d.d.p=60 volts)

ESSAI Cr1 [0.1]60: Elément: Chrome(III) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Solution à 0.1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5000 g
Poids initial de liquide: 1300 g
Poids initial de chrome: 0.130 g
Teneur initiale eau: 26 %
Durée de l'essai: 72 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en chrome(III) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=26 ppm)	Répartition finale brute de chrome(III) par zone en %	Répartition pondérée de chrome(III) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	940.8	29.0	19	0.7	15	16
2	990.2	25.5	23	0.9	18	19
3	1045.5	25.1	26	1.0	20	21
4	958.5	24.4	27	1.0	21	22
5	1030.7	24.7	27	1.0	21	22
(-)						
	4965.6	Moy=25.7	122	4.7	94	100

ESSAI Cr2 [0.1]60: Elément: Chrome(III) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Solution à 0.1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5453 g
Poids initial de liquide: 1418 g
Poids initial de chrome: 0.1418 g
Teneur initiale eau: 26 %
Durée de l'essai: 198 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en chrome(III) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=26 ppm)	Répartition finale brute de chrome(III) par zone en %	Répartition pondérée de chrome(III) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1207.4	25.1	20	0.8	15	17
2	909.7	24.2	22	0.8	17	19
3	1064.8	23.4	24	0.9	18	21
4	1160.9	23.0	26	1.0	20	22
5	1055.3	23.2	24	0.9	18	21
(-)						
	5398.1	Moy=23.7	116	4.5	89	100

Tableaux 6.a. Répartition finale du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g Cr³⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Cr3 [0.1]60 | Element: Chrome(III) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 0.1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5000 g
 Poids initial de liquide: 1300 g
 Poids initial de chrome: 0.130 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 549 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en chrome(III) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=26 ppm) (5)	Quantité finale de chrome(III) par zone (mg) (6)	Répartition finale de chrome(III) par zone en % (7)
(+)						
1	933.0	24.4	19	0.7	15	16
2	864.6	23.1	21	0.8	16	18
3	1170.1	22.8	28	1.1	22	23
4	990.1	22.4	26	1.0	20	22
5	997.2	22.2	25	1.0	19	21
(-)	4955.0	Moy=22.9	119	4.6	92	100

ESSAI Cr4 [0.1]60: | Element: Chrome(III) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 0.1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de chrome: 0.1418 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 699 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en chrome(III) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=26 ppm) (5)	Répartition finale brute de chrome(III) par zone en % (6)	Répartition finale de chrome(III) par zone en % (7)
(+)						
1	1177.5	24.4	18	0.7	14	16
2	946.4	23.6	22	0.8	17	19
3	1209.5	23.2	26	1.0	20	22
4	1047.4	23.2	26	1.0	20	22
5	1027.3	23.0	24	0.9	18	21
(-)	5408.2	Moy= 23.5	116	4.5	89	100

Tableaux 6.a.(suite) Répartition finale du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.1 g Cr³⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Cr1 [0.5]60: Element: Chrome(III) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 0.5 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm
 Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de chrome: 709 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 52 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en chrome(III) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=130 ppm) (5)	Répartition finale brute de chrome(III) par zone en % (6)	Répartition pondérée de chrome(III) par zone en % (7)
(+)						
1	829.7	27.6	24	0.2	4	4
2	1193.9	24.1	48	0.4	7	9
3	1134.3	28.0	65	0.5	10	12
4	1089.0	24.4	138	1.1	21	24
5	1130.1	24.5	291	2.2	45	51
(-)	5377.0	Moy=25.7	566	4.4	87	100

ESSAI Cr2 [0.5]60: Element: Chrome(III) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 0.5 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm
 Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de chrome: 709 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 194 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en chrome(III) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=130 ppm) (5)	Répartition finale brute de chrome(III) par zone en % (6)	Répartition pondérée de chrome(III) par zone en % (7)
(+)						
1	1136.7	25.0	21	0.2	3	3
2	1179.8	23.2	26	0.2	4	4
3	1161.7	23.0	33	0.3	5	5
4	1011.8	23.8	182	1.4	28	28
5	934.5	24.0	382	2.9	59	60
(-)	5424.5	Moy=23.8	644	5.0	99	100

Tableaux 6.b. Répartition finale du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 0.5 g Cr³⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Cr1 [1]60:

Element: Chrome(III)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5000 g
Poids initial de liquide: 1300 g
Poids initial de chrome: 1.300 g
Teneur initiale eau: 26 %
Durée de l'essai: 72 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en chrome(III) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm) (5)	Répartition finale brute de chrome(III) par zone en % (6)	Répartition pondérée de chrome(III) par zone en % (7)
(+)						
1	966.3	27.2	67	0.3	5	5
2	1040.2	24.9	125	0.5	10	10
3	1050.9	24.5	238	0.9	18	18
4	867.3	24.7	213	0.8	16	17
5	1032.3	24.9	648	2.5	50	50
(-)						
	4957.0	Moy=25.2	1291	5.0	99	100

ESSAI Cr2 [1]60:

Element: Chrome(III)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5000 g
Poids initial de liquide: 1300 g
Poids initial de chrome: 1.300 g
Teneur initiale eau: 26 %
Durée de l'essai: 198 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en chrome(III) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm) (5)	Répartition finale brute de chrome(III) par zone en % (6)	Répartition pondérée de chrome(III) par zone en % (7)
(+)						
1	984.2	27.3	37	0.1	3	3
2	897.7	24.7	48	0.2	4	4
3	1089.9	23.9	65	0.3	5	5
4	1040.4	24.5	114	0.4	9	9
5	954.4	25.0	995	3.8	77	79
(-)						
	4966.6	Moy=25.09	1259	4.8	97	100

Tableaux 6.c. Répartition finale du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Cr³⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Cr3 [1]60:

Element: Chrome(III) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5000 g
 Poids initial de liquide: 1300 g
 Poids initial de chrome: 1.300 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 550 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en chrome(III) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm)	Répartition finale brute de chrome(III) par zone en %	Répartition pondérée de chrome(III) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1075.1	25.9	36	0.1	3	3
2	1037.8	24.1	43	0.2	3	4
3	1000.5	23.3	53	0.2	4	5
4	975.4	24.2	222	0.9	17	21
5	878.5	25.1	717	2.8	55	67
(-)	4967.2	Moy=24.5	1071	4.1	82	100

ESSAI Cr4 [1]60:

Element: Chrome(III) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5000 g
 Poids initial de liquide: 1300 g
 Poids initial de chrome: 1.300 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 701 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en chrome(III) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm)	Répartition finale brute de chrome(III) par zone en %	Répartition pondérée de chrome(III) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1200.1	25.1	33	0.1	3	2
2	774.9	23.8	37	0.1	3	3
3	1222.6	23.2	52	0.2	4	4
4	892.8	24.5	230	0.9	18	18
5	885.0	25.0	960	3.7	74	73
(-)	4975.5	Moy=24.2	1312	5.0	101	100

Tableaux 6.c.(suite) Répartition finale du chrome (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Cr³⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

Intensité électrique pour les essais réalisés avec le zinc:

