

**Université des Sciences et Technologies de Lille**  
**U.F.R. des Sciences de la Terre**

n° d'ordre : 3051

**THESE**

pour obtenir le grade de

**Docteur de l'Université de Lille I**

***En : Dynamique et Environnement Sédimentaires***

présentée et soutenue publiquement par

**Sophie DENIMAL**

Le : 20 Décembre 2001

*Titre :*

**Impact des terrils houillers du bassin minier  
Nord-Pas-de-Calais sur la qualité des eaux de la  
nappe de la Craie.**

---

*Directeur de thèse : N. Tribouvillard*

---

**JURY**

L. Dever, Professeur	<i>Université Paris XI-Orsay</i>	Rapporteur
C. Dupuis, Professeur	<i>Faculté polytechnique de Mons</i>	Rapporteur
J-L. Bastien, Ingénieur	<i>Etablissement Public Foncier</i>	Examinateur
H. Coulon, Docteur	<i>CETE-Nord-Fas-de-Calais</i>	Examinateur
R. Guerin, Maître de Conférence	<i>Université Paris VI-Jussieu</i>	Examinateur
J. Laversanne, Docteur ingénieur	<i>Charbonnages de France</i>	Examinateur
F. Meilliez, Professeur	<i>Université de Lille 1</i>	Examinateur
N. Tribouvillard, Professeur	<i>Université de Lille 1</i>	Examinateur

## **AVERTISSEMENT**

La qualité de numérisation de ce fichier dépendant de l'état général de la microfiche, l'A.N.R.T. ne peut garantir un résultat irréprochable.

Le présent ouvrage est uniquement consultable en bibliothèque.

## Avant-Propos

Il y a trois ans, à l'issue de mon DEA, je commençai cette thèse et je laissai derrière moi la dynamique côtière et les plages du Nord de la France pour m'intéresser aux « montagnes noires » du bassin minier Nord-Pas-de-Calais. Je dois aujourd'hui avouer que je n'avais alors jamais approché de terrils et que le premier contact fut un peu déprimant : imaginez une matinée d'octobre pluvieuse, le ciel désespérément gris, des coronas murés et en toile de fond, ces fameux terrils qui devaient occuper une grande partie de mes pensées pendant les trois années suivantes. Mais j'ai appris à découvrir au cours de ces trois ans qu'en plus de leur rôle de « témoins historiques » de la période florissante d'extraction du charbon dans notre région, ces terrils constituent aujourd'hui, par leurs impacts environnementaux potentiels, un sujet d'étude passionnant. Cette étude n'aurait bien sûr pas pu être réalisée sans le soutien financier du Pôle de Compétence sur les sites et sédiments pollués Nord-Pas-de-Calais, des Charbonnages de France et du Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement Nord-Pas-de-Calais.

Ces années de thèse m'ont permis de rencontrer des personnes qui m'ont aidée et conseillée tout au long de ce travail et que je souhaite aujourd'hui remercier :

Nicolas Tribovillard, mon directeur de thèse, qui n'échappera pas à mes remerciements, non seulement pour la disponibilité dont il a toujours fait preuve et les conseils qu'il m'a prodigués mais aussi pour son éternelle bonne humeur et sa capacité d'écoute, qualités qui ont permis de balayer mes moments de doute récurrents au cours de ces trois ans.

Le professeur Laurent Dever, non seulement pour m'avoir ouvert les portes du laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique d'Orsay et m'avoir judicieusement conseillée au début de cette étude mais également pour avoir accepté d'être le rapporteur de ce mémoire.

Christian Dupuis, professeur à l'École Polytechnique de Mons, que je remercie vivement d'avoir accepté d'examiner cette thèse. Je lui suis très reconnaissante pour le travail de rapporteur qu'il a bien voulu prendre en charge.

Le professeur Francis Meilliez, qui est à l'origine de cette thèse et qui, malgré ses nombreuses occupations et son prochain départ pour le Canada, a accepté de faire partie du jury.

Jacques Laversanne (Charbonnages de France), Jean-Louis Bastien (Établissement Public Foncier) et Hervé Coulon (Centre d'Étude Technique de l'Équipement), non seulement d'avoir suivi régulièrement ce travail mais également d'avoir accepté d'en être les examinateurs attentifs.

Roger Guerin, dont la rencontre lors d'un congrès a permis d'aboutir à une collaboration avec le DESS de géophysique appliquée de Jussieu. L'occasion m'est donnée de le remercier vivement non seulement pour les nombreuses heures passées sur le « terrain » pour réaliser les mesures géophysiques mais aussi pour avoir accepté d'examiner ce manuscrit.

Le Centre d'Etude Technique de l'Equipement et tout particulièrement Arnoult Cuveillier qui m'a fourni de précieuses informations et qui m'a toujours accueillie et conseillée malgré un emploi du temps très chargé.

Les Charbonnages de France et surtout Mrs Faille, Gobillot, Gavois, Blanchart et Lagarde qui ont suivi ce travail et fourni des documents essentiels à sa réalisation.

L'établissement Public Foncier et en particulier Mr Kaszynski, Anne Lefrançois et Mr Huault qui ont suivi et veillé au bon déroulement de cette thèse.

L'équipe du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique (LHGI) d'Orsay et particulièrement les techniciens qui m'ont enseigné et aidée à réaliser les mesures isotopiques : Annick Filly, Annick Raguideau et Marc Massault qui m'a également accompagnée lors de la campagne de prélèvement des eaux souterraines.

Florent Barbecot, qui a pris sur son temps alors qu'il était déjà très occupé par sa propre thèse, pour me guider dans le monde des isotopes stables au commencement de ma thèse, lors de mon passage au LHGI d'Orsay. Je lui suis également très reconnaissante d'avoir relu et corrigé avec attention les articles issus de cette étude.

Je n'oublie évidemment pas les étudiants d'Orsay pour leur accueil chaleureux : Anne, Stéphanie, Anne-Cécile, Anne-Sophie, Laurent, Caroline et Delphine.

Les étudiants du DESS de géophysique appliquée de Jussieu (2000-2001) pour toutes les mesures qu'ils ont réalisées ; leurs encadrants et responsables du DESS : C. Camerlynck, Y. Albouy et P. Andrieux qui a également présenté une partie de mes travaux au cours d'un congrès en septembre 2001, autant dire à un moment où je ne quittais plus ma rédaction de thèse et mon écran d'ordinateur.

Patrick Dussautoy et Isabelle Sevin du bureau d'étude Geco qui m'ont initiée à la réalisation et l'interprétation des panneaux électriques. Je sais grâce à eux que la géophysique est un travail physique et qu'un terril peut sembler infranchissable lorsqu'il s'agit de porter jusqu'en haut des caisses pleines de matériel.

Jacques Morel du CRPG ainsi que Michel Wartel, particulièrement pour la rapidité avec laquelle ils m'ont procuré les derniers résultats d'analyses chimiques en fin de thèse.

J'ai également côtoyé au cours des trois ans passés au laboratoire de Sédimentologie et Géodynamique de Lille de nombreuses personnes qui m'ont aidée et soutenue au quotidien :

Je pense bien sûr à Hervé Chamley qui a toujours su s'intéresser à mon travail et m'a toujours accueillie et répondu avec chaleur et enthousiasme. Je pense également à Jean-François Deconinck, Alain Trentesaux, Viviane Beut, Stanislas Loboziak, Jacky Ferrière, Christian Gorini, Franck Chanier, Claire Derycke, Eric Duviellbourg, Georges Chapalain, Béatrice Beauvière, Béatrice Ledésert, et toutes les personnes qui par leurs conseils et leur amitié ont fait de cette période une tranche de vie très agréable.



Je n'oublie pas non plus Philippe Recourt, Deny Malengros, Miguel Vandaele, Françoise Dujardin, Christine Mulier, Bill et Rolande Rouzé, Jean Carpentier, Nelly Pernot, Eliane Hanton, Nadège Tiberghien : je les remercie pour leur gentillesse et toute l'aide, technique ou logistique, qu'ils m'ont apportée.

Et vous mes amis, oui, vous qui vous dites qu'il y a déjà deux pages de remerciements et pas un mot sur vous : ne vous inquiétez pas je ne vous oublie pas : d'ailleurs comment oublier le temps passé à vos côtés, les discussions, les fous-rires, les moments de stress ou de dégoût, donc MERCI à vous tous : particulièrement Sophie (LB) et Pierre pour m'avoir supportée quotidiennement pendant plus de trois ans, mais aussi Stéphane, Florence, Thony, Geoffroy, Lhoussain et Ludmila, Michel et Véronique, Yvan, Sophie (S), Dimitri et Nathalie, Aurélie, Magali, Julien (B), Julien (P), Christophe (B), Jean-Baptiste, Alexis, Christine, Sébastien, Abder, Corinne, Danièle, Frédéric, Thomas et Najoua, Lahcen, Sami.

Merci à vous également mes amis qui m'avez soutenue parfois depuis les bancs du lycée : Christophe, fidèle parmi les fidèles, Dorothée, Olivier, Anne, Caro, François, Hervé et enfin Alix et Olivier.

Je souhaite dédier ce travail à ma famille et tout particulièrement :

A mes grands-parents qui, j'en suis sûre auraient été heureux et fiers du long chemin parcouru.

A mes parents, qui ont toujours fait preuve envers moi d'une patience infinie et auxquels je n'ai jamais eu l'occasion d'exprimer vraiment toute ma reconnaissance et mon amour.

A mes frères : Fabrice et Yannick qui d'aussi loin que je me souviens m'ont toujours épaulée et aidée à chaque étape importante de ma vie. Fabrice qui m'a toujours hissée vers le haut, modèle d'accomplissement et de persévérance et Yannick, l'épaule solide et réconfortante, relativisant sans cesse et m'aidant à porter un regard positif et enthousiaste sur la vie.

A mes belles-sœurs, Régine et Anne-Sophie que je remercie aujourd'hui pour toute la tendresse et l'affection dont elles ont su faire preuve à mon égard.

A Laurie, Thomas, Romain, Lucille et Mattéo.



# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>
<b>CHAPITRE I : LE DRAINAGE ACIDE MINIER : ÉTAT DES CONNAISSANCES.....</b>	<b>9</b>
1 - PRINCIPES .....	10
2 - OXYDATION DES SULFURES.....	12
3 - FACTEURS CONTRÔLANT LA PRODUCTION DU DRAINAGE ACIDE MINIER (AMD) .....	13
3.1 - <i>L'activité bactérienne</i> .....	13
3.2 - <i>Effet du pH</i> .....	14
3.3 - <i>Effet de la surface spécifique, de la cristallinité de la pyrite et de l'épaisseur de la couche oxydée...</i>	15
3.4 - <i>Effet de l'oxygène et de l'eau</i> .....	16
3.5 - <i>Effet des microenvironnements</i> .....	17
3.6 - <i>Effet de la température</i> .....	18
3.7 - <i>Durée des périodes sèches et des périodes humides</i> .....	18
3.8 - <i>L'altération physique</i> .....	18
4 - LES MINÉRAUX SECONDAIRES .....	19
5 - ÉLÉMENTS LIÉS AUX PRÉCIPITÉS DE FER ET MÉTAUX LOURDS .....	20
6 - NEUTRALISATION DU DRAINAGE ACIDE MINIER .....	20
7 - DÉTERMINATION DU POTENTIEL D'ACIDIFICATION ET DE NEUTRALISATION DES STÉRILES.....	23
7.1 - <i>Test de détermination des acides-bases</i> .....	23
7.2 - <i>Test de détermination modifiée de<sub>s</sub> acides-bases</i> .....	25
7.3 - <i>Essai initial de B.C. Research</i> .....	25
7.4 - <i>Essai de production nette d'acide</i> .....	26
7.5 - <i>Essai d'établissement du ratio Soufre / Potentiel de production alcaline</i> .....	26
7.6 - <i>Mesure du potentiel de neutralisation par l'analyse des carbonates</i> .....	26
<b>CHAPITRE II : PRÉSENTATION DES SITES D'ÉTUDE .....</b>	<b>29</b>
1 – DESCRIPTION, HISTORIQUE .....	30
1.1 - <i>Site 1 (Fig 2.2)</i> .....	30
1.2 - <i>Site 2 (Fig. 2.5 et 2.6)</i> .....	34
2 - CONTEXTE GÉOLOGIQUE .....	37
2.1 - <i>Généralités : le bassin minier</i> .....	37
2.2 - <i>Les sites étudiés</i> .....	41
3 - CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE.....	43
3.1 - <i>Les différents aquifères</i> .....	43
3.2 - <i>La nappe de la Craie</i> .....	44

**CHAPITRE III : ALTÉRATION CHIMIQUE DES TERRILS ET TRANSFERT DE SULFATES VERS LA NAPPE DE LA CRAIE..... 48**

<b>I – PRÉLÈVEMENTS, METHODES D'ETUDE ET RÉSULTATS .....</b>	<b>49</b>
<b>1.1 - Prélèvements solides .....</b>	<b>49</b>
1.1.1 - Terrils .....	49
1.1.2 - Bassins de décantation .....	52
<b>1.2 - Résultats des analyses menées sur la fraction solide .....</b>	<b>53</b>
1.2.1 - Analyses minéralogiques (roche totale et argiles) .....	53
1.2.2 - MEB et micro-sonde .....	62
1.2.3 - Teneurs en soufre et carbone .....	65
1.2.4 - Analyses chimiques (éléments majeurs et éléments traces) .....	69
1.2.5 - Analyses isotopiques ( <sup>34</sup> S) .....	78
1.2.6 - Calcimétrie .....	79
<b>1.3 - Prélèvements liquides .....</b>	<b>81</b>
1.3.1 - Eaux souterraines .....	81
1.3.2 - Autres prélèvements liquides effectués .....	82
<b>1.4 - Résultats des analyses menées sur les prélèvements liquides .....</b>	<b>82</b>
1.4.1 - Mesures <i>in situ</i> (eaux souterraines) .....	82
1.4.2 - Analyses chimiques (éléments majeurs et éléments traces) .....	86
1.4.3 - Analyses isotopiques .....	94
<b>1.5 - Variations qualitatives et quantitatives des précipitations à proximité des sites étudiés .....</b>	<b>95</b>
1.5.1 - Calculs de Pluie efficace .....	95
1.5.2 - Variations du chimisme des eaux de pluie .....	97
<b>1.6 - Essais de lixiviation et mesures du potentiel d'acidification et de neutralisation des stériles houillers .....</b>	<b>100</b>
1.6.1 - Mise en contact des stériles houillers avec des solutions de pH basique à acide .....	100
1.6.1.1 - Principes et protocole .....	100
1.6.1.2 - Résultats .....	101
1.6.2 - Essais en condition saturée / essais en condition saturée - non saturée .....	116
1.6.2.1 - Principes et protocoles .....	116
1.6.2.2 - Résultats .....	117
1.6.3 - Potentiel d'acidification et potentiel de neutralisation .....	122
<b>2 - INTERPRÉTATIONS .....</b>	<b>126</b>
<b>2.1 - Départ de carbone et de soufre en surface des terrils .....</b>	<b>126</b>
<b>2.2 - Chimie et minéralisation sulfatée .....</b>	<b>128</b>
<b>2.3 - Détermination des sources de sulfate .....</b>	<b>131</b>
2.3.1 - Le δ <sup>34</sup> S - marqueur des sources de sulfates .....	131
2.3.2 - L' <sup>18</sup> O des sulfates .....	133
<b>2.4 - Processus de réduction .....</b>	<b>135</b>
<b>2.5 - Variations de pH et variations du chimisme des eaux de la nappe de la Craie en aval des terrils .....</b>	<b>138</b>
<b>2.6 - Comportement des métaux .....</b>	<b>142</b>
<b>2.7 - Les minéraux secondaires - des témoins d'un drainage acide minier limité .....</b>	<b>144</b>

3 - CONCLUSION.....	145
<b>CHAPITRE IV : COMPORTEMENT DES EAUX MÉTÉORIQUES, MODALITÉS DE DÉPLACEMENT : RUISSELLEMENT ? , INFILTRATION ?.....</b>	<b>146</b>
1 - CARACTÉRISTIQUES HYDROGÉOLOGIQUES DES TERRILS ET CONSÉQUENCES SUR LA PRODUCTION D'AMD ET LA LIBÉRATION D'IONS SULFATES.....	147
1.1 – <i>Origine de l'hétérogénéité du matériau constitutif des terrils</i> .....	147
1.2 - <i>Facteurs influençant la circulation des eaux</i> .....	148
1.2.1 - Lithologie et granulométrie.....	148
1.2.2 - Le mode de « mise à terril ».....	149
1.2.3 - Compaction et âge des résidus.....	149
2 – MÉTHODES UTILISÉES ET RÉSULTATS.....	153
2.1 - <i>La méthode Radiomagnéto-Tellurique</i> .....	153
2.1.1 - Principe et méthode.....	153
2.1.2 – Résultats.....	154
2.2 - <i>Panneaux électriques</i> .....	156
2.2.1 - Principes et méthodes.....	156
2.2.2 - Résultats.....	159
2.2.2.1 - Prospection de Juillet 2000.....	159
2.2.2.2 - Prospection de Février 2001.....	168
2.3 - <i>Cartographie électromagnétique Slingram (EM 31)</i> .....	172
2.3.1 - Principe et méthode (Fig. 4.20).....	172
2.3.2 – Résultats.....	172
2.4 - <i>Essais Perméafor</i> .....	174
2.4.1 – Principes et méthodes (Fig. 4.22).....	174
2.4.2 – Résultats.....	175
2.5 - <i>Sondages et analyses granulométriques</i> .....	180
2.5.1 - Méthode.....	180
2.5.2 - Résultats.....	181
3 - INTERPRÉTATIONS.....	195
3.1 – <i>Détermination de zones d'infiltration préférentielle des eaux météoriques, apports de la Radiomagnéto-Tellurique</i> .....	195
3.2 – <i>Mise en évidence de barrières de perméabilité naturelles et impact sur la quantité de sulfate potentiellement exportable</i> .....	196
3.3 - <i>Panneaux électriques et cartographie électromagnétique</i> .....	197
3.3.1 - Panneaux électriques.....	197
3.3.2 - Cartographie électromagnétique.....	205
4 - CONCLUSION.....	205
<b>CHAPITRE V : SYNTHÈSE ET CONCLUSION : LES TERRILS DU BASSIN MINIER NORD-PAS-DE-CALAIS, LE CAS D'UN DRAINAGE ACIDE MINIER NEUTRALISÉ.....</b>	<b>207</b>
1 - MISE EN ÉVIDENCE DE L'EXISTENCE D'UN DRAINAGE ACIDE MINIER LIMITÉ SUR LES SITES ÉTUDIÉS.....	208
1.1 – <i>Le lessivage du soufre en surface des terrils</i> .....	208

1.2 - Mise en évidence d'un panache sulfaté à l'aval des sites .....	208
1.3 - Confirmation du rôle joué par les terrils dans la minéralisation sulfatée de la nappe de la Craie ..	209
1.4 - Les stériles houillers étudiés sont une source potentielle d'acidification .....	209
1.5 - Présence de minéraux secondaires typiques des cas de drainage acide minier sur les deux sites....	210
<b>2 - LIMITATIONS DU DRAINAGE ACIDE ISSU DES SITES ÉTUDIÉS.....</b>	<b>210</b>
2.1 - La faible teneur en soufre des stériles mis à teruil .....	210
2.2 - L'absence de lessivage des métaux .....	211
2.3 - L'apport d'oxygène et l'infiltration des eaux.....	212
2.4 - La perméabilité des terrils.....	213
2.5 - La neutralisation du drainage acide minier .....	214
2.6 - Variations du contexte géologique et hydrogéologique entre les sites 1 et 2 .....	214
<b>3 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>215</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>218</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS.....</b>	<b>229</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>238</b>

**INTRODUCTION**





Le drainage acide minier a fait l'objet de nombreuses études dans la plupart des pays concernés par l'extraction des métaux mais également l'exploitation du charbon. Le drainage acide minier constitue en effet un danger potentiel notamment pour les écosystèmes mais également pour la qualité des ressources en eau. En effet, les sites miniers laissent, après extraction, de grandes quantités de déchets, souvent riches en sulfures. L'oxydation de ces sulfures engendre des eaux acides potentiellement riches en métaux, susceptibles de rejoindre les eaux de surface et les aquifères profonds.

L'exploitation du charbon a ainsi créé dans de nombreux pays (notamment les Etats-Unis, la Corée, l'Europe de l'Est, l'Angleterre ou encore la Belgique) de nombreux problèmes environnementaux. Les recherches sur le sujet se sont tout d'abord focalisées sur les ouvrages souterrains mais depuis quelques années l'intérêt a commencé à se porter sur les déchets abandonnés en surface à la fin de l'exploitation. C'est ainsi que des études se sont développées pour connaître l'impact des terrils sur la production de drainage acide minier. Les études menées en France sur l'impact environnemental des résidus d'exploitation charbonnière restent cependant relativement peu nombreuses.

C'est dans ce cadre que le travail exposé dans ce mémoire a débuté : le projet « évolution physico-chimique des terrils du bassin minier Nord-Pas-de-Calais et impact environnemental » a fait l'objet d'une convention établie entre l'Université des Sciences et Technologies de Lille et l'Etablissement Public Foncier ainsi que d'un partenariat avec Charbonnages de France et le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement. En effet, dans le Nord-Pas-de-Calais comme dans tous les bassins houillers, l'activité minière liée à l'extraction du charbon se traduit notamment par l'existence de terrils, très nombreux et de taille souvent considérable. La plupart du temps, le choix de l'emplacement des terrils a obéi à des impératifs économiques qui ne prenaient en compte ni la nature du substratum, ni le risque potentiel de contamination des aquifères sous-jacents par des composés organiques et inorganiques susceptibles d'être libérés lors de la météorisation de ces édifices.

Ce travail a eu pour objectif de déterminer quels peuvent être les impacts des terrils du bassin minier Nord-Pas-de-Calais sur la qualité des eaux souterraines et notamment sur la nappe de la Craie sous-jacente qui constitue la principale ressource en eau de la région. Pour ce faire, deux sites ont été choisis en collaboration avec Charbonnages de France au vu de leur équipement piézométrique permettant un échantillonnage des eaux souterraines en amont et en aval hydraulique des terrils, et de leurs contextes géologique et hydrogéologique différents : le site 1 est disposé en zone de nappe libre, au dessus de la craie Seno-Turonienne ; le second en zone de nappe semi-captive puisqu'il est séparé de la nappe de la Craie par les formations tertiaires (Argiles de Louvil et Sables d'Ostricourt). Dans cette étude il a été choisi d'utiliser le sulfate, comme marqueur d'un éventuel impact, puisqu'il s'agit d'un élément très mobile et qui peut être annonciateur de la libération de métaux lorsque des eaux très acides sont produites par oxydation des sulfures.

L'oxydation de la pyrite contenue dans les schistes houillers qui constituent les terrils n'est cependant pas l'unique source possible de sulfate dans le bassin minier. Les travaux antérieurs (Bernard, 1979 ; Droz, 1985) donnent ainsi également comme sources possibles d'apport :

→ la dissolution des minéraux évaporitiques présents dans la formation des Calcaires carbonifères et pouvant contaminer localement *per ascensum* la nappe de la Craie là où la nappe des Calcaires carbonifères est en charge ;

→ la mise en solution du gypse contenu dans les couches tertiaires (Argiles de Louvil et Sables d'Ostricourt) ;

→ les sulfates d'origine anthropique liés aux rejets d'eaux usées et/ou aux pratiques agricoles.

La géochimie isotopique et notamment l'utilisation des isotopes stables du soufre, marqueurs classiques des sources de sulfates, a été utilisée dans le but d'une part, de vérifier l'existence d'un apport de sulfates par les terrils vers la nappe de la Craie et d'autre part, de déterminer l'éventuelle existence d'une autre source sur les sites étudiés.

La quantité de sulfate potentiellement libérable à partir des terrils dépend de la quantité de sulfure lessivable et donc de la possibilité pour les eaux météoriques de s'infiltrer dans les terrils. Une étude du comportement (ruissellement ? infiltration ?) des eaux météoriques sur ces édifices a donc été menée, d'une part par l'étude des variations de perméabilité en profondeur sur l'un des sites, et d'autre part par l'utilisation de techniques géophysiques de subsurface (méthode Radiomagnétotellurique et panneaux électriques notamment) dans le but de déterminer une éventuelle infiltration des eaux météoriques en profondeur dans les édifices.

Cette étude est complétée par une approche expérimentale visant à étudier la libération en fonction du temps des ions sulfates, et le relargage potentiel de métaux éventuellement présents dans les schistes houillers.

Ce mémoire s'organise en cinq chapitres de la manière suivante :

- Le premier chapitre constitue une courte synthèse de l'état des connaissances sur les processus de drainage acide minier.
- Le second chapitre correspond à la présentation des sites étudiés, après un bref historique des activités menées sur ces sites ; leurs contextes géologique et hydrogéologique sont présentés.
- Le troisième chapitre rassemble les résultats et interprétations de l'étude géo- et hydro-chimique menée à la fois *in situ* (analyses des teneurs en carbone et soufre total des schistes houillers, analyses des teneurs en sulfates des eaux de la nappe de la Craie, analyses isotopiques et notamment recherche des sources de sulfates par l'utilisation des isotopes du soufre), et en laboratoire, par le biais des essais de lixiviation réalisés sur les stériles houillers.

- Le quatrième chapitre regroupe les résultats et interprétations des études, notamment de géophysique de subsurface, réalisées pour déterminer le comportement des eaux météoriques sur les terrils.
- Le cinquième chapitre est consacré à la synthèse des différents résultats acquis et à leur mise en perspective dans le cadre plus général des processus liés au drainage acide minier.

Une conclusion générale permet de faire le bilan du travail effectué et d'en tracer quelques perspectives.



**CHAPITRE I :**  
**LE DRAINAGE ACIDE MINIER :**  
**ETAT DES CONNAISSANCES**



## 1 - Principes

Le Drainage Acide Minier (Acid Mine Drainage -AMD-) peut être défini comme le résultat de l'oxydation naturelle des sulfures contenus dans les roches exposées à l'air et à l'eau. Même si ce phénomène est habituellement associé aux activités minières, il peut exister partout où des sulfures sont exposés à l'altération naturelle.

Dans le cas des exploitations minières, plusieurs sources de drainage acide peuvent être distinguées (Coastech Research Inc, 1991) :

- Les ouvrages souterrains (galeries de mines) ;
- Les « fronts de taille » des mines à ciel ouvert ;
- Les terrils dans les mines de métaux et les mines de charbon ;
- Les bassins de décantation (utilisés notamment dans le cas des mines de charbon pour séparer les particules inférieures à 0,5 mm, obtenues après traitement des charbons dans les lavoirs).

Quelles que soient les sources, les processus entraînant l'apparition de drainage acide minier sont essentiellement les mêmes : des sulfures en présence d'oxygène, d'eau et de micro-organismes naturellement présents dans les sols, peuvent être oxydés, produisant ainsi des eaux de pH abaissé, capables de mobiliser des métaux lourds et d'autres constituants solubles contenus dans les stériles.

Le drainage acide minier est un problème commun des exploitations minières, il peut, s'il n'est pas contrôlé, avoir un impact environnemental significatif en raison de la toxicité des métaux pour la faune et la flore (Coastech Research Inc., 1991 ; Foos, 1997 ; Campbell *et al.*, 2001 ). De ce fait, ce phénomène géologique fait l'objet de nombreuses études dans le monde entier (Webb et Sasowsky, 1994 ; Yu, 1996 ; Bullock *et al.*, 1997 ; Schüring *et al.*, 1997 ; Cammaer, 1998 ; Charlier *et al.*, 1998 ; Geldenhuis et Bell, 1998 ; Rose et Cravotta, 1998 ; Berger *et al.*, 2000).

Une étude menée par Cammaer (1998) sur les terrils houillers de Flandres a montré que les terrils et les bassins de décantation, en raison de la pyrite contenue dans les schistes houillers entassés, ont un impact potentiel sur les sols, les eaux de surface et les aquifères sous-jacents (Fig. 1.1). Sous l'influence de bactéries, la pyrite réagit avec l'oxygène et l'eau pour former des sulfates (Fig. 1.2), des ions  $H^+$ , des hydroxydes de fer qui peuvent contaminer les eaux profondes et les eaux de surface. Cammaer remarque également que si les stériles charbonniers de Flandres (terrils et bassins de décantation) contiennent peu de pyrite (< 1%), ils représentent cependant une quantité de matériaux énorme et donc une contamination potentielle non négligeable.

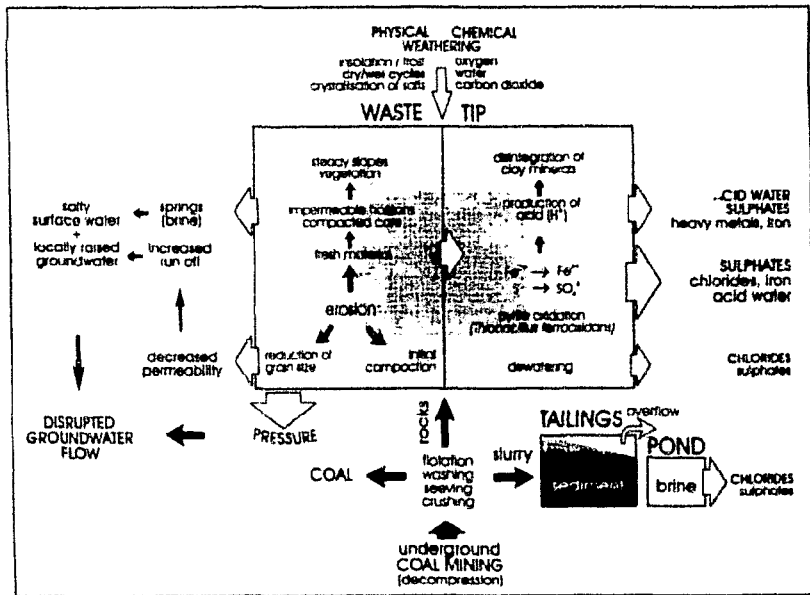


Fig. 1.1 : Schéma présentant l'évolution des terrils et bassins de décantation et leurs effets sur l'écoulement et la qualité des eaux souterraines (Cammaer, 1998).

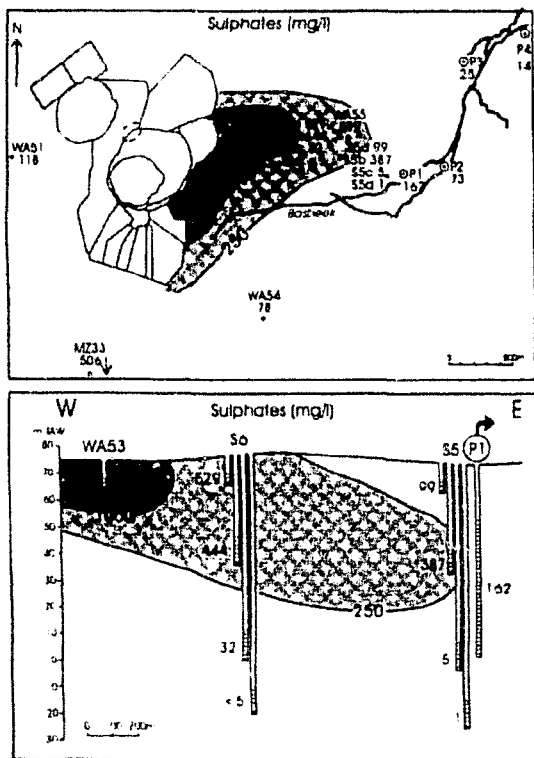
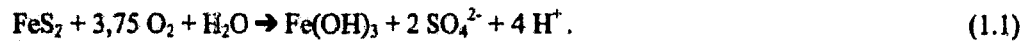


Fig. 1.2 : Vue en plan et en coupe du panache de sulfates (mg/l) visible à l'aval du site de Watershei (Belgique) (Cammaer, 1998)

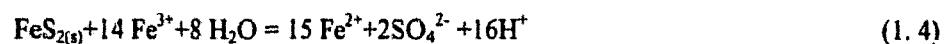
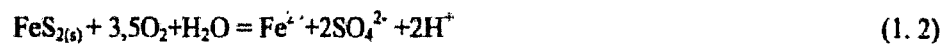


## 2 - Oxydation des sulfures

La réaction stœchiométrique complète décrivant l'oxydation de la pyrite, sulfure à l'origine de nombreux cas de drainage acide minier, est communément donnée par la réaction exothermique suivante :



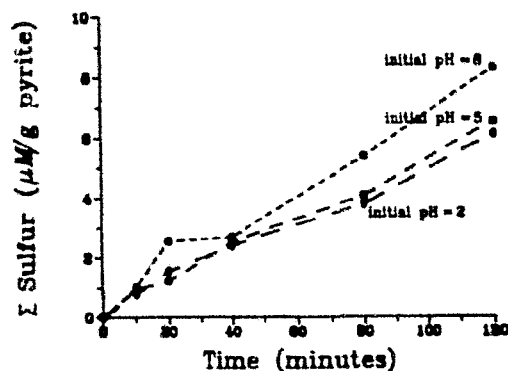
Les réactions suivantes correspondent à différents stades de la réaction complète (Webb et Sasowsky, 1994 ; Cammaer, 1998 ; Rose et Cravotta, 1998) :



Les réactions d'oxydation du soufre et du fer par l'oxygène gazeux ou l'oxygène dissous ((1.2) et (1.3)), peuvent être catalysées par différentes espèces de bactéries sulfuro- et ferro-oxydantes, notamment par les bactéries du genre *Thiobacillus*.

Dans la réaction (1.4), les ions ferriques dissous produits par la réaction (1.3) sont les agents oxydants de la pyrite. Des études cinétiques (Moses *et al.*, 1987 ; Moses and Herman, 1991 ; Williamson and Rimstidt, 1994) ont montré qu'à pH acide, les vitesses d'oxydation de la pyrite par  $\text{Fe}^{3+}$  sont plus rapides que l'oxydation par  $\text{O}_2$  (Fig. 1.3).

a -



b -

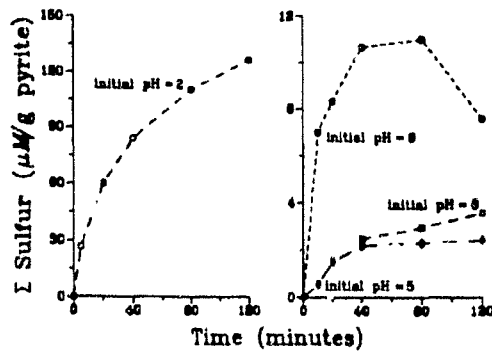


Fig. 1.3 : Evolution des concentrations en soufre total de solutions saturées en  $O_2$  dissous ; a - solutions saturées en  $O_2$  dissous ; b - solutions saturées en Fe (III). (Moses *et al.*, 1987).

Une fois que le drainage acide minier a débuté, l'oxygène est nécessaire à l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique. Si l'oxygène n'est plus fourni, le fer ferrique peut être fourni par dissolution du  $Fe(OH)_3$  solide présent (Stumm et Morgan, 1981 ; Moses *et al.*, 1987).

### 3 - Facteurs contrôlant la production du drainage acide minier (AMD)

Plusieurs facteurs contrôlent la vitesse et l'extension de l'AMD (Schüring *et al.*, 1997 ; Rose et Cravotta, 1998 ; Bain *et al.*, 2000 ; Berger *et al.*, 2000). La vitesse de production d'AMD à partir de l'oxydation de la pyrite est déterminée notamment par l'activité bactérienne, le pH, la surface spécifique et la cristallinité de la pyrite, la température, la concentration en oxygène et les cycles d'altération. Le potentiel de production d'AMD est de ce fait propre à chaque site (rapport EPA, 1994).

#### 3.1 - L'activité bactérienne

Dans beaucoup de situations, le plus important contrôle sur la vitesse de production d'AMD est l'oxydation bactérienne de  $Fe^{2+}$  en  $Fe^{3+}$  par la réaction (1.3) : le fer ferrique résultant pouvant ensuite oxyder la pyrite par la réaction (1.4).

Les bactéries ferro-oxydantes et les faibles valeurs de pH accélèrent la réaction d'acidification. En effet, bien que  $Fe^{3+}$  se forme rapidement à  $pH > 4$ ,  $Fe^{3+}$  est relativement insoluble sous ces conditions et a tendance à former  $Fe(OH)_3$  ou d'autres solides, de telle sorte qu'il reste peu de  $Fe^{3+}$  en solution capable d'oxyder la pyrite.

Taylor *et al.*, (1984a), Moses *et al.*, (1987), Schüring *et al.*, (1997) estiment que l'oxydation inorganique joue un rôle mineur dans l'oxydation de la pyrite. En l'absence de bactéries,  $Fe^{3+}$  n'est

soit pas produit à une vitesse suffisante (pH<4) soit si insoluble que sa forme dissoute n'est pas assez importante comme agent oxydant de la pyrite (pH>4). Cependant, Moses et Herman (1991) suggèrent que, même si la quantité de  $Fe^{3+}$  en solution est négligeable, il peut y avoir oxydation du  $Fe^{2+}$  adsorbé à la surface de la pyrite et que le  $Fe^{3+}$  ainsi formé peut à son tour oxyder la pyrite.

La bactérie *Thiobacillus ferrooxidans* et plusieurs espèces similaires sont capables de catalyser l'oxydation de  $Fe^{2+}$  (Webb et Sasowsky, 1994 ; Schüring *et al.*, 1997), sous conditions acide et aérobie, et produisent ainsi l'énergie nécessaire à leur métabolisme. La figure 1.4 montre les vitesses des réactions d'oxydation de la pyrite par l'oxygène (réaction 1.2), de l'oxydation du fer ferreux par l'oxygène (réaction 1.3) et de l'oxydation de la pyrite par le fer ferrique (réaction 1.4).

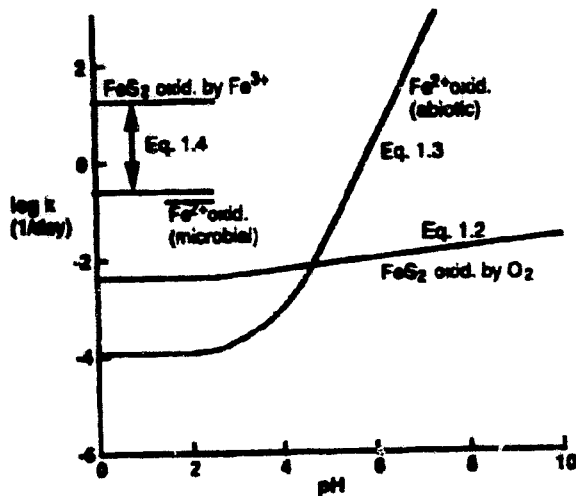


Fig. 1.4 : Comparaison des vitesses en fonction du pH pour : (1) l'oxydation de la pyrite par l'oxygène (réaction 1.2) ; (2) l'oxydation du fer ferreux par l'oxygène (réaction 1.3) ; (3) l'oxydation de la pyrite par le fer ferrique (réaction 1.4) (Rose et Cravotta, 1998).

La vitesse d'oxydation de la pyrite par  $Fe^{3+}$  étant en général rapide en comparaison de la vitesse d'oxydation par  $O_2$  ou la vitesse d'oxydation inorganique de  $Fe^{2+}$  en  $Fe^{3+}$ , l'oxydation de  $Fe^{2+}$  en  $Fe^{3+}$  est généralement le facteur limitant de la réaction (Singer et Stumm, 1970).

### 3.2 - Effet du pH

Pour des valeurs de pH allant de 4 à 7, la vitesse d'oxydation de la pyrite par l'oxygène est lente, de plus, la concentration en  $Fe^{3+}$  est limitée en raison de la faible solubilité de  $Fe(OH)_3$ . Plus les systèmes sont acides, plus la solubilité de  $Fe^{3+}$  augmente. Or, puisque  $Fe^{3+}$  peut oxyder la pyrite rapidement, l'oxydation de la pyrite sera largement accélérée à pH bas. D'après Kölling (1990) in Schüring *et al.*, (1997), l'oxydation de la pyrite présente une vitesse maximale pour un pH compris entre 1 et 5. Cependant, en dessous de pH 1,5 à 2 l'efficacité de *Thiobacillus ferrooxidans* comme catalyseur de l'oxydation de  $Fe^{2+}$  diminue (Silverman et Lundgren, 1959 ; Schnaitman *et al.*, 1969 ; Schüring *et al.*, 1997).

D'après Kleinmann *et al.* (1981) et Nordstrom (1982) la production d'AMD peut être comprise en trois étapes séquentielles : (1) à pH proche de la neutralité ou faiblement acide, il y a oxydation de la pyrite par la réaction (1.2) suivant une combinaison de mécanismes abiotiques et bactériens, et l'oxydation de  $Fe^{2+}$  est principalement abiotique. L'oxydation biotique de la pyrite se fait principalement par l'intermédiaire de bactéries attachées à la surface des grains de pyrite (2) à pH compris entre 3 et 4,5, l'oxydation de  $Fe^{2+}$  se fait surtout par *Thiobacillus ferrooxidans* car l'oxydation abiotique est lente. Pendant ce stade de transition, l'oxydation de la pyrite se fait par combinaison des réactions (1.2) et (1.4), à la fois de manière abiotique et par l'intermédiaire de bactéries. (3), à  $pH < 3$ , la concentration en  $Fe^{3+}$  est suffisamment importante pour que la réaction (1.4) devienne le principal mécanisme de production d'acide, avec une ré-oxydation bactérienne de  $Fe^{2+}$  en  $Fe^{3+}$ . Aux étapes 1 et 2, la vitesse de production d'acide est relativement lente mais elle devient très rapide à l'étape 3. Cette séquence de réaction est basée sur des processus ayant lieu dans des systèmes non saturés, avec un apport suffisant d'oxygène et un apport de matériau alcalin négligeable.

### **3.3 - Effet de la surface spécifique, de la cristallinité de la pyrite et de l'épaisseur de la couche oxydée**

Des études cinétiques montrent que la vitesse de production d'acide dépend de la surface spécifique de la pyrite exposée à la solution, de la cristallinité et des propriétés chimiques de la surface de la pyrite (Mc Kibben et Barnes, 1986). De manière générale, les roches à fort pourcentage de pyrite produisent l'acidité plus rapidement que les roches à faible pourcentage de pyrite et plus la quantité de pyrite présente dans les matériaux générant l'AMD est importante, plus l'acidité générée sera forte (Foos, 1997 ; Cammaer, 1998). De plus, une masse donnée de pyrite en petites particules avec une grande surface spécifique s'oxydera plus rapidement que la même masse composée de grains grossiers à surfaces lissées (Rose et Cravotta, 1998 ; Williams et Smith, 2000 ; Campbell *et al.*, 2001).

Bain *et al.* (2000) notent également que la vitesse de relargage des produits d'oxydation des sulfures décroît graduellement avec le temps quand l'épaisseur de la couche oxydée, située autour des particules de sulfure, augmente. De même, Edwards *et al.* (2000) soulignent que la formation de minéraux secondaires en surface de la pyrite a le potentiel de former des niveaux inertes qui peuvent inhiber la diffusion d'oxydants à la surface, ralentissant ainsi la dissolution.

### 3.4 - Effet de l'oxygène et de l'eau

L'eau constitue à la fois un réactif et un milieu pour les bactéries dans le processus d'oxydation, elle permet également le transport des produits d'oxydation (Rapport EPA, 1994).

L'oxygène atmosphérique est nécessaire à l'oxydation directe de la pyrite et pour la production de  $Fe^{3+}$  par oxydation de  $Fe^{2+}$ . Ainsi, si la pyrite n'entre pas en contact soit avec l'air, soit avec des eaux oxygénées ou riches en  $Fe^{3+}$ , l'oxydation est inhibée et il n'y a pas production d'acide (Rose et Cravotta, 1998, Edwards *et al.*, 2000). L'oxygène est particulièrement important pour maintenir une oxydation rapide catalysée par les bactéries à pH bas. L'oxydation des sulfures est largement réduite quand la concentration en oxygène dans les espaces poreux des stériles est inférieure à 1 ou 2 % (Rapport EPA, 1994).

L'accès de l'air contenant l'oxygène nécessaire à l'oxydation de la pyrite est l'un des facteurs limitants de la vitesse d'acidification : en raison de sa faible solubilité dans l'eau, seule une petite quantité d'oxygène peut être entraînée dans les stériles sous forme dissoute dans les précipitations qui s'infiltrent (dans un système saturé en eau, seules 250  $\mu\text{mol/l}$  d'oxygène sont solubles (Schüring *et al.*, 1997)). Il existe 2 processus principaux qui permettent de fournir l' $O_2$  nécessaire à l'oxydation de la pyrite ou du  $Fe^{2+}$ . Le premier processus correspond à la diffusion des molécules d'oxygène de zones de concentrations plus importantes à des zones de concentrations plus basses à travers les espaces poreux remplis d'air. Si, en un site donné, la diffusion est le processus principal fournissant l'oxygène alors la majeure partie de l'oxydation se fait à faible profondeur dans les stériles, typiquement dans la zone située entre 1 et 8 m (Rose et Cravotta, 1998). En dessous de cette profondeur, il y a peu d'oxygène présent et les solutions percolant vers le bas sont relativement réduites.

Le second processus de transport d'oxygène correspond à l'advection (écoulement d'air à travers les stériles). L'écoulement est guidé par le flux d'air ascendant réchauffé par la chaleur dégagée au cours de l'oxydation de la pyrite. Dans les sites où l'advection domine, il peut exister de grandes concentrations d'oxygène en profondeur.

L'advection semble être le phénomène prédominant dans les milieux qui contiennent une proportion significative de grès ou de roches dures qui laissent des espaces importants entre les stériles. Au contraire, la diffusion prédomine dans les milieux moins perméables, composés de petits fragments de schistes.

Schüring *et al.* (1987) ont montré, grâce à des essais réalisés en laboratoire, que sous conditions saturées en eau, l'oxydation de la pyrite par l'oxygène dissous est limitée par la quantité d'oxygène disponible par transport diffusif (à profondeur croissante de « dépyritisation », l'expérience a montré un aplatissement du gradient d'oxygène diffusif et une diminution exponentielle de la progression du front d'oxydation dans les stériles testés) : les auteurs estiment que l'oxydation de la pyrite est négligeable si les stériles sont disposés sous conditions saturées en eau, et que l'oxydation complète d'une couche des résidus étudiés, de 1,5 m d'épaisseur, prendrait plusieurs centaines de milliers

d'années (Fig. 1.5). Cependant, Webb et Sasowsky (1994) estiment que la possibilité de fournir le fer ferrique par dissolution de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  explique que l'immersion des résidus miniers dans le but de ne plus laisser entrer d'oxygène, ne stoppe pas le drainage acide minier une fois que les réactions ont commencé.

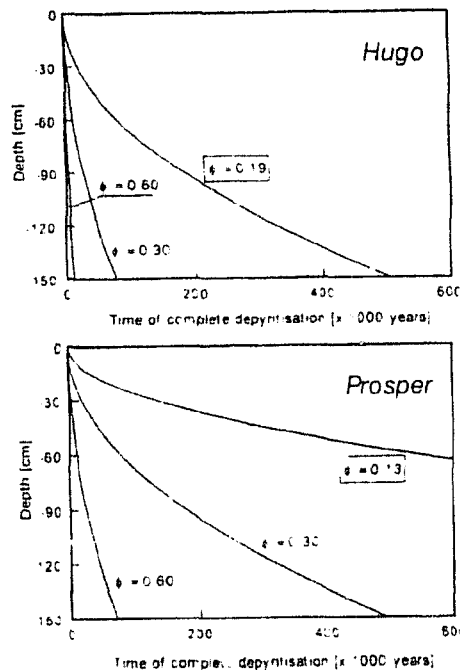


Fig. 1.5. Modélisation du temps nécessaire à la « dépyritisation » totale de stériles (1,5 m d'épaisseur) pour différentes porosités, en faisant l'hypothèse que l'oxygène est entièrement consommé par l'oxydation de la pyrite (Expériences réalisées sur 2 échantillons de stériles provenant des mines Hugo (Gelsenkirchen-Buer) et Prosper (Bottrop). (Schünng *et al.*, 1997).

### 3.5 - Effet des microenvironnements

Dans les stériles non saturés, l'eau remplit les petits pores et forme des films à la surface des particules. Les vitesses d'écoulement des eaux sont fonction notamment de la granulométrie des stériles et donc de la taille des pores qui les séparent. Ces vitesses varient de mouvements relativement rapides au travers de larges pores interconnectés ou de fractures à des mouvements lents voire à des conditions presque stagnantes dans les films d'eau ou les petits pores. De plus, l'abondance et la distribution de la pyrite et des autres minéraux varient d'une particule à l'autre. Les variations observées dans les concentrations de pyrite des stériles ne sont pas uniquement dues aux concentrations initiales mais peuvent également être causées par une oxydation secondaire de la pyrite (soit au moment de l'exploitation, sur le front de taille, soit au moment du dépôt (Wisotsky et Obermann, 2001)) : l'oxydation des sédiments débute à l'exhaure du matériau original stratifié avant

l'exploitation ; l'aération s'intensifie pendant l'exploitation (excavation, mélange, mise à terril) ; après le dépôt, l'oxydation secondaire de la pyrite continue dans la partie supérieure des terrils, probablement sur une période de plusieurs décennies (Gerke *et al.*, 1998). Ainsi, le fait que les volumes de stériles présentent de plus ou moins grandes quantités de pyrite, une bonne ou une mauvaise disponibilité de l'oxygène et de l'eau, a pour conséquence une variabilité spatiale et temporelle importante de la qualité des eaux de drainage.

Le drainage acide résultant est généralement un mélange de fluides issus d'une variété de microenvironnements dynamiques, de telle manière que la prévision de la qualité des eaux de décharge s'avère difficile et imprécise (Rose et Cravotta, 1998).

### **3.6 - Effet de la température**

La réaction d'oxydation est exothermique et peut générer la formation de gradients thermiques dans les stériles. La chaleur due à la réaction se dissipe par conduction thermique ou convection (Rapport EPA, 1994). Lu et Zhang (non daté ; in rapport EPA, 1994) et Guo *et al.* (1994) indiquent qu'il peut exister des flux convectifs lorsque la porosité du matériau est importante. Les cellules de convection aspirent l'air atmosphérique, ce qui permet d'entretenir l'oxydation. Le flux de convection gazeux dû à l'oxydation des sulfures dépend de la température maximale dans les résidus.

En général, la vitesse des réactions qui produisent l'AMD augmente avec la température. Il existe toutefois une exception à ceci : *Thiobacillus ferrooxidans* se développe bien à des températures allant de 25°C à 35°C mais elle devient inactive ou meurt pour des températures supérieures à 55°C. Des mesures indiquent qu'un matériau riche en sulfure peut atteindre une température interne de 60°C en raison de la chaleur dégagée par les réactions d'oxydation (Cathles et Apps, 1975). Il faut également noter que certains matériaux riches en sulfure peuvent entrer en combustion spontanée.

### **3.7 - Durée des périodes sèches et des périodes humides**

Une humidité constante génère un volume plus constant d'acide et de contaminants. Quand la longueur des cycles secs augmente, les produits d'oxydation de la pyrite s'accumulent dans le système, un événement de pluie ou d'humidité importante peut alors chasser ces contaminants en dehors du système (Rapport EPA, 1994).

### **3.8 - L'altération physique**

D'après Cammaer (1998), l'altération physique des roches mises à terril produit rapidement un niveau de surface plus ou moins imperméable. Ceci limite l'AMD à une fine zone sommitale car l'altération

**Fe<sup>2+</sup> dans les eaux souterraines, ce qui représente un mode de transport potentiel de l'acidité sur de longues distances (Bain *et al.*, 2000).**

## **5 - Éléments liés aux précipités de fer et métaux lourds**

Le drainage acide minier, en plus des sulfates, du fer et des protons, peut entraîner la libération d'éléments tels que le manganèse, l'aluminium ainsi que des éléments plus communs tels que le calcium, le sodium, le potassium ou le magnésium (Rose et Cravotta, 1998). Il peut également amener en solution des éléments traces tels que le cadmium, le cobalt, le chrome, le cuivre, le molybdène, le nickel, le plomb, le rubidium, le strontium, l'uranium, le zinc... Les fortes acidités générées par le processus d'oxydation des sulfures provoquent l'hydrolyse de minéraux dans les résidus, rendant ainsi solubles de grandes quantités d'éléments (Monterroso et Macias, 1998a). Des études traitent des processus d'atténuation de la concentration en ions métalliques dans les phénomènes de drainage acide minier, pour les mines de charbon et les mines de métaux. Ainsi, Yu (1996), dans l'étude de la pollution d'un cours d'eau par les eaux de drainage d'une mine de charbon en Corée, a montré que les éléments qui présentaient une mobilité relativement faible (Cr, Cu, Pb et Zn) tout comme le Mo et le Ni se comportaient comme le fer tandis que les éléments à mobilité plus importante (Rb, Sr et U) suivaient le comportement des sulfates. D'après cet auteur, la plupart des métaux lourds toxiques présentent des mobilités faibles et sont rapidement exclus de la solution par adsorption sur les composés de fer précipité. Une étude menée par Chapman *et al.* (1983) sur les cours d'eau drainant une mine métallifère a également montré que des quantités substantielles d'éléments autres que le fer et particulièrement de la silice, des sulfates, de l'aluminium et de l'arsenic, pouvaient être adsorbés sur les précipités de fer. Des études expérimentales ont également montré que les sulfates s'adsorbent facilement sur les hydroxydes ferriques amorphes, particulièrement à pH bas (Bradley et Herman, 1989 in Webb et Sasowsky, 1994).

## **6 - Neutralisation du drainage acide minier**

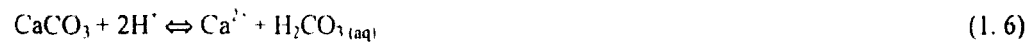
La neutralisation du drainage acide minier (couramment appelée NAMD pour Neutral Acidic Mine Drainage) peut être provoquée de deux façons : la première est l'AMD neutralisé par des réactions avec des carbonates, la seconde est provoquée par des roches contenant de faibles quantités de pyrite. Cependant, il faut noter que la neutralisation de l'AMD n'affecte généralement pas les teneurs en sulfates (Rose et Cravotta, 1998).

Le calcaire et les autres matériaux qui ont un effet tampon peuvent affecter la production d'AMD de différentes façons. Si l'eau qui s'écoule au travers du matériau contenant la pyrite est alcaline, les réactions qui génèrent l'acidité peuvent être inhibées de telle façon que peu ou pas d'AMD se forme



(l'oxydation bactérienne du  $\text{Fe}^{2+}$  est minimale). D'autre part, une fois l'AMD formé, son interaction avec un matériau alcalin peut neutraliser l'acidité et promouvoir l'extraction de fer, d'aluminium et d'autres métaux, ne laissant que la teneur en sulfate témoigner de l'occurrence d'un drainage acide minier.

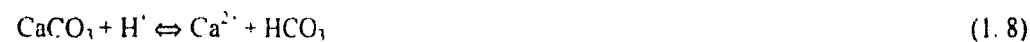
La calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et la dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) sont les principaux minéraux pourvoyeurs d'alcalinité, la sidérite ( $\text{FeCO}_3$ ) est cependant également une source possible bien que moins fréquente. Dans le cas de la calcite, la réaction initiale avec une solution acide est la suivante (Webb et Sasowsky, 1994) :



Si une phase gazeuse est présente,  $\text{H}_2\text{CO}_3$  peut se décomposer partiellement (exsolution en phase gazeuse) :

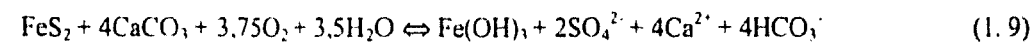


Pour une neutralisation plus poussée de l'AMD jusqu'à des valeurs de pH supérieures à 6,3, le produit formé est le bicarbonate :

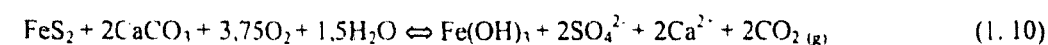


Les espèces carbonatées dominantes en solution sont déterminées par le pH. Pour une température de  $25^\circ\text{C}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (acide carbonique) est prédominant pour des pH  $< 6,35$ ,  $\text{HCO}_3^-$  (bicarbonate) domine pour des pH compris entre 6,35 et 10,33 et  $\text{CO}_3^{2-}$  domine à pH  $> 10,3$  (Webb et Sasowsky, 1994)

La quantité de calcite nécessaire à la neutralisation d'une quantité donnée d'AMD dépend du comportement du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) pendant la neutralisation et du pH atteint. Si l'AMD est neutralisé à pH supérieur ou égal à 6,3 ( $\text{HCO}_3^-$  est donc l'espèce carbonatée principale produite) alors, la réaction s'écrit :

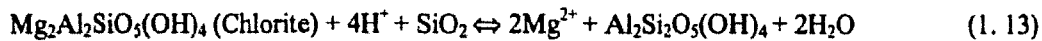
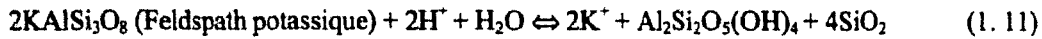


Dans ces conditions, la neutralisation des produits de l'oxydation d'une mole de pyrite demande 4 moles de  $\text{CaCO}_3$  ou 400 g de  $\text{CaCO}_3$  pour 64 g de sulfure pyritique, ou 62,5 tonnes de  $\text{CaCO}_3$  pour 1000 tonnes de matériel à 1 % de soufre sous forme de pyrite. Cependant, si tout le  $\text{CO}_2$  s'échappe en phase gazeuse et/ou si l'AMD est neutralisé à pH 5, alors, la réaction s'écrit :



Alors, la neutralisation de l'AMD générée par l'oxydation d'une mole de pyrite demande 2 moles de  $\text{CaCO}_3$  ou 200 g de  $\text{CaCO}_3$  ou 31,25 tonnes de  $\text{CaCO}_3$  pour 1000 tonnes contenant 1% de sulfure pyritique. D'après Rose et Cravotta (1998), les situations naturelles sont probablement entre ces deux extrêmes.

Il faut également noter que la dissolution de minéraux silicatés consomme l'acidité par des réactions telles que :



Les réactions de ce type sont responsables de la majeure partie ou de la totalité du K, Na, Al, Mg et une partie du Ca dissous dans les zones touchées par l'AMD. Cependant ces réactions sont lentes et consomment seulement une petite partie de l'acidité présente en solution.

La neutralisation du drainage acide minier, en augmentant le pH, entraîne la précipitation des espèces métalliques aqueuses sous la forme d'hydroxydes, d'oxyhydroxydes et d'hydroxysulfates ; ces métaux peuvent également s'adsorber à la surface de ces précipités nouvellement formés (Berger *et al.*, 2000). Des essais de lixiviation réalisés par Rose et Elliott (2000) ont montré qu'il fallait être vigilant quant à l'utilisation de calcaire et de réactifs alcalins similaires dans la remédiation de l'AMD, en effet, l'augmentation de pH permet la précipitation et l'immobilisation des métaux mais les calcaires perdent leur efficacité lorsqu'ils sont recouverts par des hydroxydes de fer (Webb et Sasowsky, 1994 ; Monterroso et Macias, 1998b). L'utilisation de carbonates pour neutraliser l'AMD produit des eaux riches en sulfate et en calcium (issus de l'oxydation de la pyrite et de la dissolution de la calcite). Les concentrations de ces espèces peuvent être suffisamment importantes pour que du gypse précipite et que de ce fait les concentrations en sulfates diminuent (Webb et Sasowsky, 1994, Rose et Ghazi, 1997). Cependant, Bain *et al.* (2000) estiment que même si les concentrations en sulfates peuvent être limitées par la précipitation de gypse (Johnson *et al.*, 2000) la grande solubilité de ce minéral peut entraîner des variations de concentration importantes.

L'augmentation de pH peut également entraîner le relargage des sulfates adsorbés sur les précipités d'oxyhydroxydes de fer qui se sont formés à pH plus bas (Fig. 1.6) (Rose et Ghazi, 1997 ; Rose et Elliot, 2000). Les résultats de cette étude montrent que plus de 40% des sulfates adsorbés aux ocres peuvent être mobilisés quand les agents neutralisants sont utilisés pour augmenter le pH de l'AMD. L'étude de Nicholson *et al.* (1990) a mis en évidence qu'à condition que l'acidité produite par oxydation de la pyrite soit immédiatement neutralisée par le calcaire, un recouvrement d'hydroxyde de fer pouvait se former à la surface de la pyrite, réduisant alors de manière importante la vitesse d'oxydation et donc le drainage acide minier.

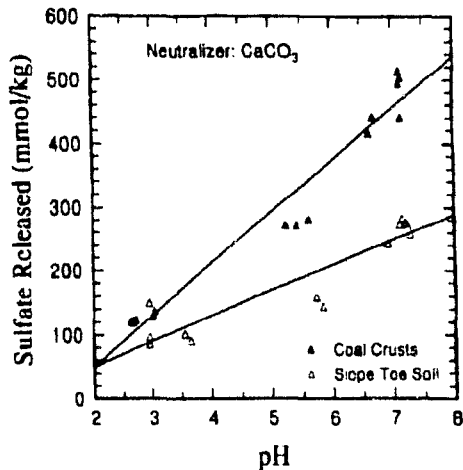


Fig. 1.6 : Taux de désorption des sulfates en fonction du pH après neutralisation par  $\text{CaCO}_3$  des échantillons traités. (Rose et Elliot, 2000)

## 7 - Détermination du potentiel d'acidification et de neutralisation des stériles

Certains pays, et notamment le Canada et les Etats-Unis, pour lesquels la remédiation du drainage acide minier est devenue un enjeu économique, ont mis en place des techniques permettant la prévision de l'AMD. Ces techniques et notamment les tests dits « statiques » sont décrites ci-dessous (Coastech Research Inc., 1989 ; Coastech Research Inc., 1991, ; Lawrence et Wang, 1996) :

La capacité de l'échantillon testé à produire de l'acide est calculée soit en faisant la balance entre son potentiel d'acidification (PA) et son potentiel de neutralisation (PN) (Lawrence et Wang, 1996), cette valeur est nommée potentiel net de neutralisation ( $\text{PNN} = \text{PN} - \text{PA}$ ), soit en en faisant le rapport.

Les résultats des tests statiques permettent de déterminer si les stériles étudiés sont générateurs d'acide ou non : si la différence entre PN et PA est négative, alors la roche étudiée peut produire de l'acide, si la différence est positive, le risque est moins important.

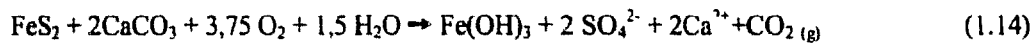
### 7.1 - Test de détermination des acides-bases

Le test statique le plus largement utilisé est le test ABA (Acid Base Accounting) ou détermination des acides-bases, de Sobek *et al.* (1978). Le potentiel d'acidification, y est déterminé par le calcul de la quantité théorique d'acide pouvant être produite si la quantité totale de soufre contenue dans l'échantillon est oxydée en acide sulfurique. Les résultats exprimés en kg de  $\text{CaCO}_3$  par tonne de matériau sont issus de la formule suivante :

$$\text{AP} = ((\text{Teneur en soufre} (\%) * 1000\text{kg}) / 100) * (\text{Poids moléculaire de } \text{CaCO}_3 / \text{Poids atomique du soufre})$$

Donc AP = Teneur en soufre (%) \* 31,25 kg CaCO<sub>3</sub>/tonne.

Le potentiel d'acidification est donc calculé de manière stœchiométrique à partir du pourcentage de soufre total, cependant, le facteur de calcul approprié est controversé : Sobek *et al.* (1978), notant qu'une masse de 3,125 g de CaCO<sub>3</sub> est théoriquement capable de neutraliser l'acide généré par 1 g de soufre (sous la forme FeS<sub>2</sub>), ont suggéré que la quantité d'acidité potentielle dans 1000 tonnes de matériau pouvait être calculée en multipliant le pourcentage de soufre total par 31,25. Ce facteur est issu de la relation stœchiométrique (1.14) et fait la supposition que le CO<sub>2</sub> entre en exsolution sous forme de gaz :



Or, dans les remblais où le CO<sub>2</sub> ne peut pas vraiment entrer en exsolution, le CO<sub>2</sub> se dissout et réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique. l'acidité potentielle maximum dans 1000 tonnes de matériau peut alors être calculée en multipliant le pourcentage de soufre total par 62,50 (Kania, 1998). Il faut cependant noter que l'interprétation des tests ABA a été largement construite en utilisant le facteur 31,25 et que cette convention est suivie dans la plupart des études (Perry, 1998).

Le potentiel de neutralisation est déterminé par digestion de l'échantillon broyé dans une quantité d'acide chlorhydrique chaud en excès (quantité déterminée par l'intermédiaire d'un test d'effervescence) et titrage à rebours de la solution résultante à pH 7 avec de l'hydroxyde de sodium pour déterminer quelle quantité d'acide est consommée dans la réaction entre l'acide chlorhydrique et l'échantillon.

Le test d'effervescence consiste à ajouter quelques gouttes d'acide chlorhydrique à 25% à une petite quantité d'échantillon, le degré d'effervescence de celui-ci détermine ensuite la quantité et la force de l'acide à ajouter (Tab. 1.1).

Fizz Rating	Acid Normality	Acid Volume (mL)
None	0.1	20
Slight	0.1	40
Moderate	0.5	40
Strong	0.5	80

Tab. 1.1 : Détermination du volume et de la force de l'acide à utiliser dans le test ABA en fonction du résultat du test d'effervescence. (Lawrence et Wang, 1996)

En pratique, ce test d'effervescence se révèle très subjectif et sa réponse peut être différente d'une personne à l'autre. Ceci peut entraîner la sous ou la sur-estimation du taux d'effervescence, ce qui implique une différence dans la quantité d'acide à ajouter lors du test ABA et donc des variations du potentiel de neutralisation obtenu.

L'utilisation du test ABA pose différents problèmes. Tout d'abord, il suppose que tout le soufre présent dans l'échantillon est réactif. Cette supposition ne prend pas en considération la présence de gypse et d'autres minéraux soufrés non réactifs. Cette méthode a également le défaut de potentiellement surestimer le potentiel de neutralisation (l'utilisation d'acide fort et chaud peut dissoudre des minéraux qui autrement ne réagiraient pas, par exemple, la procédure peut extraire des minéraux silicatés qui s'altèrent seulement lentement en condition de terrain (Perry, 1998)), ou sous-estimer le PN s'il y a contribution d'hydroxydes métalliques qui précipitent lors du titrage à l'hydroxyde de sodium. De plus, les méthodes d'estimation de PNN impliquent que la formation d'acide et sa neutralisation se concurrencent à vitesse égale ; en réalité, la production d'acide peut se faire plus rapidement et est catalysée par *Thiobacillus ferrooxidans*. La dissolution de minéraux carbonatés est fonction du pH et de  $pCO_2$  et ne se déroule pas aussi rapidement (Plummer *et al.*, 1978 in Perry, 1998).

## 7.2 - Test de détermination modifiée des acides-bases

Le principe est le même que celui du test décrit précédemment (détermination du potentiel d'acidification et du potentiel de neutralisation puis calcul du potentiel net de neutralisation), la différence réside dans le fait que le test se déroule à température ambiante pendant 24 heures. Un test d'effervescence est utilisé au départ et de l'acide est ajouté au cours du test pour maintenir une acidité suffisante pendant la réaction. Finalement l'acide non consommé est titré à l'aide d'une base jusqu'à pH 8,3.

Le potentiel d'acidification est quant à lui calculé à partir de la quantité de sulfure et non de la quantité de soufre total en considérant que la quantité de sulfure est égale à la quantité de soufre total à laquelle est soustraite la quantité de sulfates.

## 7.3 - Essai initial de B.C. Research

Le potentiel de neutralisation est déterminé par titrage d'un échantillon finement broyé et transformé en boue par ajout d'eau avec de l'acide sulfurique jusqu'à pH 3,5. Le choix du pH de fin est basé sur l'hypothèse que cette valeur représente la limite au dessus de laquelle les bactéries ferro et sulfuro-oxydantes ne sont pas actives. Ainsi, si la production d'acide n'est pas suffisante pour amener le pH sous 3,5 alors l'oxydation biochimique du matériau n'a pas lieu et la formation d'AMD est peu probable.

Le potentiel d'acidification est déterminé par l'analyse du soufre total en faisant l'hypothèse d'une conversion totale du soufre en sulfate (acide sulfurique) et une production de 4 moles de  $H^+$  par mole

de pyrite oxydée. Le PA de l'échantillon en kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> par tonne de matériau est donné par la relation suivante : PA = Soufre total (%) \* 30,6.

#### **7.4 - Essai de production nette d'acide**

Cette méthode permet de déterminer la balance entre PA et PN sans avoir recours aux analyses de soufre. Ce test implique l'utilisation de peroxyde d'hydrogène qui réagit avec les sulfures contenus dans l'échantillon broyé. Le peroxyde d'hydrogène a été largement utilisé comme alternative pour accélérer la réaction d'oxydation et simplifier les protocoles analytiques (Heard et Senfile, 1984 in Monterroso et Macias, 1998b ; Finkelman et Griffin, 1986). L'acide produit par oxydation est simultanément consommé par les carbonates et les autres constituants neutralisants contenus dans l'échantillon. L'acide restant après réaction est titré à l'aide d'une base jusqu'à pH 7.

La principale limite de ce test est que, ni les facteurs déterminant la vitesse de ces réactions, ni les conditions environnementales ayant un effet sur la production d'acide, ne sont prises en compte (Monterroso et Macias, 1998b).

#### **7.5 - Essai d'établissement du ratio Soufre / Potentiel de production alcaline**

Ce test comprend deux mesures : (1) la détermination de la consommation d'acide de l'échantillon (APP) ; (2) l'analyse des teneurs en soufre total (S<sub>T</sub>).

L'échantillon broyé est mis en présence d'acide chlorhydrique sous conditions moins agressives que celles du test ABA. Le volume de base nécessaire au titrage de l'acide restant après réaction jusqu'à pH 7 est mesuré et comparé à une courbe de calibration préparée en appliquant le traitement acide à des carbonates standards. Les valeurs d'APP obtenues sont comparées aux teneurs en soufre total correspondantes dans un diagramme APP / S<sub>T</sub>.

#### **7.6 - Mesure du potentiel de neutralisation par l'analyse des carbonates**

Le potentiel de neutralisation peut être calculé à partir des résultats de calcimétrie d'un échantillon grâce à la formule suivante :

$$\text{PN Carbonate (kg CaCO}_3\text{/t)} = (\text{C (mg) contenu dans l'échantillon} * 8,34) / \text{Poids de l'échantillon (g)}.$$

Comme nous venons de le voir, certains tests utilisent pour la détermination du potentiel d'acidification, non pas la teneur en soufre total mais ils différencient parfois les formes du soufre (sulfures, soufre organique et sulfates) (Kania, 1998) :

- Le sulfure est la forme qui réagit avec l'oxygène et l'eau pour former l'AMD.
- Le soufre organique est celui qui existe dans les molécules à base de carbone (dans les charbons et autres roches qui contiennent une quantité significative de carbone) ; ce soufre, lié à des composés stables sous conditions de surface, n'est pas considéré comme un contributeur à l'AMD.
- Le sulfate est souvent ignoré car dans les climats humides, il se trouve généralement en petite quantité en raison de sa solubilité importante.

Théoriquement, la somme des sulfates et des sulfures devrait constituer un meilleur indicateur de la quantité de soufre réactif dans un échantillon que le soufre total, cependant, l'étude de Hedin et Erickson (1988, in Kania, 1998) a montré que le soufre total était mieux corrélé aux résultats de tests de lixiviation que le soufre pyritique. Ceci révèle des problèmes dans la détermination des formes du soufre (moins de précision, moins bonne reproductibilité, ... (Brady et Smith, 1990 in Kania, 1998)). Ces considérations et le fait que le soufre pyritique est la forme la plus abondante des stériles, expliquent que le pourcentage de soufre total donne généralement une meilleure base pour calculer le potentiel d'acidification (Kania, 1998).

Il est important de noter que, dans les conditions habituelles de dépôt, tout le soufre n'est pas oxydé, de même, toute la capacité de neutralisation déterminée par les tests statiques standards n'est pas disponible pour la réaction (Lawrence et Scheske, 1997). Malgré ceci, les résultats de ces tests sont utilisés pour déterminer si un résidu est « sûr » et peut être mis en dépôt (lorsque  $PN > PA$ ), ou s'il est potentiellement générateur d'acide (lorsque  $PA > PN$ ). Lawrence et Scheske (1997) soulignent l'importance d'une détermination minéralogique « classique » par des méthodes de type microscopie optique ou DRX bien que cette dernière ne soit pas suffisante pour permettre les distinctions quantitatives fines nécessaires au calcul de PN. Ils proposent donc une procédure simple permettant de calculer le potentiel de neutralisation « efficace » de stériles à partir de la composition minéralogique et des réactivités relatives aux différents constituants minéraux. Pour ce faire, ils calculent la composition minéralogique, à partir d'analyses d'éléments majeurs combinées à des analyses du carbone inorganique, en utilisant la norme CIPW. Le potentiel de neutralisation de l'échantillon est ensuite calculé en additionnant les valeurs de PN calculées pour chaque constituant minéral (en utilisant les réactivités relatives de chaque minéral fournies par Sverdrup (1990) et Kwong (1993)). L'unité de potentiel de neutralisation est exprimée en kg de  $CaCO_3$  équivalent par tonne. Lawrence et Scheske (1997) convertissent les valeurs de PN calculées en utilisant le rapport du poids moléculaire de  $CaCO_3$  et celui du minéral concerné.

Exemple d'un échantillon contenant 17,1 % d'anorthite :

$$NP = (17,1 / 100) * (1000 \text{ kg} / 1 \text{ tonne}) * (\text{poids moléculaire } CaCO_3 / \text{poids moléculaire anorthite}) * \text{réactivité relative}$$

Paktunc (1999a et b) souligne différents problèmes dans l'utilisation de la méthode proposée par Lawrence et Scheske et notamment la validité de l'utilisation d'une classification normative telle que la norme CIPW : Ils rappellent en effet que cette norme a été mise en place afin de calculer l'assemblage minéralogique de roches ignées refroidies lentement et composées essentiellement de minéraux anhydres et non pas l'assemblage minéralogique actuel présent dans les roches ; cette norme n'est donc pas représentative des minéraux secondaires, des assemblages sédimentaires et des minéraux formés pendant le métamorphisme et l'altération hydrothermale. Cette méthode, en créant des minéraux « artificiels » non présents réellement dans l'échantillon, peut entraîner une surestimation du potentiel de neutralisation.

Les terrils du bassin minier Nord-Pas-de-Calais, constitués principalement de schistes houillers contenant de la pyrite, pourraient avoir été ou être encore, pour les plus récents notamment, une source de drainage acide minier. Les stériles sont en effet entassés à l'air libre et sujets aux intempéries, notamment à la pluie qui, si elle a la possibilité de s'infiltrer, pourrait entraîner les produits d'oxydation de la pyrite vers les eaux de surface mais aussi, et ce qui nous concerne en tout premier lieu dans cette étude, vers les nappes d'eau souterraines et principalement vers la Nappe de la Craie, principale ressource en eau de la région.





**CHAPITRE II :**  
**PRESENTATION DES SITES D'ETUDE**



Afin de mener à bien la présente étude, deux sites ont été choisis en collaboration avec Charbonnages de France (CdF). Ces deux terrils sont situés à 30 km au sud de Lille et sont séparés l'un de l'autre par 3 km (Fig. 2.1). Le choix des sites d'étude a été guidé par leur bon équipement piézométrique permettant de visualiser un éventuel panache d'effluents dans la nappe de la Craie, et par le fait que les deux sites sont placés dans des contextes hydrogéologiques contrastés, ainsi qu'expliqué ci-dessous.

## **1 – Description, historique**

### **1.1 - Site 1 (Fig. 2.2)**

Le site 1 est situé à proximité de l'embranchement de l'autoroute A1 et de la rocade minière (A21), en bordure de la ligne de TGV nord. Il s'agit d'un terril de lavoir, de forme conique, présentant une emprise au sol de 13 ha et une hauteur par rapport au sol d'environ 100 m. Le volume de stériles entassés est estimé à 2,8 millions de m<sup>3</sup>. Les mises à terril ont été faites par déversement gravitaire.

Le site 1 est lié aux travaux miniers de la fosse Sainte-Henriette (2 et 2bis selon la nomenclature CdF comme les numéros qui suivront) et aux lavoirs centraux de la concession de Dourges (Fig. 2.3). Les bassins n° 15 et 16 ont été conçus pour la décantation des eaux du lavoir du siège 2 Est qui traitait les charbons provenant des fosses de la concession de Dourges jusqu'en 1970. Au cours de l'exploitation, de nombreuses activités se sont développées sur le site et ne sont plus visibles aujourd'hui. Le rapport initial de l'INERIS (1995) concernant l'étude historique du site 1 nous montre que certaines infrastructures (cokerie, lavoirs, usines à sous-produits...), présentes sur le site au moment de l'exploitation et aujourd'hui disparues, peuvent être responsables de pollutions chroniques ou accidentelles (Fig. 2.4).

L'analyse historique des activités pratiquées sur le site a ainsi permis d'établir les points suivants :

- la fosse minière (2 et 2 bis) a été exploitée dès 1854, son remblaiement date de 1971 ;
- une cokerie a fonctionné sur le site de 1895 à 1958 ; elle était associée à deux usines à sous-produits (sulfate d'ammonium, benzols commerciaux, goudrons) ; une centrale électrique a également fonctionné dès le début du XX<sup>ème</sup> siècle.

Ces activités liées à l'exploitation du charbon ont pu engendrer différents types de pollution (rapport INERIS, 1995) :

- atmosphérique : la présence sur le site d'une cokerie peut avoir entraîné une pollution superficielle des sols par des dépôts éoliens. Les cokeries rejettent en effet d'importantes quantités de

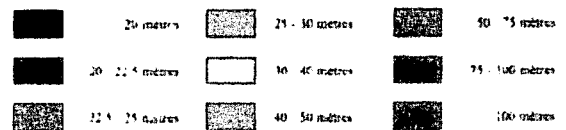
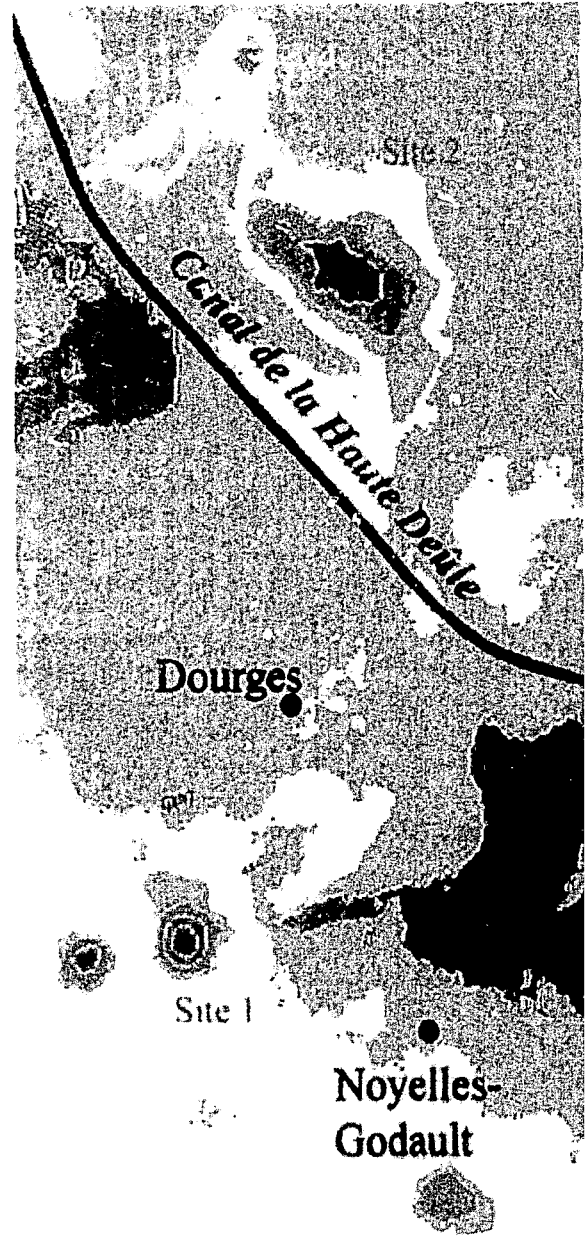
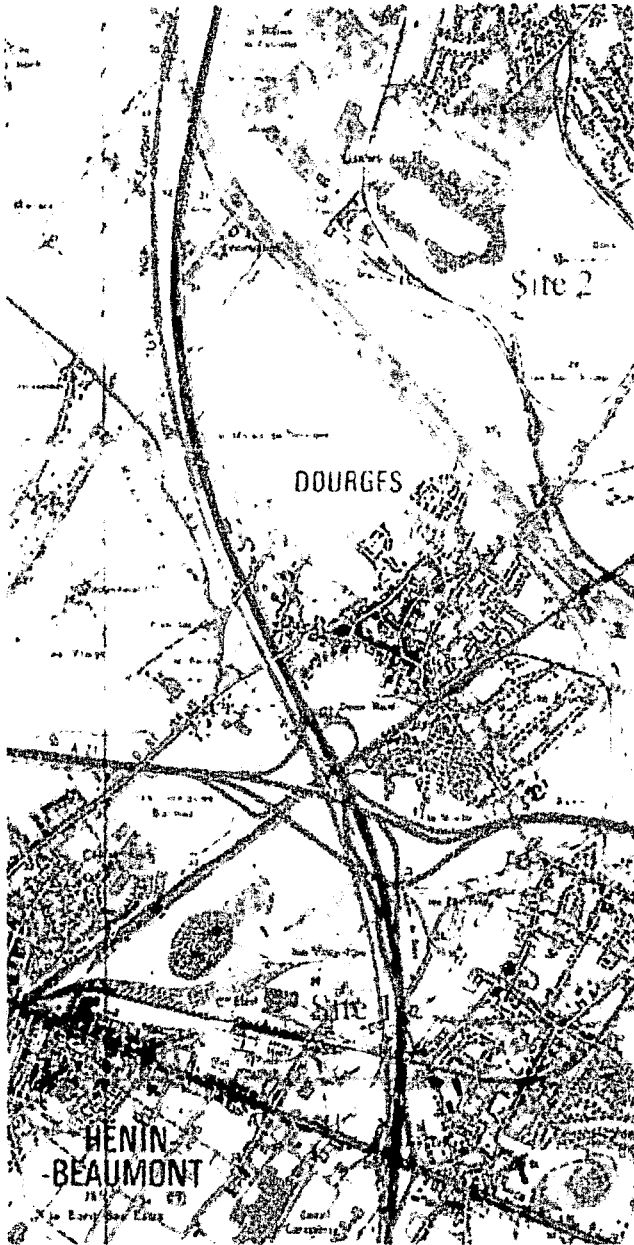


Fig. 2.1 Présentation des sites étudiés : situation géographique (carte IGN 1:25000) , topographie (d'après Duchesne, 1999 (données SAC'OMI, 1994))

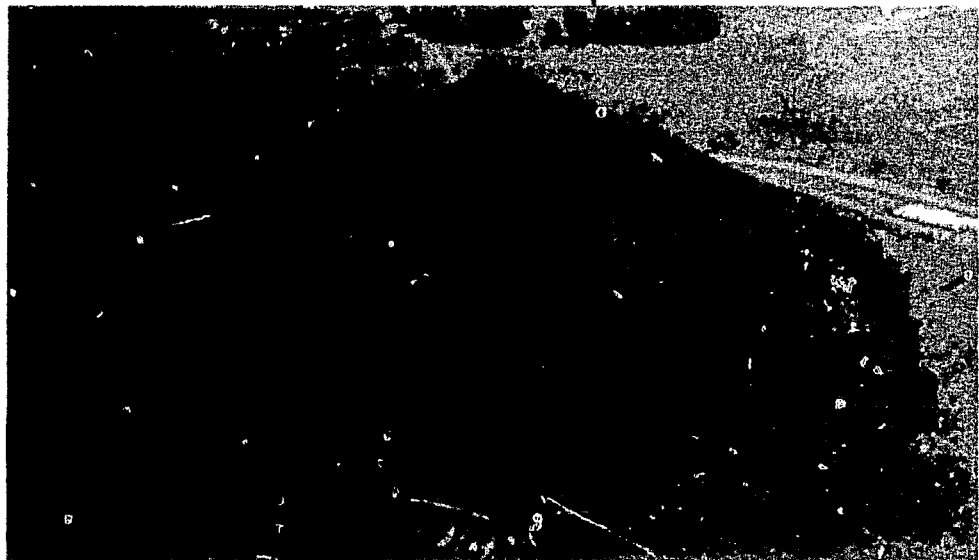
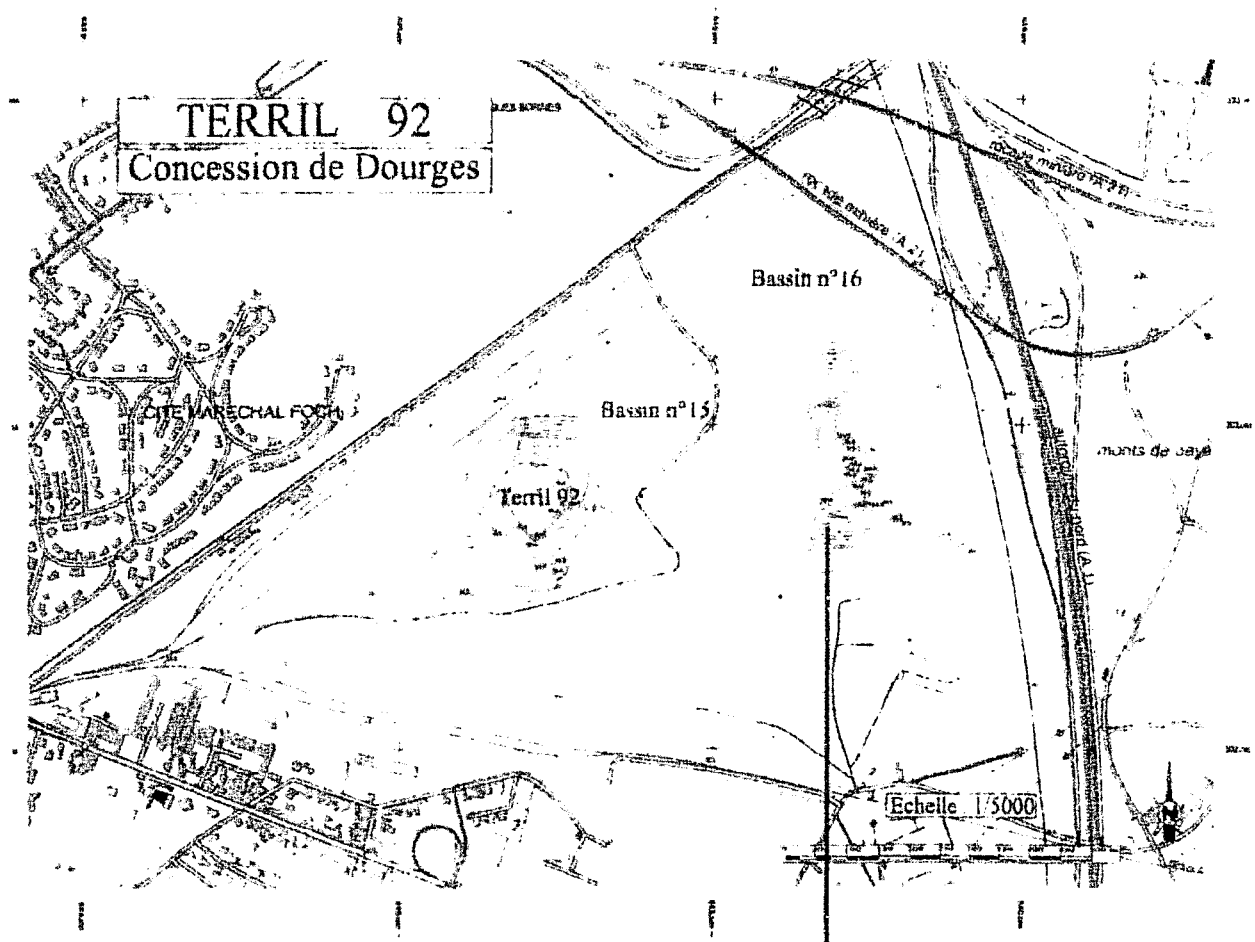


Fig. 2.2 : Présentation du site 1

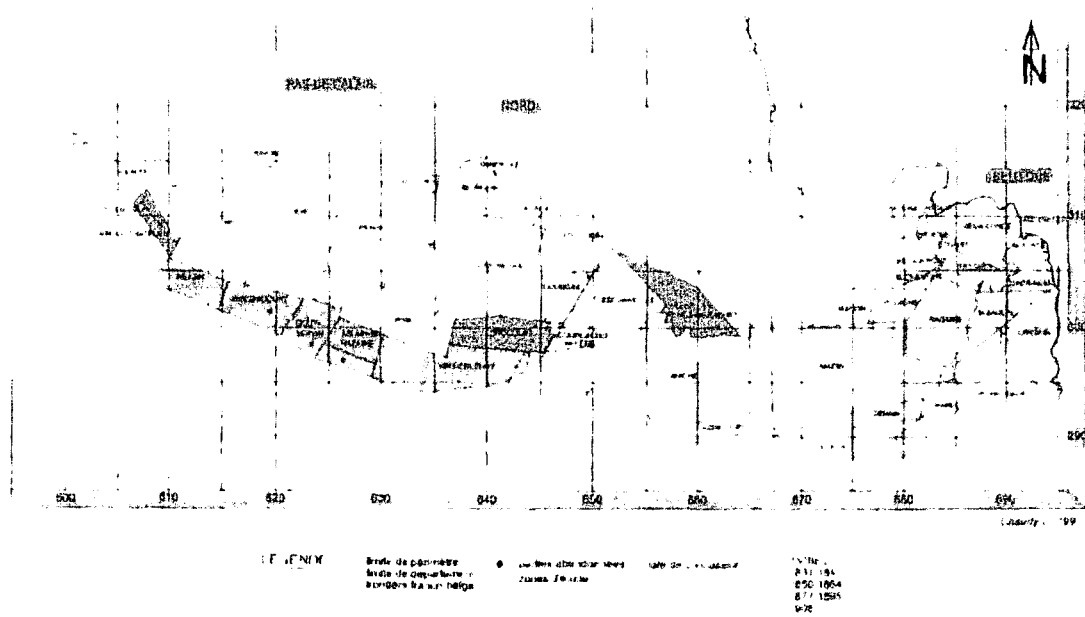
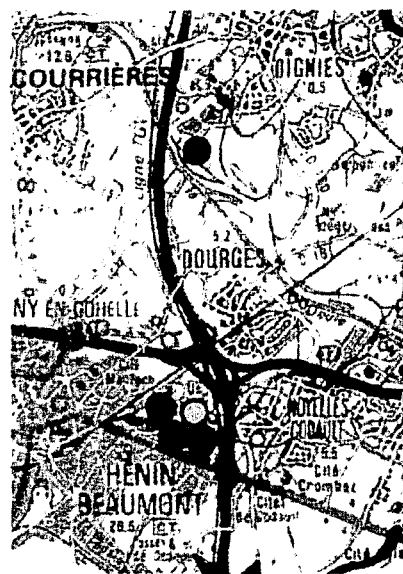


Fig. 2.3 . Carte des concessions (d'après Chaudy, 1997).



- Cokerie
- Agglomères
- Distillerie de goudron
- Usine d'ammoniac de synthèse
- ⚡ Centrale électrique

Echelle 1:100 000

Fig. 2.4 - Localisation des industries dérivées du charbon sur les sites étudiés (d'après Duchesne, 1999).

poussières, vésicules de goudron, anhydride sulfureux et sulfurique, ammoniac, composés cyanurés, hydrogène sulfuré, phénols...

- des eaux : les émissions d'eaux résiduelles (cokerie, lavoir) étaient collectées et acheminées par un fossé dans le canal de la Haute-Deûle.

- des sols : les activités des lavoirs et de la cokerie, par l'intermédiaire du stockage de matières premières et de déchets ont pu engendrer des contaminations (stockage de cendres, de stériles, de coke). Les stockages passés et présents sur le site sont donc susceptibles d'une contribution à la contamination organique (phénols, HPA, ...) et minérale (sulfates, sodium).

D'autre part, le remblaiement de la fosse n°2 par des suies de centrales ou chaufferies au niveau de la fosse n°2 est susceptible de contaminer l'aquifère en éléments minéraux.

Les activités des ateliers présents sur le site (réparation, brûlage de câbles de cuivre sont susceptibles de contribuer à la pollution minérale (Cuivre, Zinc, Fer, ...) mais également à la pollution organique du fait de l'utilisation de solvants de dégraissage.

## 1.2 - Site 2 (Fig. 2.5 et 2.6)

Le site 2 correspond au terril 116-117, issu des activités des anciennes fosses minières 9, 9 bis et 10 de Oignies, dernier site d'exploitation minière des Houillères du Bassin du Nord et du Pas-de-Calais. Le terril étudié fait partie d'une friche industrielle d'une superficie totale de 300 ha. L'ensemble des terrils 116 et 117 constitue un terril de lavoir de forme pseudo-tabulaire occupant une surface d'environ 65 ha. Sa hauteur varie entre une quinzaine de mètres au niveau de la partie plate au sud-est, à plus de 60 m au centre. Le volume de matériau est estimé à environ 15 millions de m<sup>3</sup>. L'édification du « double terril » 116-117 s'est fait de la manière suivante (CdF, communication personnelle ; rapport Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille (LRPC) - ANTEA, 1995) : tout d'abord création du terril conique n° 116, les matériaux stockés en premier lieu étaient fins (<0,20 mm) mais devinrent par la suite plus hétérogènes ; un premier bassin de décantation pour les schistes de flottation a ensuite été créé à l'est-sud-est du terril 116 ; l'extension du terril 116 finit par engendrer le fluage des terrains superficiels, ce qui amena à reconsidérer le stockage des stériles ; le bassin de décantation jouxtant le terril fut partiellement curé et le terril s'étendit par dessus, prenant une forme tabulaire pour en arriver au dépôt actuel.

Trois bassins de décantation étaient présents sur le site au cours de l'étude. Les digues de ces bassins de décantation, constituées de schistes, sont filtrantes.

Le bassin A est le bassin situé le plus à l'ouest de la friche, il a été mis en service en 1973 et son exploitation s'est terminée en 1986/1987. Ce bassin n'a jamais été curé et le volume de fines entreposées est estimé à 800000 m<sup>3</sup>.



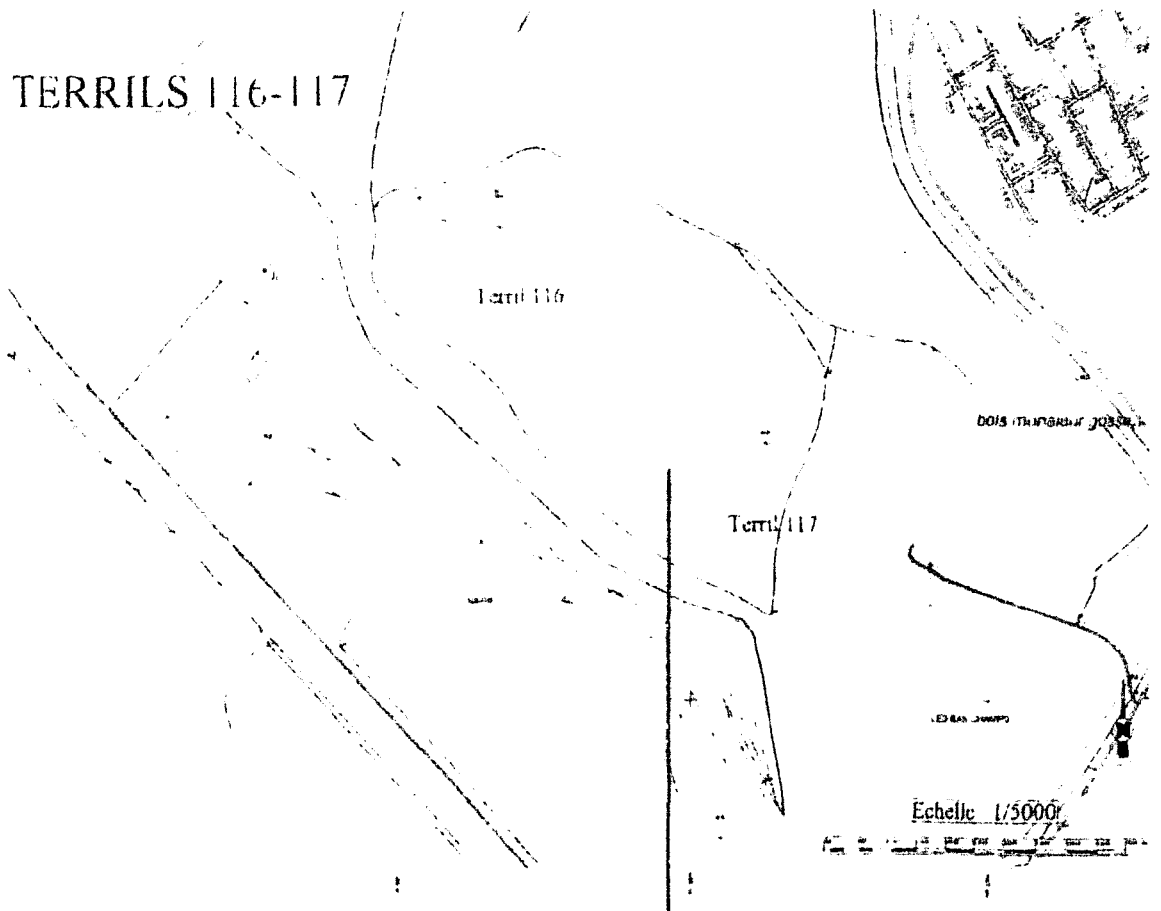
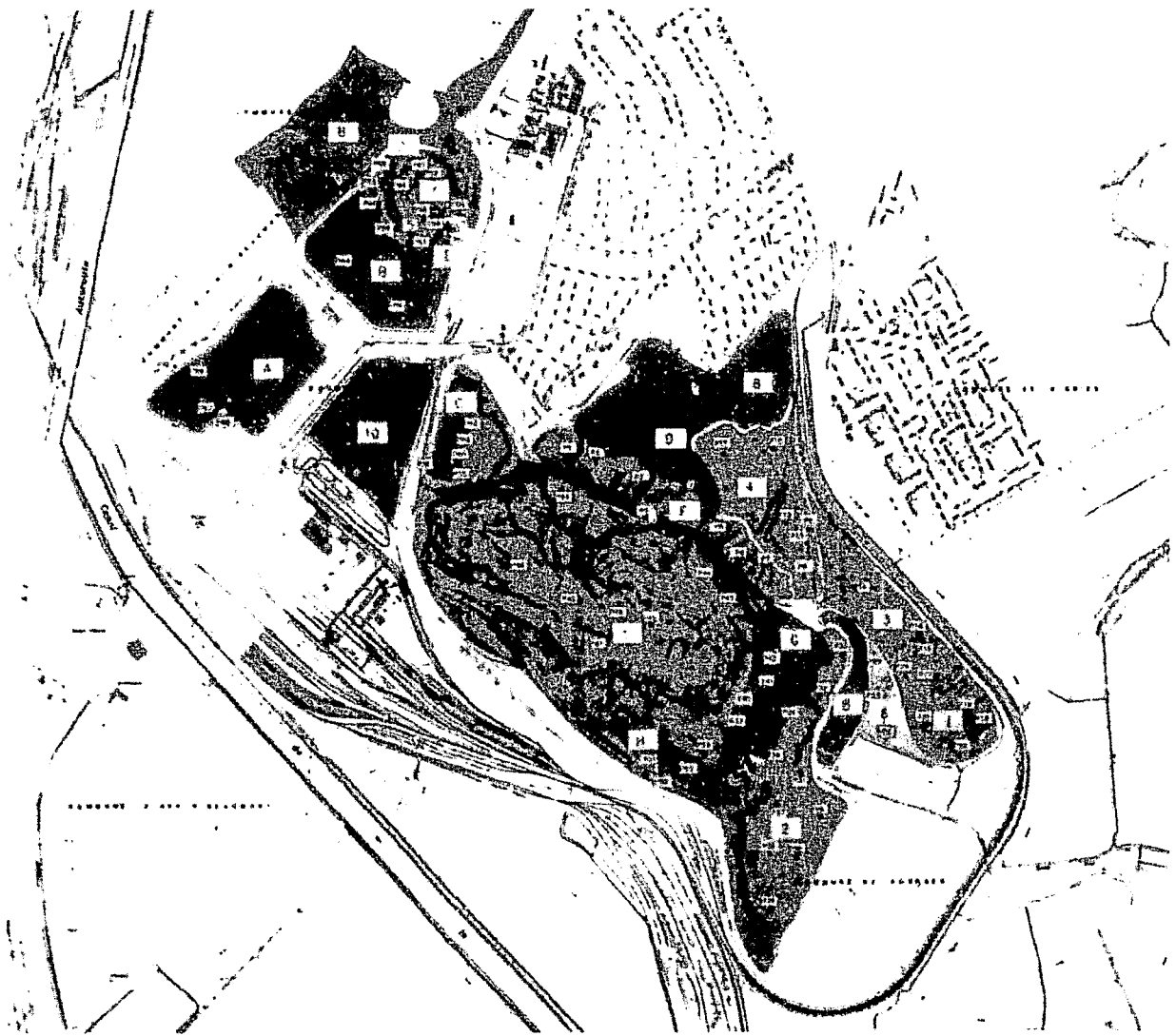


Fig. 2.5 : Présentation du site 2















- |   |   |
|---|---|
| A - B - C   | Bassins a schlamms  |
| D - E - F - G - H - I   | Schlamms en depot   |
|  | Schlamms en depot   |
|  | 1 Terril 116 - 117  |
|  | 2 Derniers schistes noirs mis en depot  |
|  | 3 Plate forme schistes noirs<br>(ep. 1 a 1,5 m reposant sur le terrain naturel)                       |
|  | 4 - 5 Remblais heterogene : zones herbacees en surface<br>(remblais tres heterogenes)                 |
|  | 6 Remblais plutot limoneux<br>(ep. 1 a 2 m reposant sur des schistes noirs.<br>TN vers 3,60 - 4,40 m) |
|  | 7 Terrils 110   |
|  | 8 Zones boisées   |
|  | 9 Zone marecageuse (eau en surface)   |
|  | 10 Marais Chaux zone depolluee (ancienne zone<br>de rejet d'eaux goudronnees)                         |

Fig. 2.6 : Présentation détaillée du site 2 (d'après rapport LCPC-ANTEA, 1995)

Le bassin B, adossé au terril conique de la fosse 9 (terril 110), recevait non seulement des schistes de flottation mais également les eaux des installations de défumage. De ce fait, les digues réalisées à l'aide de schistes, sont devenues étanches. Ce bassin a été rempli en 1973 puis curé entre 1983 et 1985. Les fines ainsi récoltées (650000 tonnes) ont été entreposées sur le flanc nord-est du terril de la fosse 10 et sur le bois de Monsieur Gosse situé dans la partie est de la friche. Le remplissage du bassin a ensuite repris jusqu'en 1990, date de l'arrêt des lavoirs. Le volume actuel de fines est estimé à 400000 m<sup>3</sup>.

Le bassin C est le plus petit et le plus récent des trois. Il se situe sur le flanc nord-ouest du terril de la fosse 10 (terril 116-117). Ce bassin de décantation a été mis en service en 1983-1984 et rempli en 6 mois. Le volume de fines entreposées est estimé à 50000 m<sup>3</sup>.

L'analyse historique des activités pratiquées sur le site a permis d'établir les points suivants : un lavoir existait sur le site de 1959 à 1991 ; de même, l'usine à boulet de charbon située à proximité du site et datant de 1960 a été démantelée au cours de l'année 2001 (Fig. 2.4). Les activités de cette usine ont engendré la production notamment d'eaux goudronneuses qui étaient dirigées vers des bassins de décantation (initialement ceux du lavoir puis d'autres bassins creusés notamment au sud du terril du siège 10).

Le site 2 fait actuellement et fera encore à l'avenir vraisemblablement l'objet de modifications (stabilisation des flancs notamment) puisqu'il se trouve au cœur de la future plate-forme logistique d'intérêt européen de Dourges.

## **2 - Contexte géologique**

### **2.1 - Généralités : le bassin minier**

La géologie de la région Nord-Pas-de-Calais peut être résumée de la façon suivante : un ensemble sédimentaire d'âge méso- à cénozoïque, à structure interne subhorizontale, recouvre en discordance un soubassement paléozoïque formé du bassin synorogénique d'avant-pays qui borde la frange septentrionale de la chaîne varisque. Du Pays de Galles à la Slovaquie, ce bassin d'avant-pays contient des gisements miniers plus ou moins continus, multicouches, à dépôts paraliques dominants (Bouroz, 1969, Paproth *et al.* 1983a et b). L'exploitation de ces dépôts est contrariée par une déformation tectonique croissante vers l'extérieur de la chaîne, où plis et failles de raccourcissement se sont imposés à des failles synsédimentaires d'âge namuro-westphalien (Meilliez, 1989).

Dès la fin du Crétacé inférieur, la subsidence qui a peu à peu différencié le bassin de Paris et celui de la Mer du Nord, affecte les reliefs résiduels varisques qui relient alors les futures Iles Britanniques au massif ardennais. Le Nord, la Picardie et les Flandres sont recouverts par la mer de la craie, laquelle

s'accumule, à l'échelle régionale, sur un substratum débité en gradins décalés par des failles synsédimentaires (Robaszynski, 1987). La puissance des dépôts crayeux est ainsi différenciée régionalement, s'épaississant vers l'ouest et le sud-ouest à partir des reliefs résiduels du moment.

Peu de temps avant la fin du Mésozoïque, une modification de la cinématique des plaques modifie radicalement le système de contraintes régionales. Souvent qualifié de 'contre-coup de l'orogénèse alpine' cet événement provoque la surrection du massif ardenno-rhénan et l'effondrement de la Mer du Nord méridionale. Corrélativement, la sédimentation redevient détritique et la région est le site de dépôts sableux et argilo-sableux durant le Paléocène et la majeure partie de l'Eocène. Ensuite, l'essentiel de la région est exondé, en dépit d'épisodes marins locaux ayant laissé quelques dépôts peu épais.

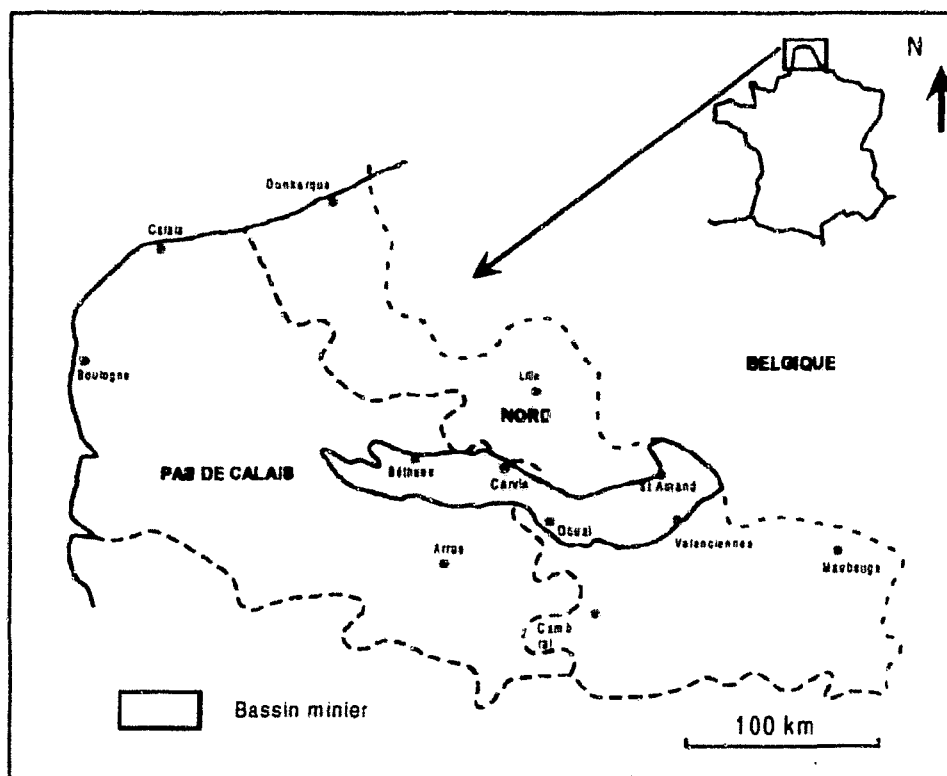


Fig. 2.7 : Situation géographique du bassin minier Nord-Pas-de-Calais.

La pile sédimentaire s'organise donc comme suit (Fig. 2.8) :

- Les formations quaternaires :

Les loess, d'une épaisseur variant de quelques centimètres à 3 m, couvrent une partie importante des formations tertiaires et secondaires. Leur composition varie en fonction de la nature du substrat, ainsi, lorsqu'ils reposent sur la craie, ils contiennent un horizon supérieur décalcifié et brun surmontant un

horizon plus argileux de couleur jaune clair, ils sont plus sableux lorsqu'ils reposent sur les sables tertiaires

Les alluvions, dont l'épaisseur peut atteindre 8 à 10 m sont généralement composées d'argiles grises ou jaunâtres et de sable argileux à intercalation de tourbe ou de lits de graviers. Ces alluvions sont généralement présentes dans les vallées et sont présentes notamment dans le secteur de Carvin et Oignies

- Les formations tertiaires

Les Sables d'Ostricourt (Landémien) dont l'épaisseur peut atteindre 20 à 30 m présentent deux faciès : d'une part sont observés dans la partie sommitale des sables blancs, d'origine continentale ou fluviale. D'autre part, à la base, des sables verts, fins et glauconneux, d'origine marine.

Au dessous, les Argiles de Louvil (Landémien), pouvant atteindre 10 m d'épaisseur, sont noirâtres et plastiques. Leur base comporte souvent de petits niveaux de sable fin glauconneux (grès tendres appelés « tuffeaux »).

- Les formations secondaires

La craie du Sénomien, dont l'épaisseur peut atteindre 60 m, est une craie blanche, fine, homogène et aquifère dont la partie inférieure est constituée de bancs gris-jaunâtres.

La craie du Turonien supérieur peut présenter une épaisseur de 10 m. Il s'agit d'une craie grise, glauconieuse contenant des silex et parfois chargée de grains de phosphate. Elle contient des bancs durcis (en raison de la cristallisation de calcite) et imperméables appelés « meule » ou « tun » qui peuvent atteindre 8 m d'épaisseur.

Les marnes crayeuses du Turonien moyen, pouvant atteindre 30 m d'épaisseur, sont constituées d'une alternance de bancs de craie dure (plus ou moins argileux) et de marnes bleuâtres tendres (« dièves bleues »)

Les marnes du Turonien inférieur (25 m) sont des marnes verdâtres, plastiques et imperméables (« dièves vertes »)

Les marnes blanches et le tourtia du Cenomanien : 20 m de marnes blanches et intercalations de bancs crayeux reposent sur quelques mètres de dépôts argilo-sableux, sous forme de conglomérats (« Tourtia »)

- Les formations primaires

Les schistes houillers sont micacés et mal stratifiés : ils ont été fortement plissés pendant la phase hercynienne

Les calcaires carbonifères sont compacts et constituent un aquifère profond

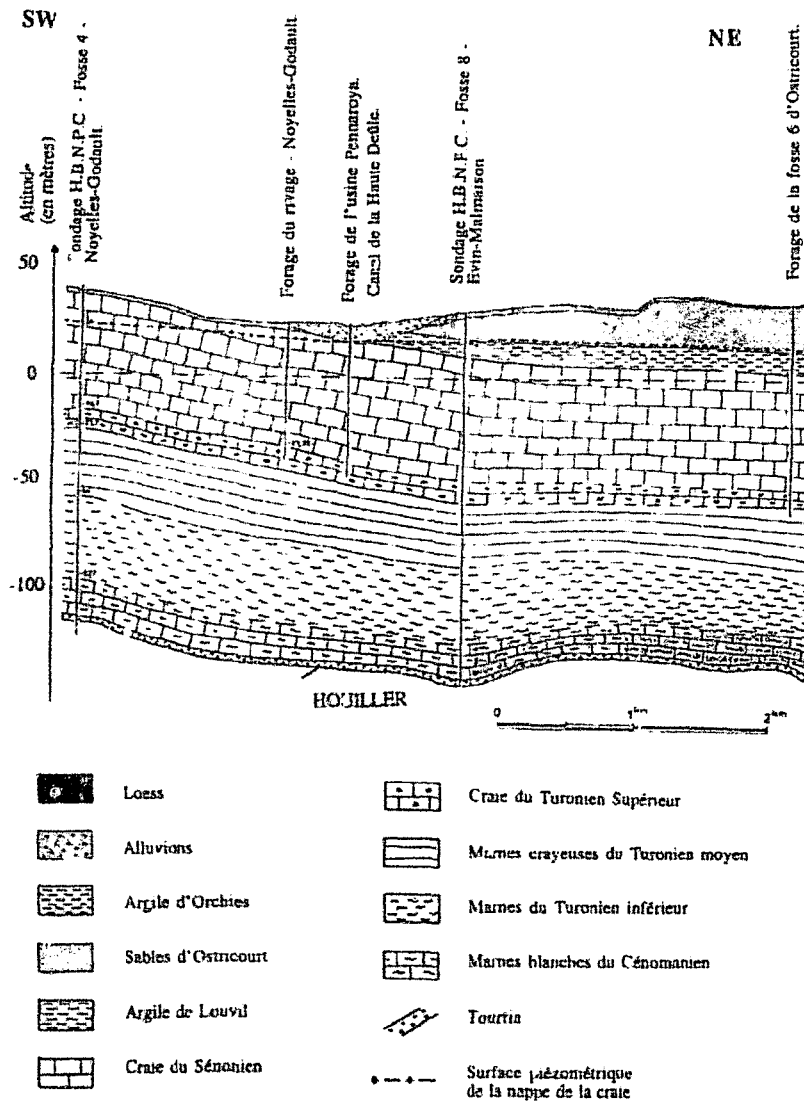


Fig. 2.8 : Coupe géologique Noyelle-Godault - Ostricourt (Duchesne, 1999).