Tension initiale: 60 Volts

Gradient électrique théorique: 2.6 Volts/cm

Concentration initiale solution de zinc: 1 g/l

Temps (heures)	Essai Zn1[1]60	Temps (heures)	Essai Zn2[1]60	Temps (heures)	Essai Zn3[1]60
0.0	149.0	0.0	150.0	0.0	178.0
2.0	39.0	0.8	84.0	0.2	119.0
5.0	35.0	1.7	50.0	0.5	80.0
6.0	34.0	3.4	32.0	1.0	64.0
22.0	10.0	5.4	25.0	1.5	58.0
24.0	13.0	6.4	24.0	2.0	55.0
26.5	11.0	8.4	15.0	3.0	53.0
30.0	10.0	23.4	9.0	3.5	45.0
-	-	24.9	11.0	5.3	33.0
-	-	25.4	13.0	21.0	16.0
-	-	27.4	9.0	22.5	19.0
-	-	28.4	12.0	25.1	18.0
-	-	44.4	11.0	27.0	20.0
-	-	46.4	31.0	28.0	15.0
-	-	48.9	26.0	30.0	15.0
-	-	52.4	27.0	45.0	29.0
-	-	117.4	14.0	46.5	32.0
-	-	124.4	12.0	47.0	31.0
-	-	139.9	14.0	49.0	30.0
-	-	143.9	12.0	52.0	28.0
-	-	146.4	11.4	53.0	27.0
-	-	148.4	11.6	69.0	22.0
-	-	163.9	12.5	71.0	24.0
-	-	168.9	13.3	73.5	24.0
-	-	187.9	14.2	77.0	26.0
-	-	-	-	142.0	11.0
-	-	-	-	149.0	13.0
-	-	-	-	164.0	13.0
-	-	-	-	168.0	12.0
-	-	-	-	170.5	12.0
-	-	-	-	172.5	12.0
-	-	-	-	188.0	10.8
-	-	-	-	193.0	11.4
-	-	-	-	212.0	13.0
-	-	-	-	236.0	14.2
-	-	-	-	309.0	8.8
-	-	-	-	333.0	8.8
-	-	-	-	335.0	9.3
-	-	-	-	339.5	9.1
-	-	-	-	356.5	8.6
-	-	-	-	380.5	8.5
-	-	-	-	405.8	9.5
-	-	-	-	478.5	10.4

Tableaux 7.a. Résultats de l'intensité électrique (mA) en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 1 g Zn²⁺/l (d.d.p = 60 volts)

Intensité électrique pour les essais réalisés avec le zinc:

Tension initiale: 60 Volts
 Gradient électrique théorique: 2.6 Volts/cm
 Concentration initiale solution de zinc: 3 g/l

Temps (heures)	Essai Zn1[3]60	Temps (heures)	Essai Zn2[3]60
0.0	344.9	0	324.1
0.3	342	1.5	76.6
1.8	73	19	25.7
4.3	56	24	31
6.3	47.3	43	32.8
21.8	41.5	116	51.2
26.8	35.52	140	53.5
28.3	33.3	142	54.9
45.8	32.1	146.5	56.6
50.8	33.4	163.5	48.2
-	-	171.75	52.9
-	-	187.5	56.1

Moyenne des intensités des essais Zn[3]60

Temps (h)	Moyenne
0.0	334.5
1.5	74.8
4.3	56.0
6.3	47.3
21.0	41.5
25	33.1
44	32.4
116	51.2
140	53.5
142	54.9
146.5	56.6
163.5	48.2
171.75	52.9
187.5	56.1

Tableaux 7.b. Résultats de l'intensité électrique brute et valeurs moyennes (mA) en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 3 g Zn²⁺/l (d.d.p =60 volts)

Moyenne des intensités Essais Zn[1]60

Temps (h)	Moyenne
0.0	159.0
2.5	61.7
7.5	27.7
22.5	13.0
27.5	18.9
45.0	27.1
60.0	26.0
135.0	12.1
165.0	12.6
190.0	12.1
142.0	11.0
149.0	13.0
164.0	13.0
168.0	12.0
170.5	12.0
172.5	12.0
188.0	10.8
193.0	11.4
212.0	13.0
236.0	14.2
309.0	8.8
333.0	8.8
335.0	9.3
339.5	9.1
356.5	8.6
380.5	8.5
405.8	9.5
478.5	10.4

Tableaux 7.c. Valeurs moyennes des intensités électriques (mA) en fonction du temps pour des sables pollués avec du zinc avec une concentration de 1 de Zn²⁺/l (d.d.p = 60 volts)

Tension électrique (Volts) pour chaque zone de sol pour les essais réalisés avec le zinc (C=1 g/l):

Temps (heures)	0-Z1	z1-z2	z2-z3	z3-z4	z4-z5	z5-0	Total
0.0	3.9	5.9	8.1	7.4	7.4	26.4	59.1
2.0	1.6	2.0	2.5	2.2	2.9	47.9	59.1
5.0	1.3	1.8	2.3	2.1	2.6	46.1	56.1
22.0	0.8	0.5	0.8	0.6	51.7	5.5	59.9
26.5	0.8	0.6	0.9	0.9	49.4	7.4	59.9
30.0	0.8	0.5	0.7	0.8	51.4	5.1	59.3

Zn1(1)60

Temps (heures)	0-Z1	z1-z2	z2-z3	z3-z4	z4-z5	z5-0	Total
0.0	6.8	8.6	7.2	9.9	11.3	14.8	58.6
1.7	2.7	3.0	2.8	3.5	44.9	3.2	60.0
3.4	2.0	1.7	1.4	2.0	50.6	2.3	59.9
5.4	1.6	1.4	1.2	1.7	51.0	1.3	58.2
6.4	1.3	1.2	1.1	1.6	51.5	1.4	58.0
8.4	1.2	0.8	0.7	1.0	54.5	1.7	59.8
23.4	0.9	0.5	0.5	0.7	56.4	1.0	60.0
25.4	1.0	0.6	0.6	0.7	56.0	0.9	59.9
27.4	0.9	0.4	0.4	0.6	56.5	1.2	59.9
28.4	1.0	0.6	0.6	1.2	56.3	0.4	60.0
44.4	1.3	1.4	4.1	2.0	49.5	1.3	59.6
117.4	0.4	0.6	1.2	12.7	42.2	1.9	58.9
124.4	0.4	0.6	1.5	26.9	27.0	3.4	59.7
163.9	0.3	0.5	1.3	18.3	34.0	5.2	59.5
187.9	0.4	0.6	1.2	4.6	48.2	3.9	58.9

Zn2(1)60

Temps (heures)	0-Z1	z1-z2	z2-z3	z3-z4	z4-z5	z5-0	Total
0.0	-	10.6	9.9	10.9	6.9	-	-
0.5	3.6	4.6	4.3	4.9	2.9	34.2	54.5
1.5	2.7	3.4	3.2	3.5	3.2	42.9	58.9
3.0	2.4	3.0	2.8	3.4	3.9	42.6	58.1
21.0	0.9	1.0	0.8	1.6	37.7	17.7	59.7
25.0	1.1	1.1	0.9	2.6	40.3	14.0	59.9
27.0	1.1	1.1	0.9	7.3	34.1	15.1	59.8
28.0	1.0	0.8	0.7	36.6	14.2	6.6	59.8
30.0	1.0	0.8	0.7	36.9	14.9	5.5	59.8
45.0	1.1	1.2	15.4	21.4	12.4	6.8	58.2
47.0	1.1	1.9	8.8	4.7	32.4	10.0	59.0
52.0	1.0	1.3	4.8	1.7	27.2	23.4	59.3
69.0	0.6	1.0	13.9	19.4	17.9	7.1	59.9
73.5	0.5	1.0	11.2	16.0	9.5	20.6	58.8
142.0	0.3	0.5	1.7	27.3	25.4	4.2	59.4
164.0	0.3	0.7	2.4	25.6	28.1	2.4	59.5
188.0	0.3	0.6	1.2	20.9	20.4	16.2	59.5
212.0	0.3	0.8	3.0	30.4	9.3	15.6	59.3
236.0	0.3	0.9	18.5	25.1	8.2	3.7	57.7
309.0	3.4	7.6	10.1	19.8	11.5	6.2	58.6
356.5	0.2	0.5	37.8	12.1	2.5	6.8	59.8
478.5	0.2	0.5	16.5	11.0	6.5	23.0	57.5

Zn3(1)60

Tension électrique (Volts) pour chaque zone de sol pour les essais réalisés avec le zinc (C=3 g/l):

Temps (heures)	0-Z1	z1-z2	z2-z3	z3-z4	z4-z5	z5-0	Tension totale
0.00	6.0	10.8	8.4	9.4	9.2	5.0	48.7
0.50	1.6	2.0	1.3	1.6	2.0	50.4	59.0
1.50	1.3	1.5	0.8	1.2	1.9	53.1	59.7
3.00	1.1	1.2	0.9	1.4	1.5	53.6	59.7
21.00	0.4	1.4	0.6	1.2	4.1	51.9	59.7

Zn1(3)60

Temps (heures)	0-Z1	z1-z2	z2-z3	z3-z4	z4-z5	z5-0	Tension totale
0.00	5.6	7.9	9.2	8.8	6.3	8.0	45.8
19.00	0.9	0.7	0.9	0.8	1.4	54.0	58.6
43.00	0.9	0.7	0.9	1.0	1.9	54.5	59.8
116.00	0.5	0.8	1.3	2.2	7.8	46.9	59.5
140.00	0.4	0.9	1.8	2.8	4.6	49.8	60.0
163.50	0.4	0.8	1.6	3.2	4.4	47.0	57.3
171.75	0.5	0.6	0.2	0.5	1.6	55.8	59.1
187.50	0.5	1.0	1.8	3.9	6.0	45.5	58.6

Zn2(3)60

Tableaux 7.e. Résultats de la tension électrique (Volts) mesurée sur un sable pollué par du zinc avec une concentration initiale de 3 g de Zn²⁺/l (d.d.p= 60 volts).