Les failles qui quadrillent le bassin présentent deux directions fondamentales (Colbeaux *et al.*, 1980), NE-SO (transverses) et ONO-ESE (longitudinales).

D'après Gosselet (1908), les failles qui découpent le Houiller peuvent être séparées en deux catégories : les failles affectant uniquement le Houiller (les plus nombreuses) et les failles ayant une répercussion sur les terrains crétacés sus-jacents (dénommées failles épicrotécés). Toutes les failles du Houiller, y compris les plus importantes (le Cian de retour, la faille Reumeaux ; Fig. 2.9) présentes entre la concession d'Aniche et la concession de Lens, donc dans la zone étudiée ici, n'affectent pas

les formations crétacées. Il en est de même pour les failles situées à l'est de Béthune (concessions de Liévin et Bully-Grenay). Cependant, il existe à l'ouest de ces concessions des failles qui affectent à la fois le Horiller et le Crétacé (Faille de Ruit, d'Hersin, de Marquefines...).



Fig. 2.9 - Carte simplifiée des zones stratigraphiques à la cote 300, (d'après Bouroz *et al* (1962, 1963) (Chaudy, 1997)).

## 2.2 - Les sites étudiés

Le terril du site 1 repose sur la succession lithostratigraphique suivante (Fig. 2.10) :

- à la base, les marnes crayeuses du Turonien moyen inférieur recouvertes par la craie blanche sénonturonienne d'environ 70 m d'épaisseur,
- la partie sommitale de cette craie, constituée d'un horizon de fragments crayeux emballés dans une matrice silto-crayeuse (5 m d'épaisseur), appelée couche de "marnettes" ;
- au sommet, le terril repose directement sur les formations quaternaires (loess et lehm) dont l'ensemble peut atteindre 3 à 5 m d'épaisseur.

Le substratum du site 2 possède une assise crayeuse identique à celle du site 1. Sur cette assise repose le Landénien représenté à sa base par l'Argile de Louvil (5-6 m d'épaisseur) et dans sa partie supérieure par les Sables d'Ostricourt. Ces sables de faible épaisseur présentent des limites cartographiques imprécises à proximité du terril et sont riches en gypse issu de l'altération supergène de pyrite. Le terril repose directement sur les alluvions récentes de la Deûle. Plus au nord, des limons sablo-argileux quaternaires se substituent aux alluvions.

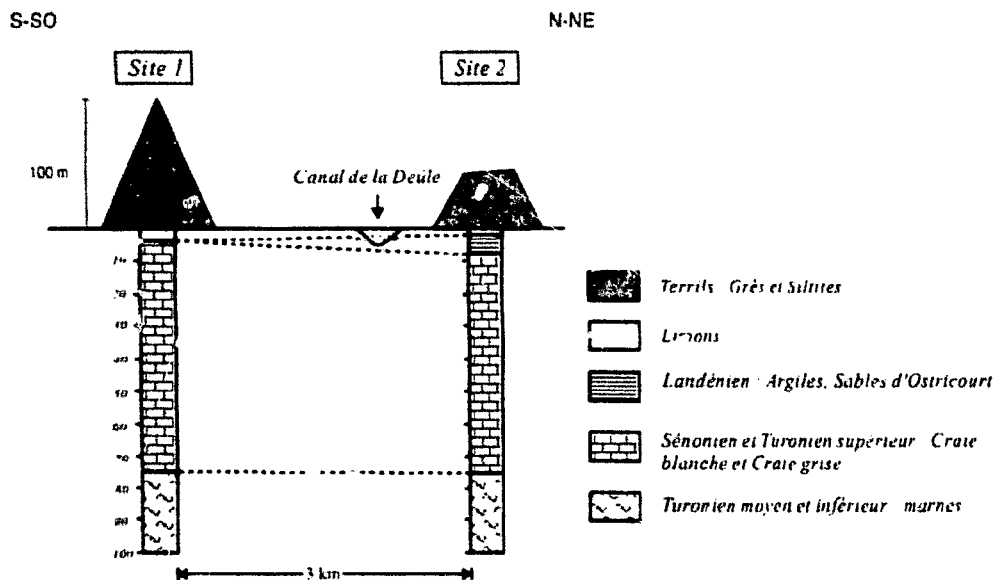
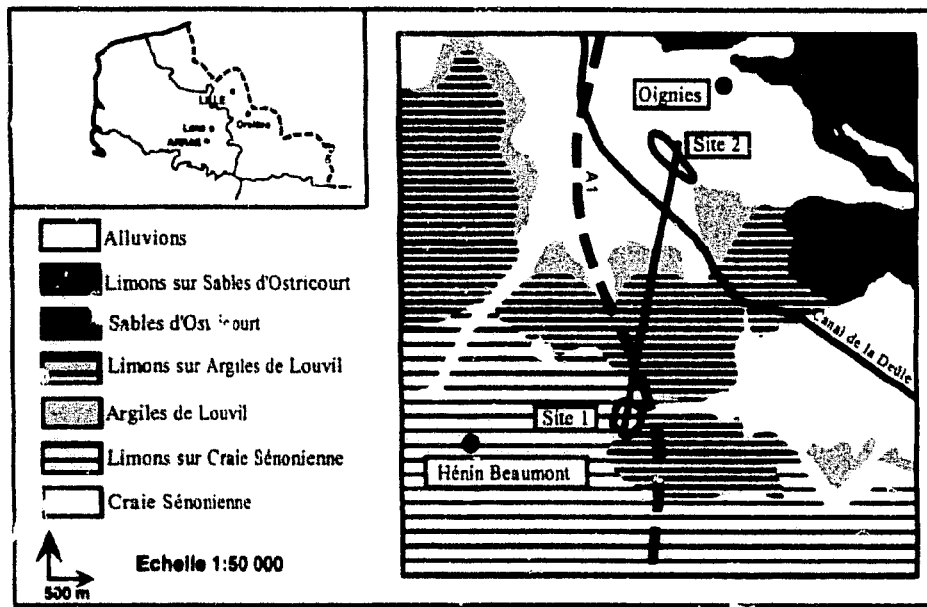


Fig. 2.10 : Contexte géologique des sites étudiés



### 3 - Contexte hydrogéologique

Plusieurs aquifères peuvent être distingués dans le bassin minier du Nord-Pas-de-Calais (Mania, 1978 ; Bernard, 1979 ; Droz, 1985 ; Carlier, 1989 ; Duchesne, 1999), le plus important correspond à la nappe de la Craie.

#### 3.1 - Les différents aquifères

- Les alluvions peuvent être aquifères lorsqu'elles sont limitées à la base par un niveau imperméable. Cette nappe qui n'est pas recouverte d'une couverture argileuse imperméable est très vulnérable aux pollutions.
- La nappe des sables tertiaires : les Sables d'Ostricourt contiennent une nappe libre, perchée, limitée à la base par la formation des Argiles de Louvil. Les prélèvements y sont limités de par la faible perméabilité de ces sables qui présentent une granulométrie fine et des passées argileuses (Mania, 1971). Plus au nord, cette nappe devient captive sous les argiles yprésiennes (argiles d'Orchies). D'après Bernard (1979) et Droz (1985), il peut exister en certains endroits des intercommunications entre la nappe tertiaire et la nappe de la Craie en raison des variations de faciès du substratum argileux. En domaine libre, la nappe des Sables d'Ostricourt est vulnérable aux pollutions de surface et sa mise en captivité entre les argiles yprésiennes et le complexe de base landénien (riches en gypse) ainsi que la présence de gypse (d'origine supergène) explique la présence d'eaux riches en sulfates (Droz, 1985).
- La nappe de la Craie : cette nappe est limitée à la base par les marnes imperméables (« Dièves »). Son écoulement se fait du SO vers le NE (Bernard, 1979). Elle représente le réservoir d'eaux souterraines le plus important du Nord de la France et étant donné l'importance de cet aquifère dans l'étude présentée, ses caractéristiques seront développées en détail dans le paragraphe suivant.
- Les alternances marno-craieuses du Turonien moyen, considérées comme la base de la nappe de la Craie, peuvent être aquifères dans les secteurs où il n'y a pratiquement pas de craie aquifère. La perméabilité de ces bancs étant faible, elle ne permet pas l'obtention de débits importants (Droz, 1985).
- Il peut exister dans les formations du Cénomaniens, de l'Albien et du Wealdien des réservoirs de faible extension. L'eau rencontrée dans le Wealdien est fortement minéralisée notamment en sulfate (phénomène d'oxydation de la pyrite, abondante dans cette formation) (Waterlot, 1960b). Ces poches d'eau semblent présenter un très faible renouvellement (Bernard, 1998).
- Le Houiller : les mineurs ont fait état de venues assez rares et brutales d'eaux fortement minéralisées dans les terrains houillers (Bernard, 1998). Des analyses d'eaux réalisées par Waterlot ont montré qu'il

existait beaucoup de chlorures mais peu de sulfates et de bicarbonate dans les eaux du Houiller (Waterlot, 1960a, Waterlot, 1960b). Le même auteur explique l'absence de sulfate soit par des processus de précipitation, soit par des processus de réduction.

- La nappe du calcaire Carbonifère : Les Calcaires carbonifères sont uniquement productifs dans le secteur nord de Valenciennes (Saint-Amand). D'après Droz (1985), les eaux sur-sulfatées des Calcaires carbonifères (en raison de la dissolution des évaporites dinantiennes) pourraient, dans cette zone, remonter vers les eaux de la nappe de la Craie (drainance *per ascensum*). Ces eaux pourraient également au cours de leur ascension se minéraliser en entrant en contact avec les terrains houillers (production de sulfates par oxydation des sulfures contenus dans les schistes houillers).

### 3.2 - La nappe de la Craie

Par leur manque de productivité et/ou les caractéristiques chimiques de leurs eaux, les aquifères profonds et celui des Sables d'Ostricourt ne participent pas ou peu à l'établissement d'une réserve pour l'Alimentation en Eau Potable (A.E.P.). Seule la nappe de la Craie joue ce rôle. Elle constitue en effet la quasi-totalité de la ressource en eau potable du bassin minier et du Nord-Pas-de-Calais (Bernard, 1998 ; Celet *et al.*, 1990 ; Duchesne, 1999).

La craie, composée de coccolithes est une formation carbonatée presque pure ( $\text{CaCO}_3=90$  à  $97$  %) où l'on retrouve cependant des traces de sulfure, les 3 à 10 % restants sont essentiellement composés d'argile et de quartz (Doremus, 1978). La craie constitue une formation très homogène dont la porosité totale (micro et macroporosité) est de l'ordre de 41-42 %. La microporosité, entièrement interconnectée, est de 40 %, la répartition du rayon équivalent des pores est uni-modale et centrée sur  $0,375 \mu\text{m}$ . La macroporosité (1 à 2%) est une porosité de fissure dont l'ouverture est de l'ordre du millimètre (Caulier, 1974 ; Vachier *et al.*, 1979).

L'aquifère de la Craie renferme une nappe libre ayant pour mur les Marnes du Turonien inférieur. Bien que la craie soit un aquifère puissant, la zone de circulation des eaux est limitée à la partie supérieure de cette formation (20 à 40 m).

Dans la partie nord de la zone d'étude, la nappe de la Craie devient semi-captive sous les recouvrements des Argiles de Louvil, horizon peu perméable. La nappe libre de la Craie est surmontée d'une zone non saturée plus ou moins importante (de 1 à 2 m dans les vallées jusqu'à 20 m sur les plateaux) (Bernard, 1998). En zone saturée, l'eau circulant, c'est-à-dire disponible au pompage, est localisée dans les réseaux de fissures (Price, 1997). Dans la zone non saturée la microporosité est à saturation, seule la porosité de fissure est non saturée. Cette dernière ne peut assurer un rôle de transit des solutés lors de phénomènes pluviométriques importants et par là même, permettre la recharge directe de la nappe. Hors ces conditions particulières, l'alimentation de la nappe de la Craie se fait par la percolation de l'impluvium au travers de la microporosité de la craie avec une vitesse d'infiltration de l'ordre de 0,5 à 0,7 m par an (Vachier *et al.*, 1987).

L'écoulement général des eaux de la nappe de la Craie est schématiquement sud-ouest / nord-est (Bernard, 1979), c'est-à-dire en direction du bassin d'Orchies dont l'exploitation intensive des eaux souterraines depuis un siècle a engendré une importante dépression piézométrique créant ainsi un bassin endoréique artificiel.

Dans le bassin minier, la productivité de la nappe de la Craie varie beaucoup dans l'espace (Fig. 2.11). Ainsi, l'eau circulant surtout dans les fissures de la craie, la nappe est peu productive sous les recouvrements tertiaires, dans le sous-sol des plateaux et en profondeur car la pression lithostatique opère une fermeture du réseau de fissure (Carlier, 1989). La craie est par contre plus productive dans les fonds de vallée et dans les zones couvertes de sable tertiaire car le sous-sol y est très fissuré en profondeur (Carlier, 1989). La partie du sud du bassin minier, où la craie affleure, est en régime libre. La carte de répartition des transmissivités krigées ( $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s) présentée en Fig. 2.12 permet de représenter les zones de productivité de l'aquifère dans la zone étudiée (Couteau, 1995). On y observe que la zone présentant les transmissivités les plus faibles correspond à la zone de recouvrement tertiaire située au nord-est. On remarque tout de même que la majeure partie de la zone étudiée présente une bonne transmissivité, ce qui marque une recharge facile de la nappe. Dans ces zones de bonne transmissivité, la nappe est donc plus vulnérable, puisque les transferts de pollution vers la nappe peuvent se faire facilement.

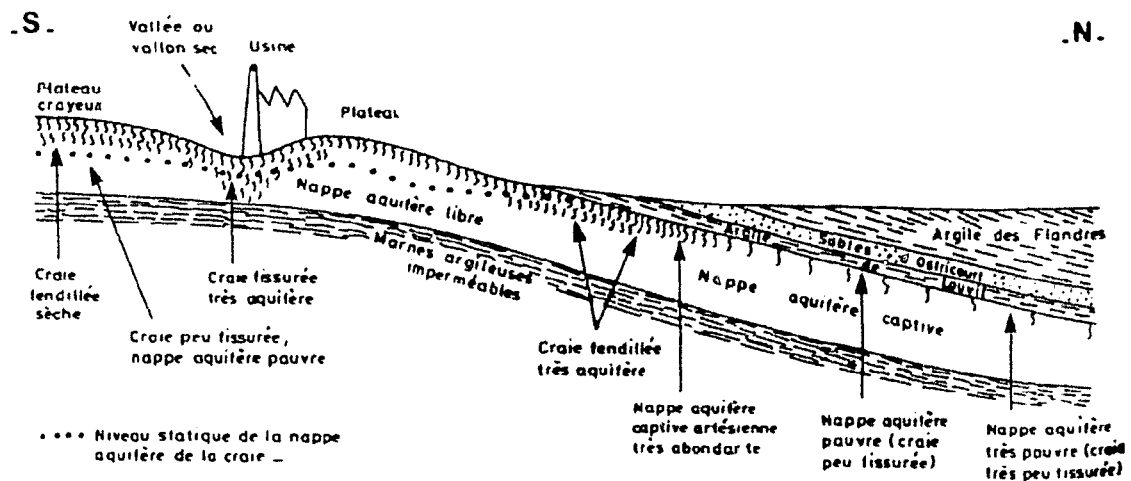


Fig. 2.11 Zones aquifères de la craie en régime libre et captif dans le bassin minier du Nord-Pas-de-Calais (Carlier, 1989).

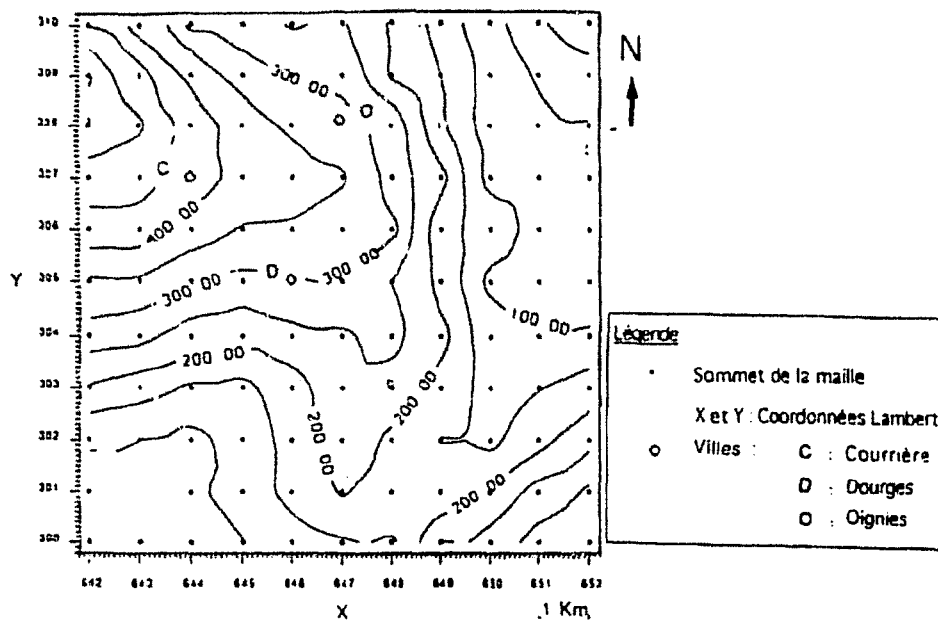


Fig. 2.12 : Répartition des transmissivités krigées ( $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) dans le secteur étudié (Couteau, 1995).

→ Caractéristiques chimiques de la nappe de la Craie : sulfates, métaux lourds, pH et  $T^\circ$

D'après Ferry (1992), la part des éléments en solution dans la nappe de la Craie se décompose comme suit : le bicarbonate de calcium représente 50 % de la charge minérale de l'eau de la nappe de la Craie, le sodium, le potassium, les sulfates et les chlorures représentent 25 %, la part restante est composée de silice colloïdale et d'une faible concentration de métaux en solution (fer, aluminium, zinc, cuivre et nickel).

La carte des teneurs en sulfate de la nappe de la Craie réalisée par Bernard (1979) (Fig. 2.13), montre que dans la région concernée par la présente étude (Lens-Oignies-Vitry-en-Artois), les teneurs en sulfates peuvent dépasser 100 mg/l (avec une valeur maximale de 269 mg/l). Ces teneurs sont globalement plus élevées que le fond géochimique de la nappe de la Craie qui d'après Beckelynck *et al.* (1981) peut être considéré comme étant égal à 30 mg/l. Ils remarquent également que la minéralisation comporte très peu de métaux lourds en solution en raison des valeurs de pH proches de la neutralité. Le pH de l'eau de la nappe de la Craie fluctue en effet le plus souvent entre 6,5 et 7. Le pH peut s'écarter notablement de ces valeurs lorsque des modifications chimiques importantes surviennent (pollution), ceci en raison de l'effet tampon de l'eau. La température des eaux de la nappe

de la Craie oscille autour de 11 °C, la proximité de la surface du sol ou encore une pollution bactériologique peuvent faire varier cette température (Bernard, 1979).

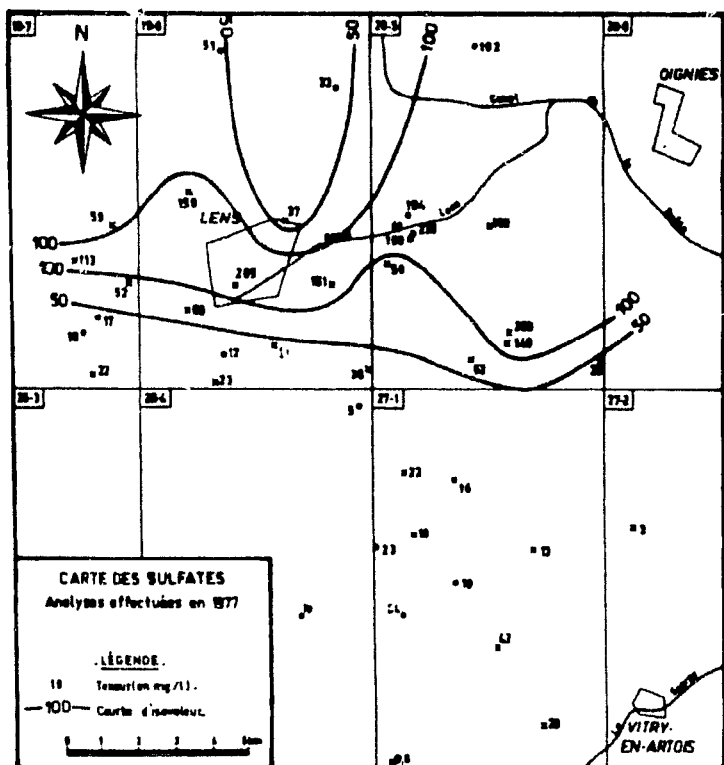


Fig 2.13 : Répartition des teneurs en sulfates dans le secteur Lens-Oignies-Vitry en Artois mesurées en 1977 (Bernard, 1979)

**CHAPITRE III :**  
**ALTERATION CHIMIQUE DES TERRILS ET**  
**TRANSFERT DE SULFATES VERS LA NAPPE DE LA**  
**CRAIE**



# 1 – Prélèvements, méthodes d'étude et résultats

## 1.1 - Prélèvements solides

### 1.1.1 - Terrils

Des échantillons de stériles ont été prélevés en surface et en profondeur sur les 2 sites. Ainsi, sur le site 1, un premier échantillonnage a permis de récolter les solides en surface le long de la pente ; la réalisation d'une fosse en pied de terril sur le flanc nord-ouest a également permis d'échantillonner jusqu'à 1,9 m avec un pas d'échantillonnage de 20 cm, puis des prélèvements à la tarière ont ensuite été réalisés dans la fosse jusqu'à 2,5 m de profondeur avec un pas d'échantillonnage de 10 cm (éch. SH280199D à Q). Un deuxième échantillonnage a permis de prélever les stériles tous les 5 cm dans le premier mètre (Tab. 3.1) (éch. SH311A à T). Sur le site 2, des prélèvements de surface ont été effectués et des solides ont pu être échantillonnés dans une ravine présente sur l'un des flancs du terril (photo. 3.1). Un premier échantillonnage a permis de prélever les stériles tous les cinquante centimètres jusque 12,5 m de profondeur (éch. 2904OIG5 à 29), puis un deuxième échantillonnage a eu lieu afin de récolter les stériles tous les 5 cm dans le premier mètre (Tab. 3.2a) (OIG311Z, OIG311A à T). Enfin, l'observation des fosses réalisées et des ravines a mis en évidence la présence en profondeur de tâches pulvérulentes, parfois noduleuses, de couleur jaune ocre qui ont également été échantillonnées (éch SH280199Jar1, OIGJar1 ; Tab.3.1 et 3.2b ; photo. 3.2). Ces échantillons ont fait l'objet de différentes analyses : détermination de la composition minéralogique par diffraction des rayons X sur roches totales et sur la fraction de taille inférieure à 2 $\mu$ m (argiles), teneurs en carbone total et soufre total, teneur en CaCO<sub>3</sub>, teneurs en éléments majeurs et en éléments traces. Ponctuellement, des échantillons ont fait l'objet d'observations au microscope électronique à balayage et d'analyses couplées à la micro-sonde. Des prélèvements de solides réalisés sur d'autres terrils (Rieulay, Divion et Fouquières) ont permis de mesurer le  $\delta^{34}\text{S}$  des sulfures présents dans les schistes houillers.

Des essais de lixiviation ont été réalisés sur des stériles du site 2 prélevés au lieu des dernières mises à terril (cf Fig. 2.6 : « derniers schistes noirs mis en dépôt ») au sud-est de la friche. Ces stériles ont également fait l'objet de diverses analyses récapitulées dans le tableau 3.2b (ST11ixi à ST51ixi).



Réf échantillon	Profondeur (cm)	Poudres	Argiles	C/S	CaCO <sub>3</sub>	chim.
SHA99	surface	1	1	1	1	0
SHB99	surface	1	1	1	1	0
SHB99C	surface	1	1	1	1	0
SHC99	surface	1	1	1	1	1
SHD99T	surface	1	1	1	1	0
SHE99	surface	1	0	1	1	0
SHF99BAS	surface	1	1	1	1	0
SH280199D	-10	1	1	1	1	1
SH280199E	-30	1	1	1	1	1
SH280199F	-50	1	1	1	1	1
SH280199G	-72	1	1	1	1	1
SH280199H	-90	1	1	1	1	1
SH280199I	-107	1	1	1	1	1
SH280199J	-126	1	1	1	1	1
SH280199K	-142	1	1	1	1	1
SH280199L	188	1	1	1	1	1
SH280199M	-200	1	1	1	1	1
SH280199N	-209	1	1	1	1	1
SH280199O	-219	1	1	1	1	1
SH280199P	-230	1	1	1	1	1
SH280199Q	-245	1	1	1	1	1
SH311A	-5	0	0	1	0	1
SH311B	-10	0	0	1	0	1
SH311C	-15	0	0	1	0	1
SH311D	-20	0	0	1	0	1
SH311E	-25	0	0	1	0	1
SH311F	-30	0	0	1	0	1
SH311G	35	0	0	1	0	1
SH311H	-40	0	0	1	0	1
SH311I	-45	0	0	1	0	1
SH311J	-50	0	0	1	0	1
SH311K	-55	0	0	1	0	1
SH311L	-60	0	0	1	0	1
SH311M	-65	0	0	1	0	1
SH311N	-70	0	0	1	0	1
SH311O	-75	0	0	1	0	1
SH311P	-80	0	0	1	0	1
SH311Q	85	0	0	1	0	1
SH311R	90	0	0	1	0	1
SH311S	95	0	0	1	0	1
SH311T	-100	0	0	1	0	1

Réf échantillon	Remarques	Poudres	Argiles	C/S	CaCO <sub>3</sub>	chimie
SH280199Jar1	couleur ocre jaune	1	1	0	0	0

Tab.3.1 : Nom des échantillons, profondeur du prélèvement (en cm) et analyses menées pour le site 1.  
(1 : analyse réalisée ; 0 : pas d'analyse)

Ref. échantillon	Profondeur (cm) / Remarques	Poudres	Argiles	C/S	CaCO <sub>3</sub>	chimie
OIGA99	surface	1	1	1	0	0
OIGB99T	surface	1	1	1	1	1
OIGC99	surface	1	0	1	1	0
OIGD99	surface	1	1	1	1	0
OIGE99	surface	1	1	1	1	0
OIG311Z	surface	0	0	1	0	1
2904OIG5	-20	1	0	1	1	1
2904OIG6	-100	1	0	1	1	1
2904OIG7	-150	1	0	1	1	0
2904OIG8	-200	1	0	1	1	1
2904OIG9	-250	1	0	1	1	0
2904OIG10	-300	1	0	1	1	1
2904OIG11	-350	1	0	1	1	0
2904OIG12	-400	1	0	1	1	1
2904OIG13	-450	1	0	1	1	0
2904OIG14	-500	1	0	1	1	1
2904OIG15	-550	1	0	1	1	0
2904OIG16	-600	1	0	1	1	1
2904OIG17	-650	1	0	1	1	0
2904OIG18	-700	1	0	1	1	1
2904OIG19	-750	1	0	1	1	0
2904OIG20	-800	1	0	1	1	1
2904OIG21	-850	1	0	1	1	0
2904OIG22	-900	1	0	1	1	1
2904OIG23	-950	1	0	1	1	0
2904OIG24	-1000	1	0	1	1	1
2904OIG25	-1050	1	0	1	1	0
2904OIG26	-1100	1	0	1	1	1
2904OIG27	-1150	1	0	1	1	0
2904OIG28	-1200	1	0	1	1	1
2904OIG29	-1250	1	0	1	1	0
OIG311A	-5	0	0	1	0	1
OIG311B	-10	0	0	1	0	1
OIG311C	-15	0	0	1	0	1
OIG311D	-20	0	0	1	0	1
OIG311E	-25	0	0	1	0	1
OIG311F	-30	0	0	1	0	1
OIG311G	-35	0	0	1	0	1
OIG311H	-40	0	0	1	0	1
OIG311I	-45	0	0	1	0	1
OIG311J	-50	0	0	1	0	1
OIG311K	-55	0	0	1	0	1
OIG311L	-60	0	0	1	0	1
OIG311M	-65	0	0	1	0	1
OIG311N	-70	0	0	1	0	1
OIG311O	-75	0	0	1	0	1
OIG311P	-80	0	0	1	0	1
OIG311Q	-85	0	0	1	0	1
OIG311R	-90	0	0	1	0	1
OIG311S	-95	0	0	1	0	1
OIG311T	-100	0	0	1	0	1

Tab.3.2a : Nom des échantillons, profondeur du prélèvement (en cm) et analyses menées pour le site 2.

Ref. échantillon	Remarques	Poudres	Argiles	C/S	CaCO <sub>3</sub>	chimie
OIGJar1	couleur ocre jaune	1	0	0	0	0
ST1lix	essais lixiviation	1	0	1	1	0
ST2lix	essais lixiviation	1	0	1	1	0
ST3lix	essais lixiviation	1	0	1	1	0
ST4lix	essais lixiviation	0	0	0	0	1
ST5lix	essais lixiviation	0	0	0	0	1

Tab.3.2b : Analyses menées sur les échantillons tests représentatifs des derniers schistes houillers mis à terreil (site 2) sur lesquels ont été réalisés différents essais de lixiviation ainsi que sur l'échantillon particulier de couleur jaune ocre OIGJar 1



Photo. 3.1 : Ravine échantillonnée sur le site 2.



Photo. 3.2 : Taches de couleur jaune-ocre

### 1.1.2 - Bassins de décantation

L'un des bassins de décantation présent sur le site 2 (Bassin C ; Fig. 2.6) a été échantillonné à la tarière jusque 2 m (pas d'échantillonnage : 10 cm) (OIGBD1 à 22). Ces échantillons ont fait l'objet d'analyses minéralogiques, d'analyses des teneurs en soufre et en carbone total, des teneurs en CaCO<sub>3</sub>,

ainsi que des teneurs en éléments majeurs et en éléments traces. Ces analyses ont également été réalisées sur un échantillon prélevé en surface dans le bassin E. du site 2 (OIGF99T) (Tab. 3.3a).

Tout comme pour les stériles, des échantillons de bassin de décantation ont été prélevés dans le bassin B du site 2 dans le but de réaliser des essais de lixiviation. Ces échantillons ont subi diverses analyses récapitulées dans le tableau 3.3b (BD1lix à BD5lix).

Réf échantillon	Profondeur (cm)	Poudres	Argiles	C/S	CaCO <sub>3</sub>	chimie
OIGF99T	surface	1	1	1	0	1
OIGBD1	surface	1	0	1	1	1
OIGBD2	-10	0	0	1	0	1
OIGBD3	-20	1	0	1	1	1
OIGBD4	-30	0	0	1	0	1
OIGBD5	-40	1	0	1	1	1
OIGBD6	-50	0	0	1	0	1
OIGBD7	-60	1	0	1	1	1
OIGBD8	-70	0	0	1	0	1
OIGBD9	-80	1	0	1	1	1
OIGBD10	-90	0	0	1	0	1
OIGBD11	-100	1	0	1	1	1
OIGBD12	-110	0	0	1	0	1
OIGBD13	-115	1	0	1	1	1
OIGBD14	-125	0	0	1	0	1
OIGBD15	-130	1	0	1	1	1
OIGBD16	-140	0	0	1	0	1
OIGBD17	-150	1	0	1	1	1
OIGBD18	-160	0	0	1	0	1
OIGBD19	-170	1	0	1	1	1
OIGBD20	-180	0	0	1	0	1
OIGBD21	-190	1	0	1	0	1
OIGBD22	-200	0	0	1	0	1

Tab.3.3a : Nom des échantillons, profondeur du prélèvement (en cm) et analyses menées pour les bassins de décantation du site 2.

Réf échantillon	Remarques	Poudres	Argiles	C/S	CaCO <sub>3</sub>	chimie
BD1lix	essais lixiviation	1	0	1	1	0
BD2lix	essais lixiviation	1	0	1	1	0
BD3lix	essais lixiviation	1	0	1	1	0
BD4lix	essais lixiviation	0	0	0	0	1
BD5lix	essais lixiviation	0	0	0	0	1

Tab.3.3b : Analyses menées sur les échantillons tests représentatifs des résidus du bassin de décantation B (site 2) sur lesquels ont été réalisés différents essais de lixiviation.

## 1.2 – Résultats des analyses menées sur la fraction solide

### 1.2.1 - Analyses minéralogiques (roche totale et argiles)

Les analyses minéralogiques par diffraction des rayons X ont été menées selon la méthode décrite par Holtzapffel (1985) et Moore et Reynolds (1989) (Annexe 1).

- Poudres sur roches totales : l'assemblage minéralogique de la plupart des échantillons, prélevés en surface et en profondeur, est caractérisé par la présence constante de quartz, de mica, de minéraux argileux et la présence occasionnelle et nettement moins marquée de sidérite (Tab.3.4 et 3.5 ; Fig. 3.1 et 3.2). L'échantillon SHB99C prélevé en surface sur le site 1 montre, en plus de ces minéraux, la présence de dolomite et d'ankérite (Fig. 3.3). L'analyse par diffraction des rayons X des taches pulvérulentes jaune-ocre prélevées en profondeur sur les sites 1 et 2 a permis de montrer la présence de jarosite et de natrojarosite au sein des terrils étudiés (Fig. 3.4).

Les échantillons prélevés dans le bassin de décantation B du site 2 (Tab. 3.6) montrent, en plus de l'assemblage typique, la présence régulière de calcite et de sidérite (Fig. 3.5).

- Argiles : le cortège argileux est constitué d'illite dominante (50-75 %), de chlorite et de kaolinite. La répartition de ces espèces minérales est très homogène pour l'ensemble des échantillons. Seul l'échantillon OIGF99T (bassin de décantation B du site 2), montre une proportion de kaolinite plus marquée (35%) (Tab. 3.4, 3.5 et 3.6).

Réf. échantillon	Profondeur cm	Poudres sur roche totale	fraction < 2µm		
			Illite %	Chlorite %	Kaolinite %
SHA99	surface	Qz / Musc / Arg / Sid	60	20	20
SHB99	surface	Qz / Musc / Arg / Sid ?	60	15	25
SHB99C	surface	Qz / Musc / Arg / Dol / Ank	60	20	20
SHC99	surface	Qz / Musc / Arg	60	15	25
SHD99T	surface	Qz / Musc / Arg / Sid ?	55	20	25
SHE99	surface	Qz / Musc / Arg			
SHF99BAS	surface	Qz / Musc / Arg	55	25	20
SH280199D	-10	Qz / Musc / Arg / Ank	55	25	20
SH280199E	-30	Qz / Musc / Arg / Sid	55	30	15
SH280199F	-50	Qz / Musc / Arg / Sid ?	60	25	15
SH280199G	-72	Qz / Musc / Arg	50	30	20
SH280199H	-90	Qz / Musc / Arg / Sid ?	55	25	20
SH280199I	-107	Qz / Musc / Arg	50	30	20
SH280199J	-126	Qz / Musc / Arg	50	30	20
SH280199K	-142	Qz / Musc / Arg / Sid ?	55	30	15
SH280199L	-188	Qz / Musc / Arg	40	40	20
SH280199M	-200	Qz / Musc / Arg	45	35	20
SH280199N	-209	Qz / Musc / Arg	55	25	20
SH280199O	-219	Qz / Musc / Arg / Sid ?	50	30	20
SH280199P	-230	Qz / Musc / Arg	55	25	20
SH280199Q	-245	Qz / Musc / Arg	50	30	20
Réf. échantillon		Poudres sur roche totale			
SH280199Jar1		Qz / Musc / Arg / Pyr / Jar			

Tab. 3.4 : Analyses minéralogiques menées sur les solides prélevés sur le site 1 (Qz = Quartz ; Musc = Muscovite ; Arg = Argiles ; Sid = Sidérite ; Dol = Dolomite ; Ank = Ankérite ; Jar = Jarosite ; Pyr = Pyrite)

Réf. échantillon	Profondeur cm	Poudres sur roche totale	fraction < 2µm		
			Illite %	Chlorite %	Kaolinite %
OIGA99	surface	Qz / Musc / Arg / Sid ?	70	15	15
OIGB99T	surface	Qz / Musc / Arg / Sid ?	75	15	10
OIGC99	surface	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
OIGD99	surface	Qz / Musc / Arg	70	20	10
OIGE99	surface	Qz / Musc / Arg	65	20	15
2904OIG5	-20	Qz / Musc / Arg			
2904OIG6	-100	Qz / Musc / Arg / Sid			
2904OIG7	-150	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG8	-200	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG9	-250	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG10	-300	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG11	-350	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG12	-400	Qz / Musc / Arg			
2904OIG13	-450	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG14	-500	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG15	-550	Qz / Musc / Arg / Sid			
2904OIG16	-600	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG17	-650	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG18	-700	Qz / Musc / Arg			
2904OIG19	-750	Qz / Musc / Arg			
2904OIG20	-800	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG21	-850	Qz / Musc / Arg			
2904OIG22	-900	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG23	-950	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG24	-1000	Qz / Musc / Arg			
2904OIG25	-1050	Qz / Musc / Arg /			
2904OIG26	-1100	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG27	-1150	Qz / Musc / Arg / Sid ?			
2904OIG28	-1200	Qz / Musc / Arg / Sid			
2904OIG29	-1250	Qz / Musc / Arg / Sid			

Ref. échantillon	Remarques	Poudres sur roche totale
OIGJar1		Qz / Jar / Natrojar
ST1lix	essais lixiviation	Qz / Musc / Arg / Sid ?
ST2lix	essais lixiviation	Qz / Musc / Arg
ST3lix	essais lixiviation	Qz / Musc / Arg / Sid

Tab. 3.5 : Analyses minéralogiques menées sur les solides prélevés sur le site 2 (Qz = Quartz ; Musc = Muscovite ; Arg = Argiles ; Cal = Calcite, Sid = Siderite, Dol = Dolomite ; Ank = Ankérite, Jar = Jarosite, Natrojar = Natrojarosite)

Réf. échantillon	Profondeur cm	Poudres sur roche totale	fraction < 2µm		
			Illite %	Chlorite %	Kaolinite %
OIGF99T	surface	Qz / Musc / Arg / Cal	50	15	35
OIGBD1	surface	Qz / Musc / Arg / Cal / Sid ?			
OIGBD3	-20	Qz / Musc / Arg / Cal			
OIGBD5	-40	Qz / Musc / Arg / Cal			
OIGBD7	-60	Qz / Musc / Arg / Cal / Sid ?			
OIGBD9	-80	Qz / Musc / Arg / Sid			
OIGBD11	-100	Qz / Musc / Arg / Cal / Sid			
OIGBD13	-115	Qz / Musc / Arg / Cal / Sid			
OIGBD15	-130	Qz / Musc / Arg / Cal ? / Sid			
OIGBD17	-150	Qz / Musc / Arg / Cal / Sid			
OIGBD19	-170	Qz / Musc / Arg / Cal / Sid			
OIGBD21	-190	Qz / Musc / Arg / Cal / Sid			

Réf. échantillon	Remarques	Poudres sur roche totale
BD1lix1	essais lixiviation	Qz / Musc / Arg / Cal / Sid
BD2lix1	essais lixiviation	Qz / Musc / Arg / Cal / Pyr
BD3lix1	essais lixiviation	Qz / Musc / Arg / Cal / Sid ?

Tab. 3 6 : Analyses minéralogiques menées sur les solides prélevés sur le site 2 (Qz = Quartz ; Musc = Muscovite ; Arg = Argiles ; Cal = Calcite ; Sid = Sidérite ; Pyr = Pyrite)

cps-0.5

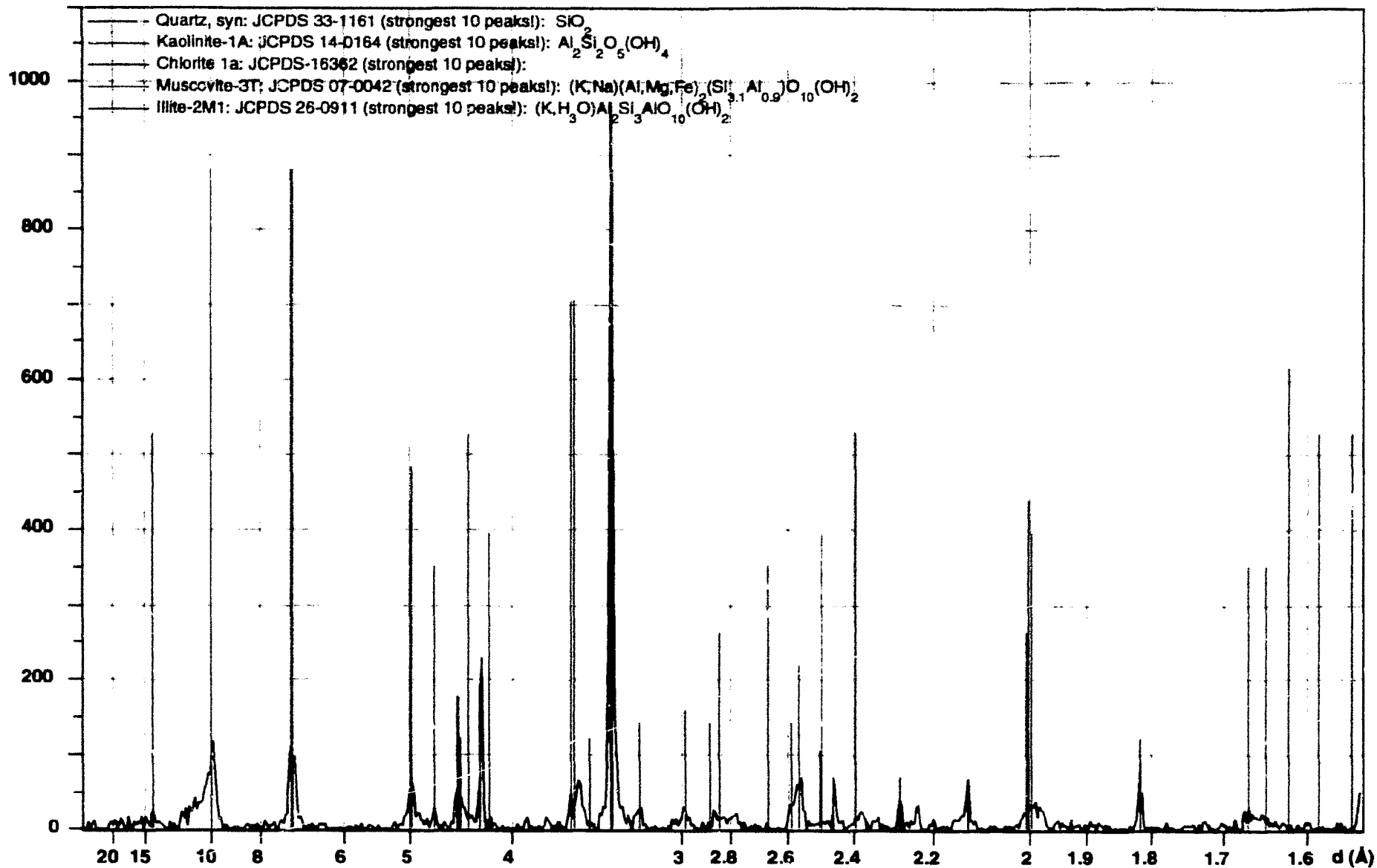


Fig. 3.1 : Analyse diffractométrique de l'échantillon SHE99.



cps-0.5

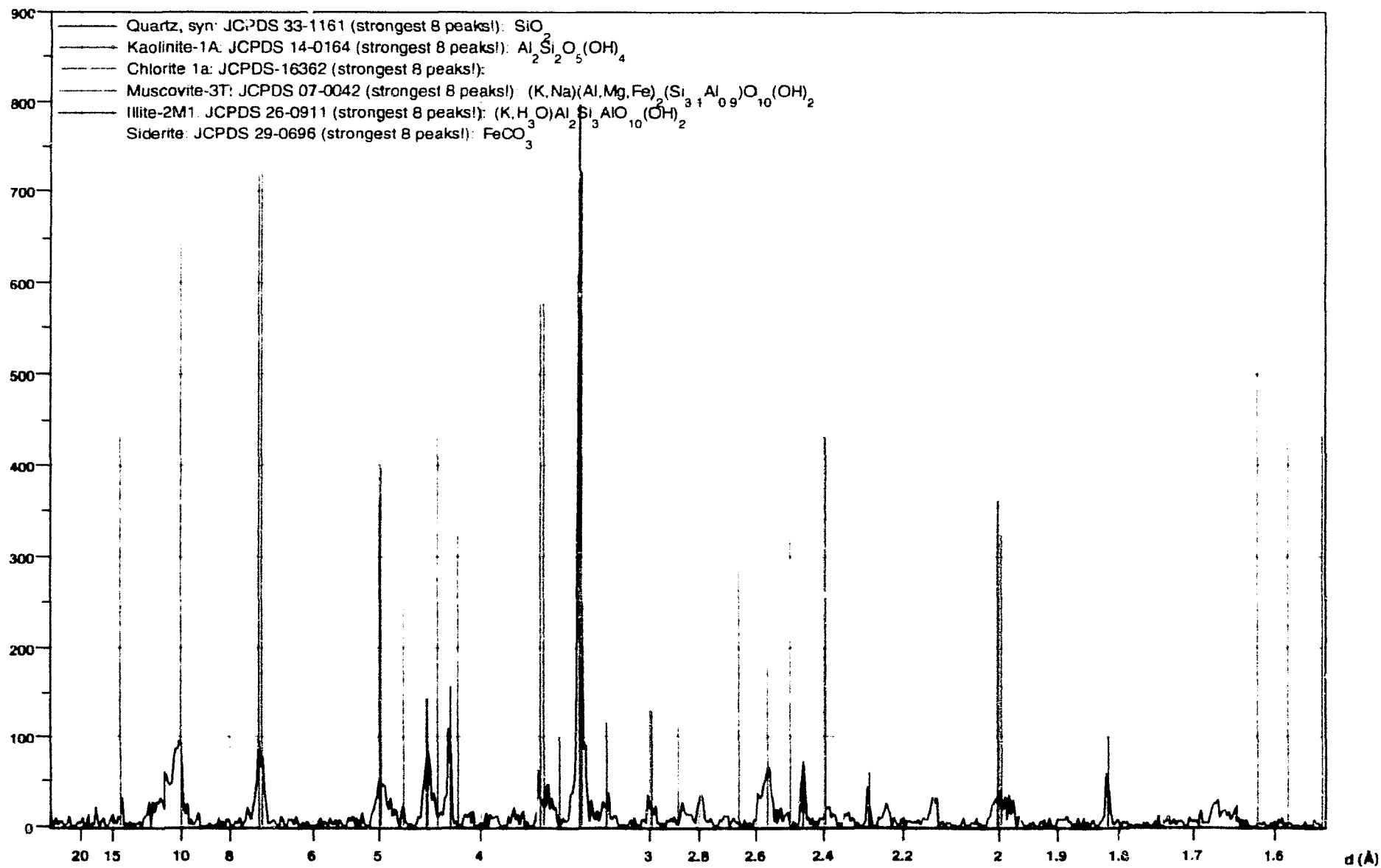


Fig 3.2 Analyse diffractométrique de l'échantillon 290401G15.

cps-0.5

shb99c

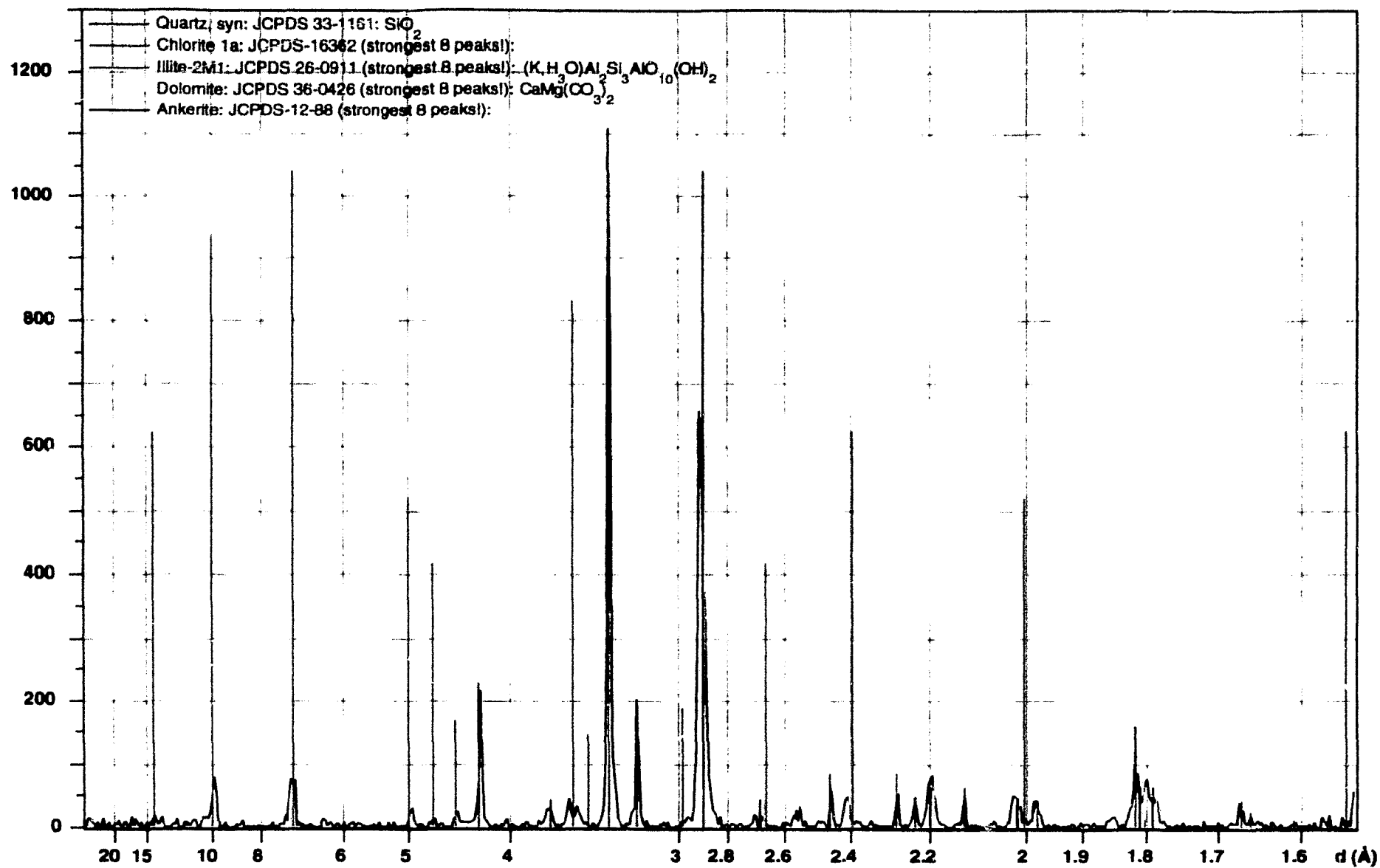
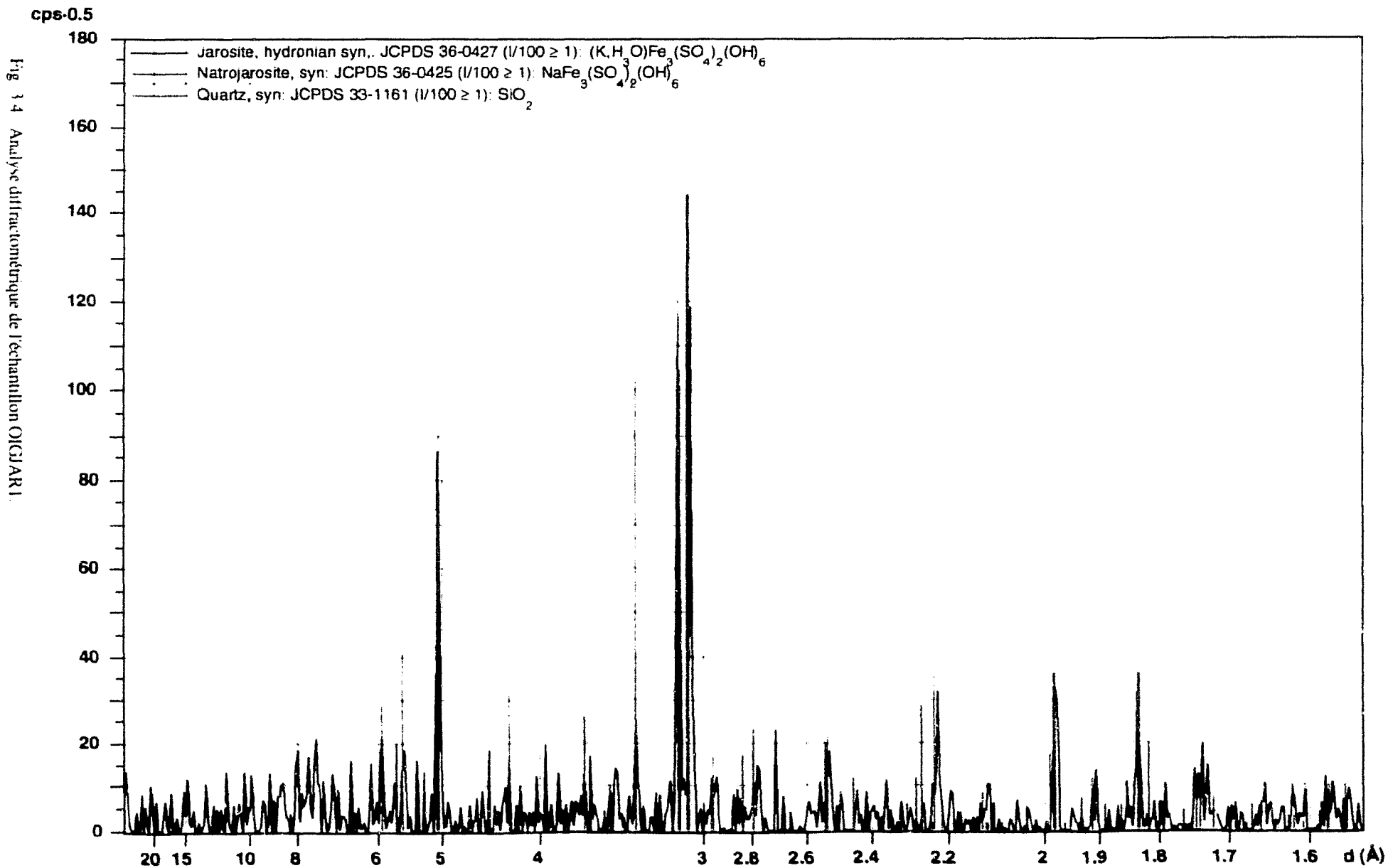


Fig. 3.3 : Analyse diffractométrique de l'échantillon SHB99C.



cps-0.5

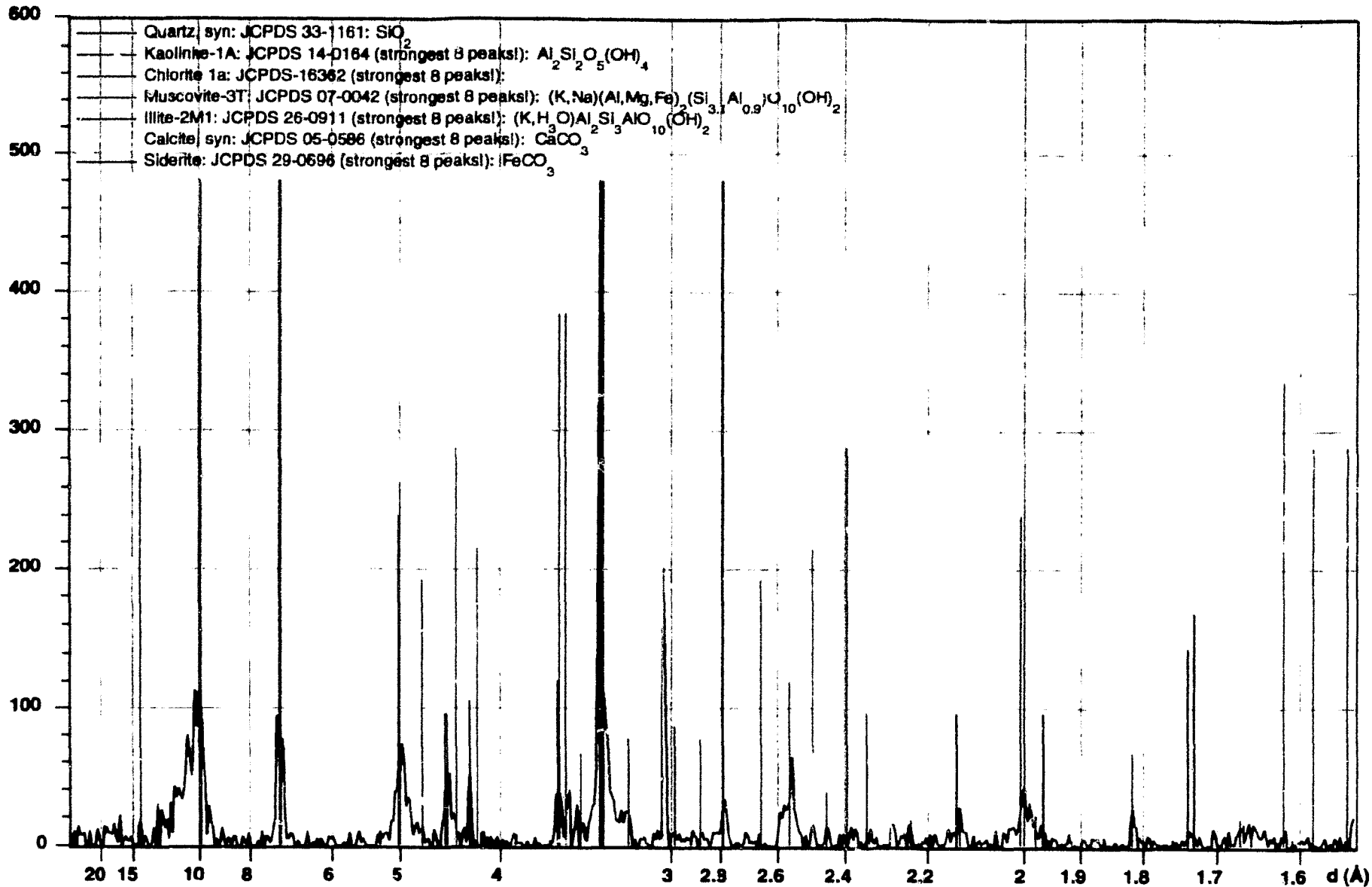


Fig. 3.5 : Analyse diffractométrique de l'échantillon OIGBD13.