Tableaux 7.d. Résultats de la tension électrique moyenne (Volts) mesurée sur un sable pollué par du zinc avec une concentration initiale de 1 g de Zn²⁺/l (d.d.n= 60 volts).

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)							
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	20-25	
0.0	6.51	6.53	6.48	6.38	6.29	6.38	6.44	6.42	6.38	6.17	6.09	6.09	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5	6.29	6.28	6.25	6.27	6.29	6.27	6.44	6.49	6.43	6.43	6.25	6.25	1.120	1.125	1.144	1.169	1.169	1.054	1.054	
7.5	6.17	6.28	6.29	6.26	6.26	6.26	6.46	6.46	6.52	6.51	9.26	9.26	1.125	1.174	1.167	1.173	1.173	0.849	0.849	
23.5	6.21	6.46	6.51	6.52	7.62	7.62	6.25	6.68	6.66	6.75	9.83	9.83	0.953	0.971	1.052	1.017	1.017	0.039	0.039	
28.5	5.89	6.51	6.55	6.37	11.87	11.87	5.78	6.49	6.45	6.43	10.26	10.26	1.189	1.265	1.311	1.291	1.291	0.090	0.090	
31.5	6.24	6.46	6.57	6.36	11.26	11.26	5.63	6.12	6.14	6.15	9.58	9.58	1.386	1.470	1.484	1.444	1.444	0.087	0.087	

Zn1(r)60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)							
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	20-25	
0.0	6.60	6.35	6.47	6.36	6.90	6.90	6.59	6.61	6.58	6.51	6.54	6.54	1.274	1.290	1.270	1.322	1.322	1.181	1.181	
0.2	6.76	6.69	6.72	6.85	11.96	11.96	6.35	6.30	6.29	6.28	6.78	6.78	1.209	1.247	1.273	1.315	1.315	0.385	0.385	
3.4	6.55	6.57	6.59	6.78	10.89	10.89	6.45	6.46	6.51	6.61	8.46	8.46	1.190	1.224	1.263	1.288	1.288	0.268	0.268	
23.4	6.21	6.42	6.56	6.74	11.15	11.15	6.20	6.74	6.77	6.89	9.65	9.65	1.059	1.105	1.132	1.151	1.151	0.408	0.408	
27.4	6.31	6.41	6.57	6.72	10.63	10.63	5.80	6.42	6.55	6.74	9.85	9.85	1.084	1.084	1.094	1.064	1.064	0.376	0.376	
31.4	6.17	6.39	6.52	6.77	10.66	10.66	6.12	6.52	6.74	6.78	9.45	9.45	1.084	1.094	1.105	1.031	1.031	0.554	0.554	
47.4	6.14	6.52	6.00	7.17	11.41	11.41	5.74	6.21	6.64	6.60	9.80	9.80	1.204	1.232	1.336	1.150	1.150	0.153	0.153	
52.4	5.89	6.31	10.92	6.94	9.67	9.67	5.22	6.06	6.32	7.40	10.68	10.68	1.378	1.292	0.394	0.317	0.317	0.707	0.707	
120.4	4.45	4.81	5.93	5.93	10.04	10.04	5.35	5.47	5.63	6.40	7.96	7.96	2.170	1.741	0.944	0.008	0.008	0.025	0.025	
127.4	4.39	4.67	5.93	6.33	7.62	7.62	5.14	5.30	5.59	6.53	7.23	7.23	1.966	1.633	0.830	0.020	0.020	0.030	0.030	
143.4	4.34	4.67	5.87	7.52	7.48	7.48	5.01	5.19	5.43	6.19	8.75	8.75	1.995	1.715	0.012	0.009	0.009	0.027	0.027	
151.4	4.79	5.06	5.85	10.90	8.41	8.41	5.00	5.20	5.60	6.86	7.51	7.51	1.976	1.753	0.740	0.019	0.019	0.027	0.027	
167.4	4.55	4.73	5.46	9.39	7.55	7.55	5.08	5.20	5.41	5.89	7.91	7.91	2.160	1.867	0.634	0.013	0.013	0.034	0.034	
191.4	4.73	5.02	5.45	7.26	10.70	10.70	5.04	5.24	5.44	5.60	8.83	8.83	2.030	1.485	0.524	0.022	0.022	0.016	0.016	

Zn2(r)60

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)							
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	20-25	
0	6.46	6.77	6.66	6.56	6.40	6.40	6.41	6.43	6.50	6.35	6.12	6.12	1.248	1.249	1.244	1.276	1.321	1.321	1.321	
2.5	6.71	6.28	6.71	6.49	4.19	4.19	6.64	6.23	6.25	6.22	5.99	5.99	1.286	1.261	1.323	1.379	1.512	1.512	1.512	
4.25	6.05	6.37	6.25	6.09	2.96	2.96	6.30	6.30	6.13	6.13	5.98	5.98	1.273	1.262	1.363	1.220	0.948	0.948	0.948	
21.5	6.21	6.35	6.29	5.51	10.08	10.08	6.14	6.97	7.10	7.33	11.18	11.18	1.117	1.235	1.296	0.888	0.032	0.032	0.032	
25.5	6.27	6.38	6.39	5.75	13.74	13.74	5.67	6.43	6.55	8.51	11.06	11.06	1.152	1.260	1.309	0.413	0.039	0.039	0.039	
28.5	6.22	6.54	6.83	7.02	13.69	13.69	5.87	6.69	6.71	8.82	10.89	10.89	1.100	1.104	1.143	0.078	0.085	0.085	0.085	
45.5	5.18	5.53	10.93	7.91	11.50	11.50	5.56	6.09	6.07	6.55	11.50	11.50	1.077	1.127	0.395	0.034	0.127	0.127	0.127	
49.5	5.86	6.20	13.90	12.33	12.26	12.26	5.57	6.05	6.72	6.72	10.43	10.43	1.206	1.153	0.159	0.109	0.104	0.104	0.104	
53.5	5.31	6.20	11.41	7.39	13.02	13.02	5.54	5.83	6.39	6.66	11.20	11.20	1.291	1.144	0.123	0.482	0.094	0.094	0.094	
69.5	5.50	6.49	12.98	13.44	13.78	13.78	5.31	5.90	5.70	7.69	7.22	7.22	1.300	1.070	0.042	0.023	0.035	0.035	0.035	
74.5	5.14	5.66	11.99	8.85	9.57	9.57	4.63	5.12	5.33	5.33	7.20	7.20	1.627	1.253	0.047	0.028	0.037	0.037	0.037	
142.5	4.88	5.21	6.07	7.85	10.08	10.08	5.48	5.90	6.46	8.29	10.67	10.67	1.586	1.242	0.222	0.009	0.008	0.008	0.008	
149.5	4.55	4.75	5.93	5.70	9.41	9.41	5.20	5.34	5.75	8.15	9.52	9.52	1.763	1.186	0.410	0.009	0.015	0.015	0.015	
165.5	4.55	4.74	5.38	9.64	10.20	10.20	5.05	5.12	6.26	5.67	8.42	8.42	1.578	1.284	0.213	0.010	0.148	0.148	0.148	
173.5	5.02	5.30	5.54	6.62	7.17	7.17	5.03	5.16	5.43	5.75	7.77	7.77	1.929	1.348	0.043	0.020	0.018	0.018	0.018	
189.5	4.79	5.02	5.36	8.26	7.74	7.74	5.24	5.39	5.55	6.12	6.65	6.65	1.811	1.348	0.637	0.013	0.013	0.013	0.013	
213.5	4.95	5.38	5.44	8.63	9.31	9.31	5.03	5.20	5.59	7.34	7.75	7.75	1.778	1.101	0.164	0.018	0.008	0.008	0.008	
237.5	4.83	5.42	8.68	9.47	8.20	8.20	4.74	4.92	5.76	7.30	8.20	8.20	2.040	0.976	0.016	-	-	-	-	
310.0	4.77	5.82	9.11	7.50	9.43	9.43	5.50	5.80	7.22	8.47	9.16	9.16	1.114	0.740	0.410	0.135	0.189	0.189	0.189	
335.0	5.59	6.57	7.58	6.93	6.39	6.39	5.70	5.82	7.63	7.69	8.06	8.06	1.335	0.095	0.005	0.003	0.008	0.008	0.008	
478.5	4.69	5.08	4.98	5.90	4.82	4.82	5.13	5.37	6.03	7.20	7.20	7.20	0.519	0.688	0.005	0.005	0.010	0.010	0.010	

Zn3(r)60

Temps (heures)	pH de l'eau Interstitielle						pH du sol						Conductivité eau Interstitielle (mS/cm)										
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25
0	6.09	5.84	5.90	5.87	5.71	-	5.94	5.85	5.77	5.67	5.49	-	4.286	4.339	4.366	4.459	4.538	-	4.286	4.339	4.366	4.459	4.538
2	6.11	6.16	6.12	6.05	5.99	-	5.92	5.81	5.75	5.64	5.23	-	4.485	4.591	4.724	4.844	4.671	-	4.485	4.591	4.724	4.844	4.671
6.5	6.13	6.10	6.02	5.94	6.00	-	5.81	5.76	5.71	5.67	5.45	-	4.552	4.605	4.605	4.698	4.353	-	4.552	4.605	4.605	4.698	4.353
22.5	6.10	6.11	6.09	6.05	6.48	-	5.69	5.76	5.70	5.66	6.26	-	4.538	4.698	4.698	4.645	1.992	-	4.538	4.698	4.698	4.645	1.992
46.5	6.50	6.39	6.29	6.84	7.19	-	5.76	5.99	5.99	5.96	6.15	-	4.100	3.981	3.755	3.158	0.031	-	4.100	3.981	3.755	3.158	0.031
51.5	5.43	6.09	6.29	6.22	7.10	-	5.28	6.33	6.17	6.22	6.60	-	4.525	4.817	4.737	3.968	0.086	-	4.525	4.817	4.737	3.968	0.086

Zn1(3)60

Temps (heures)	pH de l'eau Interstitielle						pH du sol						Conductivité eau Interstitielle (mS/cm)										
	+		-		-		+		-		-		+		-		-		+		-		
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25
0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.5	6.10	6.11	6.10	6.01	6.02	-	5.89	5.81	5.76	5.68	5.56	-	4.751	4.936	5.003	5.255	5.427	-	4.751	4.936	5.003	5.255	5.427
19.5	6.18	6.31	6.34	6.13	5.15	-	6.13	6.12	6.07	6.04	6.05	-	4.499	4.485	4.472	4.260	2.091	-	4.499	4.485	4.472	4.260	2.091
43.5	5.81	6.06	6.21	5.93	5.86	-	5.86	5.93	5.88	5.91	5.91	-	5.733	5.467	5.175	2.972	0.027	-	5.733	5.467	5.175	2.972	0.027
116.0	4.45	4.65	4.46	5.87	8.99	-	5.01	5.03	4.81	5.01	8.10	-	5.693	5.945	5.759	1.886	0.070	-	5.693	5.945	5.759	1.886	0.070
141.0	4.31	4.39	4.30	3.85	7.75	-	4.74	4.82	5.72	5.24	8.01	-	7.126	6.874	4.923	3.251	0.171	-	7.126	6.874	4.923	3.251	0.171
191.5	4.29	4.39	4.57	4.13	4.76	-	4.88	4.84	4.90	5.07	6.43	-	7.617	7.962	3.954	1.879	0.060	-	7.617	7.962	3.954	1.879	0.060

Zn2(3)60

Tableaux 8.b. Résultats des mesures de pH et de conductivité électrique en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de $3 \text{ g Zn}^{2+}/\text{l}$ (pH initial de la solution de ZnSO_4 à $3 \text{ g Zn}^{2+}/\text{l}$: 4.95 et conductivité électrique initiale: 4.66 mS/cm; d.d.p=60 volts)

pH moyen dans le liquide										pH moyen dans le sol des Essais Zn(1)60										Conductivité électrique (mS/cm) dans le liquide									
pH moyen dans le liquide		pH moyen dans le sol des Essais Zn(1)60		pH moyen dans le liquide		pH moyen dans le sol des Essais Zn(1)60		pH moyen dans le liquide		pH moyen dans le sol des Essais Zn(1)60		Conductivité électrique (mS/cm) dans le liquide		Conductivité électrique (mS/cm) dans le liquide		Conductivité électrique (mS/cm) dans le liquide		Conductivité électrique (mS/cm) dans le liquide		Conductivité électrique (mS/cm) dans le liquide		Conductivité électrique (mS/cm) dans le liquide							
Temps (h)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Temps (h)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Temps (h)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)		
0	6.51	6.53	6.48	6.38	6.29	6.44	6.42	6.38	6.17	6.09	6.44	6.42	6.38	6.17	6.09	0	1.248	1.249	1.244	1.244	1.244	1.248	1.248	1.249	1.244	1.244	1.276	1.321	
2.5	6.47	6.45	6.50	6.43	6.33	6.45	6.39	6.39	6.32	6.27	6.45	6.39	6.39	6.32	6.27	2.5	1.233	1.227	1.253	1.291	1.083	1.233	1.227	1.253	1.291	1.291	1.083	1.083	
7.5	6.36	6.42	6.44	6.52	6.57	6.45	6.49	6.51	6.56	6.86	6.45	6.49	6.51	6.56	6.86	7.5	1.196	1.220	1.264	1.227	0.621	1.196	1.220	1.264	1.227	1.227	0.621	0.621	
20	6.18	6.43	6.52	6.37	11.28	5.95	6.63	6.67	7.35	10.38	5.95	6.63	6.67	7.35	10.38	20	1.083	1.147	1.190	0.843	0.152	1.083	1.147	1.190	0.843	0.843	0.152	0.152	
40	5.91	6.22	9.16	8.10	11.41	5.72	6.19	6.37	6.96	10.15	5.72	6.19	6.37	6.96	10.15	40	1.191	1.215	0.695	0.553	0.201	1.191	1.215	0.695	0.553	0.553	0.201	0.201	
55	5.56	6.33	11.63	9.25	12.15	5.38	5.94	6.35	7.03	10.94	5.38	5.94	6.35	7.03	10.94	55	1.334	1.218	0.258	0.399	0.400	1.334	1.218	0.258	0.399	0.399	0.400	0.400	
70	5.32	6.07	12.28	11.14	11.67	4.97	5.46	5.41	6.51	7.21	4.97	5.46	5.41	6.51	7.21	70	1.463	1.161	0.044	0.025	0.036	1.463	1.161	0.044	0.025	0.025	0.036	0.036	
145	4.59	4.87	5.95	7.02	8.99	5.17	5.38	5.81	7.37	9.11	5.17	5.38	5.81	7.37	9.11	145	1.781	1.381	0.214	0.009	0.016	1.781	1.381	0.214	0.009	0.009	0.016	0.016	
180	4.63	4.84	5.56	9.97	8.72	5.05	5.16	5.70	5.63	8.03	5.05	5.16	5.70	5.63	8.03	180	1.918	1.634	0.529	0.014	0.069	1.918	1.634	0.529	0.014	0.014	0.069	0.069	
225	4.89	5.40	7.06	9.05	8.76	4.89	5.06	5.68	7.32	7.98	4.89	5.06	5.68	7.32	7.98	225	1.916	1.495	0.465	0.018	0.015	1.916	1.495	0.465	0.018	0.018	0.015	0.015	
325	5.18	6.20	8.35	7.22	7.91	5.60	5.81	7.43	8.08	8.61	5.60	5.81	7.43	8.08	8.61	325	1.914	1.425	0.433	0.009	0.008	1.914	1.425	0.433	0.009	0.009	0.008	0.008	
425	4.69	5.08	4.98	5.90	4.32	5.13	5.37	6.03	7.20		5.13	5.37	6.03	7.20		425	0.519	0.688	0.005	0.005	0.010	0.519	0.688	0.005	0.005	0.005	0.010	0.010	