## 1.2.2 MEB et micro-sonde

Les observations menées par microscopie électronique à balayage (MEB) ainsi que les analyses faites à la micro-sonde par dispersion d'énergie (EDS) sur les tâches pulvérulentes jaune-ocre prélevées sur le site 2 (correspondant à la poudre sur roche totale OIGJar1) montrent la présence de produits d'oxydation de sulfure de fer mais il n'a pas été possible d'en déterminer précisément la formule structurale en raison d'un bruit de fond trop important et de la petite taille des cristaux observés qui ne permettaient pas d'analyser un minéral en particulier mais plutôt une plage de minéraux (Fig. 3.6 et 3.7).

Des précipités blancs recouvrant périodiquement en plaques les stériles houillers (photo. 3.2 notamment sur les parois des ravines et autour des mares temporaires, ont été échantillonnés sur les deux sites. L'interprétation des poudres réalisées sur ces échantillons s'est avérée impossible en raison de l'importance du bruit de fond. L'analyse au MEB-EDS de ces efflorescences a cependant montré la présence de sulfate de sodium (Fig. 3.8) ; Aglave (2000) avait également mis en évidence sur le même type d'échantillons la configuration en « fer de lance » typique des cristaux de gypse qui témoignent d'un milieu saturé en sulfates.

L'utilisation du MEB et de la sonde a également permis de mettre en évidence la présence d'oxydes de fer ou de magnésium, recouvrant des échantillons de stérile houiller prélevés sur le site 2 (Fig. 3.9 et 3.10).

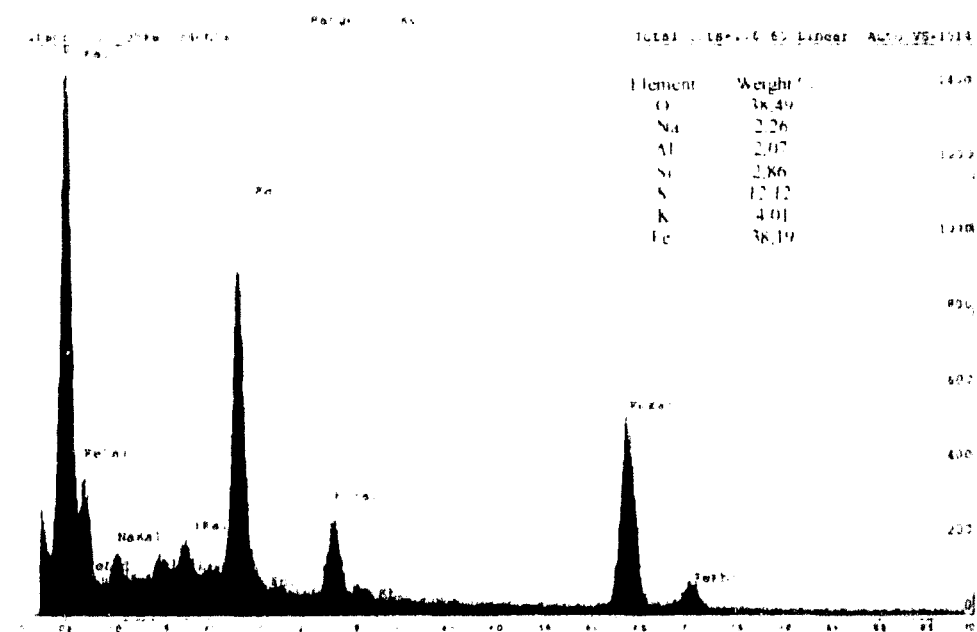


Fig. 3.6 Analyse à la sonde EDS des tâches pulvérulentes jaune-ocre

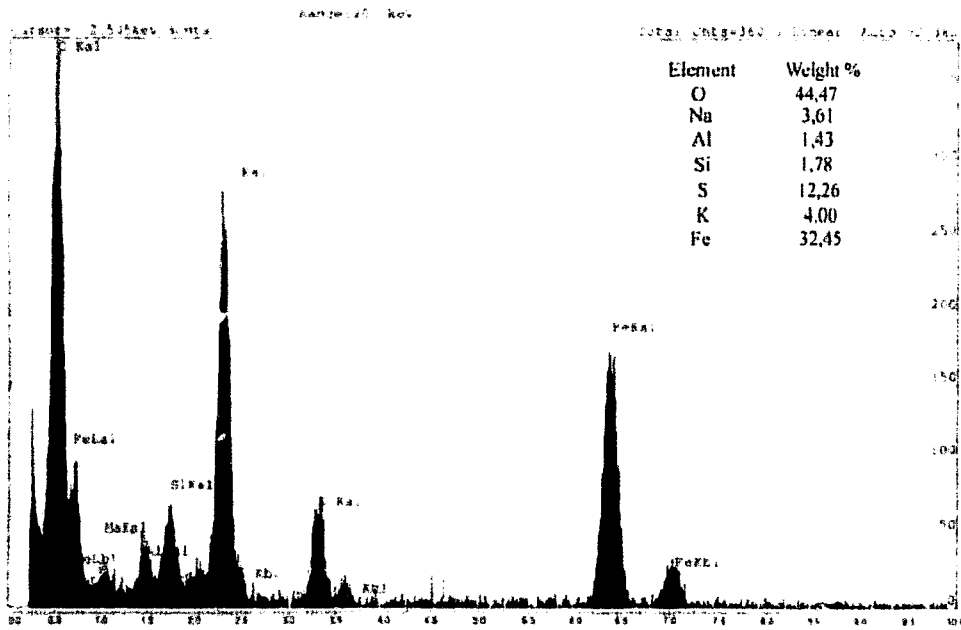


Fig. 3.7 : Analyse à la sonde EDS des taches pulvérulentes jaune-ocre.

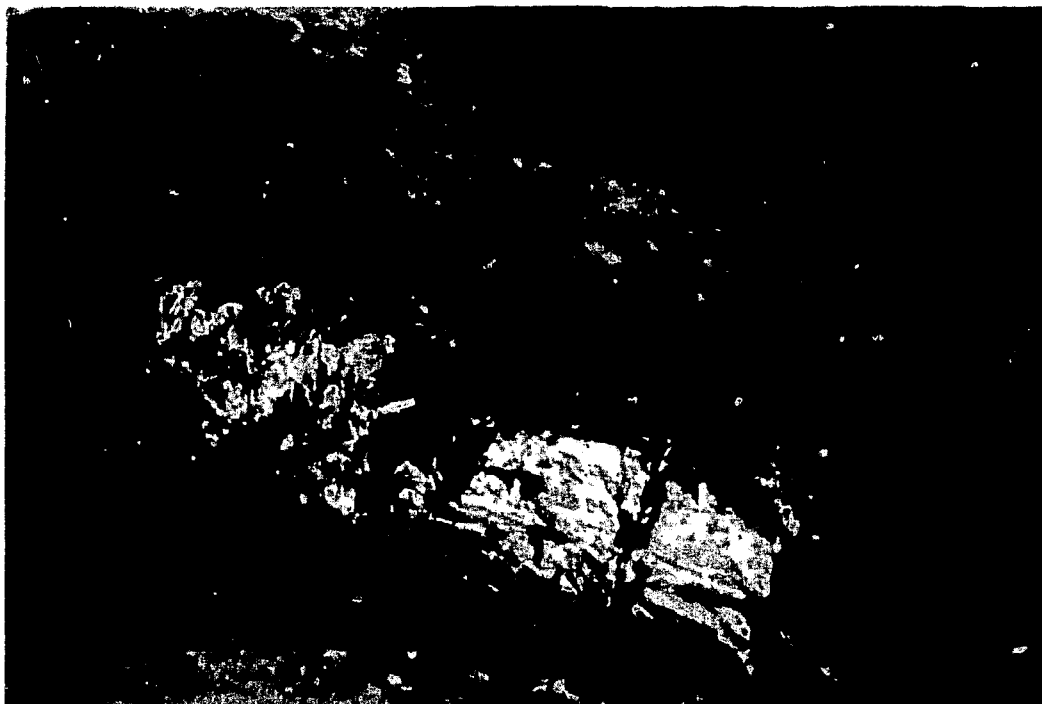


Photo. 3.3 : Précipités blancs recouvrant en plaques certaines zones des terrils.

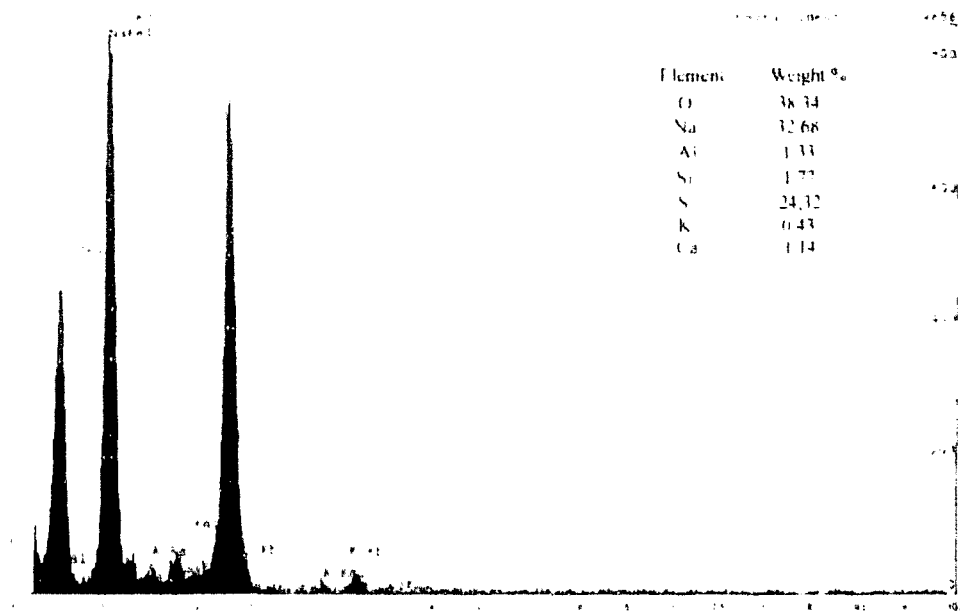


Fig. 3.8 : Analyse à la sonde EDS des efflorescences blanchâtres

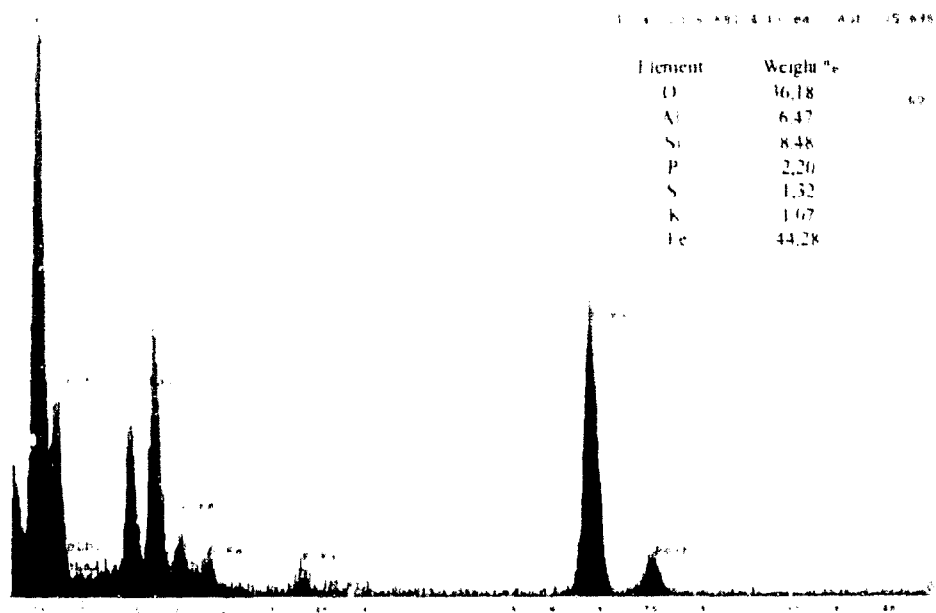


Fig. 3.9 : Analyse à la sonde EDS sur des stériles houillers montrant la présence d'oxydes de fer.

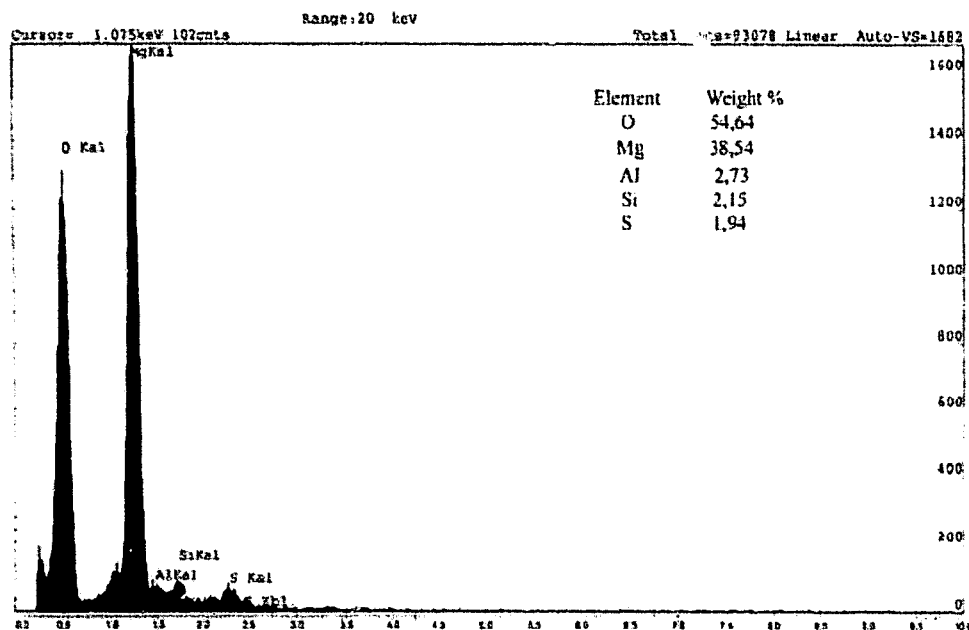


Fig. 3.10 : Analyse à la sonde EDS sur des stériles houillers montrant la présence d'oxydes de magnésium.

### 1.2.3 - Teneurs en soufre et carbone

L'analyse élémentaire du carbone et du soufre total de la phase solide a été réalisée à l'aide d'un analyseur Carbone-Soufre CS 125 LECO (Annexe 1).

#### *Terrils*

Les échantillons prélevés en sub-surface et en profondeur sur les sites sont caractérisés par des valeurs de carbone et soufre total globalement plus élevées que celles des échantillons de surface :

- Sur le site 1 (Tab.3.7) : les échantillons de surface présentent des teneurs en carbone total s'échelonnant entre 2,2 et 10,7 % et des teneurs en soufre total allant de 0 à 0,2 % et les échantillons prélevés en profondeur (de 5 cm à 2,45 m) des teneurs en carbone total de 14,4 à 23,6 % et comprises entre 0,1 et 1,6 % (moyenne : 0,3 %) pour le soufre total.
- Sur le site 2 (Tab.3.8) : les échantillons de surface présentent des teneurs en carbone total s'échelonnant entre 6,5 et 12,9 % et des teneurs en soufre total proches de 0,1 % et les échantillons prélevés en profondeur (de 5 cm à 12,5 m) des teneurs en carbone total de 4,7 à 20,8 % et comprises entre 0,1 et 0,6 % pour le soufre total.



Il est important de noter que l'on observe, pour les deux sites étudiés, une teneur plus importante en carbone et en soufre total des échantillons prélevés en profondeur par rapport aux échantillons prélevés en surface mais que passé les premiers centimètres, on n'observe pas de gradation des teneurs avec la profondeur.

Ref. échantillon	Profondeur (cm)	Carbone total (%)	Soufre total (%)
SHA99	surface	8,1	0,1
SHB99	surface	6,4	0,1
SHB99C	surface	6,0	0,0
SHC99	surface	10,7	0,2
SHD99T	surface	8,6	0,1
SHE99	surface	3,4	0,1
SHF99BAS	surface	2,2	0,1
SH280199D	-10	23,6	0,2
SH280199E	-30	20,4	0,2
SH280199F	-50	15,3	0,4
SH280199G	-72	19,6	0,2
SH280199H	-90	17,5	0,3
SH280199I	-107	17,4	0,2
SH280199J	-126	21,6	0,3
SH280199K	-142	18,1	0,3
SH280199L	-188	18,7	0,2
SH280199M	-200	16,2	0,2
SH280199N	-209	15,2	0,2
SH280199O	-219	15,7	0,3
SH280199P	-230	16,4	0,3
SH280199Q	-245	19,5	0,2
SH311A	-5	20,1	0,2
SH311B	-10	20,3	0,2
SH311C	-15	15,7	0,2
SH311D	-20	22,3	0,3
SH311E	-25	18,6	0,2
SH311F	-30	16,4	0,3
SH311G	-35	15,8	0,2
SH311H	-40	18,7	0,3
SH311I	-45	17,8	0,3
SH311J	-50	18,2	0,3
SH311K	-55	16,5	0,1
SH311L	-60	17,3	0,4
SH311M	-65	16,6	1,6
SH311N	-70	16,2	0,8
SH311O	-75	18,7	0,3
SH311P	-80	20,8	0,5
SH311Q	-85	20,2	0,4
SH311R	-90	19,9	0,4
SH311S	-95	14,4	0,3
SH311T	-100	19,8	0,5

Tab. 3.7 : Teneurs en carbone et en soufre total (%) des échantillons prélevés sur le site 1.

Ref. échantillon	Profondeur (cm)	Carbone total (%)	Soufre total (%)
OIGA99	surface	7,4	0,1
OIGB99T	surface	7,0	0,1
OIGC99	surface	6,5	0,1
OIGD99	surface	12,1	0,1
OIGE99	surface	12,9	0,1
OIG311Z	surface	12,0	0,2
2904OIG5	-20	12,7	0,2
2904OIG6	-100	11,0	0,4
2904OIG7	-150	11,9	0,2
2904OIG8	-200	14,4	0,3
2904OIG9	-250	14,4	0,2
2904OIG10	-300	18,1	0,3
2904OIG11	-350	14,3	0,2
2904OIG12	-400	11,3	0,1
2904OIG13	-450	13,0	0,1
2904OIG14	-500	13,9	0,2
2904OIG15	-550	20,8	0,2
2904OIG16	-600	13,1	0,2
2904OIG17	-650	9,7	0,1
2904OIG18	-700	12,8	0,1
2904OIG19	-750	7,9	0,1
2904OIG20	-800	11,7	0,2
2904OIG21	-850	9,4	0,2
2904OIG22	-900	9,6	0,2
2904OIG23	-950	13,1	0,1
2904OIG24	-1000	19,4	0,2
2904OIG25	-1050	14,0	0,2
2904OIG26	-1100	14,7	0,2
2904OIG27	-1150	17,4	0,3
2904OIG28	-1200	13,1	0,2
2904OIG29	-1250	13,8	0,3
OIG311A	-5	8,0	0,1
OIG311B	-10	11,1	0,1
OIG311C	-15	11,6	0,2
OIG311D	-20	13,8	0,2
OIG311E	-25	4,8	0,1
OIG311F	-30	14,2	0,2
OIG311G	-35	14,2	0,2
OIG311H	-40	13,0	0,2
OIG311I	-45	9,6	0,2
OIG311J	-50	9,9	0,1
OIG311K	-55	13,0	0,6
OIG311L	-60	9,6	0,1
OIG311M	-65	19,9	0,2
OIG311N	-70	18,6	0,2
OIG311O	-75	14,2	0,2
OIG311P	-80	12,7	0,2
OIG311Q	-85	12,6	0,2
OIG311R	-90	11,7	0,2
OIG311S	-95	14,5	0,2
OIG311T	-100	13,7	0,3

Ref. échantillon	Remarques	Carbone total (%)	Soufre total (%)
ST1lix1	essais lixiviation	4,6	0,1
ST2lix1	essais lixiviation	4,3	0,1
ST3lix1	essais lixiviation	6,8	0,1

Tab. 3.8 : Teneurs en carbone et en soufre total (%) des échantillons prélevés sur le site 2.

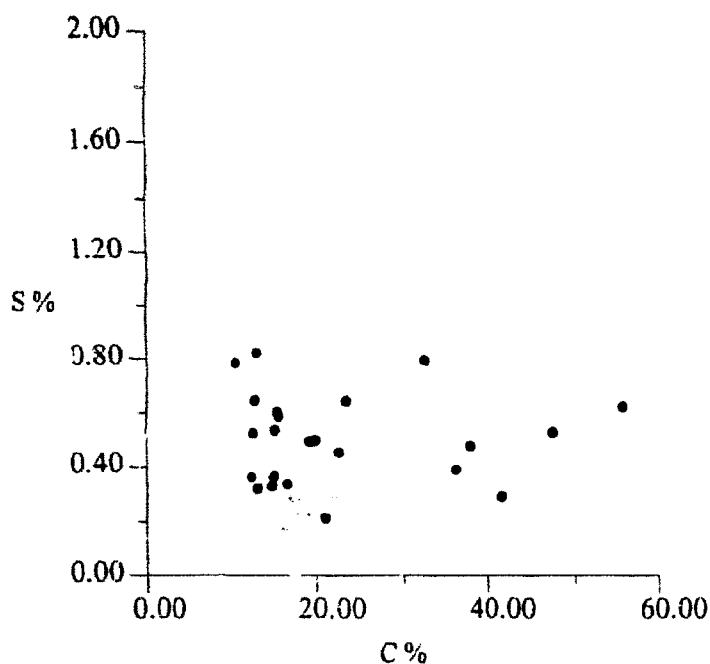
### Bassin de décantation

La teneur en carbone total des échantillons prélevés jusque 2 m dans le bassin C s'échelonne entre 10,3 et 55,6 % et les teneurs en soufre total se situent entre 0,2 et 0,8 % (Tab. 3.9). Ces valeurs apparaissent globalement plus élevées que celles mesurées en surface et en profondeur sur les deux terrils (site 1 et 2 ; Fig. 3.11). L'échantillon OIGF99T prélevé en surface dans le bassin B présente des teneurs comparables à celles des échantillons prélevés dans le bassin C.

Ref. échantillon	Profondeur (cm)	Carbone total (%)	Soufre total (%)
OIGF99T	surface	41,6	0,3
OIGBD1	surface	47,5	0,5
OIGBD2	-10	37,9	0,5
OIGBD3	-20	55,7	0,6
OIGBD4	-30	16,6	0,3
OIGBD5	-40	13,0	0,3
OIGBD6	-50	22,5	0,5
OIGBD7	-60	19,9	0,5
OIGBD8	-70	15,4	0,6
OIGBD9	-80	15,6	0,6
OIGBD10	-90	32,4	0,8
OIGBD11	-100	12,3	0,4
OIGBD12	-110	15,0	0,4
OIGBD13	-115	10,3	0,5
OIGBD14	-125	21,0	0,2
OIGBD15	-130	15,2	0,5
OIGBD16	-140	10,3	0,8
OIGBD17	-150	12,5	0,5
OIGBD18	-160	14,8	0,3
OIGBD19	-170	23,3	0,6
OIGBD20	-180	36,1	0,4
OIGBD21	-190	12,9	0,8
OIGBD22	-200	12,7	0,6

Ref. échantillon	Remarques	Carbone total (%)	Soufre total (%)
BD1lix1	essais lixiviation	25,8	0,3
BD2lix1	essais lixiviation	26,4	0,4
BD3lix1	essais lixiviation	26,7	0,3

Tab. 3.9 Teneurs en carbone et en soufre total (%) des échantillons prélevés dans les bassins de décantation B et C du site 2



- Teneurs en carbone total et en soufre total des échantillons prélevés dans l'un des Bassins de décantation
- Teneurs en carbone total et en soufre total des échantillons prélevés sur les terrils

Fig. 3.11 : Comparaison des teneurs en carbone total et en soufre total des échantillons prélevés sur les terrils et dans les bassins de décantation (B et C) du site 2.

#### 1.2.4 - Analyses chimiques (éléments majeurs et éléments traces)

##### *Terrils*

Les analyses chimiques ont été réalisées par ICP-AES (éléments majeurs et mineurs) ou ICP-MS (éléments traces : As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sr, Th, U, V, W, Zn, Zr), au laboratoire de spectrochimie du Centre de Recherches en Pétrographie et Géochimie de Vandoeuvre-les-Nancy (Tab. 3.10 à 3.15). Les échantillons ont été préparés par fusion au métaborate de lithium suivie d'une mise en solution acide (HNO<sub>3</sub>). La précision analytique est supérieure à 1 % (en moyenne 0,5 %) pour les éléments majeurs et les éléments mineurs, de 5 % pour As, Co, Mo, Ni et U, de 10 % pour le Cu et de 15 % pour le Cd.

Les éléments tels que As, Ni, Co, Cu, Zn, Cd et Mo ont été analysés en raison de leur implication dans le cycle du soufre : en théorie, le lessivage des sulfures en sulfates peut également entraîner un lessivage des métaux associés, c'est pourquoi leur analyse ainsi que celle d'éléments traces « témoins » (tels que U et V par exemple) est primordiale.

Les analyses chimiques ont été effectuées sur les solides échantillonnés en surface et en profondeur sur les deux sites. L'échantillonnage réalisé tous les 5 cm a également permis une étude à haute résolution des variations de teneurs.

Les terrils ont été alimentés par les grès et siltites dans lesquels se trouvent intercalées les veines de charbon. Leur composition est donc essentiellement alumino-silicatée (Tab. 3.10 et 3.12). Les rares bancs de carbonates marins identifiés dans le Namurien (Chalard, 1960) et à la base du Westphalien ne représentent qu'une part négligeable du volume stocké et exercent donc un contrôle négligeable sur la chimie d'ensemble de ces édifices.

La distribution verticale des teneurs en métaux sur les sites 1 et 2 ne montre pas de gradient surface-profondeur (Cd, Pb et Zn mis à part pour le site 1 ; Tab. 3.11, 3.13 ; Fig. 3.12 à 3.15) avec des valeurs proches de la « moyenne des shales », valeur de référence pour les analyses chimiques de roches sédimentaires du type relativement proche de celui des schistes houillers (Wedepohl, 1991).

Le site 1 présente un enrichissement en cadmium, plomb et zinc en surface (dans les 20 premiers centimètres) aussi bien pour les solides du premier échantillonnage (jusqu'à 2,5 m) que les solides du deuxième échantillonnage prélevés à haute résolution. Sur le site 2, cet enrichissement est moins marqué pour les stériles prélevés jusqu'à 12 m lors du premier échantillonnage et il n'est pas visible pour les échantillons prélevés à haute résolution dans le premier mètre lors du deuxième échantillonnage.

Deux autres analyses menées sur les stériles prélevés à la surface des terrils (SHC99 et OIGB99T), en dehors de la fosse pour le site 1 et en dehors de la coupe pour le site 2, montrent des valeurs extrêmement proches de celles des autres échantillons analysés.

### *Bassins de décantation*

Les échantillons prélevés dans le bassin de décantation C du site 2 ont également été analysés en terme d'éléments majeurs et d'éléments traces. Ces échantillons montrent une perte au feu beaucoup plus importante que celle des échantillons prélevés sur les terrils, ceci est compatible avec le fait que le charbon résiduel soit plus concentré dans cette fraction fine. La distribution des teneurs en métaux ne montre pas de gradient surface - profondeur et aucun enrichissement superficiel en cadmium, plomb et zinc n'est observé sur ces échantillons (Tab. 3.15, Fig. 3.16).

L'échantillon OIGF99T prélevé en surface dans le bassin de décantation B du site 2 a également fait l'objet d'analyses chimiques : les teneurs en éléments majeurs et traces obtenues sont très proches de celles des autres échantillons prélevés dans le bassin C.

Ref Echantillon	prof (m)	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MnO %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	PF %	Total
SHC99	0	46,39	21,46	5,50	0,05	1,59	0,61	0,38	3,81	0,77	0,05	19,26	99,87
SH280199D	-10	35,37	19,15	5,04	0,07	1,60	1,26	0,33	3,21	0,64	0,07	33,15	99,89
SH280199E	-30	39,33	21,61	3,79	0,03	1,15	0,42	0,39	3,67	0,74	0,06	28,69	99,88
SH280199F	-50	43,01	22,18	4,14	0,03	1,24	0,44	0,38	3,84	0,76	0,06	23,79	99,87
SH280199G	-72	40,26	21,59	3,77	0,03	1,20	0,46	0,37	3,64	0,71	0,04	27,79	99,86
SH280199H	-90	43,83	22,11	4,39	0,03	1,29	0,33	0,39	3,85	0,80	0,04	22,81	99,87
SH280199I	-107	40,79	21,10	5,29	0,07	1,27	0,48	0,38	3,61	0,73	0,05	26,58	100,35
SH280199J	-126	38,75	21,06	3,86	0,03	1,20	0,45	0,36	3,61	0,71	0,05	29,78	99,86
SH280199K	-142	41,65	21,21	4,29	0,03	1,27	0,22	0,35	3,71	0,74	0,05	26,35	99,87
SH280199L	-188	40,46	22,02	3,96	0,02	1,29	0,46	0,35	3,78	0,73	0,04	26,76	99,87
SH280199M	-200	42,94	22,30	4,18	0,03	1,39	0,62	0,35	3,78	0,75	0,07	23,46	99,87
SH280199N	-209	41,56	21,46	5,54	0,05	1,43	0,63	0,33	3,72	0,75	0,05	24,35	99,87
SH280199O	-219	41,50	21,93	4,70	0,04	1,37	0,41	0,34	3,78	0,74	0,04	25,03	99,88
SH280199P	-230	40,68	21,42	5,69	0,05	1,34	0,53	0,37	3,69	0,73	0,07	25,31	99,88
SH280199Q	-245	40,27	21,50	3,67	0,02	1,17	0,62	0,37	3,60	0,73	0,06	27,87	99,88
SH311A	-5	39,11	20,71	4,00	0,03	1,11	0,35	0,38	3,48	0,71	0,11	29,87	99,86
SH311B	-10	38,56	20,63	4,57	0,03	1,15	0,33	0,41	3,40	0,70	0,08	30,00	99,86
SH311C	-15	42,35	22,85	4,20	0,03	1,24	0,33	0,47	3,79	0,84	0,08	23,69	99,87
SH311D	-20	36,27	20,19	3,99	0,03	1,04	0,30	0,40	3,41	0,66	0,10	33,47	99,86
SH311E	-25	39,97	21,65	4,22	0,04	1,26	0,45	0,41	3,72	0,71	0,07	27,35	99,85
SH311F	-30	40,00	22,01	4,94	0,04	1,16	0,34	0,41	3,92	0,72	0,07	26,24	99,85
SH311G	-35	42,13	22,16	4,10	0,04	1,17	0,30	0,41	3,84	0,76	0,06	24,88	99,85
SH311H	-40	41,27	21,25	4,90	0,05	1,19	0,52	0,39	3,68	0,74	0,12	25,75	99,86
SH311I	-45	39,35	21,26	5,66	0,07	1,22	0,62	0,39	3,61	0,74	0,07	26,85	99,84
SH311J	-50	40,49	21,58	4,48	0,06	1,23	0,52	0,46	3,73	0,72	0,06	26,52	99,85
SH311K	-55	41,04	22,06	3,78	0,03	1,25	0,48	0,73	3,78	0,75	0,07	25,89	99,86
SH311L	-60	41,33	21,11	4,31	0,03	1,24	0,53	0,47	3,63	0,74	0,07	26,38	99,84
SH311M	-65	40,91	21,37	4,61	0,00	1,20	0,48	0,41	3,66	0,71	0,10	26,38	99,83
SH311N	-70	40,51	21,73	4,37	0,04	1,22	0,58	0,40	3,70	0,72	0,05	26,52	99,84
SH311O	-75	39,23	21,51	3,98	0,03	1,17	0,51	0,42	3,69	0,72	0,06	28,53	99,85
SH311P	-80	38,24	20,72	4,68	0,06	1,27	0,67	0,39	3,60	0,70	0,07	29,46	99,86
SH311Q	-85	37,58	20,75	5,24	0,06	1,21	0,64	0,46	3,44	0,70	0,08	29,70	99,86
SH311R	-90	38,15	21,13	4,49	0,04	1,19	0,50	0,39	3,64	0,70	0,07	29,55	99,85
SH311S	-95	42,51	22,25	3,91	0,03	1,23	0,39	0,43	3,85	0,78	0,06	24,40	99,84
SH311T	-100	39,30	21,24	3,90	0,03	1,16	0,42	0,40	3,67	0,71	0,06	28,96	99,85

Tab. 3.10 : Teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés sur le site 1.

Ref Echantillon	prof (cm)	As ppm	Ba ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sr ppm	Th ppm	U ppm	V ppm	W ppm	Zn ppm	Zr ppm
SHC99	0	7,78	493,03	0,20	15,10	138,09	41,27	0,72	57,27	35,63	132,59	16,62	3,59	158,85	1,80	105,68	139,27
SH280199D	-10	9,47	423,70	1,52	17,77	121,50	48,95	1,35	56,35	86,32	135,89	16,71	3,87	158,21	1,64	253,99	125,45
SH280199E	-30	9,05	435,84	0,17	16,80	130,43	47,74	1,12	55,79	32,31	114,48	18,88	4,06	167,50	1,70	78,53	139,33
SH280199F	-50	8,69	457,76	0,18	16,19	138,54	40,69	0,88	58,11	35,45	113,73	18,38	4,14	168,11	1,73	85,15	137,22
SH280199G	-72	5,10	643,23	0,17	15,28	125,15	39,12	0,92	51,98	28,96	112,74	18,59	3,77	156,81	1,58	67,30	134,36
SH280199H	-90	7,02	492,12	0,21	13,34	129,52	40,14	1,05	52,15	30,55	110,49	18,28	3,69	159,51	1,76	71,18	142,32
SH280199I	-107	7,41	439,33	0,22	14,56	130,31	40,61	1,25	52,15	27,73	112,62	16,40	3,73	162,82	1,56	75,41	133,47
SH280199J	-126	7,19	478,84	0,23	16,13	132,33	44,49	1,19	53,84	30,13	110,55	16,54	3,48	165,91	1,53	74,48	135,88
SH280199K	-142	9,06	461,52	0,15	22,55	132,51	37,73	1,07	63,33	29,21	111,78	16,24	3,68	158,55	1,72	81,84	137,08
SH280199L	-188	20,37	425,57	0,11	16,46	134,26	40,88	1,01	55,71	28,53	108,69	15,41	3,27	167,26	1,32	74,50	132,44
SH280199M	-200	14,58	422,65	0,18	17,83	134,19	39,49	0,95	56,11	28,04	110,21	15,11	3,30	165,11	1,36	74,00	132,78
SH280199N	-209	8,64	448,37	0,13	15,83	135,24	40,82	0,88	57,59	29,20	112,17	17,67	3,61	164,31	1,62	77,03	132,24
SH280199O	-219	9,13	454,91	0,29	17,72	136,28	44,86	1,05	60,81	35,22	113,34	17,86	3,82	173,21	1,58	87,05	140,00
SH280199P	-230	13,46	439,76	0,16	19,38	134,70	39,69	1,16	59,67	31,93	109,89	17,53	3,81	163,08	1,57	76,16	131,21
SH280199Q	-245	7,48	420,57	0,11	14,29	132,06	43,34	1,03	50,01	29,39	111,65	17,66	3,73	163,45	1,66	68,77	134,01
SH311A	-5	11,45	449,15	5,49	15,65	132,99	38,94	2,16	51,65	384,92	117,33	13,59	3,42	174,82	1,64	327,14	139,92
SH311B	-10	9,92	462,84	1,50	17,34	137,41	34,08	2,42	49,80	119,59	121,74	13,51	3,81	182,83	1,62	224,03	142,63
SH311C	-15	9,63	551,69	1,10	22,64	150,51	37,34	1,91	62,53	74,60	129,84	16,90	4,57	189,63	1,92	197,07	173,17
SH311D	-20	9,33	610,10	0,31	16,70	129,30	25,09	1,67	40,44	40,95	127,71	15,74	4,12	161,11	1,56	91,01	126,57
SH311E	-25	9,93	497,67	0,00	17,18	138,82	27,25	1,34	49,32	35,30	115,61	16,56	4,04	183,30	1,63	87,85	142,54
SH311F	-30	106,63	475,52	0,00	12,30	130,57	24,19	1,47	36,94	35,19	135,20	16,30	4,10	162,34	1,67	62,93	140,41
SH311G	-35	8,47	500,56	0,00	16,41	134,80	29,39	1,35	49,63	32,58	111,50	16,16	4,20	168,93	1,64	85,05	139,60
SH311H	-40	6,69	497,42	0,00	17,71	126,40	24,40	1,62	45,82	31,31	115,81	15,77	3,86	156,13	1,64	92,82	140,18
SH311I	-45	9,94	501,01	0,00	15,35	127,36	25,66	1,32	42,03	31,63	121,21	17,08	4,57	160,24	1,90	81,66	164,40
SH311J	-50	7,94	502,17	0,00	14,89	133,67	23,91	1,14	41,31	33,60	114,06	15,76	3,97	167,06	1,65	71,90	140,55
SH311K	-55	7,99	513,96	0,31	15,80	145,19	33,29	1,36	46,60	33,09	114,77	15,97	3,80	189,06	1,73	81,85	150,59
SH311L	-60	9,92	467,15	0,00	17,00	127,82	36,09	1,42	50,25	33,74	110,95	14,31	3,82	164,69	1,56	80,53	142,98
SH311M	-65	84,63	464,63	0,36	15,71	120,32	29,66	1,66	44,38	31,81	114,88	15,32	4,19	152,69	1,58	68,95	135,56
SH311N	-70	23,46	445,16	0,34	18,03	111,93	26,61	1,52	44,06	35,09	107,74	14,71	3,81	143,75	1,48	73,80	134,29
SH311O	-75	11,56	469,31	0,56	18,47	137,32	27,49	1,49	45,98	40,64	110,49	14,70	3,73	166,82	1,58	90,99	136,01
SH311P	-80	7,37	454,53	0,39	17,28	123,91	28,30	1,20	43,11	33,75	110,56	14,91	3,63	154,60	1,58	86,59	132,78
SH311Q	-85	9,85	412,65	0,63	16,75	122,03	28,87	1,99	41,45	36,39	106,65	14,18	3,65	149,72	1,46	76,54	130,86
SH311R	-90	12,24	423,49	0,43	15,93	119,42	28,15	1,43	39,08	36,32	105,50	14,18	3,77	148,36	1,42	76,22	126,14
SH311S	-95	12,50	482,46	1,16	17,93	136,17	32,15	1,12	48,99	64,00	108,07	16,08	4,01	166,03	1,72	83,71	146,18
SH311T	-100	10,95	481,28	0,41	17,83	131,73	32,77	1,58	47,09	40,88	119,18	15,84	3,87	161,13	1,51	88,13	137,17

Tab. 3.11 : teneurs en éléments traces des échantillons prélevés sur le site 1.

Ref Echantillon	prof (cm)	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MnO %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	PF %	Total
OIGB99T	0	52,54	21,64	5,29	0,07	1,52	0,21	0,51	3,75	0,90	0,06	1,00	99,88
2904OIG5	-20	46,14	21,29	4,96	0,05	1,30	0,38	0,49	3,53	0,89	0,07	20,78	99,88
2904OIG6	-100	44,09	22,94	4,95	0,06	1,51	0,41	0,71	3,77	0,86	0,07	20,52	99,89
2904OIG8	-200	43,29	22,98	4,19	0,04	1,30	0,41	0,64	3,84	0,88	0,06	22,25	99,88
2904OIG10	-300	42,51	19,12	5,90	0,07	1,29	0,41	0,55	3,13	0,84	0,08	25,97	99,87
2904OIG12	-400	45,89	23,29	4,95	0,04	1,31	0,34	0,56	3,94	0,87	0,06	18,64	99,89
2904OIG14	-500	45,73	19,22	6,79	0,08	1,24	0,37	0,52	3,11	0,80	0,12	21,89	99,87
2904OIG16	-600	44,60	22,01	5,07	0,06	1,33	0,52	0,59	3,62	0,82	0,07	21,18	99,87
2904OIG18	-700	44,57	23,05	4,50	0,05	1,37	0,66	0,53	3,86	0,88	0,13	20,29	99,89
2904OIG20	-800	45,51	22,96	4,75	0,06	1,30	0,32	0,55	3,83	0,92	0,06	19,64	99,90
2904OIG22	-900	47,98	22,47	5,13	0,06	1,38	0,33	0,56	3,75	0,88	0,06	17,28	99,88
2904OIG24	-1000	45,41	18,04	3,80	0,04	1,18	0,40	0,50	2,98	0,75	0,06	26,69	99,85
2904OIG26	-1100	43,37	22,60	4,32	0,05	1,37	0,55	0,52	3,60	0,90	0,06	22,55	99,89
2904OIG28	-1200	42,66	23,34	4,61	0,05	1,34	0,47	0,63	3,80	0,87	0,07	22,03	99,87
OIG311Z	0	43,94	20,41	8,07	0,09	1,45	0,55	0,50	3,38	0,83	0,08	20,57	99,87
OIG311A	-5	51,64	20,53	5,16	0,05	1,40	0,61	0,60	3,30	0,93	0,09	15,55	99,86
OIG311B	-10	47,39	21,51	5,47	0,06	1,41	0,49	0,51	3,55	0,89	0,06	18,51	99,85
OIG311C	-15	45,93	21,76	5,60	0,06	1,37	0,50	0,54	3,71	0,89	0,06	19,45	99,87
OIG311D	-20	45,62	21,83	5,02	0,05	1,40	0,55	0,53	3,65	0,87	0,07	20,27	99,86
OIG311E	-25	54,49	22,61	4,16	0,00	1,55	0,20	0,52	3,60	1,01	0,05	11,64	99,83
OIG311F	-30	44,61	21,76	4,72	0,04	1,35	0,53	0,53	3,60	0,84	0,06	21,83	99,87
OIG311G	-35	43,73	22,15	4,69	0,04	1,37	0,64	0,53	3,71	0,84	0,08	22,07	99,85
OIG311H	-40	43,75	21,55	5,43	0,06	1,46	0,71	0,51	3,61	0,84	0,08	21,85	99,85
OIG311I	-45	48,16	21,72	5,37	0,04	1,40	0,26	0,51	3,68	0,89	0,07	17,77	99,87
OIG311J	-50	49,51	20,86	5,25	0,05	1,38	0,32	0,50	3,50	0,76	0,09	17,44	99,86
OIG311K	-55	46,58	20,78	5,52	0,06	1,19	0,18	0,48	3,38	0,86	0,06	20,75	99,84
OIG311L	-60	48,23	20,11	7,62	0,14	1,80	0,44	0,48	3,64	0,91	0,07	16,43	99,87
OIG311M	-65	37,49	17,11	9,38	0,11	1,43	2,52	0,40	2,82	0,71	0,53	27,34	99,84
OIG311N	-70	40,79	19,87	5,72	0,06	1,31	0,88	0,46	3,26	0,82	0,07	26,61	99,85
OIG311O	-75	45,32	21,67	4,50	0,04	1,36	0,59	0,50	3,61	0,87	0,07	21,33	99,86
OIG311P	-80	43,06	19,81	7,79	0,14	1,53	1,10	0,50	3,35	0,83	0,38	21,37	99,86
OIG311Q	-85	45,29	21,99	6,03	0,10	1,50	0,54	0,52	3,64	0,90	0,07	19,28	99,86
OIG311R	-90	47,46	21,54	4,59	0,05	1,31	0,41	0,53	3,55	0,89	0,07	19,45	99,85
OIG311S	-95	43,29	20,64	6,83	0,11	1,38	0,52	0,49	3,44	0,84	0,07	22,24	99,85
OIG311T	-100	47,11	21,27	4,26	0,05	1,29	0,47	0,55	3,53	1,00	0,07	20,26	99,86

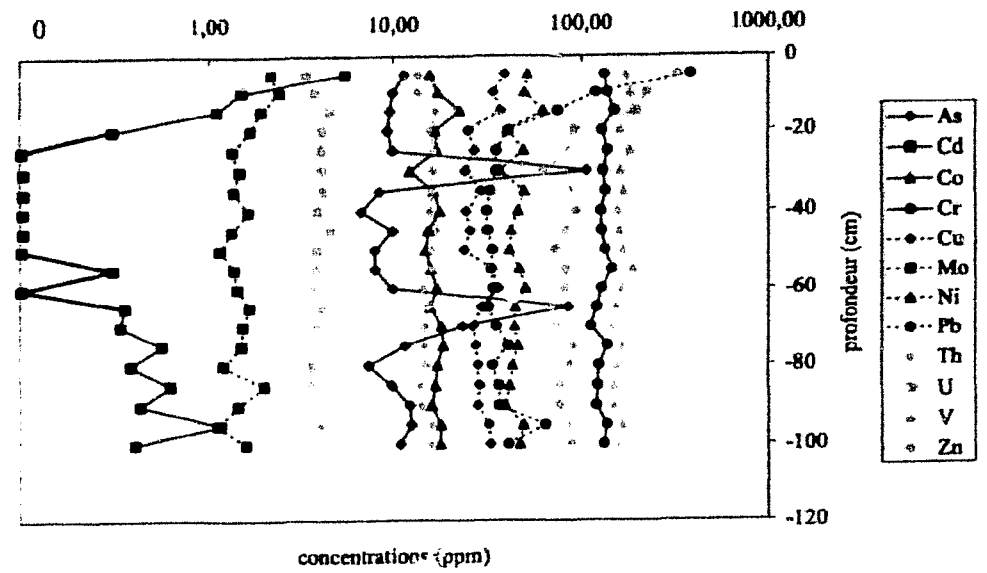
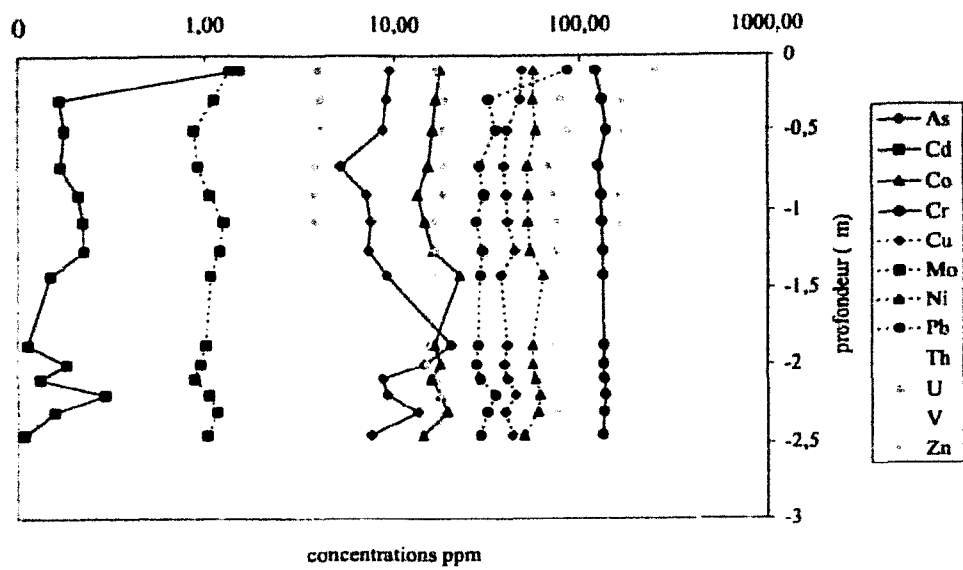
Réf. Echantillon	Remarques	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MnO %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	PF %	Total %
ST4lixi	essais lixiviation	47,10	22,57	7,17	0,16	1,52	0,50	0,56	3,53	0,88	0,13	15,73	99,85
ST5lixi	essais lixiviation	50,21	22,90	5,68	0,05	1,64	0,28	0,55	3,84	0,96	0,09	13,66	99,86

Tab. 3.12 : Teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés sur le site 2.