pH moyen dans le liquide										pH moyen dans le sol des Essais Zn(3)60										Conductivité moyenne (mS/cm) dans le liquide									
pH moyen dans le liquide		pH moyen dans le sol des Essais Zn(3)60		pH moyen dans le liquide		pH moyen dans le sol des Essais Zn(3)60		pH moyen dans le liquide		pH moyen dans le sol des Essais Zn(3)60		Conductivité moyenne (mS/cm) dans le liquide																	
temps (h)	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5	temps (h)	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5	temps (h)	Zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5		
0	6.09	5.84	5.90	5.87	5.71	5.94	5.85	5.77	5.67	5.49	4.286	4.339	4.366	4.459	4.538	0	4.286	4.339	4.366	4.459	4.538	0	4.286	4.339	4.366	4.459	4.538		
2	6.10	6.11	6.10	6.11	6.02	5.89	5.81	5.76	5.68	5.56	4.751	4.936	5.003	5.255	5.427	2	4.751	4.936	5.003	5.255	5.427	2	4.751	4.936	5.003	5.255	5.427		
6.5	6.13	6.21	6.22	6.09	5.82	5.91	5.81	5.89	5.85	5.45	4.552	4.605	4.605	4.698	4.353	6.5	4.552	4.605	4.605	4.698	4.353	6.5	4.552	4.605	4.605	4.698	4.353		
20	6.14	6.21	6.22	6.09	5.82	5.91	5.81	5.89	5.85	5.45	4.552	4.605	4.605	4.698	4.353	20	4.552	4.605	4.605	4.698	4.353	20	4.552	4.605	4.605	4.698	4.353		
45	6.16	6.23	6.25	6.19	6.03	5.81	5.96	5.94	5.94	6.03	4.917	4.724	4.585	4.452	2.042	45	4.917	4.724	4.585	4.452	2.042	45	4.917	4.724	4.585	4.452	2.042		
116	4.45	4.65	4.46	5.87	8.99	5.01	5.03	4.81	5.01	8.10	5.693	5.945	5.759	1.886	0.070	116	5.693	5.945	5.759	1.886	0.070	116	5.693	5.945	5.759	1.886	0.070		
141	4.31	4.39	4.30	3.85	7.75	4.74	4.82	5.72	5.24	8.01	7.126	6.874	4.923	3.251	0.171	141	7.126	6.874	4.923	3.251	0.171	141	7.126	6.874	4.923	3.251	0.171		
191	4.29	4.39	4.57	4.13	4.76	4.88	4.84	4.90	5.07	6.43	7.617	7.962	3.954	1.879	0.060	191	7.617	7.962	3.954	1.879	0.060	191	7.617	7.962	3.954	1.879	0.060		

Tableaux 8.c. Valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique en fonction du temps pour des sables pollués avec du zinc avec une concentration de 1 et 3 g de Zn²⁺/l (d.d.p=60 volts)

ESSAI Zn1 [1]60: Element: Zinc(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm
 Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de zinc: 1.418 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 31.5 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en zinc(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm)	Répartition finale brute de zinc(II) par zone en %	Répartition pondérée de zinc(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1135.0	27.1	121	0.5	9	9
2	990.1	25.5	171	0.7	13	13
3	1334.7	22.1	237	0.9	18	19
4	883.1	29.2	225	0.9	17	18
5	1069.0	25.4	516	2.0	40	41
(-)						
	5411.9	Moy=25.8	1270	4.9	98	100

ESSAI Zn2 [1]60: Element: Zinc(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 1 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm
 Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de zinc: 1.418 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 193 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en zinc(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm)	Répartition finale brute de zinc(II) par zone en %	Répartition pondérée de zinc(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1114.9	23.6	31	0.1	2	2
2	1210.6	22.2	39	0.2	3	3
3	1068.5	22.5	83	0.3	6	7
4	1107.6	22.6	298	1.1	23	24
5	913.5	22.4	805	3.1	62	64
(-)						
	5415.1	Moy=22.6	1256	4.8	97	100

Tableaux 9.a. Répartition finale du zinc (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Zn²⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Zn3 [1]60:

Element: Zinc(II)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 2.6 Volts/cm

Poids initial sable: 5453 g
Poids initial de liquide: 1418 g
Poids initial de zinc: 1.418 g
Teneur initiale eau: 26 %
Durée de l'essai: 482 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en zinc(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm) (5)	Répartition finale brute de zinc(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de zinc(II) par zone en % (7)
(+)						
1	1195.5	23.2	4	0.02	0.3	0.3
2	1347.6	21.9	14	0.05	1	1
3	1114.0	22.4	104	0.40	8	8
4	903.8	22.8	208	0.80	16	16
5	854.0	22.7	948	3.65	73	75
(-)						
	5414.9	Moy=22.5	1278	4.92	98	100

Tableaux 9.a.(suite) Répartition finale du zinc (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Zn²⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ESSAI Zn1 [3]60: Element: Zinc(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 3 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm
 Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de zinc: 4.254 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 51.5 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en zinc(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=780 ppm)	Répartition finale brute de zinc(II) par zone en %	Répartition pondérée de zinc(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1212.9	24.9	258	0.3	7	7
2	963.7	23.3	509	0.7	13	15
3	1108.2	23.2	563	0.7	14	16
4	1109.3	22.8	435	0.6	11	13
5	1047.4	22.7	1700	2.2	44	49
(-)	5441.4	Moy=23.3	3465	4.4	89	100

ESSAI Zn2 [3]60: Element: Zinc(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 3 g/l Gradient électrique: 2.6 Volts/cm
 Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de zinc: 4.254 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 192.5 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en zinc(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=780 ppm)	Répartition finale brute de zinc(II) par zone en %	Répartition pondérée de zinc(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1005.3	22.3	129	0.17	3	3
2	1328.6	21.6	104	0.13	3	3
3	1186.1	25.6	8	0.01	0.2	0.2
4	982.2	21.1	250	0.32	6	7
5	960.8	19.5	3330	4.27	85	87
(-)	5463.0	Moy=22.02	3821	4.90	98	100

Tableaux 9.b. Répartition finale du zinc (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 3 g Zn²⁺/l (dosage du plomb sur 30 g d'échantillon représentatif de la zone testée)

ANNEXES III:

Tableaux de résultats du chapitre 5

Moyenne des Intensités électriques
Essais Pb[1]15

Temps (heures)	I1 (mA)	I2 (mA)	I3 (mA)	Moyenne de I
0.0	20.3	19.9	19.4	19.9
1.0	20.0	18.3	18.7	19.0
3.8	19.0	17.3	18.0	18.1
7.1	17.3	15.8	16.3	16.5
22.8	4.1	5.2	4.7	4.7
24.8	3.0	4.7	4.2	4.0
31.3	1.9	4.9	3.1	3.3
47.8	1.7	3.4	2.9	2.7
52.1	1.8	3.6	3.4	2.9
120.3	4.9	2.8	2.9	3.5
123.6	5.0	2.8	3.0	3.6
126.8	5.4	3.0	3.0	3.8
144.3	4.7	2.7	3.2	3.5
148.6	4.9	-	3.2	-
151.1	4.9	3.2	3.3	3.8
168.8	5.2	2.7	3.4	3.8
172.3	5.2	3.3	3.5	4.0
175.3	5.1	2.9	3.5	3.8
191.8	4.4	2.6	3.0	3.3

Tableaux 10.a. Résultats de l'intensité électrique (mA) en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l (d.d.p =15 V)

Moyenne des Intensité Essais Pb[1]30

Temps(heures)	Moyenne de I
0.0	44.9
2.5	37.6
7.5	31.5
15.0	6.2
25.0	4.6
35.0	4.3
45.0	5.6
55.0	6.5
115.0	8.4
125.0	4.9
135.0	8.4
145.0	5.5
155.0	5.1
165.0	6.0
175.0	3.9
190.0	3.6
210.0	3.5
285.0	6.5
310.0	4.3
330.0	4.1
350.0	4.1
375.0	4.3
485.0	3.1
525.0	2.1
675.0	2.2