Ref Echantillon	prof (cm)	As ppm	Ba ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sr ppm	Th ppm	U ppm	V ppm	W ppm	Zn ppm	Zr ppm
01GH991	0	4.05	489.40	0.19	15.88	134.62	43.27	0.46	56.83	26.39	114.14	15.22	3.01	164.25	1.81	87.23	174.95
290401G5	20	6.99	546.11	0.61	14.96	130.18	44.62	0.89	51.60	66.55	114.29	18.09	3.84	166.33	2.20	124.90	150.45
290401G6	300	4.52	488.35	0.14	17.84	136.75	47.31	0.67	57.39	34.75	124.37	19.85	3.93	169.45	2.00	77.52	161.28
290401G8	200	3.70	487.65	0.10	14.41	142.63	41.69	0.77	50.71	34.20	116.59	20.49	4.08	184.80	2.01	71.58	159.48
290401G10	300	3.80	437.55	0.17	17.05	114.71	36.47	0.83	47.09	29.70	114.32	16.90	3.85	148.94	2.12	71.99	176.25
290401G12	300	4.44	519.70	0.18	13.48	134.08	38.68	0.54	50.80	40.51	122.39	19.77	3.98	176.89	2.03	120.82	173.10
290401G14	500	21.96	439.03	0.15	15.58	118.04	35.31	1.53	48.93	27.46	113.98	16.67	3.54	148.79	1.90	76.78	167.66
290401G16	600	8.57	499.98	0.20	14.75	131.91	47.92	0.85	51.72	35.45	119.39	18.86	3.88	163.19	2.00	81.98	163.51
290401G18	700	5.75	533.99	0.21	15.16	143.70	47.25	1.16	57.43	35.32	130.20	18.23	3.69	181.37	1.87	76.22	173.02
290401G20	800	4.19	606.11	0.19	15.65	145.33	48.50	0.70	55.79	42.85	122.18	18.80	3.77	179.20	2.14	90.70	185.74
290401G22	900	3.57	516.79	0.18	15.30	140.41	41.08	0.61	56.72	29.84	124.42	17.38	3.43	175.46	2.04	81.26	174.85
290401G24	1000	4.83	421.15	0.11	19.79	121.60	37.17	0.88	59.83	28.71	110.89	14.33	3.11	149.83	1.66	85.64	169.53
290401G26	1100	3.38	493.62	0.18	14.23	142.36	49.76	0.59	54.53	30.03	125.57	17.92	3.55	177.75	1.84	80.25	172.38
290401G28	1200	3.67	484.58	0.15	14.38	140.84	49.47	0.58	55.78	33.82	132.42	17.01	3.47	181.87	1.80	70.01	164.20
01G M1199 Z	0	5.98	574.17	0.31	15.72	129.58	35.00	1.15	49.31	54.26	111.89	15.39	3.67	157.43	1.79	92.66	168.64
01G M1199 A	5	6.53	530.95	0.34	18.68	136.33	42.92	0.99	60.55	41.10	114.48	15.67	3.91	159.80	2.11	111.33	205.42
01G M1199 B	10	5.44	605.48	0.35	16.58	140.19	39.17	0.98	50.78	43.18	117.95	16.12	3.90	170.27	1.92	101.68	181.26
01G M1199 C	15	5.95	566.83	0.41	16.62	137.93	31.85	1.04	49.51	45.82	119.49	16.78	3.94	168.06	2.02	99.80	186.58
01G M1199 D	20	5.52	587.70	0.37	16.44	141.64	34.95	1.10	47.86	45.17	122.41	15.31	3.63	180.94	1.80	103.96	178.21
01G M1199 E	25	11.95	536.31	0.00	26.43	147.90	35.15	1.41	74.50	46.63	112.88	14.78	3.73	166.59	1.97	122.05	200.07
01G M1199 F	30	5.07	598.99	0.00	16.19	137.99	187.20	1.06	48.01	47.18	117.69	14.11	3.51	174.78	1.76	94.23	179.37
01G M1199 G	35	4.51	576.81	0.00	16.26	144.37	37.24	1.15	46.66	42.77	120.20	14.96	3.57	185.23	1.80	98.75	180.90
01G M1199 H	40	5.65	602.43	0.33	16.94	146.50	31.44	1.04	46.61	45.70	118.03	16.63	3.93	186.63	2.01	89.21	171.88
01G M1199 I	45	5.85	625.84	0.55	14.10	149.32	28.62	0.88	49.29	69.99	119.04	15.95	3.96	185.31	2.02	112.44	179.08
01G M1199 J	50	5.79	522.41	1.14	16.11	145.37	30.80	0.96	52.34	79.30	111.56	16.55	4.10	177.37	2.12	145.36	195.75
01G M1199 K	55	10.24	500.62	0.78	15.99	138.67	27.60	0.88	45.64	69.18	107.96	15.95	3.96	171.03	2.22	106.02	178.28
01G M1199 L	60	4.09	536.50	0.31	18.20	129.61	26.57	0.75	52.26	30.45	106.77	14.55	3.55	152.18	2.17	94.90	170.10
01G M1199 M	65	4.04	439.74	0.42	13.85	108.33	27.43	1.30	38.61	38.42	156.09	13.25	3.42	134.81	1.67	79.48	153.43
01G M1199 N	70	6.25	474.18	0.60	15.19	124.15	28.25	1.03	40.23	36.45	116.89	15.68	3.60	157.03	2.03	79.39	165.11
01G M1199 O	75	12.59	539.38	0.00	16.44	137.98	89.82	0.89	45.18	35.65	117.81	16.70	3.99	180.02	2.06	78.71	179.59
01G M1199 P	80	4.82	488.65	0.00	15.21	125.19	29.91	0.92	46.81	30.61	137.28	13.91	3.37	156.00	1.79	83.07	172.35
01G M1199 Q	85	5.21	524.37	0.00	21.59	147.24	79.24	0.92	57.43	32.05	119.30	16.21	3.63	183.58	1.86	93.88	185.59
01G M1199 R	90	5.31	529.10	0.00	17.33	146.39	34.83	1.25	54.11	31.70	116.57	15.26	3.57	183.22	1.84	81.84	185.47
01G M1199 S	95	4.69	500.56	0.00	16.58	139.26	28.13	1.02	44.61	30.59	116.07	14.68	3.64	168.35	1.68	82.40	176.23
01G M1199 T	100	9.52	481.79	0.00	17.31	144.62	33.14	0.98	50.12	27.71	122.31	15.06	3.63	180.62	2.92	83.06	196.29
Réf. Echantillon	Remarques	As ppm	Ba ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sr ppm	Th ppm	U ppm	V ppm	W ppm	Zn ppm	Zr ppm
S14lex	essais lixiviation	7.69	514.41	0.00	14.82	139.24	49.88	0.86	57.25	40.95	113.61	14.81	3.62	160.99	2.05	96.30	170.71
S15lux	essais lixiviation	5.30	531.96	0.00	14.01	137.13	51.28	0.68	54.53	31.81	113.02	15.25	3.56	154.99	2.07	83.82	186.07

Tab.3.13 : teneurs en éléments traces des échantillons prélevés sur le site 2



75

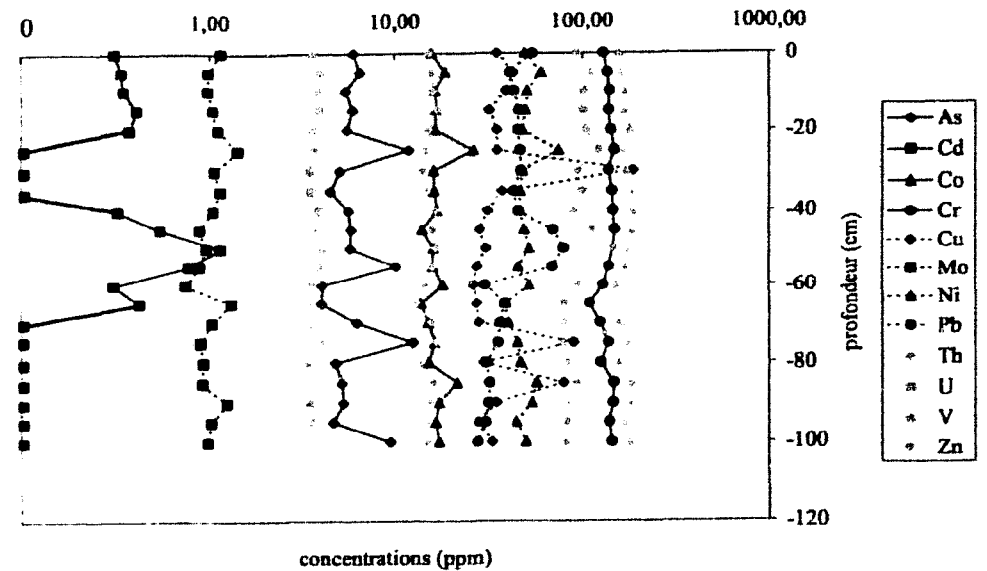
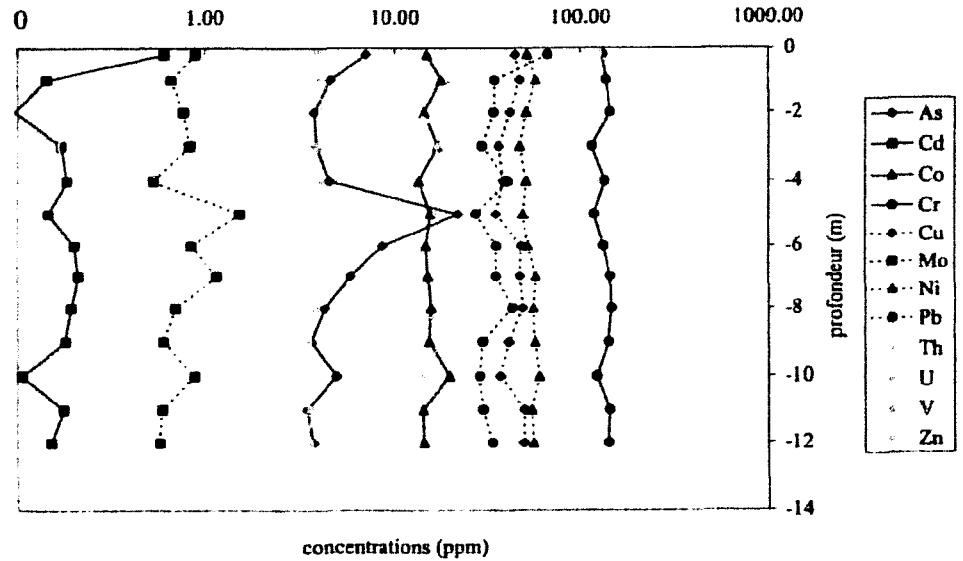


Fig. 3.14 : Variations des teneurs en éléments traces des échantillons prélevés en profondeur sur le site 2.

Fig. 3.15 : Variations des teneurs en éléments traces des échantillons prélevés à haute résolution sur le site 2.

Ref Echantillon	prof (cm)	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MnO %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	PF %	Total
OIGF99T	0	26,36	14,43	3,70	0,01	0,71	0,98	0,33	2,09	0,53	0,09	50,64	99,87
OIGBD1	0	23,89	13,03	2,91	0,00	0,62	0,93	0,32	1,91	0,47	0,12	55,31	99,52
OIGBD2	-10	28,73	16,08	3,11	0,03	0,9	0,91	0,4	2,52	0,57	0,13	46,53	99,91
OIGBD3	-20	18,77	10,94	1,91	0,03	0,56	0,54	0,28	1,64	0,41	0,11	65,05	100,24
OIGBD4	-30	40,17	21,66	4,37	0,03	1,32	1,15	0,49	3,5	0,75	0,15	26,28	99,87
OIGBD5	-40	42,34	23,04	4,96	0,08	1,47	1,21	0,53	3,71	0,81	0,2	21,55	99,9
OIGBD6	-50	37,29	20,03	4,2	0,05	1,24	1,11	0,44	3,21	0,71	0,16	31,43	99,87
OIGBD7	-60	39,5	20,62	4,3	0,07	1,33	1,38	0,46	3,33	0,73	0,19	27,94	99,85
OIGBD8	-70	40,38	21,44	5,93	0,09	1,5	1,37	0,48	3,56	0,77	0,19	24,18	99,89
OIGBD9	-80	40,06	22,01	6,31	0,07	1,56	1,12	0,5	3,6	0,78	0,2	24,21	100,42
OIGBD10	-90	29,27	16,28	4,94	0,05	1,09	0,85	0,37	2,62	0,58	0,13	43,33	99,51
OIGBD11	-100	42,73	23,84	4,95	0,04	1,46	1,04	0,54	3,92	0,83	0,14	20,4	99,89
OIGBD12	-110	40,81	22,84	4,63	0,04	1,36	1,03	0,49	3,78	0,8	0,15	23,94	99,87
OIGBD13	-115	38,9	21,72	5,07	0,05	1,39	1,15	0,48	3,67	0,76	0,14	27,13	100,0
OIGBD14	-125	37,29	20,71	4,4	0,04	1,27	1,19	0,49	3,44	0,73	0,13	30,8	100,49
OIGBD15	-130	40,82	21,39	6,23	0,06	1,39	1,32	0,52	3,59	0,76	0,16	23,65	99,89
OIGBD16	-140	42,14	21,33	9,49	0,07	1,56	1,35	0,53	3,62	0,78	0,15	18,9	99,92
OIGBD17	-150	43	21,35	6,63	0,05	1,48	1,27	0,51	3,61	0,75	0,13	21,11	99,89
OIGBD18	-160	41,9	20,93	5,77	0,04	1,34	1,32	0,51	3,58	0,75	0,13	23,61	99,88
OIGBD19	-170	37,57	19,2	4,98	0,05	1,19	1,18	0,48	3,15	0,69	0,13	31,72	100,34
OIGBD20	-180	29,61	15,4	3,38	0,04	0,92	1,03	0,43	2,5	0,56	0,11	45,87	99,85
OIGBD21	-190	43,4	22,08	5,53	0,06	1,43	1,16	0,58	3,77	0,79	0,14	21,56	100,5
OIGBD22	-200	43,56	21,46	5,71	0,06	1,45	1,33	0,58	3,69	0,78	0,13	21,14	99,89

Réf. Echantillon	Remarques	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MnO %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	PF %	Total %
BD4lix1	essais lixiviation	35,00	19,11	4,96	0,04	1,15	1,29	0,49	3,10	0,66	0,11	33,99	99,90
BD5lix1	essais lixiviation	34,76	18,98	4,77	0,04	1,10	1,18	0,48	2,99	0,66	0,06	34,86	99,88

Tab. 3.14 Teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés dans les bassins de décantation B-C du site 2.

Ref Echantillon	prof (cm)	As ppm	Ba ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sr ppm	Th ppm	U ppm	V ppm	W ppm	Zn ppm	Zr ppm
OIGF99T	0	2,32	506,05	0,02	14,58	92,65	46,14	1,38	44,08	45,81	105,31	12,41	2,91	138,44	1,25	60,69	125,45
OIGBD1	0	3,38	500,22	0,46	15,22	90,09	52,21	2,22	43,65	50,63	84,24	10,15	2,85	123,61	1,16	59,52	111,05
OIGBD2	-10	4,04	611,63	0,00	14,74	102,98	56,80	1,75	44,47	46,49	95,31	12,47	2,93	135,05	1,21	59,76	123,36
OIGBD3	-20	3,34	322,64	0,00	14,55	74,26	50,17	2,05	38,53	29,72	75,28	8,43	2,38	103,19	1,08	41,63	87,09
OIGBD4	-30	5,39	599,02	0,00	13,89	135,10	62,27	1,71	51,58	48,26	126,16	14,59	3,46	165,44	1,40	85,46	182,40
OIGBD5	-40	6,63	665,00	0,55	14,14	135,59	61,29	1,63	53,58	51,59	135,85	15,98	3,52	174,77	1,44	102,79	174,78
OIGBD6	-50	6,13	586,69	0,00	15,71	128,75	57,69	1,60	53,56	44,43	120,92	13,19	2,99	155,05	1,43	96,69	152,57
OIGBD7	-60	5,48	539,24	0,00	16,84	122,89	60,46	1,77	83,39	45,34	115,10	13,91	3,42	161,99	1,57	94,29	155,17
OIGBD8	-70	7,29	702,97	0,44	14,46	135,31	62,57	1,97	51,16	58,29	129,97	16,00	3,62	167,43	1,59	103,06	158,39
OIGBD9	-80	6,59	713,58	0,00	13,04	131,86	65,68	1,62	49,57	70,76	126,85	15,52	3,69	165,82	1,77	126,71	160,87
OIGBD10	-90	6,34	709,29	0,49	14,74	111,02	69,14	1,72	46,45	65,77	111,66	12,96	3,18	148,22	1,17	145,94	124,52
OIGBD11	-100	4,83	676,65	0,00	11,78	145,18	65,53	1,58	50,91	61,87	136,50	17,29	3,93	184,66	1,91	94,38	166,60
OIGBD12	-110	5,52	642,26	0,31	12,41	144,27	68,94	1,52	47,22	48,39	135,57	16,40	3,75	171,60	1,64	81,05	170,20
OIGBD13	-115	6,33	714,27	0,00	13,18	134,13	72,08	1,63	48,01	73,06	136,01	15,94	3,85	168,43	1,61	115,90	157,37
OIGBD14	-125	5,27	595,06	0,00	13,43	125,72	76,13	1,61	48,02	78,90	129,68	15,25	3,70	159,76	1,43	94,09	154,95
OIGBD15	-130	5,18	773,02	0,00	13,77	137,37	66,38	1,53	46,48	56,29	146,52	16,19	3,86	172,13	1,53	123,58	176,96
OIGBD16	-140	9,20	999,12	0,38	14,45	144,78	73,13	1,43	50,75	94,01	162,42	15,18	3,58	187,92	1,60	125,55	177,40
OIGBD17	-150	5,79	774,02	0,47	17,23	131,38	64,05	1,38	51,15	52,75	139,27	15,30	3,63	172,38	1,60	143,66	170,92
OIGBD18	-160	5,65	620,46	0,35	14,52	124,30	60,89	1,37	48,44	44,25	134,73	14,49	3,49	170,10	1,53	94,38	168,91
OIGBD19	-170	5,27	496,32	0,38	14,92	122,64	64,50	1,57	46,81	50,80	119,14	13,86	3,19	159,17	1,38	73,26	154,96
OIGBD20	-180	4,93	378,23	0,53	15,56	101,27	60,20	2,06	46,77	39,00	98,16	10,25	2,71	134,02	1,17	66,15	121,08
OIGBD21	-190	6,46	599,43	0,41	14,39	138,21	58,76	1,35	50,51	51,07	119,68	13,62	3,31	164,48	1,35	89,97	152,31
OIGBD22	-200	7,00	601,57	0,50	13,81	137,90	56,19	1,38	48,70	54,39	127,53	14,08	3,25	160,86	1,48	143,84	164,13

Ref Echantillon	Remarques	As ppm	Ba ppm	Cd ppm	Co ppm	Cr ppm	Cu ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Sr ppm	Th ppm	U ppm	V ppm	W ppm	Zn ppm	Zr ppm
BD4lix	essais lixiviation	5,76	890,23	0,63	13,51	112,53	57,28	1,49	40,68	55,43	102,60	13,28	3,16	153,00	1,75	88,21	138,22
BD5lix	essais lixiviation	5,45	888,03	0,45	12,90	107,93	57,42	1,50	43,79	52,56	96,25	12,84	3,13	143,02	1,62	88,71	131,93

Tab. 3.15 : teneurs en éléments traces des échantillons prélevés dans les bassins de décantation B-C du site 2.

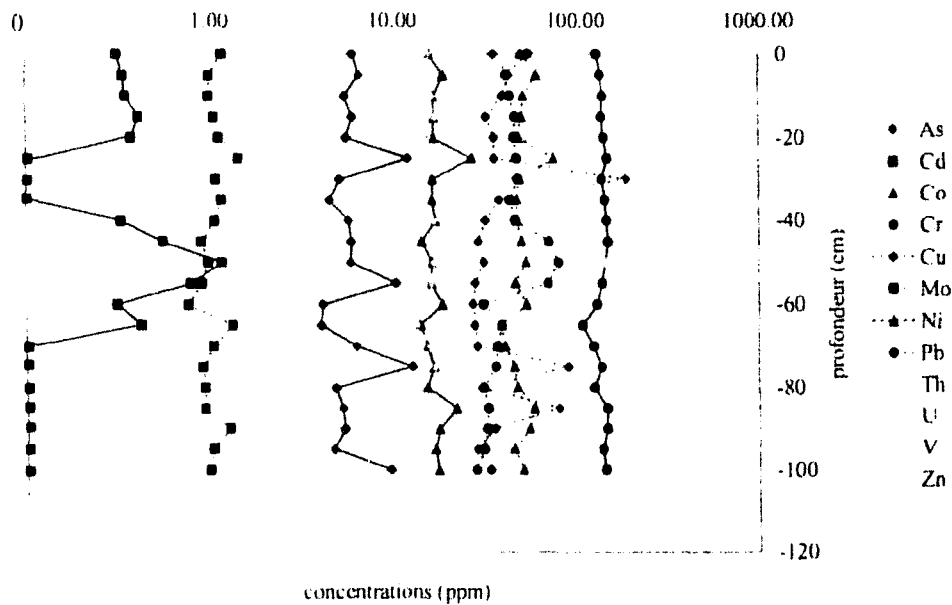


Fig. 3.16 : Variation des teneurs en éléments traces des échantillons prélevés en profondeur dans le bassin de décantation C du site 2.

### 1.2.5 - Analyses isotopiques ( $^{34}\text{S}$ )

Des mesures de  $\delta^{34}\text{S}$  ont été effectuées sur les sulfures contenus dans les schistes houillers des terrils de Rieulay, Divion et Fouquière lors de la phase préliminaire de la présente étude au laboratoire de chimie isotopique d'Elf Production (Tribovillard *et al.*, 1998) (Tab. 3.16). On observe que le  $\delta^{34}\text{S}$  des sulfures se situe entre -7 et -1 ‰, valeurs concordant avec celles de Bernard (1979) pour lequel un prélèvement de schiste houiller avait permis de mesurer le  $\delta^{34}\text{S}$  du soufre total (-6.5 ‰), puis après lixiviation à l'eau distillée, le  $\delta^{34}\text{S}$  des sulfates en solution (-3.8 ‰).

Ref Echantillon	$\delta^{34}\text{S}$
Rieulay	-1.7 à -1.0
Divion	-3.4 à -2.9
Fouquière	-7 à -1.2

Tab. 3.16 Valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  mesurées sur les sulfures prélevés sur les sites de Rieulay, Divion et Fouquière

## 1.2.6 - Calcimétrie

### Terrils

Les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  des échantillons analysés sur les sites 1 et 2 (Tab. 3.17 et 3.18) sont le plus souvent inférieures à l'erreur due à la mesure (=1 % ; annexe 1). En l'absence de carbonates, les teneurs en carbone total mesurées précédemment reflètent donc la teneur en carbone organique des échantillons. Quelques échantillons présentent une teneur en carbonates légèrement supérieure à 1 % (SHF99BAS, SH280199F, SH280199Q, 2904OIG7, 2904OIG26 et 2904OIG29). L'échantillon SHB99C présente quant à lui une teneur en carbonates supérieure à 18%.

Réf. échantillon	Profondeur (cm)	$\text{CaCO}_3$ (%)
SHA99	surface	0,3
SHB99	surface	0,3
SHB99C	surface	18,2
SHC99	surface	0,6
SHD99T	surface	0,1
SHE99	surface	0,2
SHF99BAS	surface	1,3
SH280199D	-10	0,9
SH280199E	-30	0,2
SH280199F	-50	1,0
SH280199G	-72	0,4
SH280199H	-90	0,2
SH280199I	-107	0,8
SH280199J	-126	0,8
SH280199K	-142	0,3
SH280199L	-188	0,3
SH280199M	-200	0,3
SH280199N	-209	0,3
SH280199O	-219	0,3
SH280199P	-230	0,9
SH280199Q	-245	1,2

Tab. 3.17 : Teneurs en  $\text{CaCO}_3$  d'échantillons prélevés sur le site 1.

Réf. échantillon	Profondeur (cm)	CaCO <sub>3</sub> (%)
OIGB99T	surface	0,0
OIGC99	surface	0,2
OIGD99	surface	0,0
OIGE99	surface	0,2
2904OIG5	-20	0,7
2904OIG6	-100	0,7
2904OIG7	-150	1,2
2904OIG8	-200	0,9
2904OIG9	-250	0,8
2904OIG10	-300	0,8
2904OIG11	-350	0,8
2904OIG12	-400	0,7
2904OIG13	-450	0,8
2904OIG14	-500	0,3
2904OIG15	-550	0,5
2904OIG16	-600	0,8
2904OIG17	-650	0,9
2904OIG18	-700	0,8
2904OIG19	-750	0,1
2904OIG20	-800	0,5
2904OIG21	-850	0,7
2904OIG22	-900	0,6
2904OIG23	-950	0,3
2904OIG24	-1000	0,8
2904OIG25	-1050	0,9
2904OIG26	-1100	1,1
2904OIG27	-1150	0,9
2904OIG28	-1200	0,7
2904OIG29	-1250	1,0

Réf. échantillon	Remarques	CaCO <sub>3</sub> (%)
ST1LIXI	essais lixiviation	0,6
ST2LIXI	essais lixiviation	0,4
ST3LIXI	essais lixiviation	0,5

Tab. 3.18 : Teneurs en CaCO<sub>3</sub> d'échantillons prélevés sur le site 2.

#### *Bassin de décantation*

Les teneurs en carbonates des échantillons prélevés dans le bassin de décantation du site 2 sont légèrement plus élevées que celles des échantillons prélevés sur les terrils (1 à 2 %)

Réf. échantillon	Profondeur (cm)	CaCO <sub>3</sub> (%)
OIGBD1	surface	1,7
OIGBD3	-20	1,0
OIGBD5	-40	1,9
OIGBD7	-60	2,0
OIGBD9	-80	1,5
OIGBD11	-100	1,5
OIGBD13	-115	1,6
OIGBD15	-130	1,7
OIGBD17	-150	1,6
OIGBD19	-170	1,5

Réf. échantillon	Remarques	CaCO <sub>3</sub> (%)
BD1LIXI	essais lixiviation	1,8
BD2LIXI	essais lixiviation	2,1
BD3LIXI	essais lixiviation	1,7

Tab. 3.19 : Teneurs en CaCO<sub>3</sub> d'échantillons prélevés en profondeur dans le bassin de décantation C du site 2.

### 1.3 - Prélèvements liquides

#### 1.3.1 - Eaux souterraines

Deux campagnes d'échantillonnage des eaux souterraines ont été réalisées sur 19 sites les 20 et 21 Janvier 1999 et 16 Février 1999. Les prélèvements ont été effectués dans les piézomètres ou forages atteignant la nappe de la Craie à l'amont et à l'aval hydraulique des terrils (il est toutefois apparu, après consultation des Charbonnages de France, que le piézomètre SHS3 situé sur le site 1 (Fig. 3.17) se trouve au niveau d'un bassin à cendres baigné par les eaux de la nappe de la Craie). L'identification des caractéristiques hydro-géochimiques de la nappe de la Craie en dehors de l'influence des terrils a nécessité d'autres prélèvements distribués le long des lignes de flux naturels : à Auby, Thumeries, Huclier, Esquerchin, Drocourt, Courrière et Carvin (Fig. 3.17).

Les eaux souterraines ont donné lieu à des analyses chimiques et isotopiques permettant de comparer l'amont et l'aval hydraulique des terrils (Tab. 3.20). Les puits et forages existants ainsi que les piézomètres ont été presque tous échantillonnés à l'aide d'une pompe immergée à débit variable. Les débits de prélèvement ont varié en fonction du type d'ouvrage de 2 à 20 l.min<sup>-1</sup>. Un renouvellement des eaux des différents piézomètres et forages utilisés a préalablement été effectué avant chaque prélèvement de façon que l'échantillonnage et les mesures soient représentatifs des eaux de la nappe de la Craie.

Il faut également noter que la phase préliminaire de la présente étude a permis d'analyser un échantillon représentatif des eaux de la nappe de la Craie à l'extérieur du bassin minier (Forage de



Vimy, situé au sud du bassin minier et donc à l'amont de celui-ci, l'écoulement de la nappe de la Craie étant globalement SO-NE, Bernard, 1979), donc une eau n'ayant pas subi l'influence de l'exploitation charbonnière. Cet échantillon a fait l'objet d'analyses chimiques et d'une analyse du  $\delta^{34}\text{S}$  des sulfates pour laquelle la concentration en sulfates s'est avérée trop peu abondante pour permettre la mesure.

### 1.3.2 – Autres prélèvements liquides effectués

- Des eaux de surface ont été prélevées dans les mares temporaires se formant périodiquement sur les sites (Tab. 3.20). Ces mares sont le résultat de l'accumulation des eaux de pluie qui peuvent ruisseler sur ou s'infiltrer dans les terrils. Les échantillons OIGMar1 et OIGMar2 ont été prélevés à proximité immédiate du terril du site 2 ; l'échantillon OIGMar3 a quant à lui été prélevé au niveau des résidus de curage de bassins de décantations situés à l'est du site 2 (Fig. 2.6 : Zone G : « schlamms en dépôt »).
- L'échantillon OIGBD a été prélevé dans l'un des bassins de décantation du site 2. Cette eau peut avoir deux origines : l'accumulation d'eau de pluie au sommet des bassins et la remontée d'eaux par tassement des fines accumulées dans ces bassins.
- Les eaux de pluie ont été récoltées à deux reprises sur le site 2 (OIG270300PL et OIG06.03.00PL) afin de connaître notamment quelle est la quantité initiale de sulfate dans les eaux de pluie tombant sur les sites, ceci afin de faire la part entre ce qui peut être apporté par les pluies et ce qui peut être dû à l'altération des terrils en terme de minéralisation des eaux.
- Un échantillon d'eau a également été récolté dans le canal à grand gabarit de la Deûle qui s'écoule entre le site 1 et le site 2 (cf. Fig. 2.10).

## **1.4 – Résultats des analyses menées sur les prélèvements liquides**

### 1.4.1 - Mesures *in situ* (eaux souterraines)

En parallèle de l'échantillonnage des eaux de la nappe de la Craie, des mesures *in situ* ont été effectuées (pH,  $T^\circ$ , conductivité électrique -CE-, potentiel d'oxydo-réduction -Eh-) en dynamique au sein d'une cellule de mesure isolée de l'atmosphère afin d'avoir des mesures de potentiels d'oxydo-réduction représentatifs. Pour certains piézomètres, l'introduction de la pompe étant impossible, l'échantillonnage s'est fait à la bouteille à prélèvement (en Téflon inerte), dans ce cas, les échanges avec l'atmosphère ont pu modifier certains paramètres physico-chimiques. Les niveaux piézométriques ont été systématiquement relevés avant prélèvement.

Les résultats de ces mesures *in situ* sont récapitulés dans le Tableau 3.21.

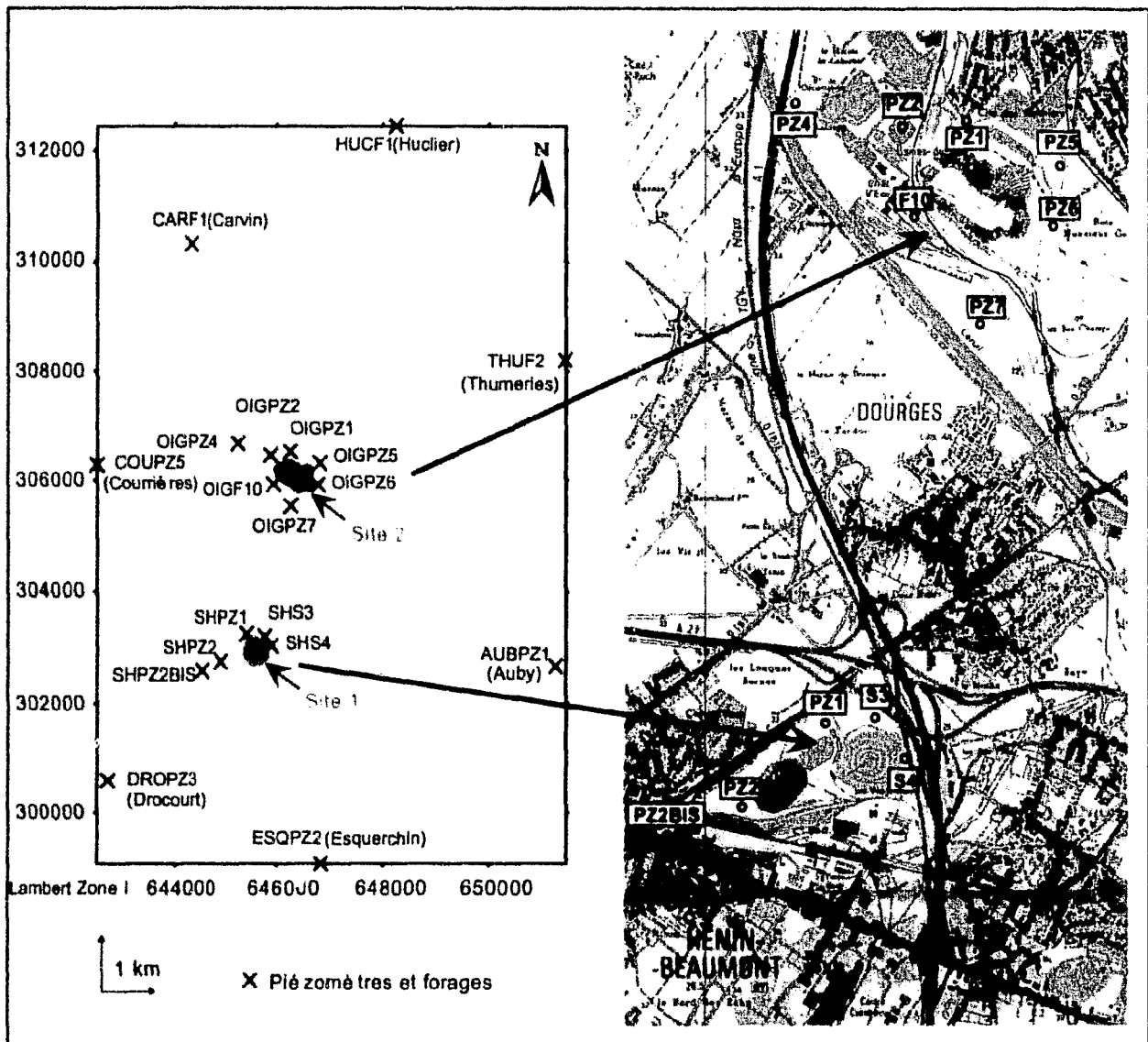


Fig. 3.17 : Piézomètres et forages échantillonnés sur les sites et en dehors des sites.

localisation	Référence	Majeurs et traces	$\delta^{18}\text{O}$ Sulfates	$\delta^{34}\text{S}$ Sulfates	$\delta^{13}\text{C}$	A <sup>14</sup> C	$\delta^{18}\text{O}$ Oeau	$\delta^2\text{H}$
Amont Site 1	SHPZ2bis SHPZ2	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	0	0	1	1
Aval Site 1	SHPZ1 SHS3 SHS4	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1
Amont Site 2	OIGPZ7 OIGF10	1	1	1	0	0	1	1
		1	0	0	1	1	1	1
Latéral Site 2	OIGPZ4 OIGPZ6	1	0	0	0	0	1	1
		1	1	1	1	1	1	1
Aval Site 2	OIGPZ2 OIGPZ5 OIGPZ1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1
		1	0	0	1	1	1	1
Piézomètres extérieurs	AUBPZ1	1	0	0	1	0	1	1
	CARF1	1	1	1	1	1	1	1
	COUPZ5	1	0	0	1	1	1	1
	DROPZ3	1	0	0	1	1	1	1
	ESQPZ2	1	1	1	1	1	1	1
	HUCF1	1	0	0	1	1	1	1
	THUF2	1	1	1	1	1	1	1
Forage Vimy	Vimy	1	0	0	0	0	0	0
Mares temporaires	OIGMar1	1	0	0	0	0	0	0
	OIGMar2	1	0	0	0	0	0	0
	OIGMar3	1	0	0	0	0	0	0
Bassin Décantation	OIGBD	1	0	0	0	0	0	0
Pluies	OIG270300PL	1	0	0	0	0	0	0
	OIG06.03.00PL	1	0	0	0	0	0	0
Canal	OIGCanal	1	0	0	1	1	0	0

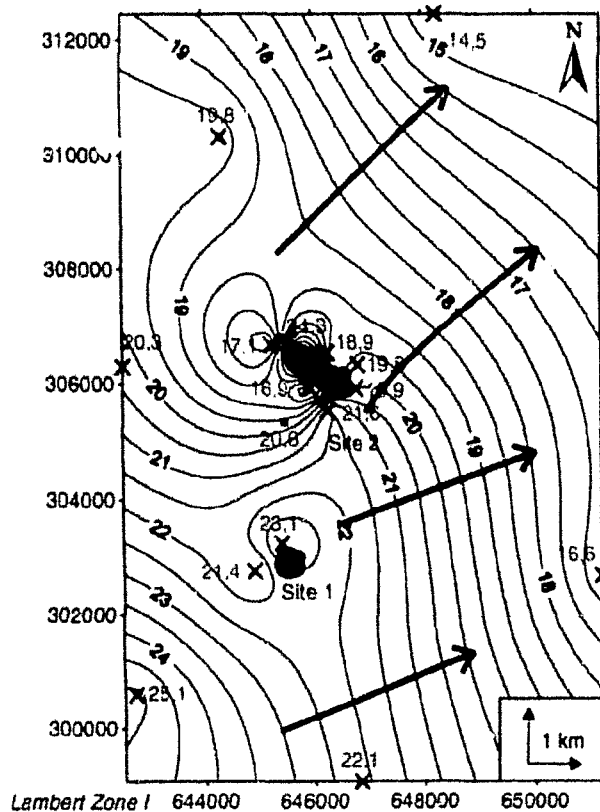
Tab. 3 20 Analyses effectuées sur les différents échantillons liquides récoltés

localisation	Référence	Profondeur (en m) par rapport au sol	Côte piézométrique (m. NGF)	pH	T° (en °C)	Eh (en mV)	conductivité (en $\mu\text{S cm}^{-1}$ )
Amont Site 1	SHPZ2BIS SHPZ2	13,56		7,62	12,5	428	1250
		12,41	21,4	6,76	12,2	336	1540
Aval Site 1	SHPZ1 SHS3 SHS4	9,85	23,1	6,93	11,6	365	2070
		11,00		7,11	12,0	-	3220
		15,87		8,01	13,4	-	2730
Amont Site 2	OIGPZ7 OIGF10	10,41	21,6	7,06	12,6	250	915
		9,06	16,9	7,41	12,3	-43	454
Latéral Site 2	OIGPZ4 OIGPZ6	8,85	17,1	7,29	11,7	-96	665
		9,23	19,9	6,85	11,7	9	2350
Aval Site 2	OIGPZ2 OIGPZ5 OIGPZ1	2,65	24,3	7,12	10,7	480	1603
		12,25	19,8	6,94	11,7	-61	1380
		7,05	18,9	6,91	12,3	-13	881
Piézomètres extérieurs	AUBPZ1	6,52	16,6	7,50	11,6	350	513
	CARF1	5,90	19,8	7,24	12,1	379	1406
	COUPZ5	6,62	20,3	6,65	11,8	212	975
	DROPZ3	13,30	25,1	6,66	13,4	-100	1411
	ESQPZ2	18,79	22,1	7,02	10,8	522	713
	HUCF1	18,02	14,5	8,21	11,8	506	541
	THUF2	-	-	7,43	14,6	495	1145

Tab. 3 21 Mesures in situ des paramètres hydrochimiques

Les relevés piézométriques effectués lors de la campagne d'échantillonnage confirment l'écoulement général des eaux de la nappe de la Craie vers le Nord-Est suivant un faible gradient hydraulique (0,8 ‰) (Fig. 3.18). Localement, ce schéma général d'écoulement peut être affecté par l'existence :

- des terrils susceptibles de poinçonner la nappe,
- de forages rabattant localement la nappe,
- de recharge forcée dans les bassins de décantation qui se trouvent aux abords des terrils.



- X Côte piézométrique mesurée (m. NGF)
- Côte de la surface des eaux du canal à grand gabarit de la Deûle (m. NGF)
- || Courbes isopièzes (m. NGF)
- Lignes d'écoulement

Fig. 3.18 : Carte piézométrique réalisée au niveau des sites d'étude.

La comparaison des niveaux piézométriques mesurés lors de la présente étude avec ceux établis en 1965 par Cottez et Dassonville souligne l'existence d'une remontée de la surface piézométrique de l'ordre de 10 m. Cette remontée reflète la diminution des volumes pompés dans la dépression d'Orchies, au cours des dernières années, et traduit un comblement partiel de la dépression

piézométrique. Dans la zone d'étude, cette remontée tend à établir une continuité hydraulique entre la nappe et le réseau hydrographique de surface (artificiel ou non).

#### 1.4.2 - Analyses chimiques (éléments majeurs et éléments traces)

Les eaux souterraines et les autres prélèvements liquides effectués ont donné lieu à des analyses chimiques (éléments majeurs et traces) réalisées par ICP et ICP-MS au Service de Chimie Analytique du Centre de Recherches en Pétrographie et Géochimie de Vandoeuvre-les-Nancy (Tab. 3.22 et 3.23).

##### *Eaux souterraines*

On observe un net enrichissement en sulfates des eaux de la nappe de la Craie entre l'amont (de 30 à 310 mg.l<sup>-1</sup>) et l'aval (de 50 à 1500 mg.l<sup>-1</sup>) hydraulique des terrils. Une augmentation des concentrations en magnésium, calcium et bicarbonates est également visible à l'aval des deux sites.

Pour la majeure partie des éléments traces analysés, on ne constate pas d'enrichissement sensible entre l'amont et l'aval des deux terrils, le comportement des différents éléments semble varier d'un site à l'autre sans qu'une cohérence d'ensemble puisse être déterminée. On peut toutefois remarquer un enrichissement en strontium entre l'amont et l'aval pour les deux sites d'étude.

L'échantillon du forage de Vimy a été comparé aux échantillons prélevés à l'amont et à l'aval des sites (Fig. 3.19 à 3.22) et aux échantillons prélevés à l'extérieur des sites mais dans le bassin minier (Fig. 3.23 et 3.24).

On constate que les échantillons prélevés à l'aval des sites (Fig. 3.21 et 3.22) sont très enrichis en sulfates par rapport à l'échantillon prélevé à l'extérieur du bassin minier (Vimy) ; on peut également observer un enrichissement de ces eaux en Mg, en Ca, en Na ainsi qu'en Sr. L'échantillon SHS3 (bassin à cendres situé à l'aval du site 1) présente une légère augmentation en K, en Ni et en Zn par rapport à l'échantillon de référence

On peut également constater l'existence d'un « bruit de fond » géochimique dans le bassin minier puisque les échantillons prélevés à l'extérieur des sites mais dans le bassin minier montrent des teneurs globalement plus élevées que l'échantillon de Vimy notamment en Mg, Ca, Na (sauf pour Esq et Huc), K et SO<sub>4</sub> mais également en Sr (et Ni mais de façon beaucoup moins nette). Ce « bruit de fond » se retrouve également pour les échantillons prélevés à l'amont des sites (Fig. 3.19 et 3.20) avec des concentrations en Mg, Ca, Na, SO<sub>4</sub> ainsi qu'en Sr et Zn plus élevées que pour l'échantillon de Vimy.

### Autres prélèvements liquides

La comparaison des échantillons prélevés dans les mares temporaires avec les analyses d'eaux de pluie (Fig. 3.25 et 3.26) montre pour OIGMar 1 et 2 un net enrichissement en SO<sub>4</sub> (avec des teneurs proches de 1400 mg. l<sup>-1</sup>), Na (1000 mg. l<sup>-1</sup>) et Sr ainsi qu'un léger enrichissement en Mg, Ca et Cl tandis que les teneurs en Zn des eaux prélevées dans ces mares sont appauvries par rapport aux eaux de pluie.

L'échantillon OIGMar3 montre le même comportement vis-à-vis de ces éléments mais de manière beaucoup moins marquée.

L'échantillon prélevé dans l'un des bassins de décantation du site 2 montre un enrichissement en Mg, Ca, Na, K, Cl et SO<sub>4</sub> par rapport aux eaux de pluie échantillonnées avec cependant des teneurs beaucoup moins élevées en SO<sub>4</sub> et Na que celles de OIGMar 1 et 2. L'enrichissement en Sr est ici encore visible et les teneurs en Zn (et en Pb) de cet échantillon apparaissent très légèrement inférieures aux eaux de pluie (Fig. 3.27 et 3.28).

L'échantillon OIGcanal, prélevé dans le canal à grand gabarit de la Deûle présente une teneur en sulfates de 80 mg/l et des teneurs en Pb, Zn et As ainsi qu'en Cd et Sr élevées.

localisation	Référence	Mg <sup>2+</sup> mg/l	Ca <sup>2+</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Si mg/l	Al mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l
Amont Site 1	SHPZ2bis	13,04	154,92	95,96	9,06	62,20	210,00	59,31	365,79	7,50	0,29	0,12	traces
	SHPZ2	13,28	233,02	98,06	6,08	74,30	310,00	48,69	-	7,92	0,32	0,24	0,05
Aval Site 1	SHPZ1	39,18	204,41	227,75	9,74	78,40	670,00	42,05	438,40	8,00	0,29	0,26	traces
	SHS3	135,80	578,62	65,80	52,43	35,80	1500,00	1,77	777,79	6,54	0,98	0,23	0,02
	SHS4	113,20	51,37	435,06	20,30	39,60	735,00	16,37	950,88	3,38	0,07	0,42	0,21
Amont Site 2	OIGPZ7	9,86	116,89	51,65	8,32	54,70	115,00	16,82	322,48	7,25	0,25	1,08	0,10
	OIGF10	6,73	37,72	44,27	8,93	29,40	30,00	0,44	187,57	2,81	1,49	0,00	0,03
Latéral Site 2	OIGPZA	10,01	90,68	56,54	8,00	51,60	33,00	41,16	484,38	8,71	0,26	2,08	0,08
	OIGPZ6	94,31	317,47	135,21	5,90	134,40	755,00	0,44	622,61	13,15	traces	0,35	0,08
Aval Site 2	OIGPZ2	51,71	192,31	88,39	3,21	134,80	235,00	0,44	526,05	7,46	0,12	0,00	traces
	OIGPZ5	32,12	156,75	99,98	8,61	80,90	200,00	0,88	661,56	13,31	0,03	0,00	traces
	OIGPZ1	19,63	120,34	34,32	6,04	40,00	50,00	0,44	-	12,63	0,13	0,18	traces
Piézomètres extérieurs	AUBPZ1	7,23	95,64	44,52	17,89	44,50	78,00	0,88	267,31	8,68	0,08	0,28	0,02
	CARF1	22,08	172,98	90,74	24,02	97,10	245,00	0,88	423,51	7,10	0,10	0,67	0,20
	COUPZ5	11,27	125,81	64,72	6,88	60,10	78,00	26,56	379,36	4,32	0,30	0,14	0,06
	DROPZ3	13,34	164,21	156,36	4,96	60,70	89,00	0,44	762,37	16,50	0,30	0,21	0,03
	ESQPZ2	10,07	111,08	18,78	5,27	34,90	15,00	44,71	323,12	7,87	traces	0,00	traces
	HUCF1	21,88	54,32	13,85	17,41	15,80	19,00	1,32	274,54	9,30	0,02	0,00	0,08
THUF2	21,58	44,56	153,16	17,61	74,50	160,00	2,21	388,47	8,78	0,44	0,23	traces	
Forage Vimy	Vimy	4,27	28,60	26,96	10,66	-	19,80	-	-	6,66	0,01	0,00	0,00
Mares temporaires	OIGMar1	49,56	57,39	1080,00	12,22	52,6	1400	-	-	3,26	0,56	0,35	0,00
	OIGMar2	50,66	29,37	1086,00	12,43	51,2	1460	-	-	7,93	0,53	0,18	0,00
	OIGMar3	9,24	27,34	19,49	3,02	9,1	70	-	-	1,19	0,16	0,16	0,01
Bassin Décantation	OIGBD	19,12	44,22	64,34	6,26	64,33	79,11	-	-	0,29	0,08	0,01	0,00
Pluies	OIG270300PL	0,89	10,78	4,59	2,01	7,92	19,63	-	-	0,29	0,21	0,13	0,07
	OIG06.03.00PL	0,25	1,25	1,32	1,86	2,17	4,03	-	-	0,26	0,31	0,11	0,02
Canal	OIGCanal	8,00	130,00	44,10	9,20	48,39	85,82	-	-	2,29	0,27	0,12	0,04

Tab. 3.22 : Teneurs en éléments majeurs mesurées sur les eaux souterraines et les autres prélèvements liquides (Mares temporaires, bassin de décantation, pluies et canal).

Localisation	Référence	As ppb	Cd ppb	Co ppb	Cr pph	Cu ppb	Mo ppb	Ni ppb	Pb ppb	Sr ppb	U ppb	V ppb	Zn ppb
Amont-site 1	SHPZ2bis	0.4	0.0	0.4	10.0	1.9	0.5	9.4	0.3	503.1	1.3	0.3	15.2
	SHPZ2	0.5	0.0	9.4	1.1	2.8	0.7	28.4	1.8	642.5	1.4	0.8	16.8
Aval-site 1	SHPZ1	0.7	0.0	0.8	1.3	2.5	0.4	20.0	0.3	538.6	2.3	0.4	19.3
	SHS3	0.4	0.8	0.5	2.4	1.9	10.5	76.9	0.0	3131.0	25.8	0.5	167.3
	SHS4	1.2	0.1	0.5	5.7	3.7	1.0	9.0	0.6	629.8	0.4	1.4	10.6
Amont-site 2	OIGPZ7	1.2	0.0	0.8	0.8	0.3	0.6	8.4	0.4	417.8	0.7	0.2	7.3
	OIGF10	0.0	0.0	0.2	0.4	0.4	1.5	4.6	0.2	260.3	0.0	0.2	29.1
Lateral-site 2	OIGPZ4	1.2	0.0	0.3	0.8	0.2	0.5	6.3	0.5	405.2	0.0	0.4	10.2
	OIGPZ6	0.8	0.0	0.9	1.7	1.3	0.3	10.0	0.0	5542.5	2.5	0.6	4.0
Aval-site 2	OIGPZ2	0.2	0.0	0.2	1.8	1.4	0.5	4.2	0.2	1573.5	8.5	0.7	6.6
	OIGPZ5	0.2	0.0	0.3	1.2	0.4	0.2	6.5	0.0	2698.7	0.4	0.2	5.6
	OIGPZ1	0.4	0.0	0.2	0.6	0.3	0.2	5.1	0.1	2267.3	0.0	0.1	5.1
Piézomètres extérieurs	AUBPZ1	3.3	0.1	15.7	0.5	1.3	3.2	47.6	0.8	541.8	1.8	2.1	11.4
	CARF1	0.5	0.1	33.1	1.5	2.7	1.6	25.0	0.3	1511.9	2.4	0.3	8.3
	COUPZ5	0.5	0.0	3.5	0.9	1.2	0.3	11.3	0.2	327.2	1.6	0.4	10.9
	DROPZ3	2.7	0.0	1.0	2.6	0.6	0.7	8.4	0.0	587.7	0.0	0.2	17.0
	ESQPZ2	0.1	0.0	1.0	1.1	0.9	0.4	8.0	0.2	343.4	1.1	0.6	12.1
	HUCF1	0.6	0.0	1.6	0.6	0.5	1.1	6.0	0.1	1544.2	0.1	0.3	2.8
	THUF2	0.2	0.0	0.0	0.6	2.4	0.0	0.4	0.5	2883.6	0.0	0.3	4.3
Forage Vimy	Vimy	0.0	1.0	0.0	5.0	0.6	0.0	7.0	0.0	628.0	0.0	14.7	0.0
Mares temporaires	OIGMar1	0.7	0.0	0.1	7.5	11.3	0.2	0.0	0.8	1423.8	3.7	0.3	12.5
	OIGMar2	0.7	0.0	0.0	7.2	8.9	0.2	0.0	0.0	579.1	3.1	0.3	0.0
	OIGMar3	0.2	0.0	0.2	0.5	8.6	0.1	0.6	1.0	154.8	0.3	0.2	53.4
Bassin Décantation	OIGBD	0.4	0.1	0.2	1.3	5.5	4.7	0.0	2.6	451.1	0.4	0.4	70.6
Pluies	OIG270300PL	0.6	0.8	0.1	1.2	12.3	0.1	1.5	2.4	33.2	0.0	0.5	98.5
	OIG06 03 00PL	0.0	0.7	0.2	0.3	1.0	0.0	0.4	2.8	7.6	0.0	1.0	77.5
Canal	OIGCanal	2.6	10.2	0.6	1.2	4.1	1.1	0.0	12.3	385.7	0.7	1.2	91.9

Tab. 3.23 : Teneurs en éléments traces mesurées sur les eaux souterraines et les autres prélèvements liquides (Mares temporaires, bassin de décantation, pluies et canal).

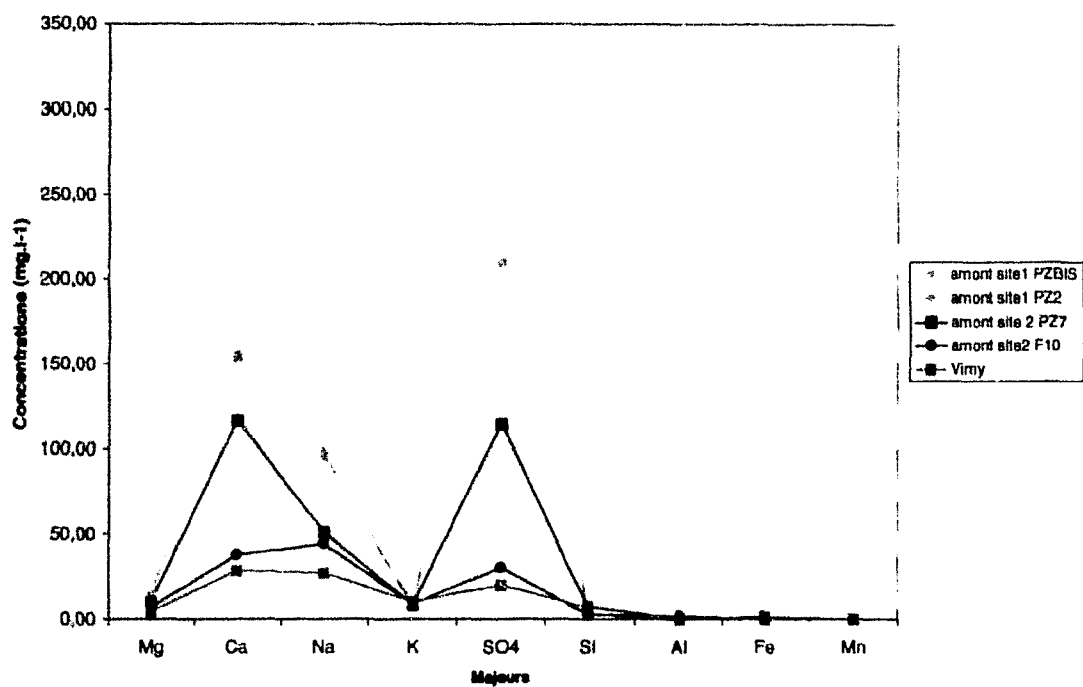


Fig. 3.19 : Comparaison entre les teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés dans les piézomètres situés à l'amont des sites et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy.

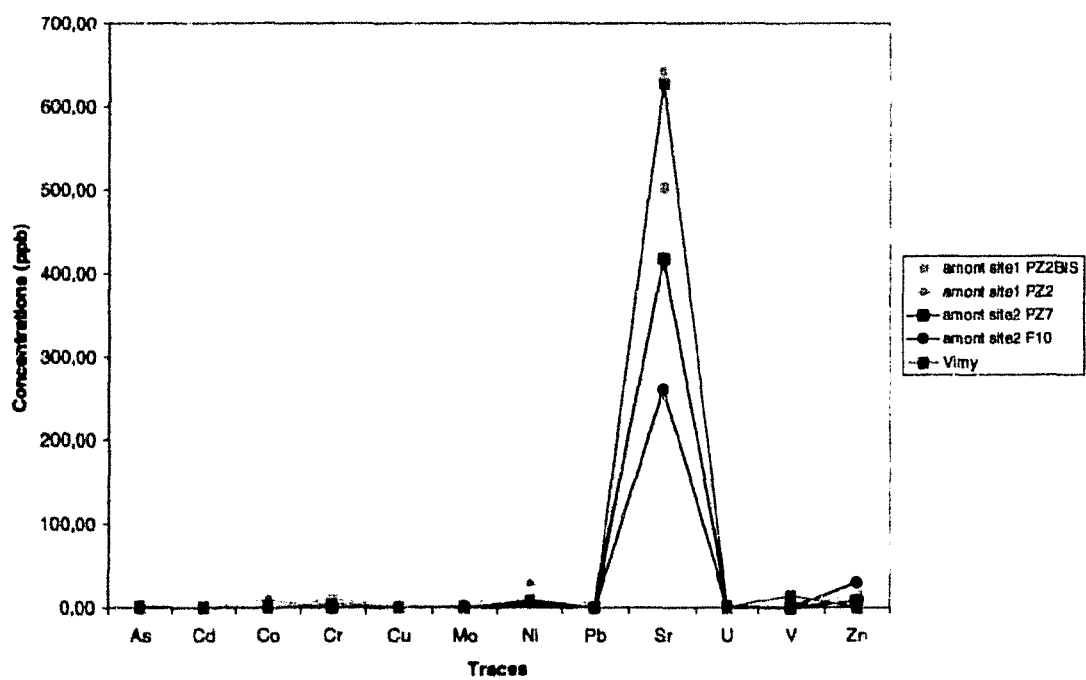


Fig. 3.20 : Comparaison entre les teneurs en éléments traces des échantillons prélevés dans les piézomètres situés à l'amont des sites et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy.



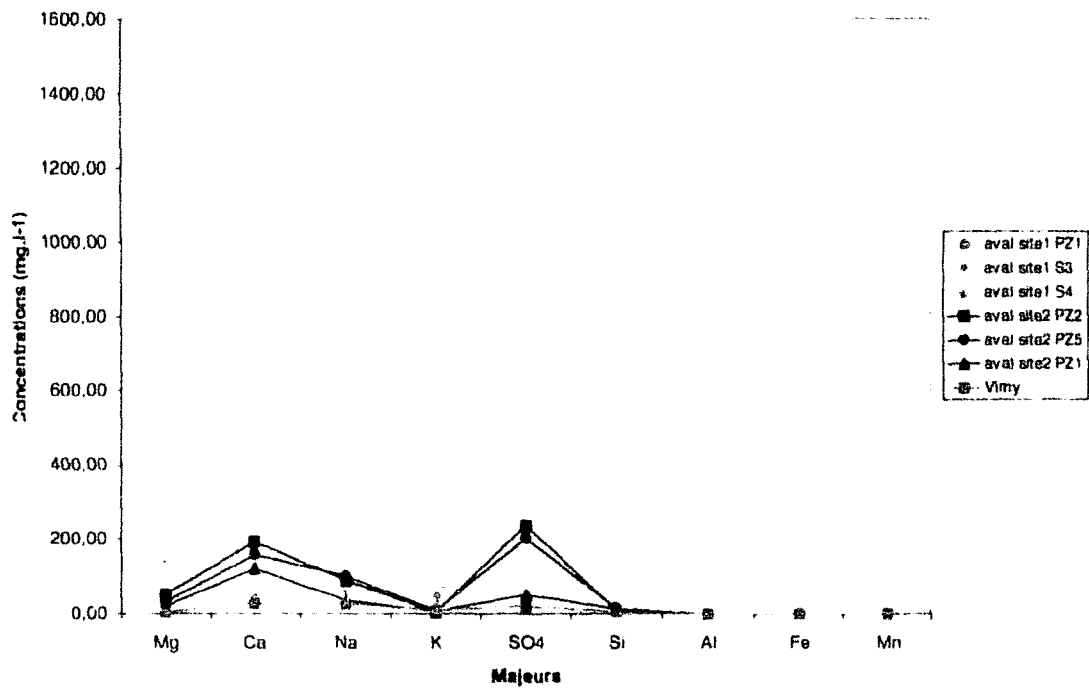


Fig. 3.21 : Comparaison entre les teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés dans les piézomètres situés à l'aval des sites et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy.