Tableaux 10.c. Valeurs moyennes des intensités électriques (mA) en fonction du temps pour des sables pollués avec du plomb avec une concentration de 1 de Pb²⁺/l (d.d.p= 30 V)

Temps (heures)	Essai Pb1[1]30	Temps (heures)	Essai Pb2[1]30	Temps (heures)	Essai Pb3[1]30	Temps (heures)	Essai Pb4[1]30	Temps (heures)	Essai Pb5[1]30
0.0	-	0.0	45.6	0.0	44.1	0.0	-	0.0	-
0.5	38.8	1.0	42.9	1.0	42.3	0.5	39.4	0.5	39.2
1.5	35.4	4.0	35.4	4.0	31.4	1.5	35.2	1.5	36.3
16.1	6.3	6.0	33.3	6.0	32.0	16.1	7.5	16.1	6.4
17.1	5.9	7.0	33.2	7.0	31.2	17.1	7.6	17.1	5.7
17.8	5.4	8.5	29.7	8.5	29.7	17.8	6.3	17.8	5.1
20.3	4.8	23.8	5.8	23.8	3.5	20.3	4.2	20.3	4.1
21.8	4.3	25.5	6.1	25.5	3.5	21.8	4.1	21.8	3.9
23.8	4.3	26.3	5.8	26.3	3.3	23.8	3.7	23.8	3.8
24.8	4.4	28.8	5.6	28.8	3.1	24.8	4.4	24.8	3.7
-	-	30.8	5.6	30.8	3.1	25.5	3.5	25.5	3.5
-	-	32.8	5.8	32.8	2.9	42.3	2.4	42.3	4.5
-	-	47.3	9.1	47.3	2.7	44.8	2.7	44.8	5.5
-	-	49.3	12.0	49.3	3.0	47.3	3.1	47.3	6.4
-	-	52.3	11.3	52.3	3.1	48.8	3.3	48.8	7.1
-	-	56.8	8.4	56.8	3.2	112.3	6.9	112.3	9.7
-	-	120.3	3.9	120.3	3.2	114.3	7.4	114.3	9.6
-	-	124.8	3.9	124.8	3.3	116.9	7.2	116.9	9.8
-	-	128.3	4.0	128.3	3.2	120.8	8.3	120.8	9.5
-	-	144.3	3.4	144.3	3.1	136.3	9.0	136.3	7.9
-	-	146.8	3.5	146.8	3.2	140.8	8.1	140.8	7.8
-	-	147.8	3.5	147.8	3.2	143.8	7.8	143.8	7.7
-	-	149.8	3.7	149.8	3.4	160.3	7.9	160.3	8.0
-	-	152.8	3.7	152.8	3.4	168.8	9.0	168.8	8.1
-	-	168.3	3.5	168.3	3.5	280.8	6.9	280.8	6.2
-	-	175.3	3.6	175.3	3.6	286.3	6.9	286.3	6.1
-	-	192.3	3.5	192.3	3.6	302.8	3.8	302.8	5.9
-	-	197.8	3.7	197.8	3.5	305.8	3.4	305.8	5.8
-	-	217.3	3.6	217.3	3.5	311.8	3.5	311.8	5.7
-	-	-	-	291.8	3.8	328.5	2.3	328.5	5.4
-	-	-	-	-	-	332.8	2.9	332.8	5.7
-	-	-	-	-	-	336.8	3.0	336.8	5.4
-	-	-	-	-	-	352.3	2.8	352.3	5.4
-	-	-	-	-	-	359.5	2.7	359.5	5.6
-	-	-	-	-	-	376.8	2.6	376.8	6.4
-	-	-	-	-	-	383.8	2.6	383.8	5.8
-	-	-	-	-	-	472.8	2.1	472.8	8.2
-	-	-	-	-	-	480.5	2.1	480.5	8.6
-	-	-	-	-	-	496.8	2.1	496.8	9.0
-	-	-	-	-	-	-	-	545.8	6.8
-	-	-	-	-	-	-	-	617.8	1.9
-	-	-	-	-	-	-	-	623.8	2.1
-	-	-	-	-	-	-	-	641.8	2.2
-	-	-	-	-	-	-	-	687.8	2.2

Tableaux 10.b. Résultats de l'intensité électrique (mA) en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l (d.d.p = 30 V)

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						conductivité électrique (mS/cm)					
	(+)		(-)		(-)		(+)		(-)		(-)	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	20-25	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
Pb2[1]15												
0.00	5.84	5.74	5.69	5.75	6.07		1.230	1.230	1.240	1.200	1.200	
3.00	5.81	5.71	5.70	5.74	8.40		1.220	1.250	1.250	1.230	0.739	
6.25	5.52	5.86	5.88	6.35	9.10		1.170	1.240	1.240	1.150	0.684	
22.00	5.05	5.45	11.69	11.49	11.45		1.730	0.800	0.427	0.545	0.888	
26.75	5.14	4.53	11.25	11.31	11.71		1.630	0.269	0.274	0.532	1.030	
30.75	5.09	3.33	10.01	11.35	11.80		1.500	0.287	0.084	0.493	1.040	
47.50	4.43	2.50	7.52	10.61	11.15		1.790	0.549	0.095	0.337	1.230	
120.00	5.25	1.30	7.30	11.00	11.18		2.170	0.194	0.048	0.070	0.264	
144.00	4.98	1.70	9.12	9.00	11.30		2.060	0.200	0.050	0.050	0.624	
172.00	4.88	1.50	9.52	9.30	11.52		2.030	0.286	0.053	0.044	0.869	
215.00	5.40	2.70	7.50	9.96	11.75		2.340	0.341	0.025	0.030	0.868	

Tableaux 11.a. Résultats des mesures de pH et de conductivité électrique en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/ (d.d.p=15 V)

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle										pH du sol										Conductivité eau interstitielle (mS/cm)									
	+					-					+					-					+					-				
	0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25	
0.2	4.26	4.76	5.26	5.65	5.18	5.20	5.19	5.29	5.41	1.233	1.297	1.278	1.339	1.358																
1.8	5.24	5.39	5.19	4.78	5.51	5.52	5.74	5.98	6.19	1.148	1.217	1.270	1.319	1.068																
4.8	5.07	5.07	5.59	4.99	5.97	5.23	5.34	5.32	10.42	1.236	1.287	1.209	1.164	0.568																
6.5	3.97	5.52	5.26	5.47	10.38	5.64	5.57	5.41	10.61	1.085	1.150	1.140	1.235	0.497																
8.3	5.08	5.26	5.24	6.24	7.19	5.20	5.44	6.48	10.75	1.126	1.151	1.145	0.567	0.601																
24.0	5.65	4.56	4.79	4.14	5.33	5.63	7.55	9.44	9.08	0.856	0.510	0.370	0.398	0.186																
28.3	5.10	4.90	4.80	4.10	5.60	4.90	6.70	10.00	10.00	0.821	0.526	0.327	0.367	0.188																
32.3	5.77	4.43	4.88	5.44	5.38	5.39	7.30	8.75	9.96	0.989	0.638	0.342	0.386	0.339																
47.3	4.90	5.60	5.43	5.20	4.81	5.11	7.00	6.34	5.94	1.281	0.498	0.288	0.402	0.390																
52.0	4.90	4.60	4.70	4.50	4.40	4.80	6.00	5.50	5.30	1.722	0.403	0.139	0.353	0.360																
56.3	5.10	5.50	6.30	5.00	4.80	4.80	6.40	5.80	5.80	1.783	0.183	0.100	0.357	0.520																
119.8	3.90	3.70	4.70	3.10	5.10	4.80	5.50	8.80	7.80	1.142	0.145	0.047	0.033	0.069																
125.8	4.20	4.40	6.80	5.20	6.30	5.30	7.10	9.20	8.00	0.633	0.093	0.024	0.020	0.045																
145.3	-	4.40	4.70	7.40	8.60	5.20	5.70	8.80	8.00	0.378	0.292	0.013	0.021	0.067																
165.3	4.40	5.00	4.60	7.00	7.90	5.40	6.40	7.00	7.50	0.776	0.344	0.010	0.034	0.105																
189.3	4.31	5.04	4.56	8.55	8.72	5.76	6.83	8.69	7.56	10.11	0.458	0.265	0.012	0.116																
217.8	4.11	5.32	6.59	9.31	8.71	5.89	6.63	8.57	7.90	10.10	0.596	0.419	0.013	0.119																