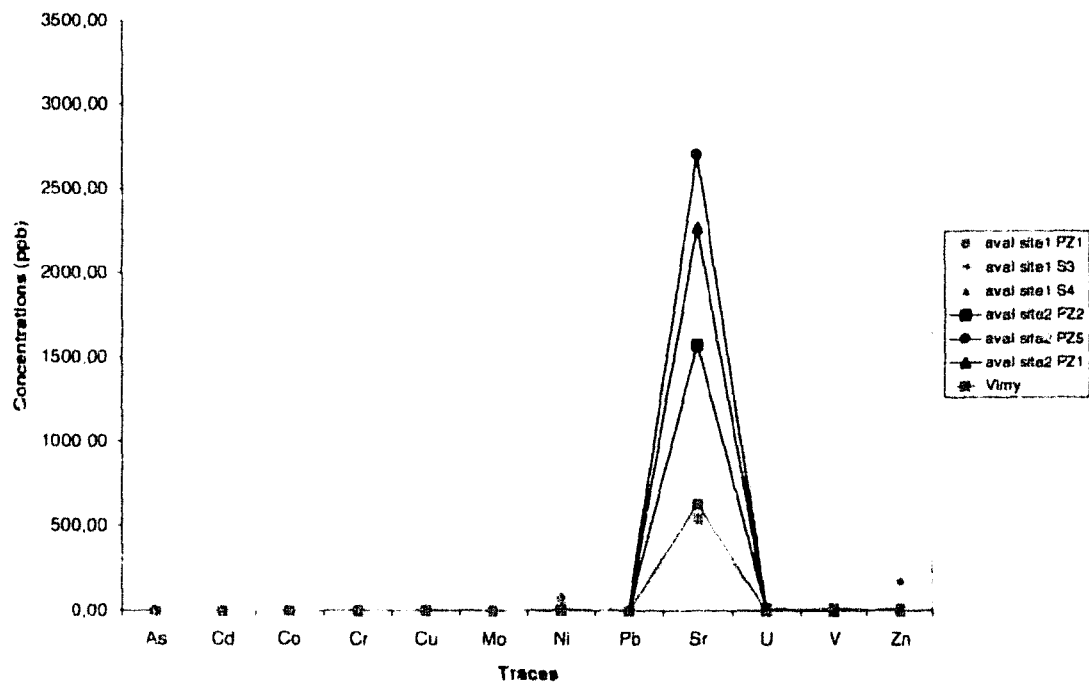


Fig. 3.22 : Comparaison entre les teneurs en éléments traces des échantillons prélevés dans les piézomètres situés à l'aval des sites et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy.

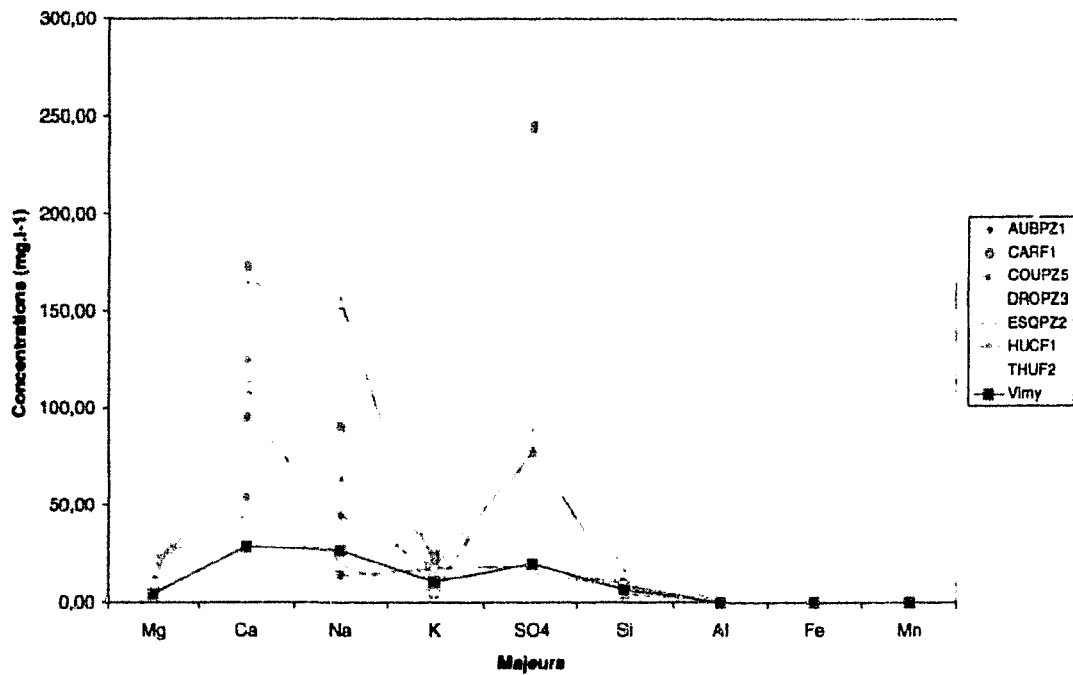


Fig. 3.23 : Comparaison entre les teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés dans les piézomètres extérieurs et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy.

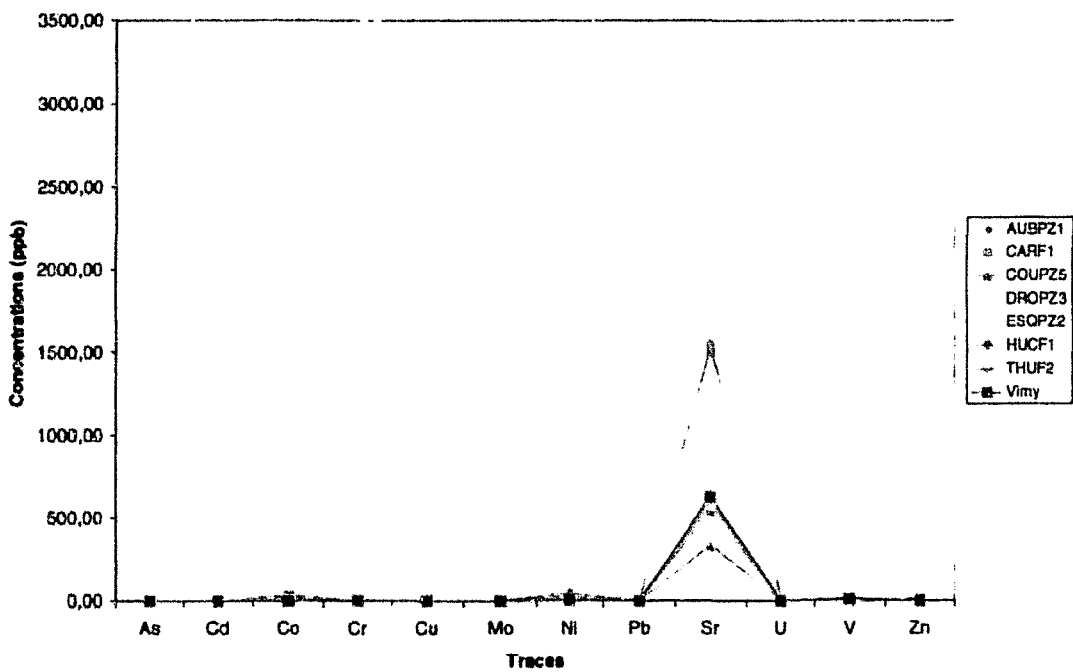


Fig. 3.24 : Comparaison entre les teneurs en éléments traces des échantillons prélevés dans les piézomètres extérieurs et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy.

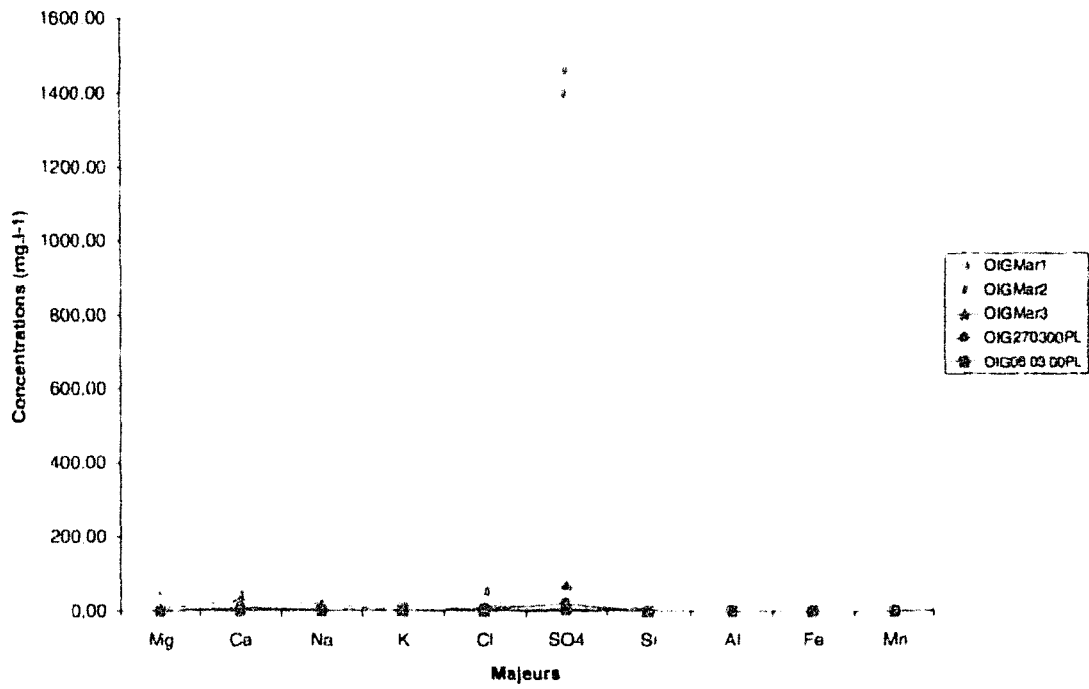


Fig. 3.25. Comparaison entre les teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés dans les mares temporaires du site 2 et les teneurs des échantillons d'eau de pluie prélevés sur ce site.

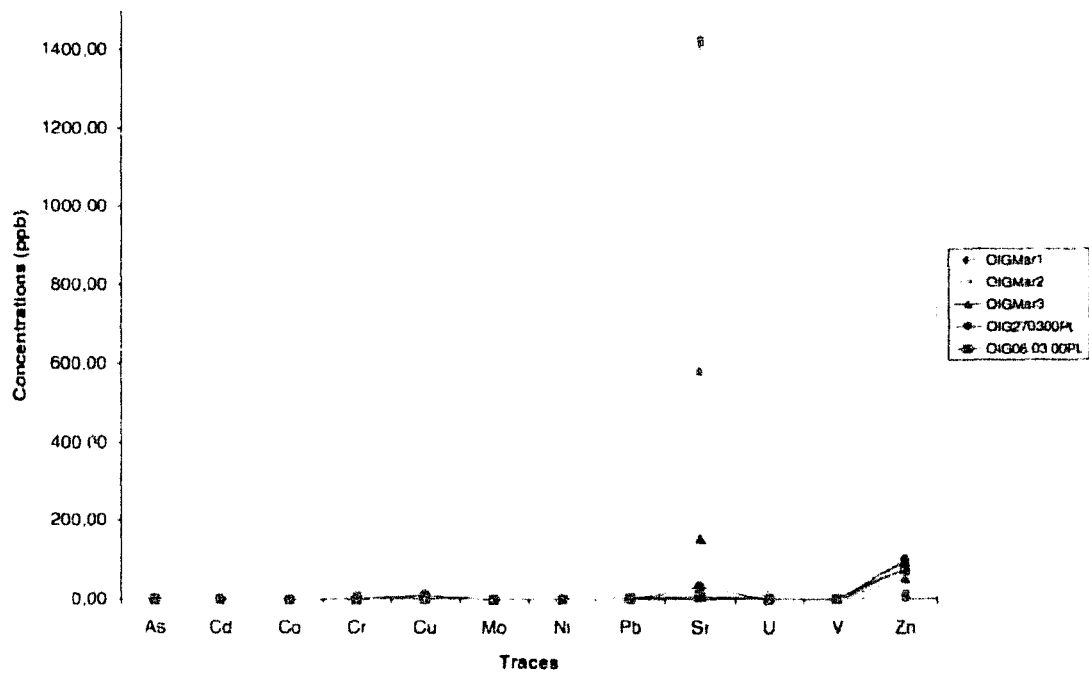


Fig. 3.26. Comparaison entre les teneurs en éléments traces des échantillons prélevés dans les mares temporaires du site 2 et les teneurs des échantillons d'eau de pluie prélevés sur ce site.

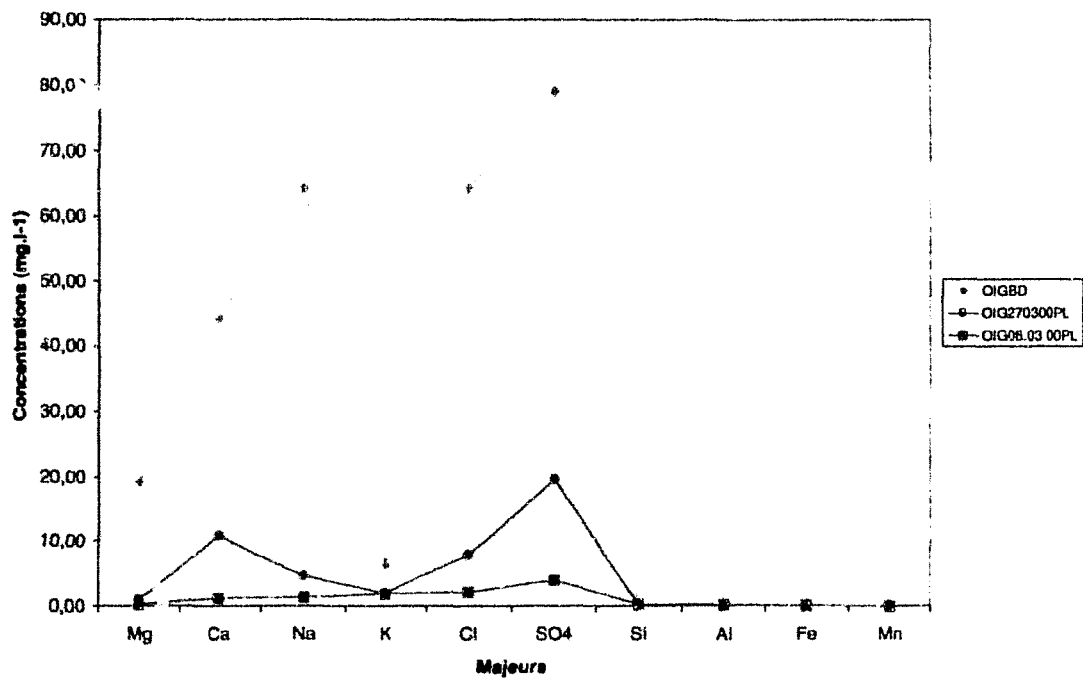


Fig. 3.27 : Comparaison entre les teneurs en éléments majeurs de l'échantillon prélevé dans l'un des bassins de décantation du site 2 et les teneurs des échantillons d'eau de pluie prélevés sur ce site.

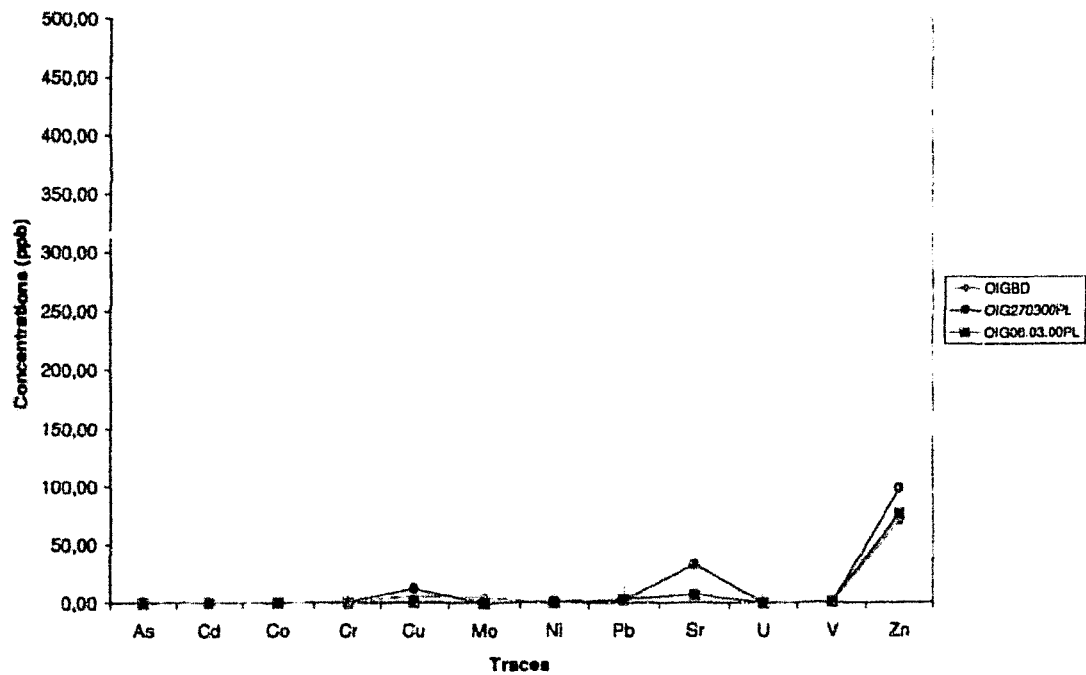


Fig. 3.28 : Comparaison entre les teneurs en éléments traces de l'échantillon prélevé dans l'un des bassins de décantation du site 2 et les teneurs des échantillons d'eau de pluie prélevés sur ce site.

### 1.4.3 - Analyses isotopiques

Les eaux souterraines ont également donné lieu à des analyses isotopiques ( $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau,  $\text{A}^{14}\text{C}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  du Carbone Inorganique Total Dissous -CITD-,  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  des sulfates dissous) effectuées au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique de l'université Paris XI-Orsay (Tab. 3.24). Les protocoles analytiques observés sont ceux décrits par Epstein et Mayeda (1953), Coleman *et al* (1982), McCrea (1950), Thode *et al* (1961) et Shakur (1982). Les résultats sont reportés selon la notation "δ" conventionnelle, déviation en part pour mille (‰) par rapport au VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) pour l'eau et l'oxygène des sulfates, au VPDB (Vienna American Belemnite from the Pee Dee Formation, Caroline du Nord, USA) pour le carbone, et au CDT (Canyon Diablo Troilite, Nouveau Mexique, USA) pour le soufre. Les erreurs associées au  $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau}}$ ,  $\delta^2\text{H}_{\text{eau}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CITD}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sulfate}}$ ,  $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$  sont respectivement de  $\pm 0,2$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 0,1$ ,  $\pm 0,5$ , et  $\pm 0,3$  ‰. Les activités  $^{14}\text{C}$  ont été mesurées par scintillation liquide (université Paris XI) ou par AMS (Acceleration Mass Spectrometry : sources graphites, université Paris XI, et mesures au Tandem, CNRS-CEA Gif sur Yvette) et sont exprimées en pour-cent de carbone moderne (pCm).

Localisation	Reference	$\delta^{18}\text{O}$ Sulfates (‰ vs VSMOW)	$\delta^{34}\text{S}$ (‰ vs CDT)	$\text{A}^{14}\text{C}$ pCm	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ eau (‰ vs VSMOW)	$\delta^2\text{H}$ (‰ vs VSMOW)
Amont Site 1	SHPZ2	3,2	-1,1	-	-	-7,18	-51,2
	SHPZ2BIS	7,0	-3,1	72,6	-13,40	-7,08	-50,7
Aval Site 1	SHPZ1	-0,9	-3,9	61,6	-14,43	-6,8	-49,5
	SHS3	6,9	-2,8	54,6	-13,21	-6,96	-48,3
	SHS4	10,0	6,1	49,8	-8,93	-5,17	-43,2
Amont Site 2	OIGPZ7	11,3	1,1	-	-	-6,51	-47,7
	OIGF10	-	-	67,3	9,83	-6,04	-44,3
Latéral Site 2	OIGPZ4	-	-	-	-	-	-
	OIGPZ6	6,7	-20,3	107,4	-16,35	-7,35	-48,5
Aval Site 2	OIGPZ2	10,4	0,7	61,7	-8,93	-5,89	-43,8
	OIGPZ5	6,9	3,7	32,7	-8,08	-6,48	-45,6
	OIGPZ1	-	-	34,6	-11,86	-6,55	-46,8
Piézomètres extérieurs	AUBPZ1	-	-	-	-17,02	-6,46	-44,6
	CARF1	6,9	-9,8	58,0	12,59	-6,29	-45,1
	C'OUPZ5	-	-	73,5	-11,81	-6,12	-46,8
	DRCPZ3	-	-	26,4	-14,02	-6,55	-47,2
	ESQPZ2	2,4	-2,3	60,7	-12,87	-6,8	-50,2
	HUCF1	-	-	60,2	-11,64	-6,55	-47,3
Mares temporaires	GHUF2	9,9	-10,4	0,9	-1,60	-7,86	-56,1
	OIGMar1	-	-	-	-	-	-
Mares temporaires	OIGMar2	-	-	-	-	-	-
	OIGMar3	-	-	-	-	-	-
Bassin Décantation	OIGBD	-	-	-	-	-	-
Plures	OIG270300PL	-	-	-	-	-	-
	OIG06.03.00PL	-	-	-	-	-	-
Canal	OIGCanal	-	-	77,7	-10,87	-	-

Tab 3.24 - Analyses isotopiques réalisées sur les eaux échantillonnées

L'intégralité des mesures réalisées est présentée dans le tableau mais nous nous intéresserons plus particulièrement dans la suite du texte aux résultats obtenus pour le  $^{34}\text{S}$ , l' $^{18}\text{O}$  des sulfates et le  $^{14}\text{C}$ .

On observe ainsi que les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  se situent dans une gamme de valeurs allant de  $-3,9\text{‰}$  à  $6,1\text{‰}$  en amont et aval des sites d'étude, une des valeurs présente cependant un écart important, il s'agit du point de prélèvement OIGPZ6 qui montre un  $\delta^{34}\text{S}$  de  $-20,3\text{‰}$ . Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  des sulfates s'échelonnent quant à elles entre  $-0,9$  et  $11,3\text{‰}$

On observe également que les activités  $^{14}\text{C}$  mesurées sont plus faibles en aval qu'en amont des sites d'études : ainsi, pour le site 1, d'une valeur de  $72,6\text{ pCm}$  en amont, on passe à des valeurs s'échelonnant entre  $49,8$  et  $61,6\text{ pCm}$  en aval.

## **1.5 – Variations qualitatives et quantitatives des précipitations à proximité des sites étudiés**

Afin de déterminer la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer sur les terriils ou à proximité, des calculs de pluie efficace ont été réalisés à partir des données Météo-France de la station de Loos-en-Gohelle sur une période de 10 ans (1989-1999). Cette station a été préférée à celle de Loison-sous-Lens en raison du manque de données existant sur certaines périodes dans le cas de cette dernière.

### 1.5.1 – Calculs de Pluie efficace

Le bilan en eau est la balance des apports et des sorties sur une période de temps déterminée, correspondant généralement à une année. Il est calculé à partir des valeurs mensuelles : température moyenne mensuelle (moyenne des températures maximales et minimales de chaque jour du mois aux stations déterminées), de la lame mensuelle précipitée et de l'évapotranspiration potentielle mensuelle (méthode de Thornthwaite)

L'excédent EXC correspond à la part des précipitations ayant ruisselé ou s'étant infiltrées :

$$\text{EXC} = \text{I} + \text{R}$$

I : Infiltration

R : Ruissellement

L'ETP (Evapotranspiration Potentielle) dont l'on peut déduire l'ETR (Evapotranspiration Réelle), est calculée par la formule de Thornthwaite :

$$\text{ETP} = 16\text{L} (10\text{T}/\text{T})^3$$

T : Température moyenne du mois considéré (° C)

$$a : 6,75.10^{-7}I^3 - 7,71.10^{-5}I^2 + 1,79.10^{-2}I + 0,49239$$

I : indice thermique annuel, somme des 12 indices thermiques mensuels  $i$ , précédant le mois considéré avec  $i = (T/5)^{1,514}$ .

L : coefficient de correction, fonction de la latitude et du mois. Pour notre zone d'étude, voisine de 50 degrés nord, les coefficients mensuels sont les suivants :

Janv-	Fév-	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil-	Août	Sept-	Oct-	Nov-	Déc-
0,74	0,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92	0,76	0,70

Tab. 3.25 : Coefficients de correction de Thornthwaite.

Le calcul de l'ETR et de l'excédent d'eau (EXC) disponible pour le ruissellement et l'infiltration est le suivant :

**1<sup>er</sup> cas** : Pluie mensuelle  $P$  supérieure à l'évapotranspiration potentielle ( $P > ETP$ )

$$ETR = ETP$$

$$\text{Si } RFU_{\text{initiale}} < RFU_{\text{max}}, EXC = P - ETP - (RFU_{\text{max}} - RFU)$$

$$\text{Si } RFU_{\text{initiale}} = RFU_{\text{max}}, EXC = P - ETP$$

(RFU max : lame d'eau maximale pouvant être stockée par le sol)

**2<sup>ème</sup> cas** : Pluie mensuelle  $P$  égale à l'ETP ( $P = ETP$ ) :

$$ETR = ETP$$

$$EXC = 0$$

**3<sup>ème</sup> cas** : Pluie mensuelle  $P$  inférieure à l'ETP ( $P < ETP$ ) :

$$ETR = P + RFU \rightarrow \text{diminution du stock d'eau (RFU).}$$

$$EXC = 0$$

Les résultats du calcul de pluie efficace réalisé pour la station de Loos-en-Gohelle sont donnés en Tab.3.26 et en figure 3.29.

Année	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Pluie (mm)	528	625	566	743	763	749	637	565	523	820	782
Peff (mm)	140	143	74,6	132	217	173	245	38,9	72,4	234	223

Tab. 3.26 : calcul des pluies efficaces à la station de Loos-en-Gohelle pour la période 1989-1999

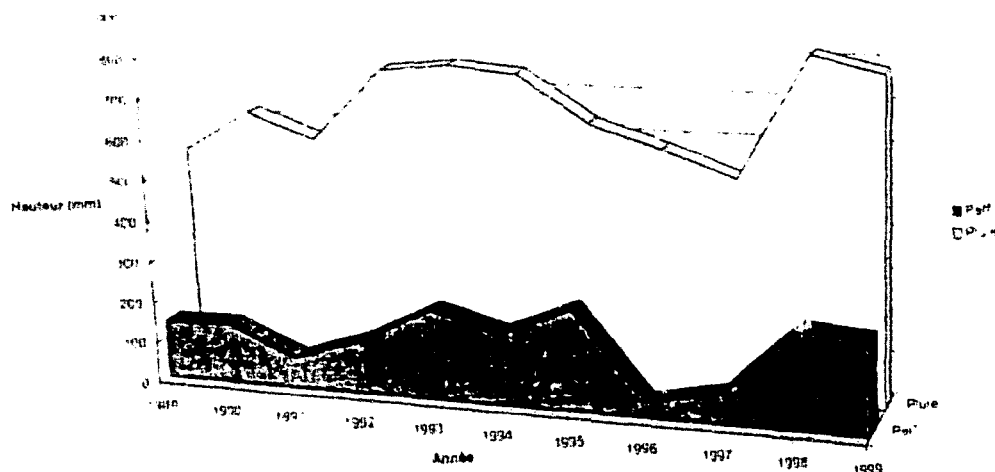


Fig. 3.29 : Bilan hydrique (en mm) à la station de Loos-en-Gohelle

On observe sur ce bilan hydrique annuel une variation de la hauteur des pluies efficaces (de 70 à 245 mm) qui suit globalement la variation des précipitations (523 à 820 mm).

### 1.5.2 – Variations du chimisme des eaux de pluie

En plus de l'échantillonnage des pluies sur le site, une étude de la chimie des précipitations et plus particulièrement des teneurs en sulfates et du pH des eaux de pluie a été réalisée pour les communes des deux sites sur une période de 9 ans (grâce aux données du dispositif régional de surveillance de la qualité de l'air géré par la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement Nord-Pas-de-Calais (annexe 2). Les résultats de cette étude sont exposés en Fig. 3.30 et 3.31. On y observe pour le site 1 que les teneurs en sulfates s'échelonnent entre des valeurs minimales de 5 mg/m<sup>3</sup>/jour et des valeurs maximales de 180 mg/m<sup>3</sup>/jour (la moyenne des teneurs maximales étant de 59 mg/m<sup>3</sup>/jour) et que les valeurs de pH se situent entre 3,4 à 9. Pour le site 2, les concentrations en sulfates sont comprises entre 3 et 50 mg/m<sup>3</sup>/jour et les valeurs de pH vont de 3,4 à 9,9.





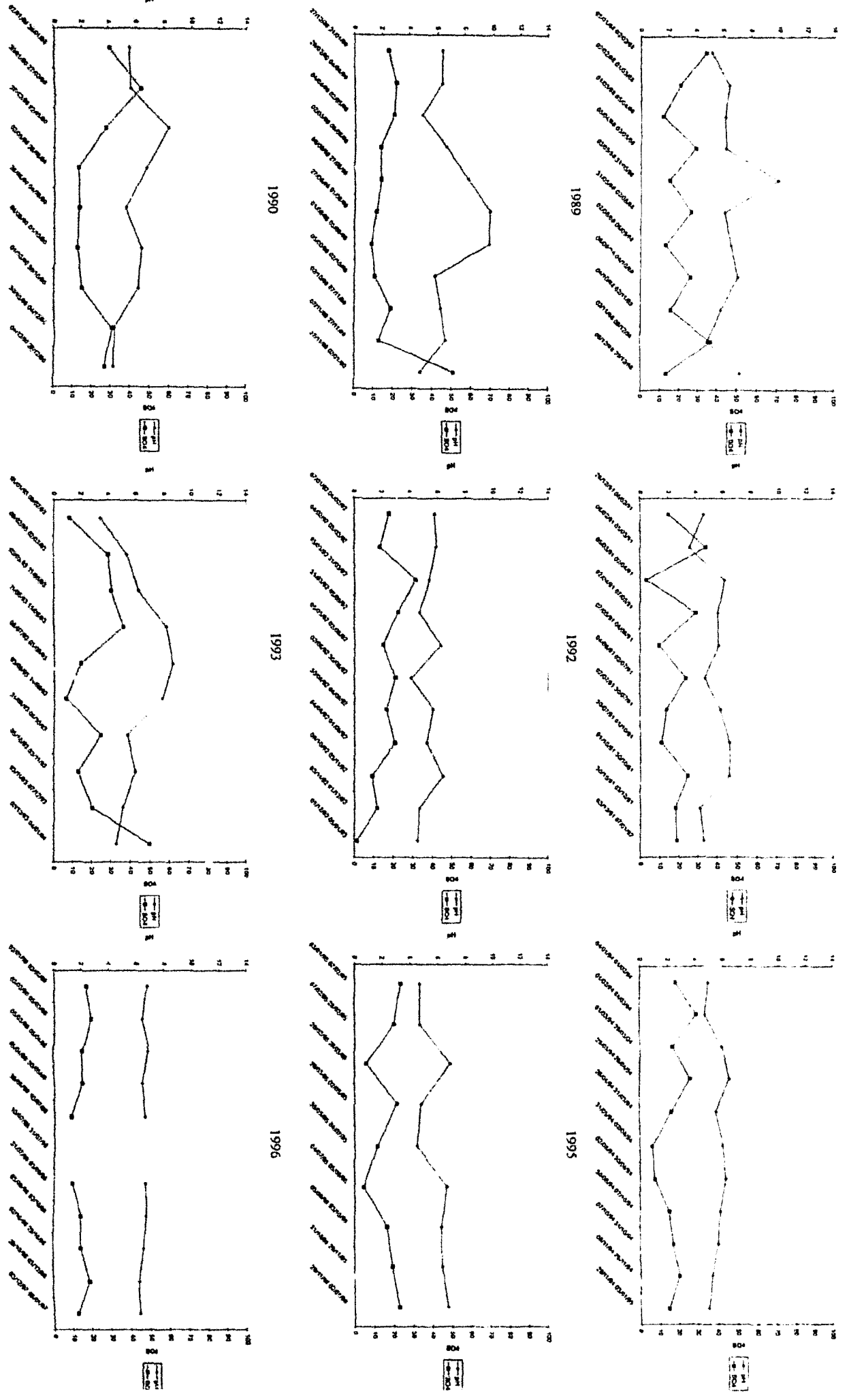


Fig. 3.31 : valeurs de pH et concentrations en sulfates de eaux de pluie récoltées à Oignies entre 1988 et 1996.



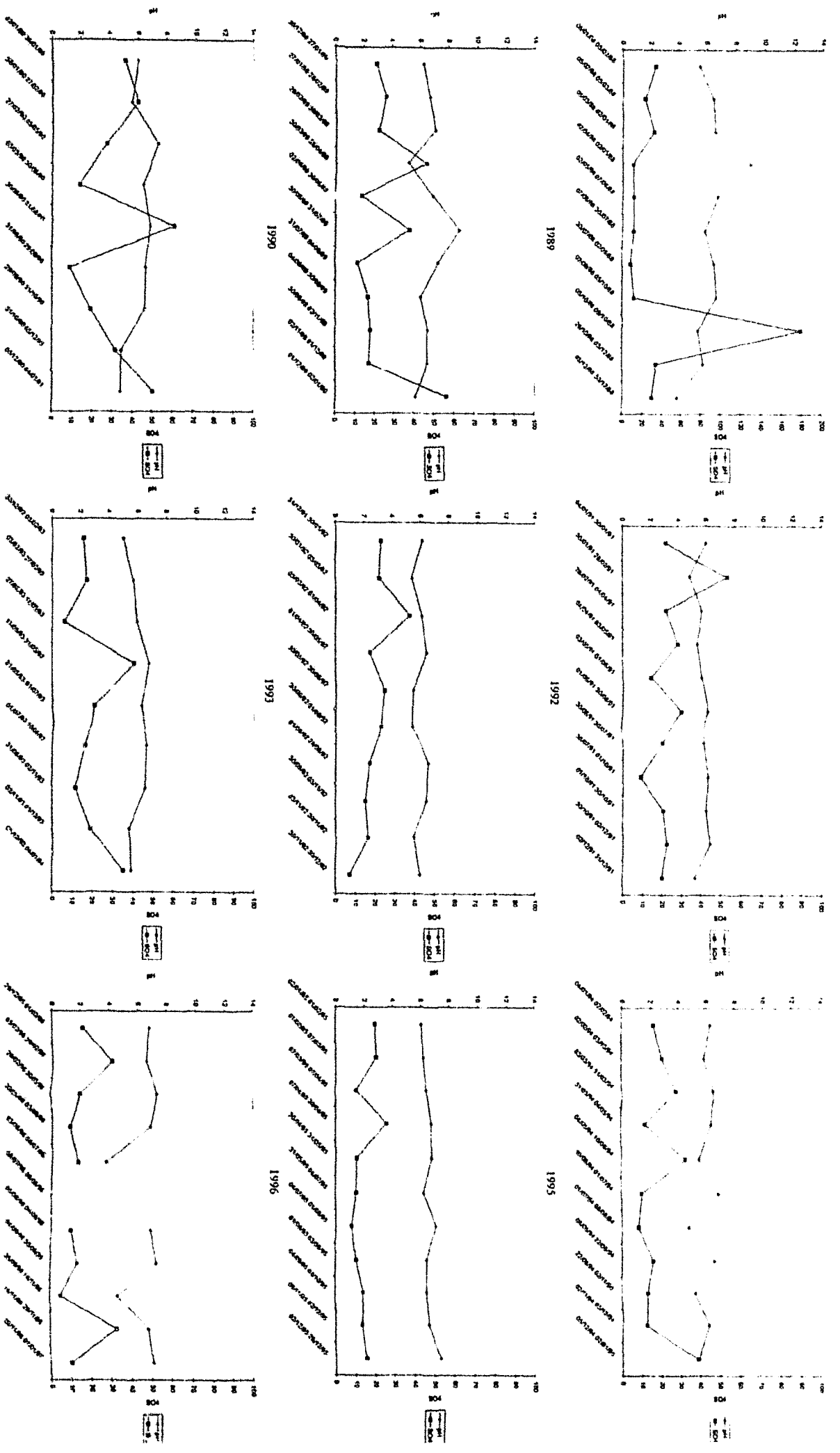


Fig. 3.10 : valeurs de pH et concentrations en sulfates des eaux de pluie récoltées à Héribert-Beaumont entre 1988 et 1996.



## **1.6 - Essais de lixiviation et mesures du potentiel d'acidification et de neutralisation des stériles houillers**

Différents essais de lixiviation ont été réalisés sur des échantillons prélevés sur le site 2, d'une part sur les schistes grossiers provenant du terril et d'autre part sur des fines issues du bassin de décantation B. Les stériles ont été échantillonnés au lieu des dernières « mises à terril » (cf. Fig. 2.6 : « derniers schistes noirs mis en dépôt ») au sud-est de la friche. Quinze kg des deux types de matériaux ont été échantillonnés puis quartés afin d'obtenir des échantillons représentatifs de la masse totale et comparables entre eux. Ceci était rendu nécessaire en raison du caractère très hétérogène des résidus. Deux des échantillons quartés (pour les stériles grossiers mis à terril et les résidus de bassin de décantation) ont été analysés en terme d'éléments majeurs et d'éléments traces, une analyse minéralogique de ces échantillons a également été réalisée.

### 1.6.1 – Mise en contact des stériles houillers avec des solutions de pH basique à acide

#### *1.6.1.1 - Principes et protocole :*

L'objectif de ce type d'essais est de déterminer l'influence du pH sur la « lessivabilité » des constituants du matériau testé. Pour ce faire, les échantillons sont mis en présence d'une quantité connue d'acide ou de base pendant 48 h sous agitation et les éluats sont ensuite analysés.

Le protocole utilisé dans la présente étude est le suivant :

Pour ces essais, le matériau est préalablement séché et broyé (< 1 mm).

Le test de lixiviation se fait en trois étapes, l'étape 1 correspond à l'ajout d'acide ou de base à l'échantillon testé et se termine à t0+4h avec une mesure de pH ; l'étape 2 de t0+4h à t0+44h est la période d'équilibrage et l'étape 3 de t0+44h à t0+48h permet la vérification des conditions d'équilibre ; les valeurs de pH sont également mesurées à la fin des étapes 2 et 3 ; si la différence entre ces deux valeurs excède 0,3 unité pH on considère que les conditions d'équilibre n'ont pas été atteintes.

Le test doit couvrir la gamme pH 4 à pH 12 (valeur la plus basse < 4 et valeur la plus haute > 12) avec au moins 8 valeurs de pH espacées régulièrement entre ces deux extrêmes (ceci incluant le pH naturel donc sans ajout d'acide et de base).

Dans cette étude la masse d'échantillon pour l'essai était de 15 g et le volume de lixiviant (eau distillée + acide ou base) était de 150 ml soit un rapport liquide sur solide (L/S) de 10 ; nous avons utilisé pour ces tests de l'acide nitrique à 5 mol/l et de la soude à 5 mol/l.

### 1.6.1.2 - Résultats :

- Caractérisation de la fraction solide

#### Chimie

Les résultats des analyses chimiques (éléments majeurs et traces) menées sur des échantillons quartés sont reportés en Tab. 3.12 et 3.13 pour les stériles mis à terril et en Tab. 3.14 et 3.15 pour les résidus de bassin de décantation. On constate que leurs teneurs sont très proches de celles mesurées sur les autres solides et donc de la « moyenne des shales » valeur référence pour ce type de roches.

#### Analyses minéralogiques

Les poudres sur roche totale réalisées sont exposées de la figure 3.32 à la figure 3.37.

Les stériles mis à terril (ST1lix1 à ST3lix1) montrent, comme les autres échantillons prélevés sur le site 2, la présence de quartz, d'argile, de mica et également pour deux des échantillons la présence de sidérite.

Les résidus de bassin de décantation montrent la même composition de base (quartz, argile, mica), les échantillons BD1lix1 et BD3lix1 montrent la présence de traces de calcite et de sidérite, ce qui n'est pas le cas de l'échantillon BD2lix1 qui montre en revanche le pic caractéristique de la pyrite. La présence de ce pic ne témoigne pas forcément de la présence d'une plus grande quantité de pyrite dans l'échantillon (comme en témoignent les teneurs en soufre total de ces échantillons (Tab. 3.9)), ceci peut également être dû à la diffraction du rayon incident sur un grain de pyrite qui donne alors un pic net même si la quantité de pyrite présente n'est pas plus importante que celle contenue dans les autres échantillons.

- Analyses des éluats

Les éluats obtenus après ce test de lixiviation ont été analysés en terme d'éléments majeurs et d'éléments traces par ICP et ICP-MS au Service de Chimie Analytique du Centre de Recherches en Pétrographie et Géochimie de Vandoeuvre-les-Nancy. Les résultats sont exposés dans les tableaux 3.27 et 3.28 et de la figure 3.38 à la figure 3.43. Les références des échantillons ont été données en fonction du type de matériau testé (ST = stériles mis à terril, BD = résidus issus de bassin de décantation) et de la quantité d'acide ou de base ajoutée à la solution (exemple : BD1NaOH correspond à un test effectué sur résidu de bassin de décantation après ajout d'1 ml de soude à 5 mol.l<sup>-1</sup>).

Ref échantillon	Vol acide/base ajouté (ml)	pH à 48h	Mg (mg.l <sup>-1</sup> )	Ca (mg.l <sup>-1</sup> )	Na (mg.l <sup>-1</sup> )	K (mg.l <sup>-1</sup> )	Cl (mg.l <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> (mg.l <sup>-1</sup> )	Si (mg.l <sup>-1</sup> )	Al (mg.l <sup>-1</sup> )	Fe (mg.l <sup>-1</sup> )	Mn (mg.l <sup>-1</sup> )
ST1NaOH	-1	12.2	0.86	1.54	524.30	5.57	9.33	9.84	17.53	5.53	0.60	0.05
ST0,25NaOH	-0.25	11.2	0.86	1.54	104.95	2.39	4.23	27.80	6.35	1.17	0.60	0.05
ST0,1NaOH	-0.1	10.0	0.86	1.54	48.37	3.86	13.90	20.10	2.51	0.82	0.60	0.05
ST0,05NaOH	-0.05	8.9	1.81	2.94	38.85	5.06	4.29	46.05	2.05	0.82	0.60	0.05
STpHnat	0	8.1	3.67	4.56	3.55	5.79	3.62	8.16	2.70	0.82	0.60	0.05
ST0,05HNO <sub>3</sub>	0.05	6.6	12.90	19.17	3.95	9.97	11.05	13.13	3.69	0.82	0.60	0.63
ST0,1HNO <sub>3</sub>	0.1	5.0	19.74	27.54	4.26	12.77	4.38	3.84	7.79	0.82	0.60	3.25
ST0,3HNO <sub>3</sub>	0.3	4.2	45.63	88.33	4.65	16.78	3.66	2.90	15.34	2.13	18.36	11.90
ST0,5HNO <sub>3</sub>	0.5	3.2	64.42	105.46	5.07	23.47	5.47	1.80	26.64	5.78	122.66	13.81
ST3HNO <sub>3</sub>	3	1.6	205.57	170.94	6.25	34.77	1.90	0.96	38.40	36.88	1314.95	24.81

Ref échantillon	Vol acide/base ajouté (ml)	pH à 48h	Mg (mg.l <sup>-1</sup> )	Ca (mg.l <sup>-1</sup> )	Na (mg.l <sup>-1</sup> )	K (mg.l <sup>-1</sup> )	Cl (mg.l <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> (mg.l <sup>-1</sup> )	Si (mg.l <sup>-1</sup> )	Al (mg.l <sup>-1</sup> )	Fe (mg.l <sup>-1</sup> )	Mn (mg.l <sup>-1</sup> )
BD1NaOH	-1	12.4	0.86	1.54	604.02	5.24	5.32	20.94	11.29	4.60	0.60	0.05
BD0,2NaOH	-0.2	10.8	0.86	1.54	92.72	2.38	4.77	20.26	2.29	0.82	0.60	0.05
BD0,05NaOH	-0.05	9.4	1.17	2.71	31.55	4.48	7.01	16.28	2.05	0.82	0.60	0.05
BDpHnat	0	8.5	8.24	15.20	2.84	6.31	6.68	11.48	2.05	0.82	0.60	0.05
BD0,5HNO <sub>3</sub>	0.5	7.0	50.79	296.15	3.70	14.22	9.17	8.11	3.31	0.82	0.60	3.44
BD1HNO <sub>3</sub>	1	5.6	80.06	579.21	3.67	14.61	7.56	7.60	6.17	0.82	0.60	10.99
BD1,5HNO <sub>3</sub>	1.5	3.6	118.78	723.46	4.11	20.89	19.46	7.12	19.23	9.70	158.22	15.97
BD2HNO <sub>3</sub>	2	2.2	131.51	761.51	4.54	28.13	14.40	1.58	32.96	22.49	368.03	19.83
BD3HNO <sub>3</sub>	3	1.4	118.54	776.83	4.52	25.09	5.81	2.38	38.91	29.17	496.23	20.81

les valeurs soulignées en grisé correspondent aux valeurs inférieures à la limite de détection pour lesquels aucune valeur précise n'était donnée. La valeur supérieure de la limite de détection a été préférée à une valeur nulle pour ces échantillons afin de pouvoir réaliser des graphiques donnant les concentrations en échelle logarithmique.

Tab. 3.27 : analyses des éléments majeurs des éluats obtenus par mise en contact des stériles houillers et des résidus de bassin de décantation avec des solutions de pH basique à acide.



Ref échantillon	Vol acide/base ajoutée (ml)	pH à 48h	As µg/l	Ba µg/l	Cd µg/l	Co µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Mo µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Sr µg/l	Th µg/l	U µg/l	V µg/l	W µg/l	Zn µg/l	Zr µg/l
STANCTIN <sub>0</sub> OH	-1	12.2	25.2	0.5	0.2	0.1	2.5	7.8	63.0	0.0	0.5	9.0	0.2	0.1	40.8	422.3	1.9	3.6
STANCT0,25N <sub>0</sub> OH	-0.25	11.2	7.7	3.6	0.2	1.5	1.5	5.8	5.1	1.2	0.2	9.0	<LD	0.1	13.2	1.4	1.9	0.7
STANCT0,1N <sub>0</sub> OH	-0.1	10.0	2.0	2.7	0.2	0.1	0.8	8.5	3.4	2.6	0.3	9.3	<LD	0.2	2.0	0.5	2.2	0.9
STANCT0,05N <sub>0</sub> OH	-0.05	8.9	0.3	7.6	0.2	0.2	0.8	3.5	1.1	0.0	0.3	32.5	<LD	<LD	<LD	<LD	3.3	0.3
STANCTpHnat	0	8.1	0.3	12.9	0.2	0.2	0.8	2.1	0.5	0.4	0.2	52.3	<LD	<LD	<LD	<LD	4.5	0.2
STANCT0,05HNO <sub>3</sub>	0.05	6.6	0.3	45.8	0.2	1.9	0.8	2.1	0.1	3.5	0.2	225.1	<LD	<LD	<LD	0.2	10.4	<LD
STANCT0,1HNO <sub>3</sub>	0.1	5.0	0.3	139.4	1.1	99.4	0.8	10.8	0.1	64.6	1.1	346.9	<LD	0.0	<LD	<LD	180.4	<LD
STANCT0,3HNO <sub>3</sub>	0.3	4.2	0.3	484.3	3.2	282.1	1.5	127.1	0.1	202.4	7.3	932.5	<LD	0.1	<LD	<LD	561.8	<LD
STANCT0,5HNO <sub>3</sub>	0.5	3.2	0.6	1322.6	4.2	368.5	7.3	589.8	0.1	301.7	53.6	1073.8	<LD	1.7	0.9	<LD	965.6	1.6
STANCT3HNO <sub>3</sub>	3	1.6	1.8	2454.9	3.5	326.5	94.9	883.8	0.1	352.7	574.2	1245.4	8.74	11.7	135.1	0.1	946.2	0.5

Ref échantillon	Vol acide/base ajoutée (ml)	pH à 48h	As µg/l	Ba µg/l	Cd µg/l	Co µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Mo µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Sr µg/l	Th µg/l	U µg/l	V µg/l	W µg/l	Zn µg/l	Zr µg/l
BDANCTIN <sub>0</sub> OH	-1	12.4	34.7	7.1	0.2	0.1	7.6	8.8	54.5	0.0	0.2	9.0	<LD	<LD	27.5	200.9	1.9	0.5
BDANCT0,2N <sub>0</sub> OH	-0.2	10.8	2.9	16.1	0.2	0.1	0.9	2.0	9.0	0.4	0.2	9.0	<LD	<LD	3.6	0.5	1.9	0.1
BDANCT0,05N <sub>0</sub> OH	-0.05	9.4	0.3	82.2	0.2	0.1	0.8	3.0	5.6	0.0	0.2	27.8	<LD	0.1	0.5	0.1	1.9	0.2
BDANCTpHnat	0	8.5	0.3	221.4	0.2	0.1	0.8	1.7	2.8	0.0	0.2	139.8	<LD	0.1	0.2	<LD	1.9	0.1
BDANCT0,5HNO <sub>3</sub>	0.5	7.0	0.3	1097.5	0.3	9.4	0.8	1.4	0.5	0.0	0.2	853.1	<LD	0.3	<LD	<LD	6.6	<LD
BDANCT1HNO <sub>3</sub>	1	5.6	0.3	2194.2	3.2	178.9	0.8	2.8	0.1	0.0	0.6	1067.3	<LD	0.1	<LD	<LD	63.1	<LD
BDANCT1,5HNO <sub>3</sub>	1.5	3.6	0.3	9889.5	5.8	298.1	7.7	463.3	0.1	139.7	131.7	1347.1	<LD	0.5	0.1	<LD	599.2	0.1
BDANCT2HNO <sub>3</sub>	2	2.2	0.6	16002.9	6.3	314.9	35.1	856.1	0.1	201.3	678.3	1368.9	0.1	5.3	91.3	<LD	774.4	2.2
BDANCT3HNO <sub>3</sub>	3	1.4	2.1	18658.5	6.4	347.9	57.8	1083.3	0.1	241.3	1387.4	1408.7	2.4	8.7	151.5	0.2	945.5	0.4

les valeurs soulignées en grisé correspondent aux valeurs inférieures à la limite de détection pour lesquels aucune valeur précise n'était donnée. La valeur supérieure de la limite de détection a été préférée à une valeur nulle pour ces échantillons afin de pouvoir réaliser des graphiques donnant les concentrations en échelle logarithmique.

Tab. 3.28 : Analyses des éléments traces des éluats obtenus par mise en contact des stériles houillers et des résidus de bassin de décantation avec des solutions de pH basique à acide.

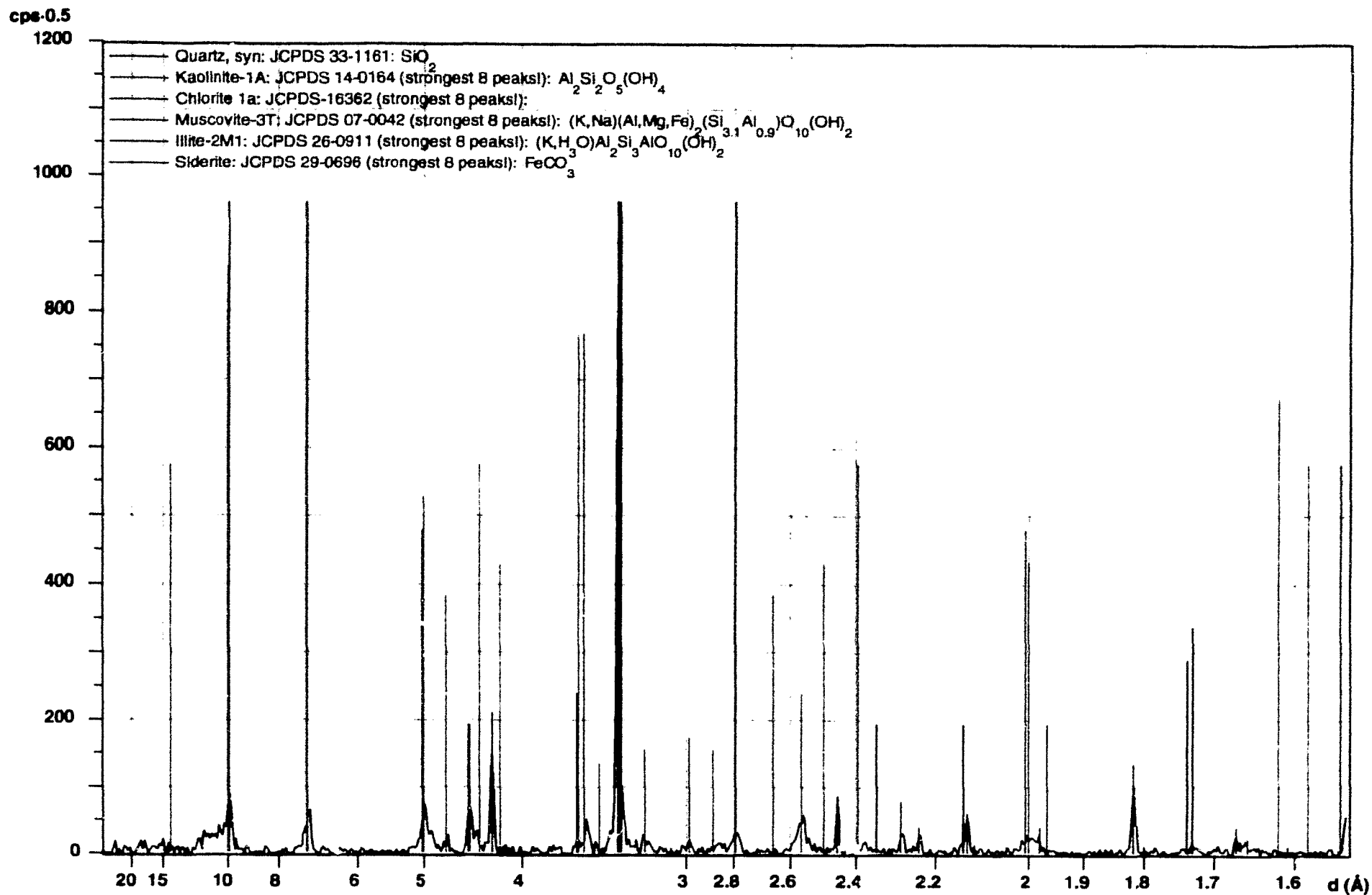
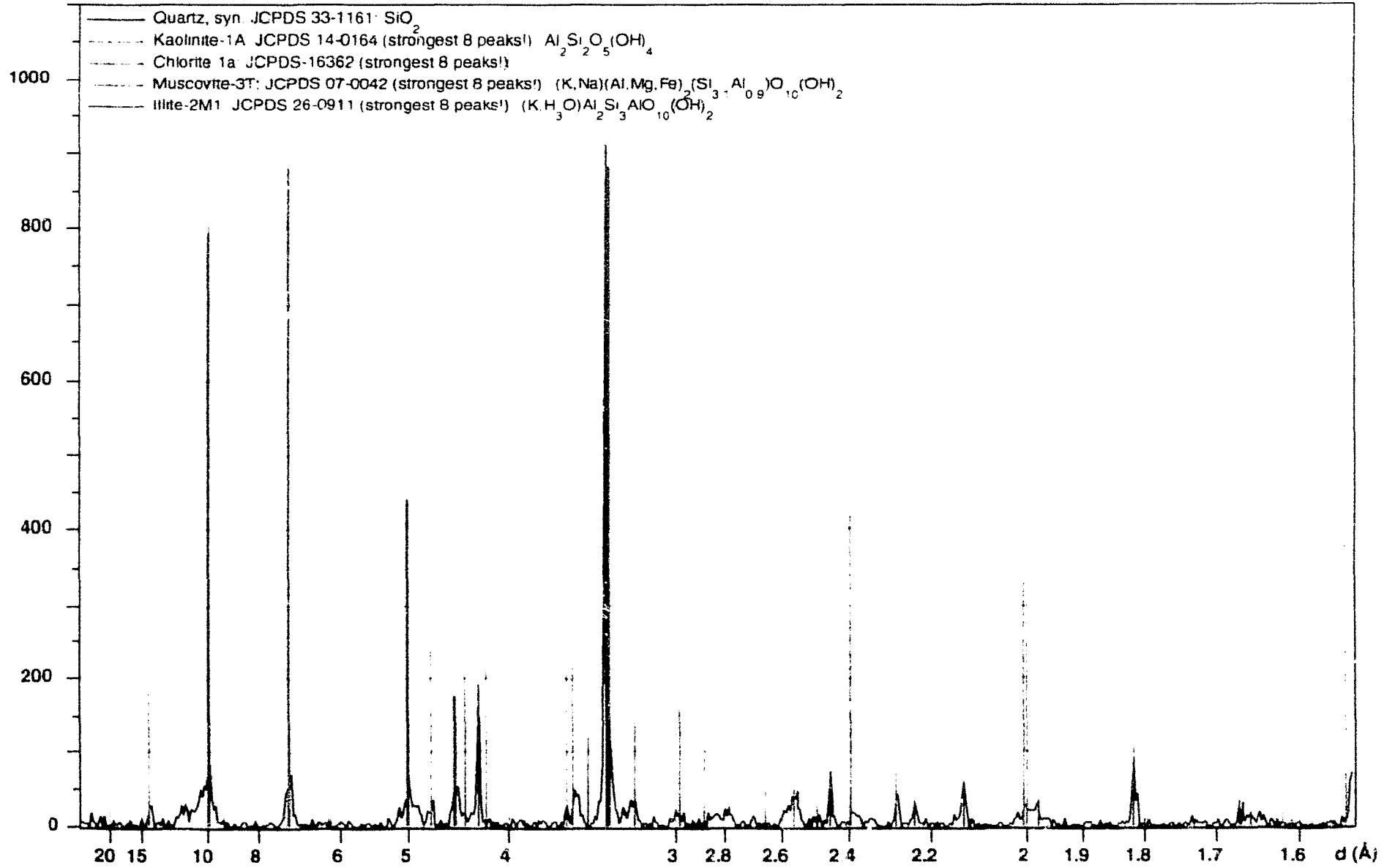


Fig. 3.32: Analyse diffractométrique de l'échantillon ST11X1.