Pb2[1]30

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle										pH du sol										Conductivité eau interstitielle (mS/cm)									
	+					-					+					-					+					-				
	0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		0-5		5-10		10-15		15-20		20-25	
0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.233	1.297	1.280	1.339	1.358																
1.8	3.23	4.73	4.57	4.94	4.33	5.44	5.59	5.72	6.04	1.259	1.295	1.274	1.394	1.452																
4.8	3.15	4.81	5.07	5.12	9.08	5.57	5.82	6.03	6.43	1.209	1.071	1.207	1.359	0.496																
6.5	5.20	5.22	5.36	6.10	7.67	5.42	5.89	6.13	10.80	1.136	1.183	1.244	0.617	0.558																
8.3	3.99	6.08	5.65	7.10	9.47	5.57	5.79	6.12	10.60	1.015	1.013	1.093	0.362	0.466																
24.0	5.26	4.58	-	9.58	9.84	5.61	6.48	10.01	10.65	0.729	0.270	0.029	0.126	0.437																
28.3	5.21	4.82	3.21	10.01	10.50	5.61	6.39	10.08	10.77	0.712	0.266	0.023	0.128	0.472																
32.3	5.08	4.43	4.75	9.98	10.31	5.59	6.26	8.36	10.84	0.651	0.151	0.018	0.118	0.348																
47.3	5.49	4.71	4.59	9.63	10.31	5.37	5.93	8.64	8.90	0.608	0.177	0.022	0.116	0.611																
52.0	5.37	4.94	4.26	9.64	10.23	5.37	5.85	5.89	10.24	0.652	0.309	0.013	0.109	0.376																
56.3	5.07	4.92	4.95	9.15	10.02	5.06	5.80	7.97	10.27	0.654	0.557	0.014	0.103	0.387																
119.8	4.45	4.84	5.61	8.60	10.39	4.78	6.03	7.68	9.90	1.036	0.884	0.018	0.065	0.656																
125.8	4.51	4.70	7.40	9.05	10.80	5.22	6.53	5.81	9.51	1.101	0.948	0.015	0.114	0.848																
165.3	4.32	4.85	7.20	8.54	10.48	4.88	5.60	5.66	9.35	1.102	0.909	0.015	0.043	0.435																
292.8	5.01	5.70	9.67	11.17	10.05	4.86	5.27	6.40	9.29	11.16	0.703	0.789	0.016	0.173																

Pb3[1]30

Tableaux 11. b. Résultats des mesures de pH et de conductivité électrique en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺ / (d.d.p= 30 V)

Temps (heures)	pH de l'eau interstitielle						pH du sol						Conductivité eau interstitielle (mS/cm)					
	+		-		-		+		-		-		+		-		-	
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	-
0.0	5.54	5.62	5.62	5.58	5.65	-	-	-	-	-	-	-	1.075	1.091	1.108	1.090	1.087	-
2.5	5.78	6.01	6.82	5.69	5.70	-	-	-	-	-	-	-	1.109	1.078	1.114	1.060	0.967	-
16.1	5.80	-	5.70	8.90	11.00	-	-	-	-	-	-	-	0.855	0.500	0.358	0.154	0.195	-
17.1	5.75	5.40	10.80	11.00	11.30	-	-	-	-	-	-	-	0.803	0.120	0.168	0.087	0.107	-
20.8	5.67	5.43	10.99	11.20	11.44	-	-	-	-	-	-	-	0.764	0.137	0.110	0.064	0.077	-
23.8	6.02	-	-	10.30	9.60	-	-	-	-	-	-	-	1.680	0.626	0.500	0.330	0.263	-
25.5	5.56	4.60	11.08	11.27	11.43	-	-	-	-	-	-	-	1.600	0.700	0.640	0.480	0.330	-
45.3	5.20	-	11.17	11.00	11.00	-	-	-	-	-	-	-	1.360	0.615	0.600	0.441	0.240	-
112.3	4.25	10.40	11.10	12.42	10.80	-	-	-	-	-	-	-	0.800	0.560	0.490	0.160	0.070	-
120.8	4.52	9.02	11.30	11.90	10.30	-	-	-	-	-	-	-	0.790	0.200	0.148	0.043	0.034	-
136.3	4.33	9.75	12.80	11.60	-	-	-	-	-	-	-	-	0.740	0.121	0.070	0.025	0.020	-
161.0	4.10	9.57	10.80	9.11	10.06	-	-	-	-	-	-	-	1.360	0.615	0.600	0.441	0.240	-
287.0	4.70	8.50	10.00	9.50	10.50	-	-	-	-	-	-	-	0.800	0.560	0.490	0.160	0.070	-
312.0	4.35	10.30	7.80	11.27	10.75	-	-	-	-	-	-	-	0.790	0.200	0.148	0.043	0.034	-
337.0	4.57	9.26	7.94	11.08	10.20	-	-	-	-	-	-	-	0.740	0.121	0.070	0.025	0.020	-
496.8	3.81	8.66	9.75	10.57	11.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Pb4[1]30

195 **Tableaux 11.b.** Résultats des mesures de pH et de conductivité électrique en fonction du temps pour du sable pollué avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺ / (d.d.p= 30 V)

pH moyen dans le liquide										pH moyen dans le sol des Essais Pb ¹ 30										Conductivité moyenne (mS/cm) dans le liquide									
Temps (h)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Temps (h)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Temps (h)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)	Temps (h)	Zone 1(+)	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5(-)						
0	4.90	5.19	5.44	5.61	5.41	0	5.20	5.21	5.19	5.29	5.41	0	1.075	1.091	1.108	1.090	1.087	0	1.075	1.091	1.108	1.090	1.087						
2.5	4.81	5.41	5.51	5.20	6.06	2.5	5.44	5.62	5.76	7.27	10.68	2.5	1.195	1.176	1.197	1.236	0.940	7.5	1.090	1.124	1.155	0.695	0.530						
7.5	4.56	5.52	5.37	6.22	8.67	7.5	5.45	5.67	6.03	10.69	11.16	15	0.862	0.430	0.328	0.180	0.157	15	0.862	0.430	0.328	0.180	0.157						
15	5.54	4.54	9.54	9.81	11.54	25	5.45	6.78	9.44	10.06	10.39	25	0.890	0.360	0.249	0.241	0.261	25	0.890	0.360	0.249	0.241	0.261						
25	5.45	4.36	6.62	8.27	9.03	50	5.08	6.16	6.69	7.65	8.74	50	1.161	0.357	0.162	0.242	0.369	50	1.161	0.357	0.162	0.242	0.369						
50	5.12	4.63	6.12	8.01	6.71	115	4.79	5.76	8.24	8.85	9.68	115	0.992	0.529	0.185	0.086	0.265	115	0.992	0.529	0.185	0.086	0.265						
115	4.28	6.00	6.27	8.56	9.43	130	5.26	6.81	7.50	8.75	9.39	130	0.816	0.340	0.084	0.050	0.236	130	0.816	0.340	0.084	0.050	0.236						
130	4.54	5.76	7.63	7.69	9.86	170	4.88	5.60	5.66	9.35	10.50	170	1.079	0.622	0.208	0.172	0.260	170	1.079	0.622	0.208	0.172	0.260						
170	4.36	6.00	6.30	8.02	9.32	275	4.86	5.27	6.40	9.29	11.16	275	0.751	0.674	0.253	0.088	0.121	275	0.751	0.674	0.253	0.088	0.121						
275	4.85	7.10	9.83	10.33	10.27	325						325	0.765	0.160	0.109	0.034	0.027	325	0.765	0.160	0.109	0.034	0.027						
325	4.46	9.78	7.87	11.17	10.47																								