Fig. 3.33 Analyse diffractométrique de l'échantillon ST2LXI

cps-0.5



cps-0.5

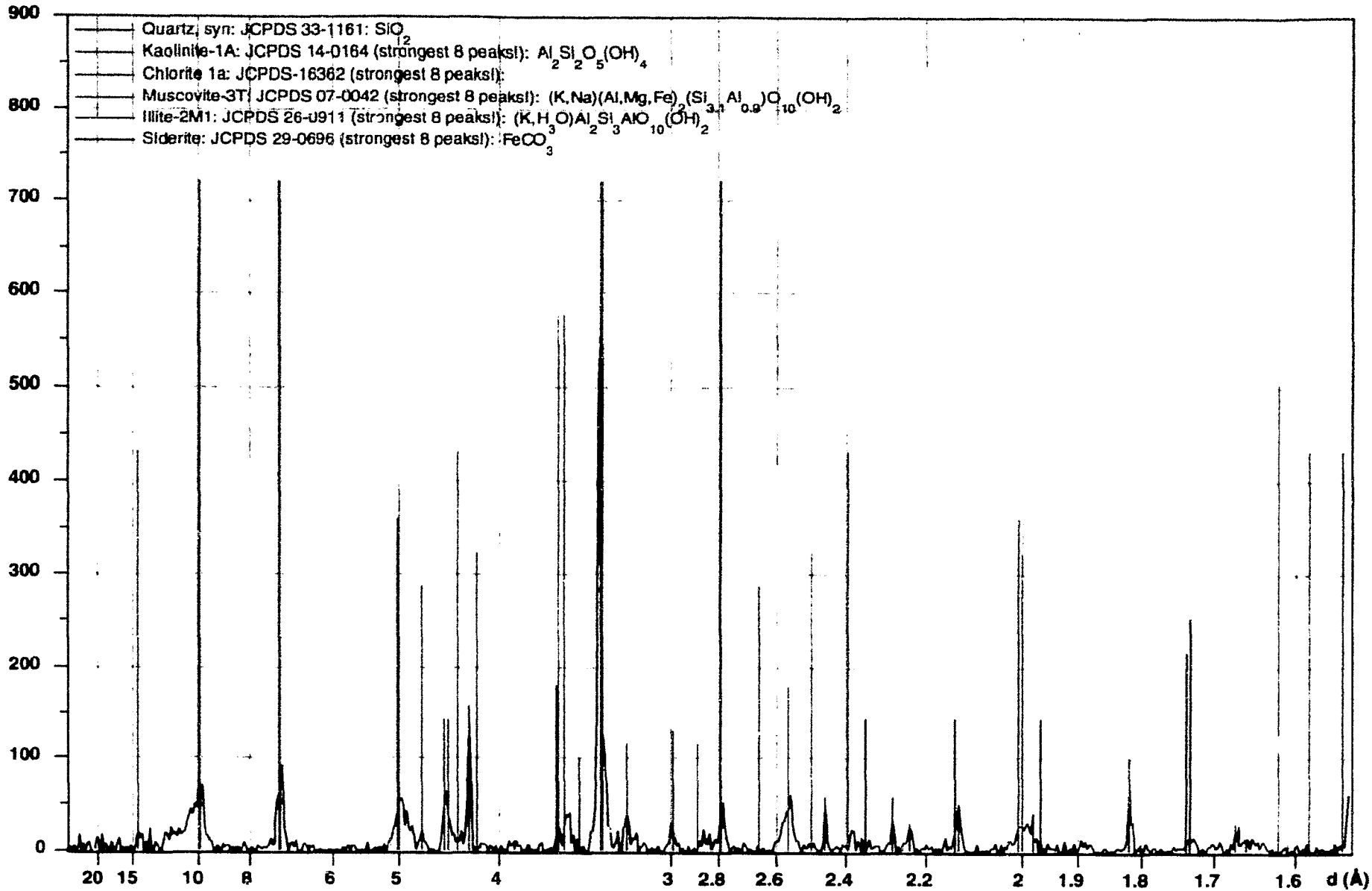
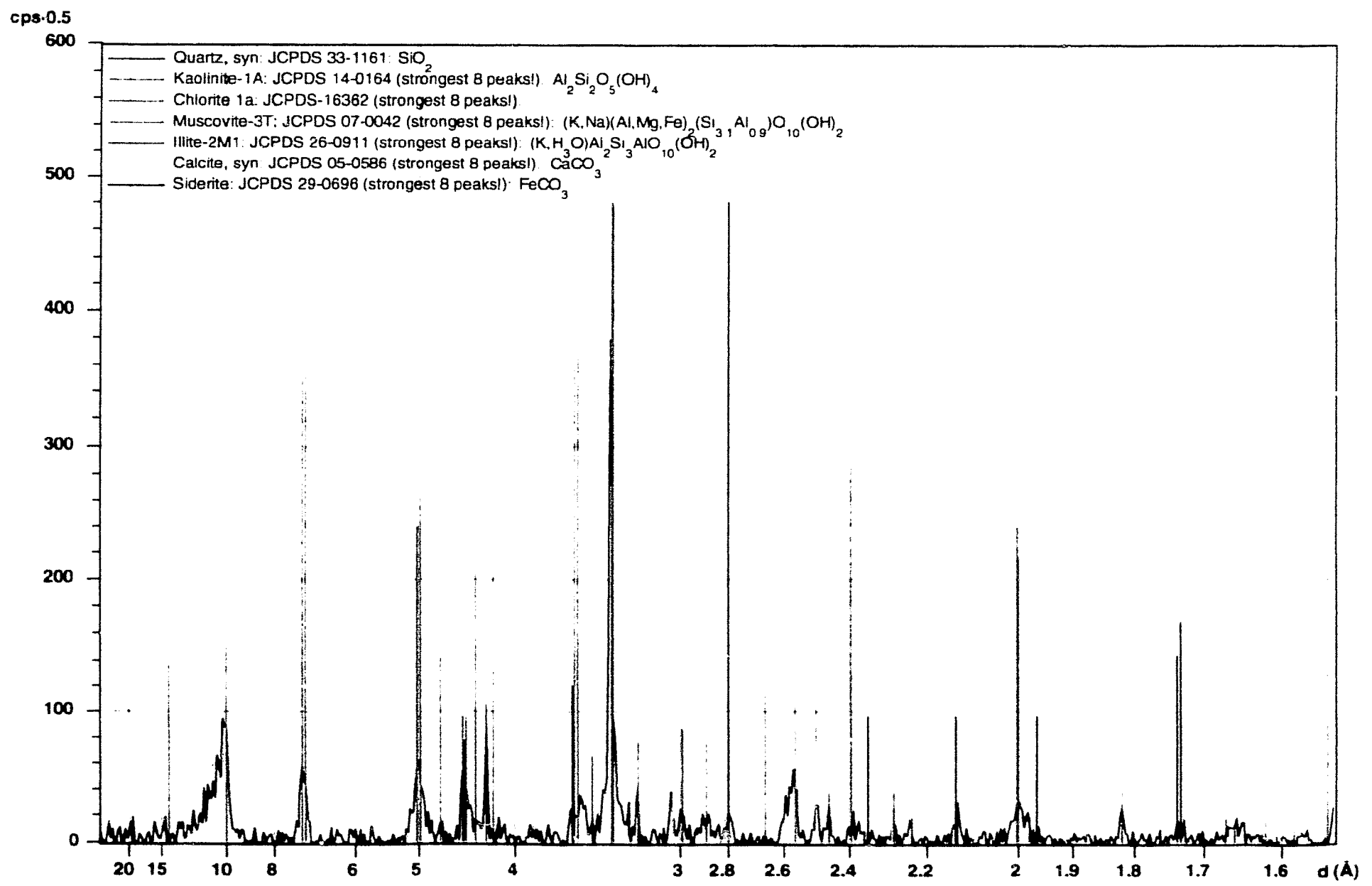


Fig. 3.34 : analyse diffractométrique de l'échantillon ST3LXI1.

Fig. 3.35 Analyse diffractométrique de l'échantillon BID11JX1



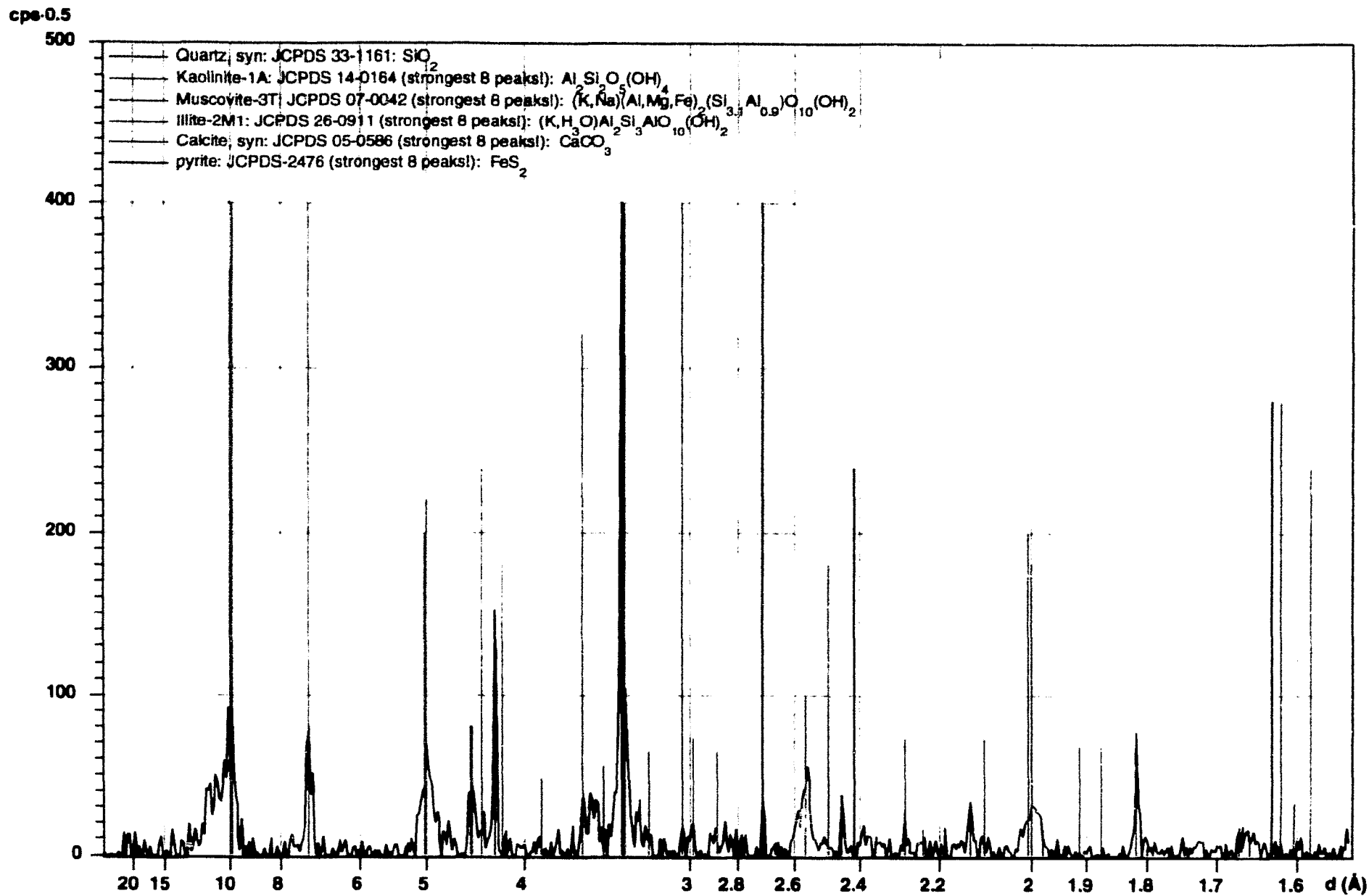
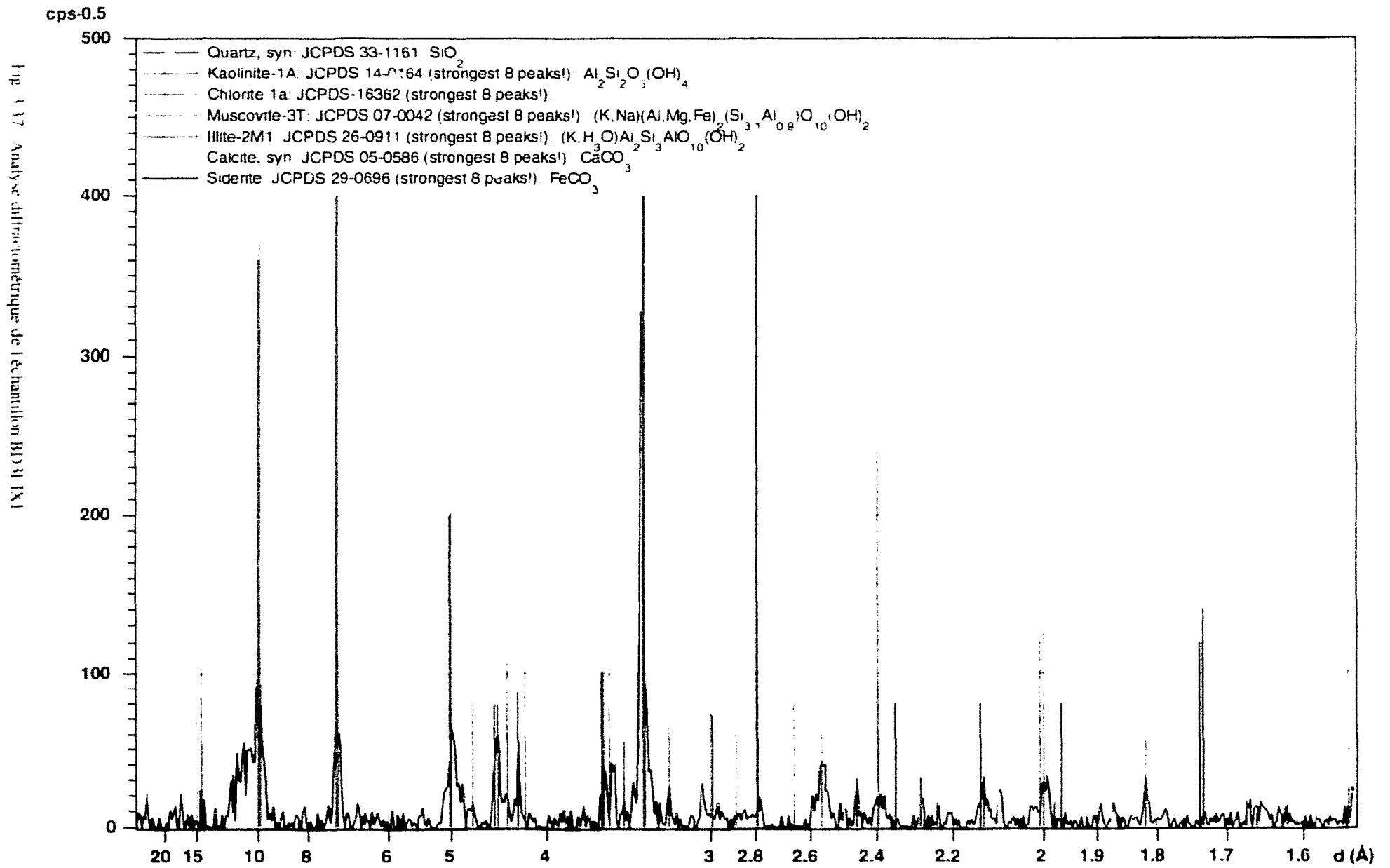


Fig. 3.36 : Analyse diffractométrique de l'échantillon BD2LXI.



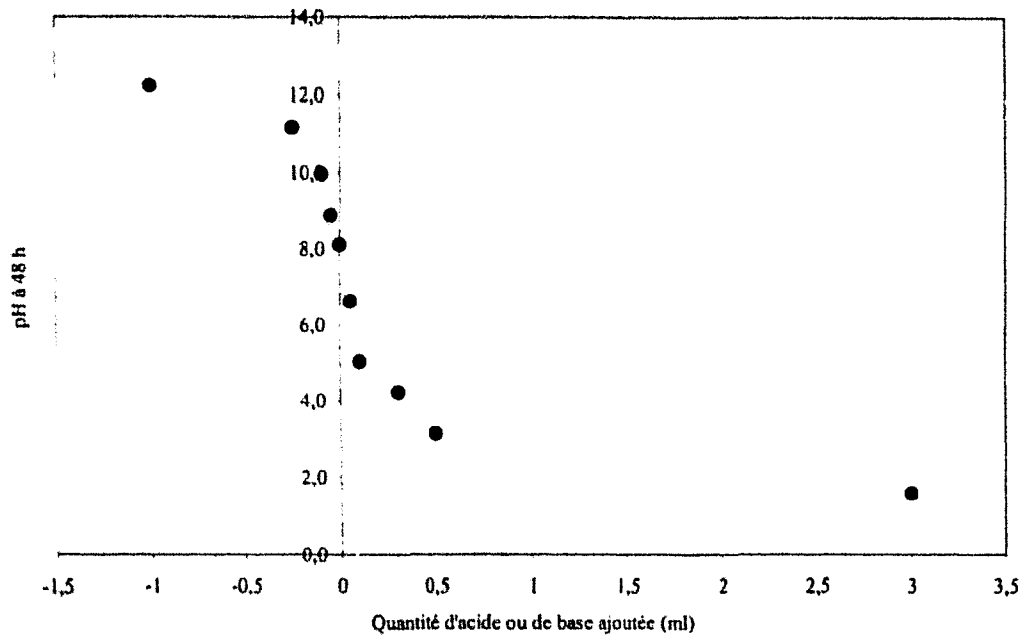


Fig. 3.38 : Variations de pH observées à 48 h après mise en contact des stériles houillers avec des solutions de pH basique à acide

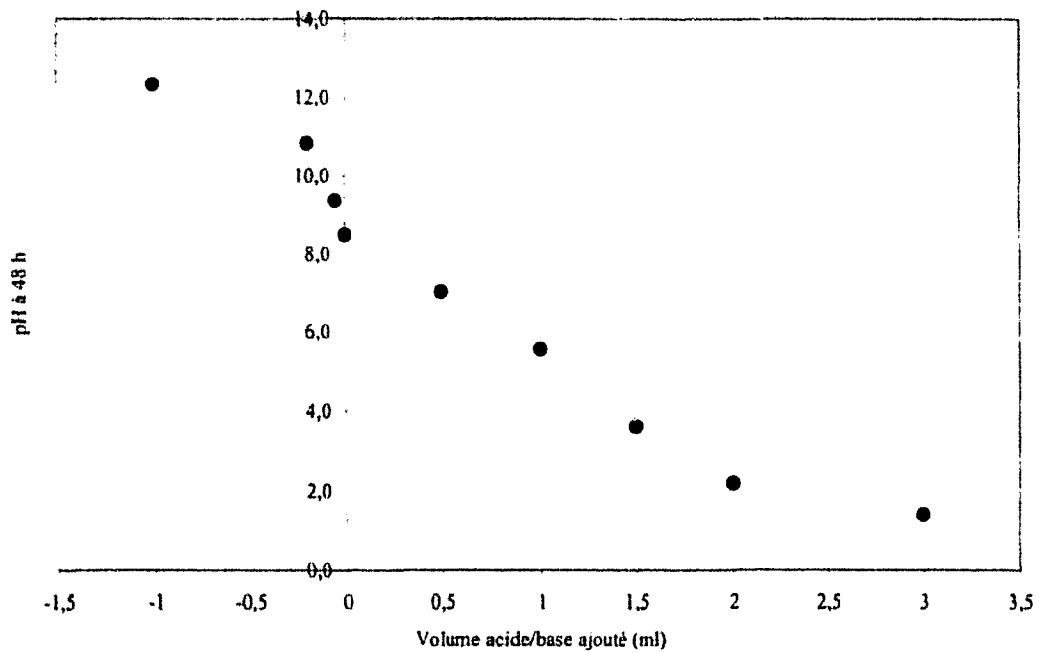


Fig. 3.39 : Variations de pH observées à 48 h après mise en contact des résidus de bassin de décantation avec des solutions de pH basique à acide



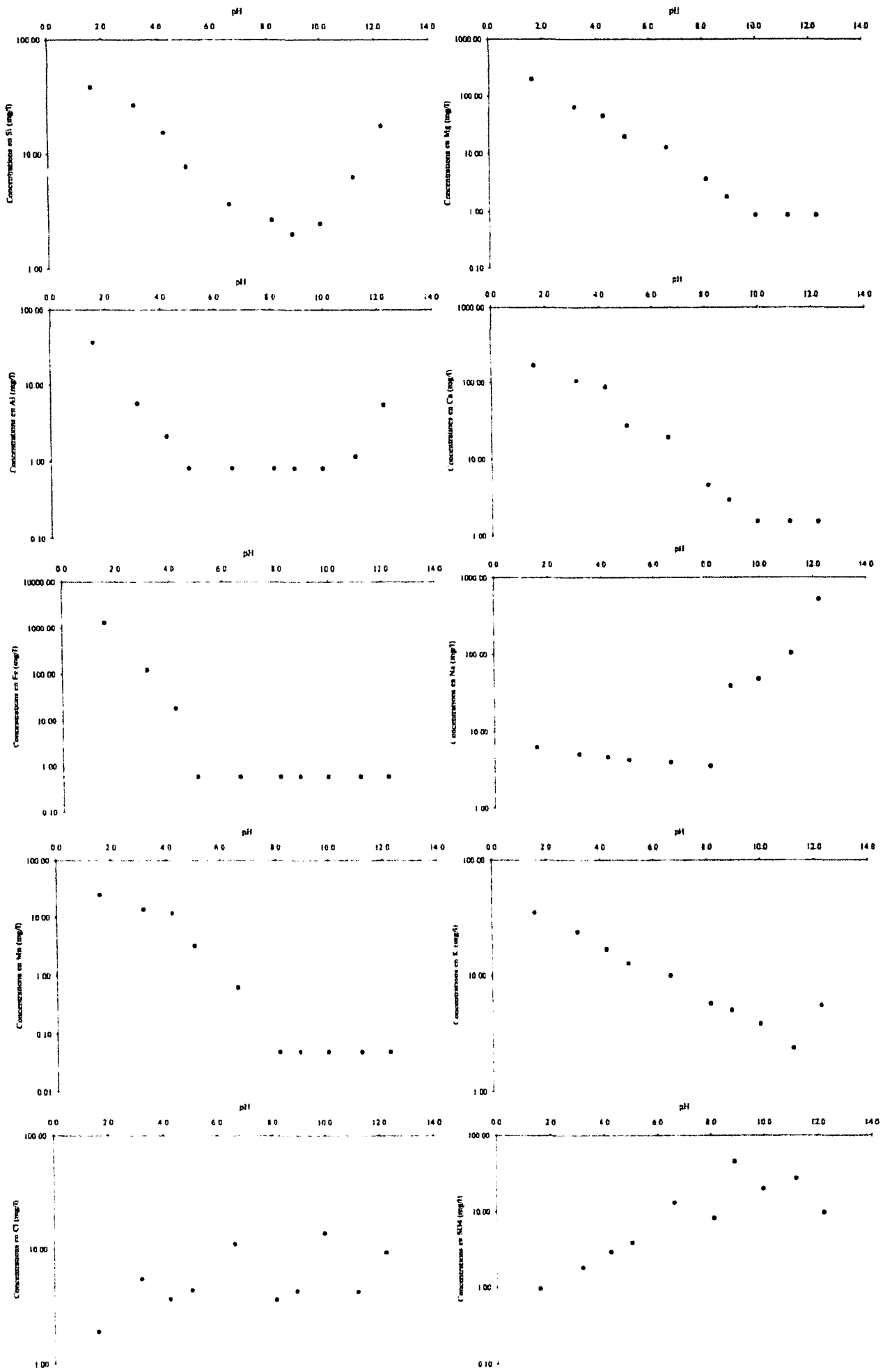


Fig. 3.40 : Concentrations en éléments majeurs en fonction du pH mesuré à 48 h des éluats obtenus après mise en contact des stériles houillers avec des solutions de pH basique et acide

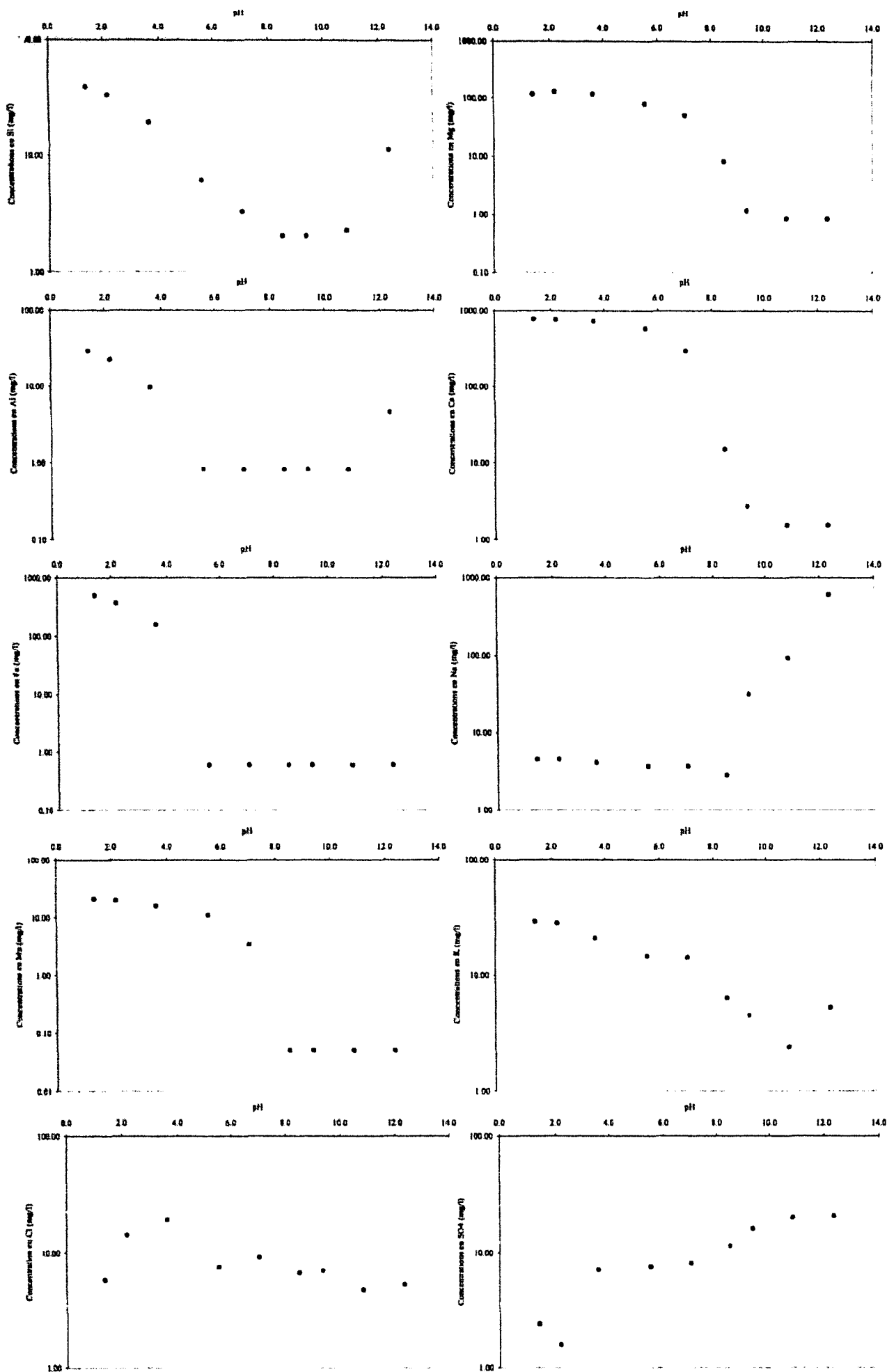


Fig. 3.41 : Concentrations en éléments majeurs en fonction du pH mesuré à 48 h des éluats obtenus après mise en contact des résidus de bassin de décantation avec des solutions de pH basique et acide

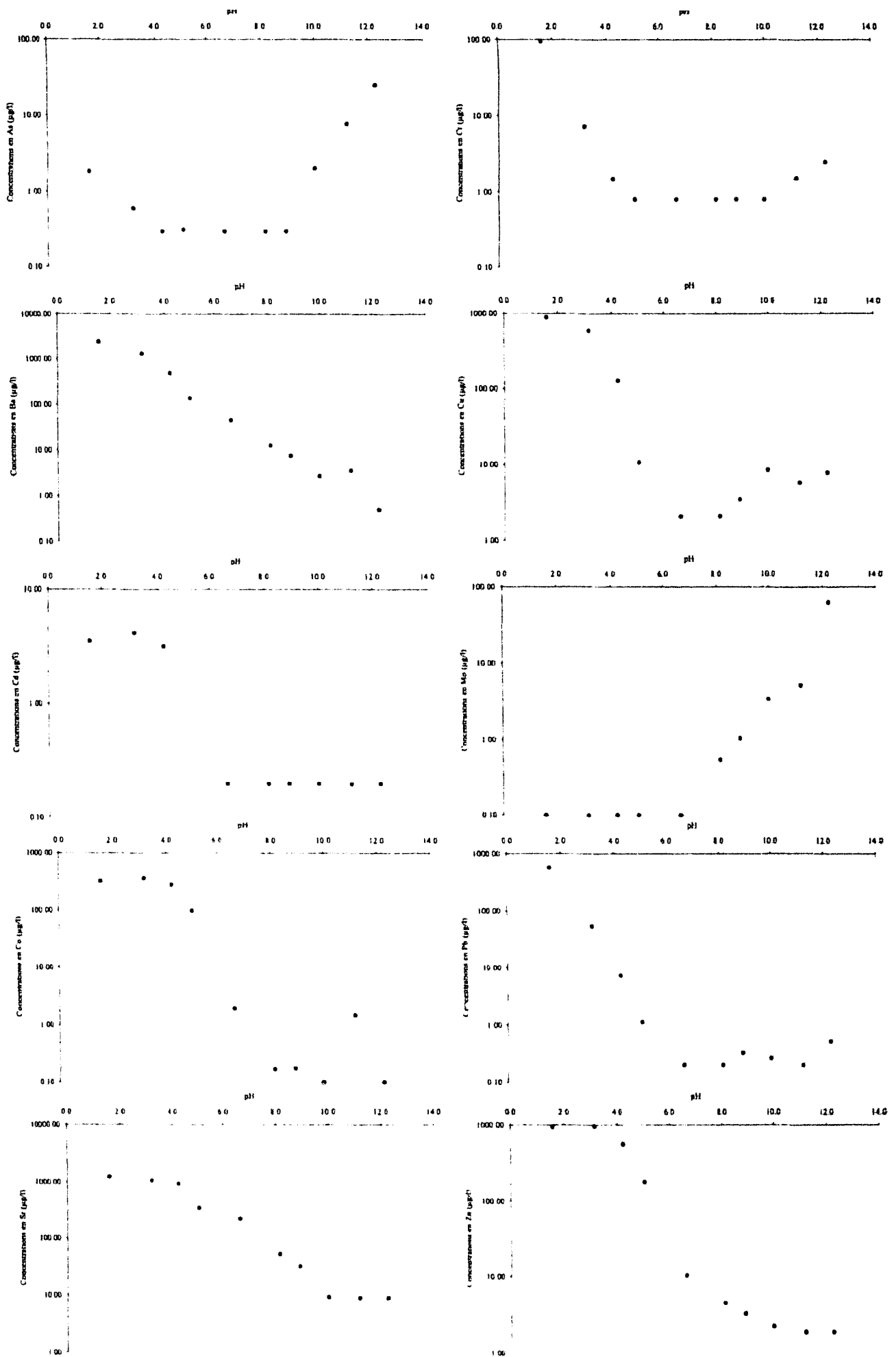


Fig. 3.42 Concentrations en éléments traces en fonction du pH mesuré à 48 h des éluats obtenus après mise en contact des stériles houillers avec des solutions de pH basique et acide

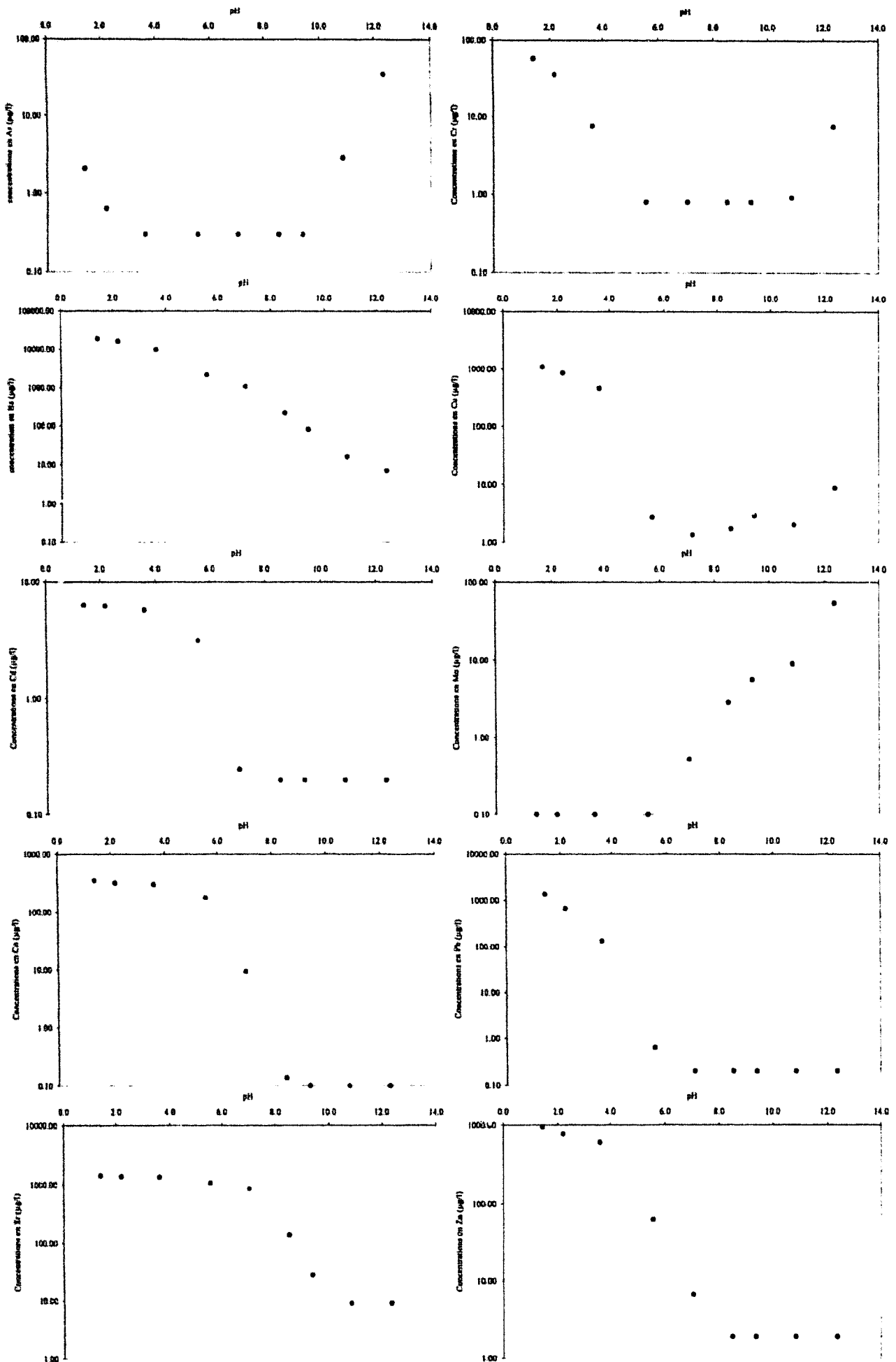


Fig. 3.43 : Concentrations en éléments traces en fonction du pH mesuré à 48 h des éluats obtenus après mise en contact des résidus de bassin de décantation avec des solutions de pH basique et acide

*Mesures de pH à 48 h (Tab. 3.27 et 3.28 et Fig. 3.38 et 3.39) :*

on observe pour les stériles que les variations de pH se font pour des ajouts de base et d'acide compris entre -0,25 (l'ajout de base est donné en valeurs négatives pour la représentation graphique) et 0,3 ml ; on peut observer qu'au dessous et au dessus, les valeurs de pH présentent un palier. Ce type de matériau présente donc un faible pouvoir tampon.

Pour les résidus de bassin de décantation, l'évolution est plus progressive, on observe une brusque diminution de pH pour des ajouts d'acide et de base allant de -0,2 à 0,5 ml, la diminution de pH se fait ensuite plus progressivement et on ne constate pas la présence d'un palier comme c'était le cas pour les essais réalisés sur les stériles mis à terril. Ce type de matériau présente donc un pouvoir tampon plus élevé que celui des stériles houillers mis à terril.

*Analyses d'éléments majeurs et d'éléments traces (Fig. 3.40 à 3.43) :*

Les analyses d'éléments majeurs montrent les mêmes tendances pour les éluats des tests effectués sur les stériles mis à terril et sur les résidus de bassins de décantation à savoir :

- pour Si, Al et Fe : une libération de ces différents éléments à pH bas ( $< 2$ ), puis une diminution de cette libération pour des pH de valeur croissante (jusqu'à pH 8 pour Si et pH 5-6 pour Al et Fe). La libération de Si, Al et Fe atteint ensuite un minimum pour les pH proches de la neutralité et les pH basiques. On constate toutefois pour Si et Al une nouvelle libération pour des pH supérieurs à 12.
- pour Mn, Mg et Ca : on constate la présence d'un palier correspondant à une libération plus importante de ces éléments en milieu acide (pH inférieur à 2 jusqu'à pH neutre) puis une brusque diminution de la concentration de ces différents éléments en solution jusqu'à pH 8-9 avant un second palier de libération minimale en milieu basique (pH 8-9 à pH > 12). Les essais réalisés sur les stériles montrent pour ces éléments un palier moins marqué en milieu acide.
- Na : la libération est minimale à pH acide et augmente brutalement à pH 8 pour atteindre une valeur maximale à pH supérieur à 12.
- K : cet élément suit globalement le même schéma que Si, Al et Fe, la décroissance de concentration est ici toutefois moins prononcée : les plus basses concentrations sont relevées à pH légèrement supérieur à 10 et on constate une augmentation de la libération à pH supérieur à 12.
- Cl : on constate que la répartition des points ne permet pas de dégager de comportement tranché pour les ions chlorures. On observe uniquement que les concentrations sont réparties autour de 10 mg/l pour les tests effectués sur les résidus de bassins de décantation et situées entre 5 et 10 mg/l pour les stériles plus grossiers.
- $\text{SO}_4$  : Pour les stériles et les résidus de bassin de décantation, le relargage est minimal à pH bas puis augmente progressivement jusqu'aux pH basiques.

Les analyses d'éléments traces montrent également les mêmes tendances pour les éluats des tests effectués sur les stériles mis à terril et sur les résidus de bassins de décantation à savoir :

- As : libération minimale pour des pH allant de 3 à 9-10, légère augmentation de libération à pH inférieur à 3 et plus forte libération en milieu basique (9-12).
- Ba : forte libération à pH bas (pH<4) puis diminution jusqu'à pH basique.
- Cd, Co et Sr : les libérations sont maximales à pH acide et minimales en milieu basique (pH entre 6 et 12 pour le cadmium et le cobalt et entre 10 et 12 pour le strontium).
- Cr, Cu, Pb et Zn : la libération de ces éléments est maximale en milieu acide (pH inférieur à 2 pour le chrome et le plomb et inférieur à 4 pour le cuivre et le zinc), elle diminue ensuite vers les pH basiques. On constate une augmentation des concentrations dans les éluats pour le chrome et le cuivre à pH supérieur à 10.
- la libération du molybdène est croissante de pH 5-6 à pH 12, elle est minimale aux valeurs de pH inférieures.

#### 1.6.2 - Essais en condition saturée / essais en condition saturée – non saturée

##### *1.6.2.1 - Principes et protocoles :*

Ces essais ont été réalisés dans le but de déterminer le comportement des stériles houillers et des résidus de bassins de décantation dans deux conditions se rapprochant des conditions dites de « terrain ». En effet, deux scénarii peuvent être imaginés dans le cas du stockage de stériles houillers : un scénario « stériles saturés en eau », conditions qui pourraient exister ou avoir existé en profondeur dans les terrils et les bassins de décantation et un scénario « stériles en conditions saturées - non saturées en eau » représentatif de la couche supérieure des terrils et des bassins de décantation qui peut subir une alternance d'infiltration d'eau et de non infiltration en période sèche, comportement comparable à celui d'une zone vadose.

Dans chacun de ces scénarii deux conditions ont été étudiées : les essais ont été menés d'une part avec une eau à pH naturel autour de 7 et d'autre part avec une eau à pH de départ acide (entre 4 et 5) afin de pouvoir représenter le comportement des stériles en cas de pluie acide (l'étude sur 9 ans de la chimie des eaux de pluie nous ayant montré la fréquence de ce type de pluie sur nos sites).

Dans ces essais, 50 g d'échantillons ont été mélangés à 150 ml de lixiviant (eau distillée ou eau distillée + acide nitrique) soit un L/S de 3. Les éluats ont fait l'objet d'analyses des concentrations en sulfates et en fer.

- Essais en conditions saturées : ces essais ont été réalisés sur une période de 6 semaines. Huit essais ont commencé au même moment et les solutions ont été filtrées et analysées à  $t_0+12h$ ,  $t_0+24h$ ,  $t_0+1sem$ ,  $t_0+2sem$ ,  $t_0+3sem$ ,  $t_0+4sem$ ,  $t_0+5sem$  et  $t_0+6sem$ .
- Essais en conditions saturées-non saturées : ce deuxième type d'essais a duré 7 semaines. Au départ, les solides ont été mis en eau pendant 12 h puis filtrés et laissés à l'air libre pendant 12 h. Ces échantillons ont ensuite de nouveau été mis en eau pendant une semaine puis filtrés et laissés à l'air libre une semaine et ce cycle a été répété 3 fois.

Les références des échantillons ont été données en fonction du type de matériau testé (ST = stériles mis à terril, BD = résidus issus de bassin de décantation), du type de test effectué (S pour essai « saturé » et SNS pour essai « saturé/non saturé ») et de la solution de lixiviation utilisée (ED pour eau distillée et AC pour eau distillée acidifiée). Par exemple l'échantillon SNSBD1AC correspond à un test saturé/non saturé réalisé avec une solution de lixiviation acidifiée. Ces essais réalisés sur plus long terme que les précédents ont été réalisés en double afin de prévenir tout incident technique mais également d'observer si les résultats étaient reproductibles.

### *1.6.2.2 - Résultats*

- suivi du pH (Tab. 3.29 et 3.30 ; Fig. 3.44 et 3.45)

essais « saturés-non saturés »

Pour les stériles mis à terril, le pH évolue légèrement entre 7,2 et 8 que les essais aient été réalisés à l'eau distillée ou à l'eau acidifiée.

Pour les résidus de bassin de décantation, le pH est relativement constant avec des valeurs comprises entre 8,5 et 8,8, que les essais aient été réalisés à l'eau distillée ou à l'eau acidifiée.

essais « saturés »

Lors des tests effectués sur les stériles mis à terril, les variations de pH sont une fois encore apparues modestes (entre 7,1 et 7,6).

Les essais réalisés sur les résidus de bassin de décantation, à l'eau distillée et à l'eau acidifiée, montrent une légère variation de pH avec des valeurs allant de 8,2 à 8,7.

Dans les deux types d'essais, le pH apparaît relativement constant, centré autour de 7,4 - 7,5 pour les stériles mis à terril, et autour de 8,4 - 8,6 pour les résidus de bassin de décantation.

- analyse des teneurs en sulfate et en fer des eaux prélevées (Tab. 3.29 et 3.30 ; Fig. 3.46 et 3.47)

#### essais « saturés/non saturés »

On observe pour les sulfates une évolution d'ensemble avec, tout d'abord, une diminution des concentrations mesurées dans les éluats (t0+3 sem, SNSBD2AC mis à part pour qui la diminution des teneurs en sulfates est visible à t0+1sem) puis une augmentation jusqu'à la fin du test. On peut également observer que la concentration en sulfates des éluats issus d'essais réalisés sur les résidus de bassin de décantation est globalement moins importante que celle des stériles mis à terribil.

La quantité de sulfate libérée pour les 50 g d'échantillons testés est comprise entre 2 et 12 mg.l<sup>-1</sup> et entre 2 et 22 mg.l<sup>-1</sup> pour les stériles mis à terribil.

Les teneurs en fer sont extrêmement faibles et proches de la limite de détection de cet élément.

#### essais « saturés »

On constate également pour ce type d'essai que la libération de sulfate est plus faible pour les résidus de bassin de décantation que pour les stériles mis à terribil. Dans le cas des résidus de bassin de décantation, la libération est progressive et s'échelonne entre 7 et 21 mg.l<sup>-1</sup> de sulfate relâché (pour le test réalisé à l'eau distillée comme pour le test réalisé à l'eau acidifiée). Les stériles montrent quant à eux une évolution différente avec, tout d'abord, une augmentation de la libération de sulfates suivie d'une diminution puis d'une nouvelle augmentation. Il faut noter que cette évolution ne se fait pas aux mêmes moments pour les deux essais réalisés : les variations se font de manière plus précoce dans le cas du test réalisé à l'eau acidifiée que dans le test effectué à l'eau distillée. La quantité maximale de sulfate libéré pour les stériles est supérieure à celle qui est libérée pour les résidus de bassin de décantation, à savoir : 47 mg.l<sup>-1</sup> pour l'échantillon SST1ED et 64 mg.l<sup>-1</sup> pour l'échantillon SST1AC.

Comme pour les essais réalisés en conditions « saturées-non saturées », les concentrations en fer sont proches de la limite de détection.



Ref.échantillon	12h	1 sem	3 sem	5 sem	7 sem	12h	1 sem	3 sem	5 sem	7 sem	12h	1 sem	3 sem	5 sem	7 sem
	valeurs de pH mesurées à la fin des essais					Concentrations en sulfates (mg.l <sup>-1</sup> )					Concentrations en fer (mg.l <sup>-1</sup> )				
SNSBD1ED	8.6	8.7	8.8	8.7	8.5	8.00	7.33	2.59	7.56	7.80	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
SNSBD2ED	8.7	8.7	8.8	8.7	8.6	8.00	7.11	2.59	6.84	8.34	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
SNSST1ED	7.1	7.2	8.0	7.5	7.3	14.50	15.73	5.17	9.00	13.08	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
SNSST2ED	7.1	7.4	8.0	7.5	7.3	22.50	15.30	6.03	7.98	15.59	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
SNSST1AC	7.2	7.5	8.0	7.5	7.4	15.00	10.34	3.23	7.38	12.50	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02
SNSBD1AC	8.7	8.6	8.7	8.6	8.4	10.25	6.90	2.37	10.08	11.75	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02
SNSST2AC	7.5	7.5	7.8	7.6	7.4	12.75	6.25	2.37	7.32	12.00	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
SNSBD2AC	8.7	8.6	8.7	8.6	8.5	7.25	2.80	6.90	7.08	11.50	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01

Tab. 3.29 : Mesures de pH et concentrations en sulfate et en fer des éluats issus des essais réalisés en conditions saturées-non saturées.

Ref.éch	12h	24h	1 sem	2 sem	3 sem	4 sem	5 sem	6 sem	12h	24h	1 sem	2 sem	3 sem	4 sem	5 sem	6 sem	12h	24h	1 sem	2 sem	3 sem	4 sem	5 sem	6 sem	
	valeurs de pH mesurées à la fin des essais								Concentrations en sulfates (mg.l <sup>-1</sup> )								Concentrations en fer (mg.l <sup>-1</sup> )								
SBD1ED	8.7	8.8	8.4	8.4	8.3	8.3	8.3	8.2	7.25	8.33	10.68	13.75	13.52	13.52	14.88	20.25	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
SST1ED	7.3	7.5	7.5	7.5	7.5	7.6	7.4	7.6	5.00	7.62	34.27	47.00	12.15	31.09	30.51	36.75	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
SBD1AC	8.5	8.7	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.2	7.00	6.91	11.39	8.09	11.56	12.93	13.71	21.25	0.02	0.02	0.02	0.02	< 0.01	< 0.01	0.02	< 0.01	
SST1AC	7.3	7.1	7.4	7.4	7.2	7.4	7.5	7.4	13.00	19.41	23.18	28.84	64.30	45.55	17.62	48.00	0.02	0.02	0.02	< 0.01	< 0.01	0.02	0.02	< 0.01	

Tab. 3.30 : Mesures de pH et concentrations en sulfate et en fer des éluats issus des essais réalisés en conditions saturées

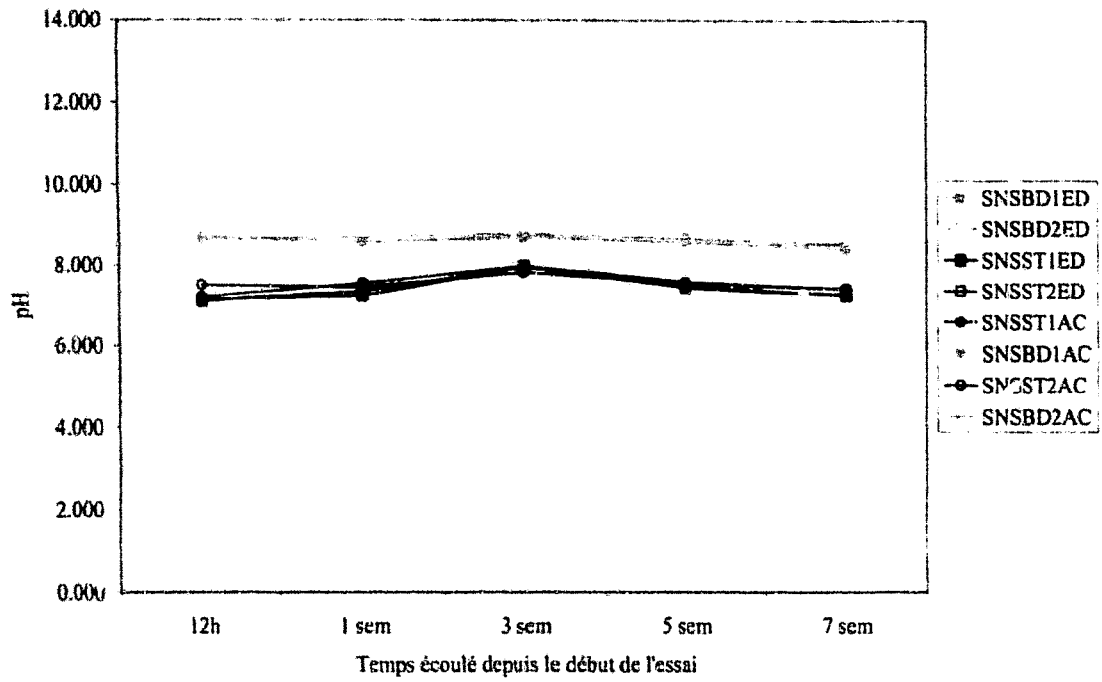


Fig. 3.44 : Evolution du pH pendant les essais réalisés en conditions saturée/non saturées.

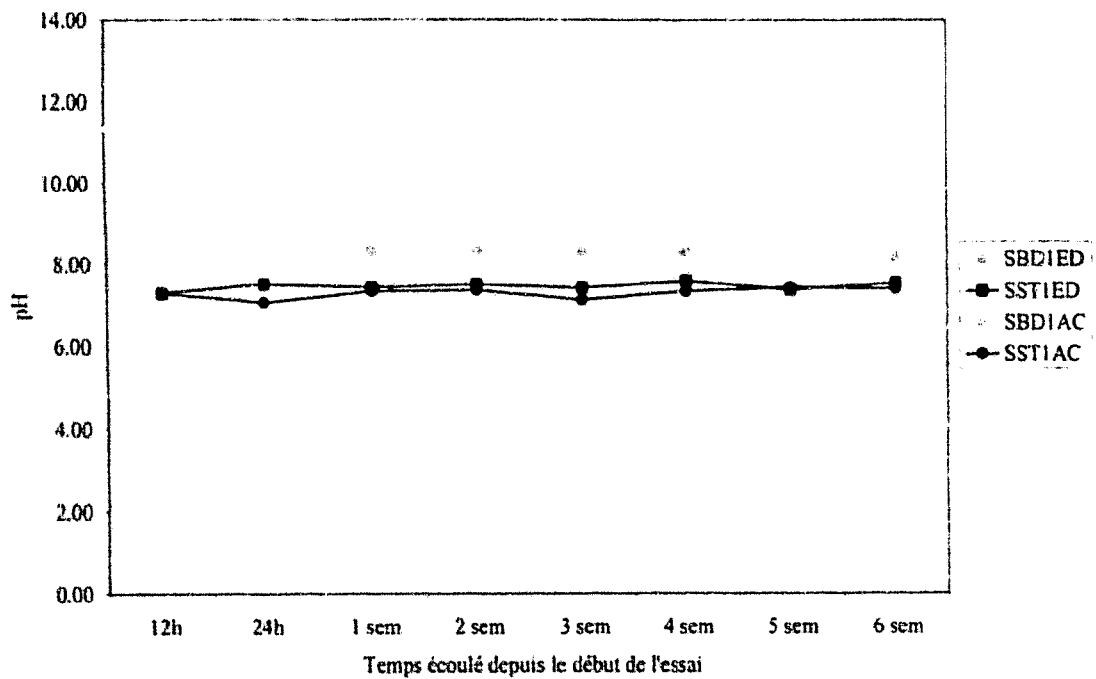


Fig. 3.45 : Evolution du pH pendant les essais réalisés en conditions saturées.