Tableaux 11.c. Valeurs moyennes du pH et de la conductivité électrique en fonction du temps pour des sables pollués avec du plomb avec une concentration de 1 g de Pb²⁺/l (d.d.p= 30 V)

Temps (heures)	Concentration (mg/l)			
	0-5	5-10	10-15	15-20
0.0	652.0	-	677.0	-
2.5	478.9	475.0	492.8	410.2
12.5	103.5	253.0	246.2	113.7
25.0	54.0	28.0	104.0	100.0
50.0	113.1	29.3	13.7	40.9
115.0	180.5	40.2	7.7	49.6
140.0	142.2	29.7	7.8	97.1
				142.1

Pb3[1]15

Temps (heures)	Concentration (mg/l)			
	0-5	5-10	10-15	15-20
0.00	-	-	-	-
1.50	601.5	619.0	659.0	625.5
16.75	72.0	50.0	19.0	102.5
25.25	99.0	23.0	0.0	62.5
44.75	250.5	39.5	2.0	69.0
112.25	304.0	62.5	0.5	81.5
136.25	254.5	57.0	15.5	193.5
161.25	125.0	38.5	1.5	10.0
280.25	7.5	55.0	3.0	2.5
				5.0

Pb5[1]30

Tableaux 12.a. Mesures de la concentration en plomb de l'eau interstitielle pour des sables pollués avec du plomb pour 1 g de Pb²⁺ et pour une d.d.p de 15 V ou 30 V.

Explications de la méthode de calcul:

Le type de prélèvement entraîne un rapport volume sable/volume de liquide différent d'un échantillon à l'autre (ce qui se traduit par des teneurs en eau différentes).
On définit les paramètres suivants chaque échantillon:

- V: volume total de liquide dans la prise
- P: poids de sable sec de la prise

Pour connaître la concentration du liquide, on prélève un volume V1.

- V1: volume de liquide prélevé=1.28 ml
- C1: concentration en plomb (mg/l) dosée en absorption dans V1

Puis, pour connaître la quantité de plomb dans l'échantillon restant:

- Q2: Quantité de plomb de l'échantillon (séché) après attaque acide

Pour pouvoir comparer les échantillons entre eux, on considèrera qu'ils ont une teneur en eau identique (c'est à dire 24.5 %, teneur en eau initiale).

ESSAI Pb1[1]15:

Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm2)
Solution à 1 g/l Gradient électrique: 0.65 Volts/cm
Poids initial sable: 4500 g
Poids initial de liquide: 1102 g
Poids initial de plomb: 1.102 g
Teneur initiale eau:24.5 %
Durée de l'essai:215heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (P) (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Concentration C1 du volume V1 prélevé (mg/l) (4)	Volume restant dans l'échantillon après prélèvement de V1 (5)	Quantité Q2 de plomb de l'échantillon après attaque (mg) (6)	Quantité de plomb de l'échantillon sans la quantité apportée par le volume restant (mg/g) (7) (7)
(+)						
1.00	7.57	40.5	110.1	1.80	0.29	0.01
2.00	7.05	49.6	12.7	2.23	1.41	0.20
3.00	8.29	36.3	5.7	1.74	3.58	0.43
4.00	7.73	38.8	15.3	1.74	2.13	0.27
5.00	8.21	37.2	76.8	1.80	2.14	0.24
(-)						

Quantité de plomb de l'échantillon (ppm) (sable +eau) en considérant une teneur de 24.5 % (8)	Rapport des teneurs Tf/Ti (t=245 ppm) (9)	Repartition du plomb finale par zone en % (10)
38.9	0.16	3
199.0	0.81	16
432.3	1.76	36
275.5	1.12	23
263.2	1.07	22
1208.9	4.93	100

- (6): quantité de plomb de l'échantillon restant déduite de la va concentration dosée par ABS
- (7): quantité de plomb de l'échantillon (après attaque) restant à laquelle on soustrait la quantité issue du volume d'eau restant (V-V1) en considérant qu'il est à la concentration C1
- (8): on calcule la quantité de plomb totale que contiendrait cet échantillon en considérant qu'il est à une teneur en eau de 24.5 %

Tableaux 12.b. Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l et pour un champ électrique de 15 V.

ESSAI Pb1[1]30:

Element: plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 1 g/l Gradient électrique: 1.3 Volts/cm

Poids initial sable: 4500 g
 Poids initial de liquide: 1102 g
 Poids initial de plomb: 1.102 g
 Teneur initiale eau: 24.5 %
 Durée de l'essai: 25 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en %	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1.00	773.3	26.4	25	0.1	2	2
2.00	864.4	23.1	56	0.2	4	5
3.00	803.1	22.7	273	1	22	26
4.00	976.4	22.5	325	1	27	30
5.00	919.6	22.6	391	2	32	37
(-)	4336.9	Moy=23.4	1070	4.3	87	100

ESSAI Pb2 [1]30:

Element: Plomb(II) Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
 Solution à 1 g/l Gradient électrique: 1.3 Volts/cm

Poids initial sable: 5453 g
 Poids initial de liquide: 1418 g
 Poids initial de plomb: 1.418 g
 Teneur initiale eau: 26 %
 Durée de l'essai: 222 heures

Zone de prélèvement	Poids de sol sec prélevé par zone (g)	Teneur eau finale (W%) par zone	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en %	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(+)						
1	1066.1	25.3	19	0.1	1	2
2	1246.1	23.1	130	0.5	10	10
3	887.9	23.2	502	2	39	40
4	1332.7	22.7	332	1	26	26
5	878.0	22.7	277	1	21	22
(-)	5410.8	Moy=23.4	1260	4.8	97	100

Tableaux 12.c. Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l et pour un champ électrique de 30 V.

ESSAI Pb3 [1]30:

Element: Plomb(II)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 1.3 Volts/cm

Poids initial sable: 5453 g
Poids initial de liquide: 1418 g
Poids initial de plomb: 1.418 g
Teneur initiale eau: 26 %
Durée de l'essai: 296 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1.00	1089.7	23.9	31	0.12	2	3
2.00	1139.3	21.8	75	0.3	6	6
3.00	1000.7	22.1	347	1	27	28
4.00	1168.0	22.0	547	2	42	44
5.00	1008.5	21.8	235	1	18	19
(-)						
	5406.3	Moy=22.3	1235	5	95	100

ESSAI Pb4 [1]30:

Element: plomb(II)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 1.3 Volts/cm

Poids initial sable: 4500 g
Poids initial de liquide: 1102g
Poids initial de plomb: 1.102g
Teneur initiale eau: 24.5 %
Durée de l'essai: 496.7heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1.00	857.9	22.5	16	0.07	1	2
2.00	839.3	21.4	164	1	13	16
3.00	802.5	21.5	414	2	34	39
4.00	1013.9	21.7	248	1	20	23
5.00	850.9	21.7	213	1	17	20
(-)						
	4364.6	Moy=21.7	1055	4.3	86	100

Tableaux 12.c. Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l et pour un champ électrique de 30 V.

ESSAI Pb 5[1]30:

Element: plomb(II)
Solution à 1 g/l

Electrodes: Cuivre (S=127.5 cm²)
Gradient électrique: 1.3 Volts/cm

Poids initial sable: 4500 g
Poids initial de liquide: 1102g
Poids initial de plomb: 1.102 g
Teneur initiale eau: 24.5 %
Durée de l'essai: 688 heures

Zone de prélèvement (1)	Poids de sol sec prélevé par zone (g) (2)	Teneur eau finale (W%) par zone (3)	Teneur moyenne (Tf) en plomb(II) (ppm) (4)	Rapport Tf/Ti (Ti=260 ppm) (5)	Répartition finale brute de plomb(II) par zone en % (6)	Répartition pondérée de plomb(II) par zone en % (7)
(+)						
1.00	792.9	22.5	31	0.07	1	3
2.00	720.6	21.3	182	1	15	17
3.00	910.0	21.5	409	2	33	37
4.00	871.7	21.1	271	1	22	25
5.00	1044.6	21.8	201	1	16	18
(-)						
	4339.7	21.6	1094	4.9	88	100

Tableaux 12.c. Répartition finale du plomb (%) en fonction du temps pour les essais réalisés avec une concentration initiale de 1 g Pb²⁺/l et pour un champ électrique de 30 V.