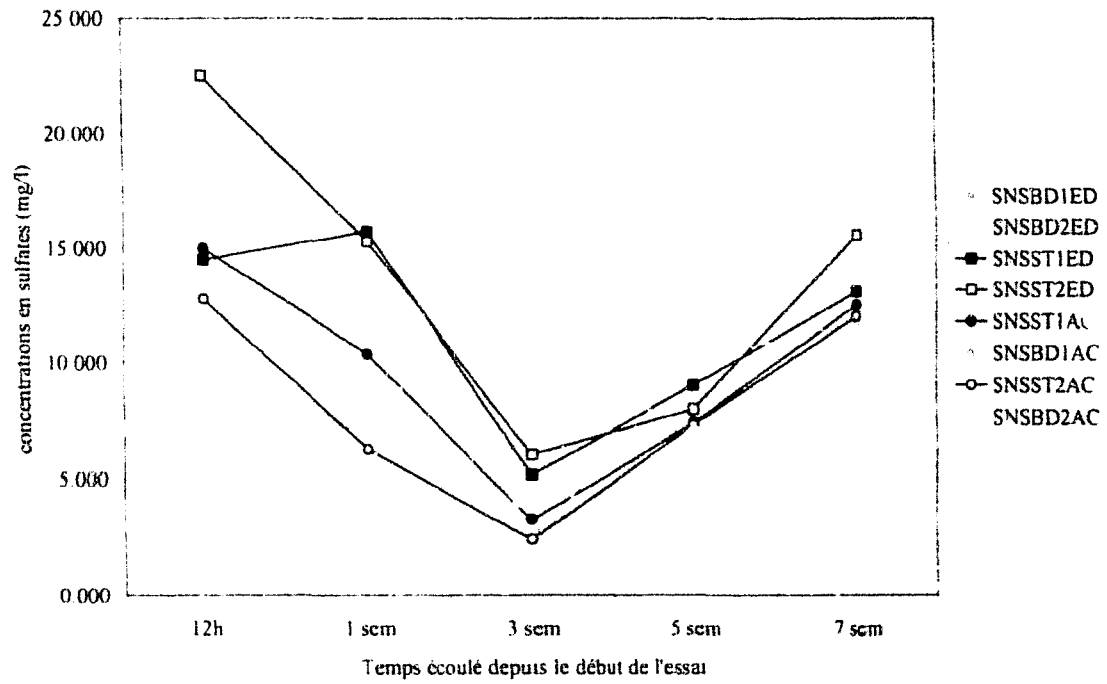


Fig. 3.46 : Evolution des concentrations en sulfates des éluats obtenus par les essais réalisés en conditions saturées/non saturées

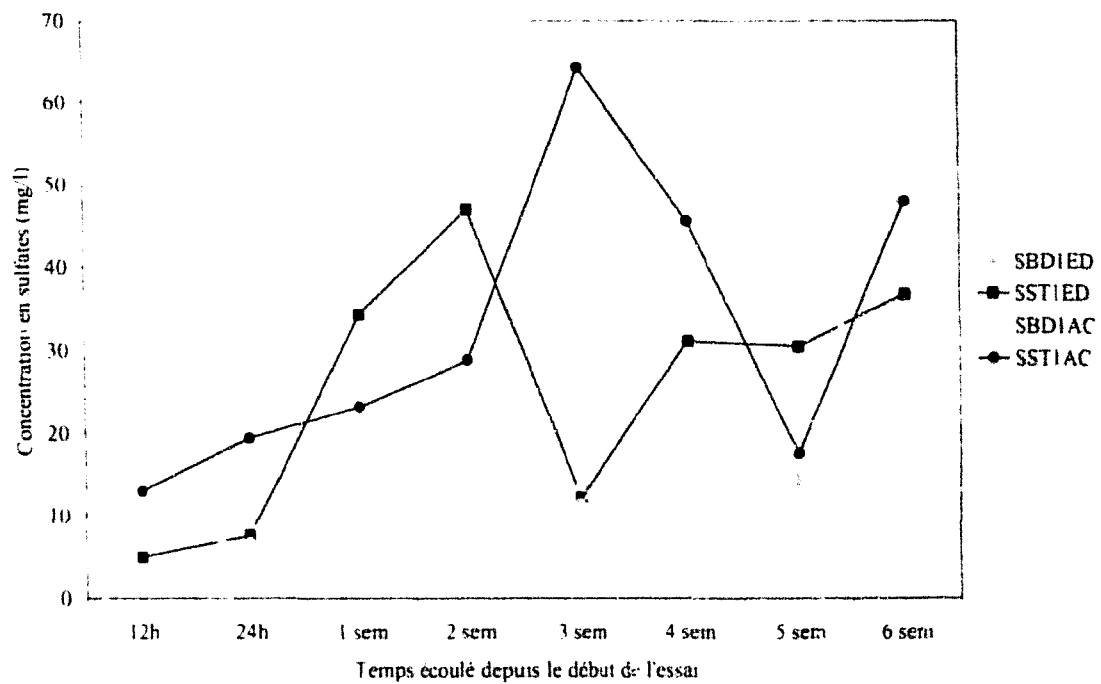


Fig 3.47 Evolution des concentrations en sulfates des éluats obtenus par les essais réalisés en conditions saturées.

### 1.6.3 - Potentiel d'acidification et potentiel de neutralisation

Au regard des résultats obtenus par Lawrence et Wang (1996) dans leur rapport sur la détermination du potentiel de neutralisation dans la prédiction du drainage acide minier (comparaison de différentes méthodes appliquées à 120 échantillons provenant de 12 mines) mais également des résultats de Hedin et Erickson (1988, in Kunia, 1998) ainsi que de ceux de Paktunc (1999a), il a été choisi dans ce mémoire de baser d'une part les calculs de potentiel d'acidification (PA) sur la mesure de la teneur en soufre total des échantillons prélevés, qui comme nous l'avons vu précédemment donne de meilleurs résultats que les analyses de soufre pyritique (chapitre 1), et d'autre part les calculs de potentiel de neutralisation (PN) sur la mesure des teneurs en carbonate de ces même échantillons. En effet, ces auteurs ont mis en évidence certains biais dans les méthodes couramment utilisées et notamment dans la détermination du potentiel de neutralisation des résidus :

- Le test de détermination des acides-bases (Sobek *et al.*, 1978) a montré dans l'étude de Lawrence et Wang (1996) des valeurs de PN très élevées, dues en partie à la dissolution de silicates rendue possible par les conditions du test (acide fort et température élevée). Il apparaît que ces conditions ne reflètent pas les conditions observées sur le terrain dans la plupart des cas. La méthode de détermination des acides bases modifiée (le test s'effectue à température ambiante) montre des valeurs de PN plus cohérentes, avec une faible dissolution des silicates. Cette dernière méthode montre dans l'étude de Lawrence et Wang (1996) une très bonne corrélation avec la méthode de détermination par l'analyse des carbonates.

Il est également important de noter que la mauvaise interprétation ou la mauvaise utilisation du test d'effervescence servant à déterminer la quantité d'acide ajoutée dans l'essai de détermination des acides bases ainsi que dans l'essai modifié peut donner lieu à des variations significatives des valeurs de PN obtenues.

La détermination du PN par l'analyse des carbonates a été retenue dans cette étude car elle permet de s'intéresser aux agents neutralisants immédiatement disponibles (les carbonates), elle ne tient pas compte des phénomènes de neutralisation par dissolution des silicates mais il a été jugé qu'étant donné leur relativement faible cinétique de dissolution, l'analyse des teneurs en carbonates reflétait bien la capacité de neutralisation des résidus, au moins à court terme ;

- D'autre part, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, la détermination du potentiel de neutralisation par la méthode décrite par Lawrence et Scheske (1997) pose différents problèmes parmi lesquels l'utilisation d'une classification normative de type CIPW conçue initialement pour des roches ignées et donc très différentes des résidus étudiés ici, cette méthode n'a donc pas été retenue ;

- Il aurait été intéressant de comparer les résultats obtenus par l'analyse des carbonates avec d'autres méthodes de détermination du PN (essai d'établissement du ratio Soufre / Potentiel de production alcaline, essai de production nette d'acide) moins agressives que le test ABA, ABA modifié ou encore l'essai initial de B.C. Research, ces analyses n'ont malheureusement pas pu être réalisées dans le cadre de cette thèse

Le calcul du potentiel net de neutralisation ( $PNN=PN-PA$ ) a été réalisé afin de déterminer si les stériles étudiés ici sont potentiellement générateurs d'acide, par convention, si le PNN est négatif, cela signifie que l'échantillon est potentiellement générateur d'acidité ; si le PNN est positif, il est « consommateur » d'acidité. Le PA et le PN ont été calculés non seulement sur les échantillons prélevés pour la réalisation des essais de lixiviation mais également sur la majeure partie des échantillons prélevés en surface et en profondeur (1<sup>er</sup> échantillonnage) sur les deux sites et sur une partie des échantillons prélevés en profondeur dans le bassin de décantation C du site 2. Les résultats sont exposés dans les tableaux 3.31 à 3.33.

Réf. échantillon	Profondeur (cm)	PA (31,25)	PA (62,5)	Carbonate PN	PNN (pour 31,25)	PNN (pour 62,5)
SHA99	surface	3,4	6,9	3,3	-0,2	-3,6
SHB99	surface	2,8	5,6	3,3	0,5	-2,3
SHB99C	surface	1,3	2,5	182,0	180,7	179,5
SHC99	surface	5,6	11,3	5,7	0,1	-5,5
SHD99T	surface	3,1	6,3	0,9	-2,3	-5,4
SHE99	surface	1,9	3,8	1,8	0,0	-1,9
SHF99BAS	surface	1,9	3,8	13,3	11,4	9,5
SH280199D	-10	5,9	11,9	9,5	3,5	-2,4
SH280199E	-30	6,3	12,5	2,3	-3,9	-10,2
SH280199F	-50	11,6	23,1	10,2	-1,3	-12,9
SH280199G	-72	7,2	14,4	4,1	-3,0	-10,2
SH280199H	-90	8,8	17,5	2,4	-6,4	-15,1
SH280199I	-107	7,2	14,4	8,2	1,1	-6,1
SH280199J	-126	9,4	18,8	8,0	-1,4	-10,7
SH280199K	-142	7,8	15,6	2,8	-5,0	-12,8
SH280199L	-188	6,6	13,1	3,2	-3,4	-9,9
SH280199M	-200	5,3	10,6	3,2	-2,1	-7,4
SH280199N	-209	7,5	15,0	3,3	-4,2	-11,7
SH280199O	-219	9,4	18,8	2,8	-6,6	-16,0
SH280199P	-230	9,1	18,1	9,3	0,2	-8,8
SH280199Q	-245	7,5	15,0	12,3	4,8	-2,7

Tab. 3.31 : Résultats des calculs de potentiel d'acidification (PA) et de neutralisation (carbonate PN) et donc du potentiel net de neutralisation (PNN) des stériles houillers échantillonnés sur le site 1. Les calculs de PA ont été réalisés d'une part en multipliant la teneur en soufre total par 31,25 (on fait alors la supposition que le CO<sub>2</sub> peut entrer en exsolution sous forme de gaz ; cf chap. 1) et d'autre part en la multipliant par 62,5 (on considère alors que dans les remblais ou le CO<sub>2</sub> ne peut pas vraiment entrer en exsolution, le CO<sub>2</sub> se dissout et réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique ; cf chap. 1).

Ref. échantillon	Profondeur	PA (31,25)	PA (62,5)	Carbonate PN	PNN (pour 31,25)	PNN (pour 62,5)
OIGB99T	surface	2,8	5,6	0,0	-2,8	-5,6
OIGC99	surface	2,5	5,0	1,9	-0,6	-3,1
OIGD99	surface	3,4	6,9	0,0	-3,4	-6,9
OIGE99	surface	3,8	7,5	2,2	-1,6	-5,3
2904OIG5	-20	7,5	15,0	7,2	-0,3	-7,8
2904OIG6	-100	12,2	24,4	7,3	-4,9	-17,1
2904OIG7	-150	7,0	14,0	12,4	5,4	-1,6
2904OIG8	-200	7,9	15,8	9,2	1,3	-6,6
2904OIG9	-250	6,1	12,3	8,3	2,2	-3,9
2904OIG10	-300	10,6	21,2	8,3	-2,3	-12,9
2904OIG11	-350	6,0	12,0	8,2	2,2	-3,8
2904OIG12	-400	4,1	8,2	7,3	3,2	-0,9
2904OIG13	-450	3,8	7,6	8,3	4,5	0,7
2904OIG14	-500	6,6	13,1	3,1	-3,4	-10,0
2904OIG15	-550	5,3	10,5	5,0	-0,3	-5,5
2904OIG16	-600	7,6	15,2	8,2	0,6	-7,0
2904OIG17	-650	4,1	8,1	9,3	5,3	1,2
2904OIG18	-700	4,5	8,9	8,3	3,9	-0,6
2904OIG19	-750	2,3	4,6	1,0	-1,3	-3,6
2904OIG20	-800	7,3	14,6	5,2	-2,1	-9,4
2904OIG21	-850	5,0	9,9	7,1	2,1	-2,9
2904OIG22	-900	4,9	9,9	6,3	1,3	-3,6
2904OIG23	-950	3,4	6,9	3,1	-0,4	-3,8
2904OIG24	-1000	7,7	15,4	8,2	0,5	-7,2
2904OIG25	-1050	6,7	13,3	9,1	2,5	-4,2
2904OIG26	-1100	7,2	14,4	11,3	4,1	-3,1
2904OIG27	-1150	8,2	16,5	9,2	1,0	-7,2
2904OIG28	-1200	5,4	10,8	7,0	1,7	-3,7
2904OIG29	-1250	9,7	19,4	10,4	0,7	-9,0

Ref. échantillon	Remarques	PA (31,25)	PA (62,5)	Carbonate PN	PNN (pour 31,25)	PNN (pour 62,5)
ST1lixivi	essai lixiviation	2,2	4,4	6,2	4,1	1,9
ST2lixivi	essai lixiviation	1,6	3,1	4,2	2,6	1,0
ST3lixivi	essai lixiviation	3,8	7,5	5,2	1,4	-2,3

Tab. 3.32 : Résultats des calculs de potentiel d'acidification (PA) et de neutralisation (carbonate PN) et donc du potentiel net de neutralisation (PNN) des stériles houillers échantillonnés sur le site 2. Les calculs de PA ont été réalisés d'une part en multipliant la teneur en soufre total par 31,25 (on fait alors la supposition que le CO<sub>2</sub> peut entrer en exsolution sous forme de gaz ; cf. chap. 1) et d'autre part en la multipliant par 62,5 (on considère alors que dans les remblais où le CO<sub>2</sub> ne peut pas vraiment entrer en exsolution, le CO<sub>2</sub> se dissout et réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique ; cf. chap. 1).

Ref. échantillon	Profondeur (cm)	PA (31,25)	PA (62,5)	carbonate PN	PNN (pour 31,25)	PNN (pour 62,5)
OIGBD1	surface	16,5	33,1	17,1	0,6	-16,0
OIGBD3	-20	19,5	38,1	10,5	-9,0	-28,4
OIGBD5	-40	10,0	20,0	19,3	9,3	-0,7
OIGBD7	-60	15,6	31,3	19,7	4,1	-11,6
OIGBD9	-80	18,4	36,8	15,4	-3,0	-21,3
OIGBD11	-100	11,3	22,7	15,3	4,0	-7,4
OIGBD13	-115	15,5	31,0	16,1	0,6	-14,9
OIGBD15	-130	16,8	33,6	16,6	-0,2	-17,0
OIGBD17	-150	16,5	32,9	15,7	-0,7	-17,2
OIGBD19	-170	20,1	40,2	14,6	-5,5	-25,6

Ref. échantillon	Remarques	PA (31,25)	PA (62,5)	carbonate PN	PNN (pour 31,25)	PNN (pour 62,5)
BD1lix1	essai lixiviation	10,6	21,3	17,7	7,1	-3,5
BD2lix1	essai lixiviation	13,1	26,3	20,9	7,8	-5,3
BD3lix1	essai lixiviation	9,1	18,1	16,7	7,6	-1,5

Tab. 3.33 : Résultats des calculs de potentiel d'acidification (PA) et de neutralisation (carbonate PN) et donc du potentiel net de neutralisation (PNN) des résidus de bassin de décantation échantillonnés dans le bassin C du site 2. Les calculs de PA ont été réalisés d'une part en multipliant la teneur en soufre total par 31,25 (on fait alors la supposition que le CO<sub>2</sub> peut entrer en exsolution sous forme de gaz ; cf. chap. 1) et d'autre part en la multipliant par 62,5 (on considère alors que dans les remblais où le CO<sub>2</sub> ne peut pas vraiment entrer en exsolution, le CO<sub>2</sub> se dissout et réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique ; cf. chap. 1).

Nous pouvons donc affirmer, au vu de ces résultats, que les stériles houillers peuvent être générateurs d'acide que le coefficient multiplicateur choisi pour calculer le PA soit 31,25 ou 62,5 et que dans ce dernier cas, la quasi-totalité des stériles testés montre un PNN négatif. On observe également que les valeurs de potentiel d'acidification et de neutralisation des résidus de bassin de décantation sont plus élevées que celles des stériles grossiers (Fig. 3.48). Les valeurs de potentiel net de neutralisation résultantes apparaissent globalement plus négatives pour les résidus de bassin de décantation que celles des stériles grossiers, ce qui leur confère en théorie une capacité d'acidification plus importante.

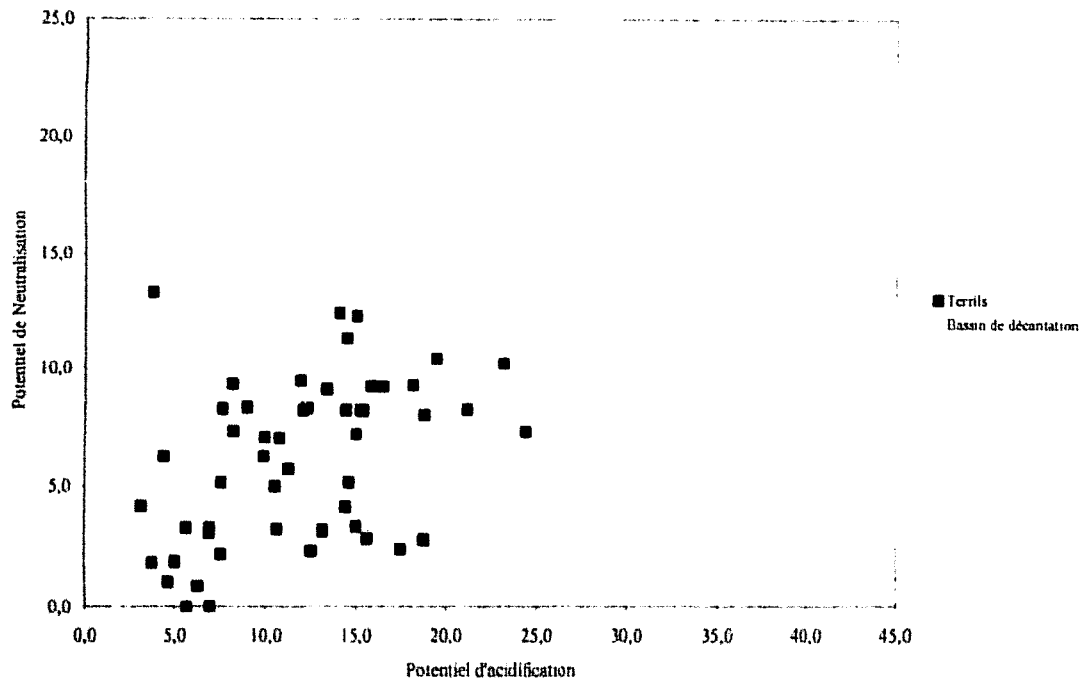


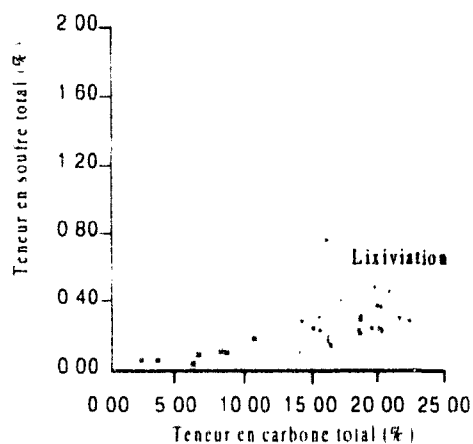
Fig. 3.48 : Comparaison des potentiels d'acidification et de neutralisation des échantillons prélevés sur les terrils et dans le bassin de décantation C du site 2.

## 2 - Interprétations

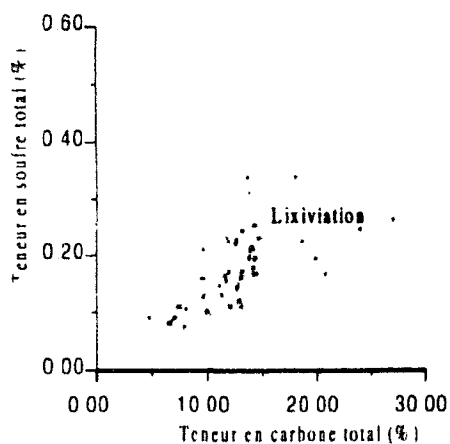
### 2.1 - Départ de carbone et de soufre en surface des terrils

La diminution des teneurs en soufre et carbone des phases solides reconnue en surface (Fig. 3.49) des terrils traduit un départ de soufre et de carbone dans les premiers centimètres. La stabilité des teneurs en soufre et carbone sur le profil vertical suggère que la lixiviation et l'exportation du soufre et du carbone sont limitées à la subsurface du terril. Sur ces édifices, le ruissellement et l'écoulement hypodermique semblent donc être prépondérants par rapport à une infiltration plus profonde.





Site 1



Site 2

- Echantillons de surface
- Echantillons prélevés en profondeur

Fig. 3.49 : Teneur en soufre total en fonction de la teneur en carbone total des échantillons solides prélevés en surface et en profondeur sur les deux sites.

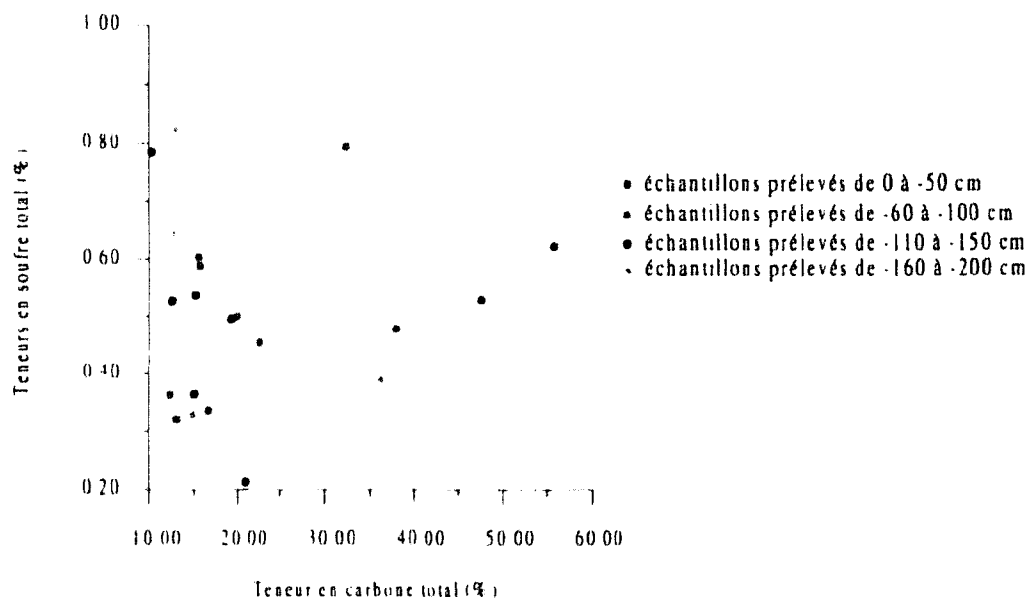


Fig. 3.50 : Teneur en soufre total en fonction de la teneur en carbone total des échantillons solides prélevés en surface et en profondeur dans le bassin de décantation C du site 2.

La figure 3.50 qui présente les teneurs en soufre total en fonction des teneurs en carbone total des échantillons prélevés à différentes profondeurs dans le bassin de décantation ne montre pas le phénomène de lixiviation superficielle visible sur les terrils. Les teneurs en soufre et en carbone apparaissent très variables en profondeur et aucun gradient surface-profondeur n'a pu être mis en évidence pour ces échantillons.

## 2.2 - Chimie et minéralisation sulfatée

La comparaison des eaux de pluie avec les échantillons prélevés dans les mares temporaires nous a montré leur enrichissement notamment en sulfates. Cet enrichissement attribué à la percolation d'eau ou au ruissellement sur les terrils est également visible par la formation d'une efflorescence blanchâtre autour des mares après évaporation (cristaux de gypse (Aglave, 2000)). Un relargage de sulfates peut donc être mis en évidence sur les sites – mêmes.

L'analyse des teneurs en sulfates des eaux souterraines situées en amont et en aval des deux sites permet de déterminer si ces eaux de lixiviation de terrils peuvent s'infiltrer et atteindre la nappe de la Craie.

Dans la suite du mémoire, des cartes d'isovaleurs de concentrations notamment, ont été réalisées grâce au logiciel de contourage automatique Surfer afin d'avoir une représentation géographique des points de prélèvements. Il est bien entendu que les courbes d'isovaleurs présentes sur les cartes n'y sont qu'à titre indicatif, la répartition non homogène des points et leur nombre ne permettant pas un maillage régulier et donc une interpolation entre les points réellement fiable.

La répartition spatiale des teneurs en sulfates (Fig. 3.51), confirme l'impact de la lixiviation des terrils sur la composition chimique des eaux de la nappe de la Craie. On observe ainsi à l'amont hydraulique du site 1 des concentrations en ions sulfate de 210 et 310 mg.l<sup>-1</sup> qui passent à des valeurs de 670 à 1500 mg.l<sup>-1</sup> à l'aval. En revanche pour le site 2, l'augmentation de concentration en sulfate à l'aval est moindre, avec des teneurs de l'ordre de 200 mg.l<sup>-1</sup>, teneurs qui sont le plus souvent supérieures à celles identifiées dans la nappe de la Craie en écoulement naturel. La carte des conductivités électriques visible en fig. 3.52, suit en toute logique le même schéma que la carte des sulfates. De l'amont à l'aval hydraulique des deux sites, une nette augmentation des valeurs de conductivité électrique est identifiée illustrant ainsi une relation entre terrils et minéralisation des eaux souterraines.

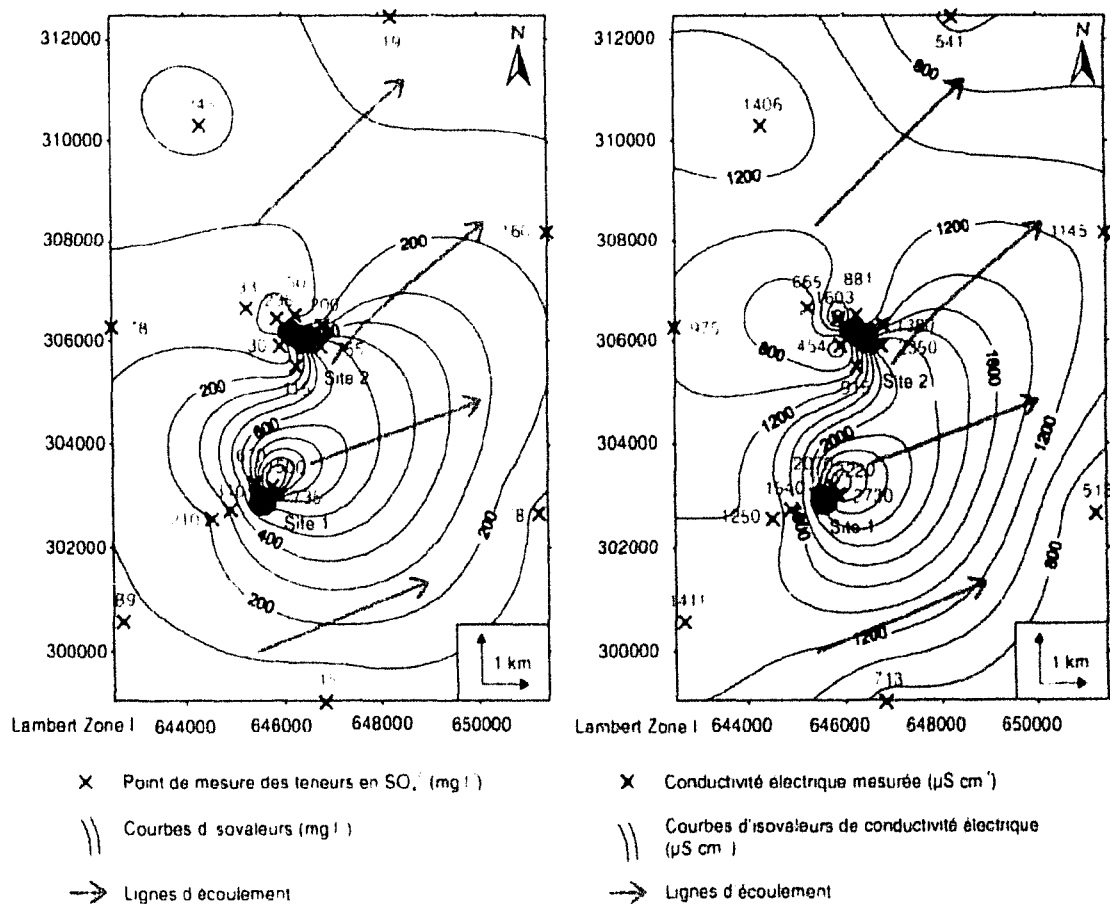
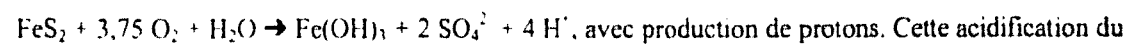


Fig. 3.51 et 3.52. Carte d'isovaleurs de concentrations en sulfates (en  $\text{mg.l}^{-1}$ ) et de conductivité électrique ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ) des eaux prélevées dans la nappe de la Craie.

Cet enrichissement en ions sulfate des eaux situées à l'aval hydraulique des terrils se traduit également par la position des points analytiques en figure 3.53. Sur un diagramme  $[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] - [\text{HCO}_3^-]$  vs  $[\text{SO}_4^{2-}]$ , où la part de la dissolution initiale de carbonates, représentée par  $[\text{HCO}_3^-]$  est soustraite à la somme des cations  $[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$ , les points analytiques présentent un enrichissement en ions sulfate par rapport à la droite théorique de dissolution des minéraux sulfatés (gypse principalement). Cet enrichissement provient de l'oxydation des sulfures (symbolisée par la flèche ① sur la figure 3.53) suivant la réaction exothermique :



avec production de protons. Cette acidification du milieu provoque la dissolution « secondaire » de carbonate (flèche ②) suivant la réaction :



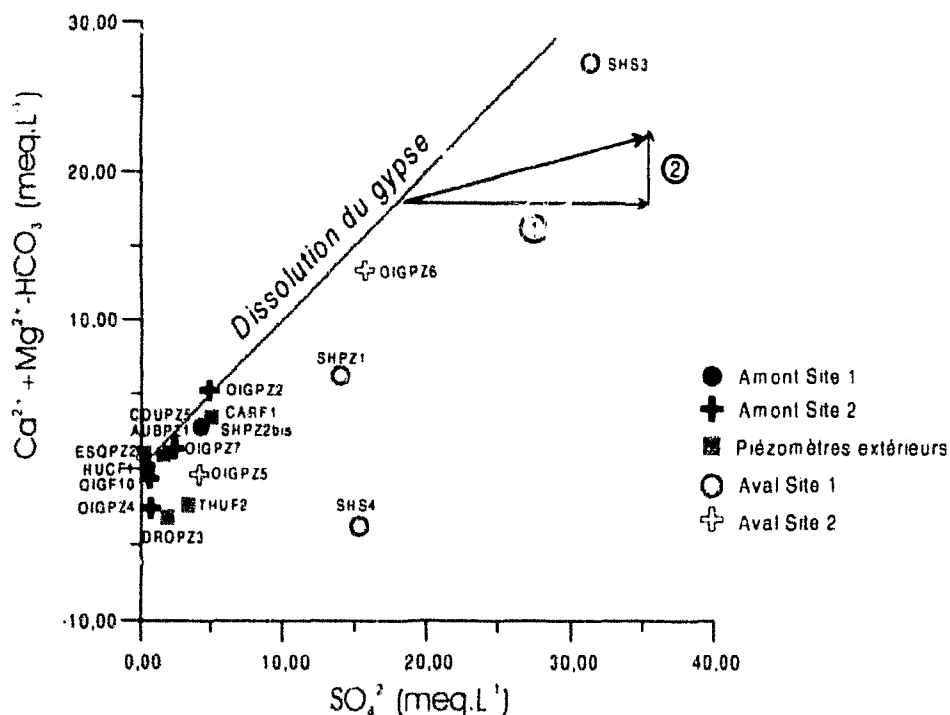


Fig. 3.53 : Diagramme  $[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] - [HCO_3^-]$  vs  $[SO_4^{2-}]$ . La flèche ① correspond à la réaction d'oxydation des sulfures et la flèche ② à la dissolution secondaire de carbonates.

La comparaison des teneurs en sulfates mais également en d'autres éléments (tels que Mg, K, Ca, Na et Sr) des eaux prélevées en amont et en aval des deux sites étudiés ainsi que dans un rayon de quelques kilomètres, avec un échantillon d'eau prélevé en dehors du bassin minier a permis d'observer des teneurs plus importantes des eaux prélevées dans le bassin minier qu'en dehors. Donc, si l'on considère que l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy est caractéristique des eaux de la nappe de la Craie avant que celle-ci ne subisse l'impact de l'exploitation charbonnière, on peut dire que les eaux enrichies en divers éléments prélevées en amont des sites ainsi que dans un rayon de 5 km autour de ceux-ci montrent l'existence d'un « bruit de fond géochimique » qui pourrait être attribué entre autre à l'exploitation du charbon mais également que les eaux prélevées à l'aval des sites montrent un enrichissement encore plus important en certains de ces éléments, ce qui signe l'existence d'un impact des terrils étudiés sur la qualité des eaux de la nappe sous jacente.

## 2.3 - Détermination des sources de sulfate

### 2.3.1 - Le $\delta^{34}\text{S}$ : marqueur des sources de sulfates

Le sulfate marin actuel présente une grande homogénéité isotopique à l'échelle planétaire, qui résulte d'un état de régime permanent dans les océans entre entrées (rivières) et sorties (aérosols marins, réduction, précipitation d'évaporites)  $\delta^{18}\text{O} = 9,45 \pm 0,15$  ;  $\delta^{34}\text{S} = 20,0 \pm 0,25$  (Michelot, 1988).

Les teneurs en isotopes lourds des sulfates évaporitiques marins montrent que des régimes permanents différents de l'actuel, ont existé dans les océans au cours des temps géologiques. Holser et Kaplan (1966), Claypool *et al.* (1980) ont mis en évidence une relative concordance entre les teneurs isotopiques de sulfates évaporitiques déposés à la même période en différents lieux, et d'autre part, des différences très significatives de teneurs isotopiques liées à l'âge des dépôts.

Une concentration importante de sulfates dans les eaux souterraines peut avoir plusieurs origines naturelles et/ou anthropiques. Dans beaucoup de situations, les isotopes stables du soufre donnent un moyen de distinguer ces deux origines (pour peu que les sources ou les processus affectant les diverses formes du soufre soient assez tranchés). Les variations d'abondance relative des isotopes du soufre dans les environnements de basse température sont principalement dues aux réactions redox du cycle bactérien du soufre (van Donkelaar *et al.*, 1995).

En effet, la réduction bactérienne du sulfate (équation 1 ci-dessous) est hautement sélective en faveur du  $^{32}\text{S}$  (fractionnement isotopique important).



La réduction préférentielle de  $^{32}\text{S}^{16}\text{O}_4^{2-}$  par les bactéries sulfato-réductrices a pour résultat un enrichissement du  $\delta^{34}\text{S}$  dans les sulfates restants. Au contraire, l'oxydation bactérienne des sulfures n'est pas sélective pour les isotopes du soufre (Taylor *et al.*, 1984).

Les sulfures des terrils pourraient ne pas constituer la seule source de sulfate en solution.

En effet, dans le secteur étudié, différentes sources peuvent être à l'origine des sulfates dissous :

- La dissolution des minéraux évaporitiques présents en abondance dans les systèmes carbonatés et sulfatés des Calcaires carbonifères et contaminant *per ascensum* la nappe de la Craie ;
- La mise en solution du gypse d'origine diagénétique contenu dans les couches tertiaires (Argiles de Louvil, Sables d'Ostricourt) ;
- L'altération météorique des terrils : le ruissellement des eaux météoriques sur les schistes houillers riches en sulfures de fer (pyrite) entraîne leur oxydation en sulfates qui peuvent être alors entraînés vers la nappe de la Craie .
- Les sulfates d'origine anthropique liés aux rejets d'eaux usées et/ou aux pratiques agricoles.

La composition isotopique des sulfates (Fig. 3.54) permet de distinguer les différentes sources possibles. En effet, les sulfates issus de l'oxydation des sulfures contenus dans les schistes houillers présentent des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  faiblement négatives (Bernard, 1979 ; Tribovillard *et al.*, 1998). Ces valeurs retrouvées en aval du site 1 (-2,8‰, -3,9‰) indiquent un transfert direct des sulfates vers la nappe de la Craie, libre en cet endroit.

Sur le site 2, une deuxième source de sulfates caractérisée par un  $\delta^{34}\text{S}$  de -20‰ est identifiée. Cette valeur, caractéristique du gypse contenu dans les Sables d'Ostricourt (Droz, 1985), souligne la contribution de la dissolution de ces minéraux sulfatés à la minéralisation totale.

En outre, l'hypothèse d'une contamination *per ascensum* de la nappe de la Craie par les eaux des systèmes carbonatés et sulfatés des Calcaires carbonifères ne peut être ici retenue. En effet, les analyses effectuées sur les évaporites dinantiennes indiquent des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  oscillant entre +14,0‰ et +18,8‰ (Droz, 1985 ; Pierre *et al.*, 1984), cette signature isotopique est trop tranchée par rapport à celle des fluides étudiés ici pour qu'une influence des eaux sulfatées des Calcaires carbonifères soit envisageable dans le secteur étudié.

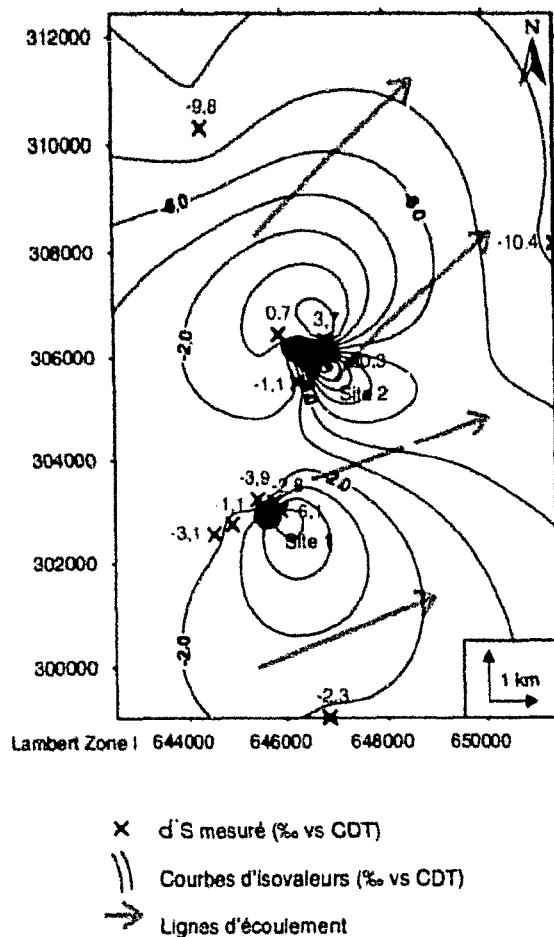
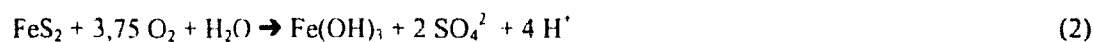


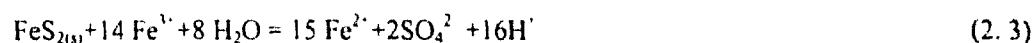
Fig. 3.54 : Carte d'isovaleurs de  $\delta^{34}\text{S}$  mesuré sur les échantillons prélevés dans la nappe de la Craie.

### 2.3.2 – L'<sup>18</sup>O des sulfates

Comme nous l'avons déjà vu dans le 1<sup>er</sup> chapitre, l'oxydation de la pyrite est une réaction exothermique que l'on peut écrire de la façon suivante :



Les réactions suivantes correspondent à différents stades de la réaction complète (Rose & Cravotta, 1998) :



La production de sulfate par oxydation peut donc se faire selon deux mécanismes (McCarthy *et al.*, 1998) :

- avec O<sub>2</sub> comme agent oxydant (2. 1)
- en l'absence d'oxygène, avec Fe<sup>3+</sup> ou un autre agent oxydant (2. 3)

Dans la réaction (2. 1), la plupart des atomes d'oxygène formant la molécule de sulfate dérivent de l'oxygène moléculaire, alors que dans la réaction (2. 3), ils dérivent des molécules d'eau. Ces deux sources d'oxygène ont des compositions isotopiques différentes ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{O}_2}$  et  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) et la composition isotopique de tout sulfate peut être décrite par :

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4} = a (\delta^{18}\text{O}_{\text{O}_2} + \epsilon_{\text{O}_2}) + b (\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (3)$$

où a et b = fractions de sulfate produites par les réactions 2. 1 et 2. 3 (et a+b=1)

$\epsilon$  = facteur d'enrichissement isotopique associé aux réactions (2. 1) et (2. 3)

Ainsi, la différence marquée dans la composition isotopique de l'oxygène atmosphérique ( $\delta^{18}\text{O} = +23 \text{‰}$ ) et des eaux météoriques ( $\delta^{18}\text{O} = -5 \text{ à } -8 \text{‰}$  dans notre secteur d'étude ; Tab 3.24) peut en théorie permettre de tracer les principaux mécanismes d'oxydation par analyses isotopiques des sulfates formés. La vitesse d'échange isotopique de l'oxygène entre sulfate et eau étant lente, la composition isotopique de l'oxygène des sulfates formés par oxydation de pyrite garde l'identité de la source originelle de l'oxygène (Taylor *et al.*, 1984a et b, Van Everdingen et Krouse, 1985).

D'après Taylor et al (1984), les variations naturelles de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$  reflètent l'incorporation à la fois d'oxygène dérivé de l'eau et d'oxygène atmosphérique, ceci pouvant se produire dans divers environnements qui faciliteraient soit la réaction (2. 1) soit la réaction (2. 3). Par exemple, dans les environnements où l'oxygène dissous est abondant, ou dans les environnements où des bactéries telles que *T. ferrooxidans* sont présentes, la réaction (2. 1) sera favorisée, augmentant ainsi le  $\delta^{18}\text{O}$  du sulfate formé par incorporation d'oxygène atmosphérique isotopiquement plus lourd. La cinétique de l'oxydation par la réaction (2. 3) est généralement plus rapide que par la réaction (2. 1) et ce mécanisme prédomine sous conditions naturelles, spécialement dans le cas de charbons où l'acidité produite par oxydation de la pyrite peut stabiliser  $\text{Fe}^{3+}$  à des concentrations relativement élevées.

Les données isotopiques de l'oxygène des sulfates dissous et des eaux souterraines échantillonnées dans notre secteur d'étude (Fig. 3.55) indiquent que les sulfates sont produits selon les réactions (2. 1) et (2. 3) décrites ci-dessus.

Le graphique représentant la teneur en  $^{18}\text{O}$  du sulfate formé par oxydation de sulfure en fonction de la teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau (Fig. 3.55) dans laquelle la réaction se produit, nous donne la part de la contribution relative de l'équation (2. 3) de 0 à 100% (Taylor et al, 1984 ; Van Everdingen & Krouse, 1985 ; Michelot, 1988) pour les points de prélèvement situés à l'aval des sites.

Hormis le point SHPZ1, les résultats montrent que pour l'essentiel des points analytiques, les sulfates présents dans la nappe sont majoritairement produits selon la réaction (2.1). Cette constatation nous amène à penser que la concentration en  $\text{Fe}^{3+}$  n'est pas suffisamment importante pour que la réaction (2.3) soit le mécanisme dominant de la production d'acide et de sulfate ce qui a pour effet une production moins importante notamment d'ions  $\text{H}^+$ .



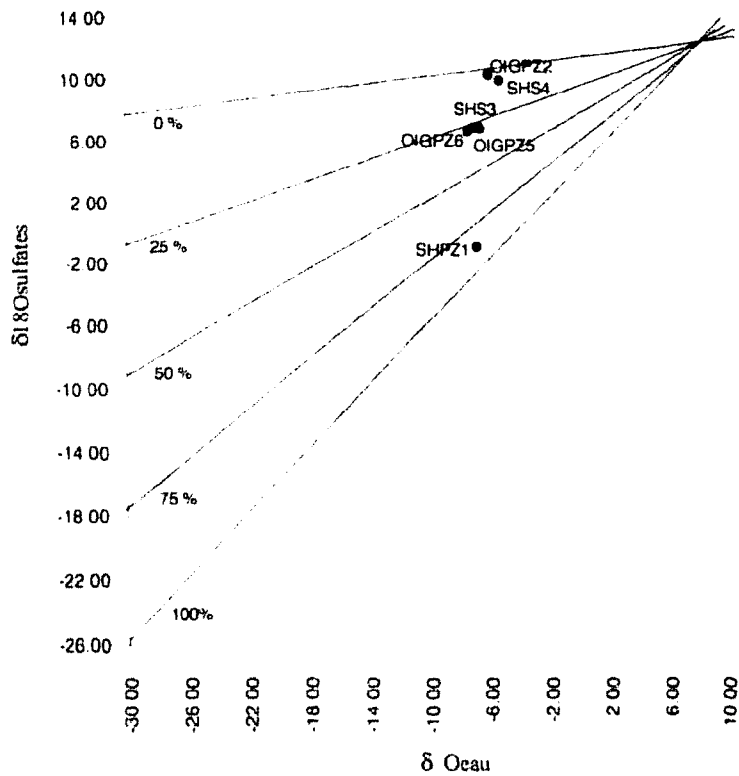


Fig. 3.55 - Graphique représentant la teneur en  $^{18}\text{O}$  du sulfate formé par oxydation de sulfure en fonction de la teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau.

## 2.4 - Processus de réduction

La carte d'isovaleurs de potentiel d'oxydo-réduction (Fig. 3.56) met en évidence qu'à l'aval du site 1, les conditions sont oxydantes (Eh positif), les sulfates issus de la lixiviation du terril ne peuvent alors être réduits postérieurement à leur transfert dans la nappe. En revanche, les conditions sont réductrices à l'aval du site 2 (Eh négatif) ou la nappe est semi-captive. Ceci provoque une réduction partielle des sulfates dissous.

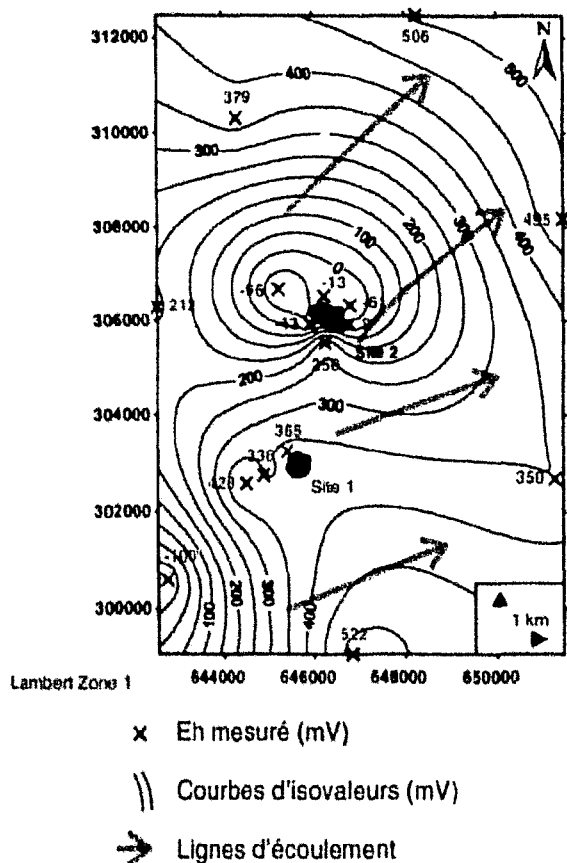
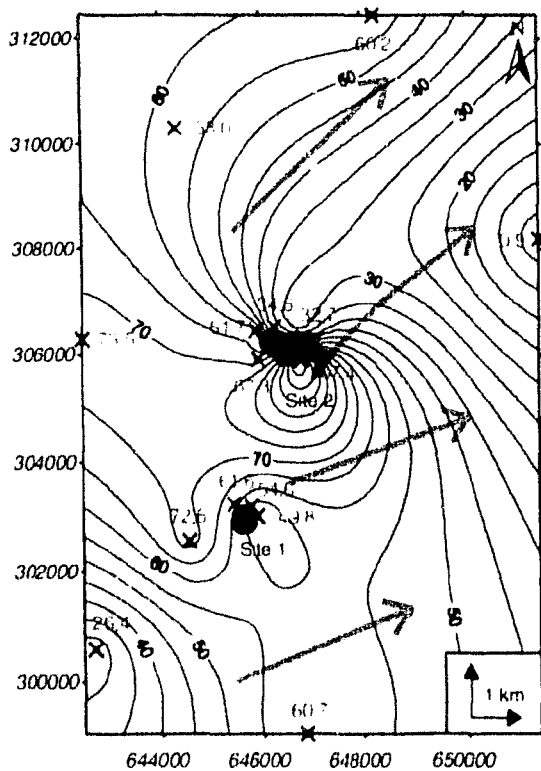


Fig. 3.56 : Carte d'isovaleurs de potentiel redox mesurées dans la nappe de la Craie.

La réduction bactérienne des sulfates est favorisée par un important apport de carbone organique en relation avec la lixiviation des terrils (Fig. 3.57). La dépendance des réactions de sulfato-réduction vis-à-vis de la matière organique, fournisseur d'électron, peut être exprimée par l'équation (4):



L'apport de carbone dissous, associé aux réactions d'oxydo-réduction, est identifiable par une diminution de l'activité  $^{14}\text{C}$  des eaux de la nappe de la Craie. En effet, il est reconnu que l'activité  $^{14}\text{C}$  moyenne d'une eau de recharge dans l'aquifère de la Craie avoisine les 70 pCm (Dever, 1985), valeur de référence reconnue en amont des sites 1 et 2 (PZ2BIS, OIGF10) (Fig. 3.57).



- x A<sup>14</sup>C mesurée (pCm)
- || Courbes d'isovaleurs (pCm)
- ➔ Lignes d'écoulement

Fig. 3 57 Carte d'isovaleurs d'activité <sup>14</sup>C mesurées sur les eaux prélevées dans la nappe de la Craie.

La diminution de teneur en <sup>14</sup>C entre amont et aval des terrils ne peut être associée à un ralentissement des circulations souterraines à proximité ou sous les terrils. En effet, la mise en place de ces derniers est récente par rapport au temps de demi-vie du <sup>14</sup>C (5568 ans). Il se produit donc une dilution partielle de l'activité <sup>14</sup>C du Carbone Inorganique Total Dissous des eaux de l'aquifère de la Craie par un apport de carbone dissous dépourvu de <sup>14</sup>C tel qu'identifié sur la figure 3.58a (carbone « mort »).

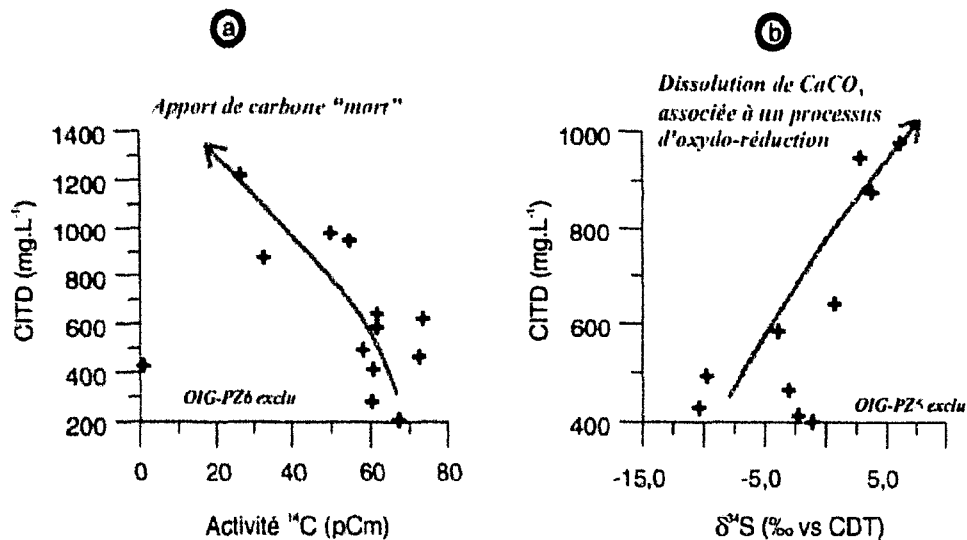


Fig. 3.58 : a - Teneurs en CITD vs activités  $^{14}\text{C}$   
b - Teneurs en CITD vs  $\delta^{34}\text{S}$

L'enrichissement en  $^{34}\text{S}$  des sulfates dissous rend compte de la réduction partielle de cet élément par voie bactérienne, le  $^{32}\text{S}$  étant préférentiellement métabolisé et piégé sous forme de sulfures néoformés et donc soustrait aux solutions (Fig. 3.58 b). L'augmentation des teneurs en CITD reflète l'oxydation bactérienne du carbone organique dissous. Le carbone organique dissous soutenant l'activité bactérienne provient de la lixiviation de matériaux d'âge carbonifère dépourvus de  $^{14}\text{C}$ . Participant à l'élévation du CITD, il explique la diminution des activités  $^{14}\text{C}$  observée en aval des terrils (Fig. 3.57). Ce processus d'oxydo-réduction ne marque pas de façon identique les deux sites étudiés, les teneurs en carbone dissous à l'aval des terrils relèvent donc de deux modes de mélange différents découlant de l'hétérogénéité des contextes hydrogéologiques :

- (a) sur le site 1 : mélange entre un apport de carbone dissous provenant de la nappe de la Craie (environ 70 pCm), un apport de carbone associé à la lixiviation des terrils (environ 0 pCm) et un apport de carbone provenant de la recharge directe de la nappe de la Craie par les précipitations (environ 100 pCm), l'absence d'argile permettant cette recharge ;
- (b) sur le site 2 : dilution de l'activité  $^{14}\text{C}$  de la nappe de la Craie (environ 70 pCm) par un apport de carbone associé à la lixiviation des terrils (environ 0 pCm), la présence d'argile ne permettant pas la recharge immédiate en aval.

## 2.5 - Variations de pH et variations du chimisme des eaux de la nappe de la Craie en aval des terrils

- données de terrain

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les terrils et bassins de décantation peuvent être une source de drainage acide minier. Les échantillons de stériles analysés montrent une faible teneur en soufre total, cependant le volume considérable de ces dépôts dans la région Nord-Pas-de-Calais laisse supposer un impact non négligeable sur la nappe de la Craie sous-jacente.

Les mesures *in situ* effectuées lors de l'échantillonnage des eaux de la nappe de la Craie ont permis de mettre en évidence une légère diminution de pH à l'aval des sites 1 et 2 (Fig. 3.59).

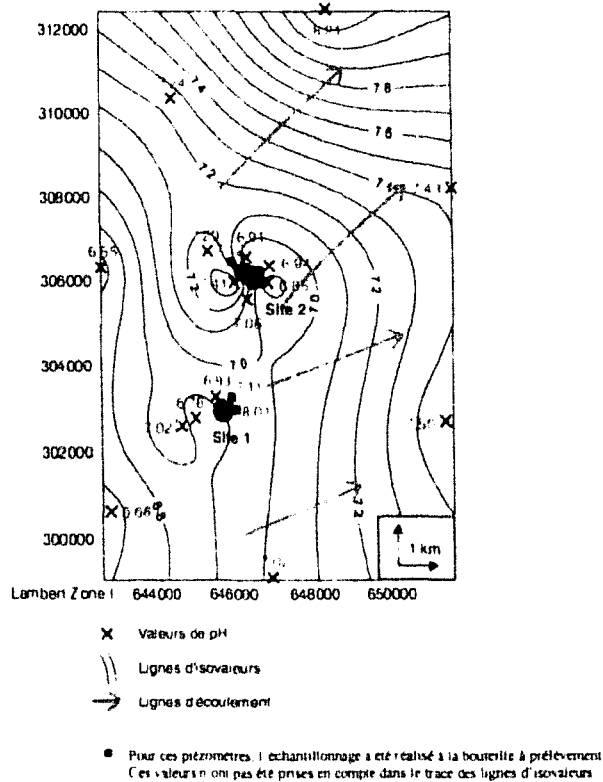


Fig. 3.59 Carte des isovaleurs de pH

La carte des teneurs en sulfates (Fig. 3.51) et l'utilisation des isotopes du soufre (Fig. 3.54) ont permis de montrer un départ de sulfates à partir des terrils étudiés. La légère diminution de pH associée au départ de sulfate à partir des terrils confirme une tendance au drainage acide minier (limité) au niveau des sites étudiés.

Il est important de noter que la diminution de pH observée est très faible. Cette constatation peut s'expliquer par le fait que les eaux issues de la lixiviation des terrils s'infiltrent dans un milieu tampon : l'aquifère de la nappe de la Craie. Les seuls témoins de cet NAMD (Neutral Acidic Mine Drainage) sont donc d'une part la quantité de sulfates et d'autre part l'augmentation de teneurs en magnésium, calcium, bicarbonate et strontium observée à l'aval des terrils (Fig. 3.60 à 3.63). Une dissolution des carbonates provoquée par la légère diminution de pH observée à l'aval des sites peut expliquer la variation des teneurs en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et Sr observées. La dissolution de chlorite peut également expliquer une partie de la concentration en magnésium observée, mais dans le cas étudié, il est plus raisonnable d'envisager la dissolution de la calcite plus ou moins magnésienne de la craie.

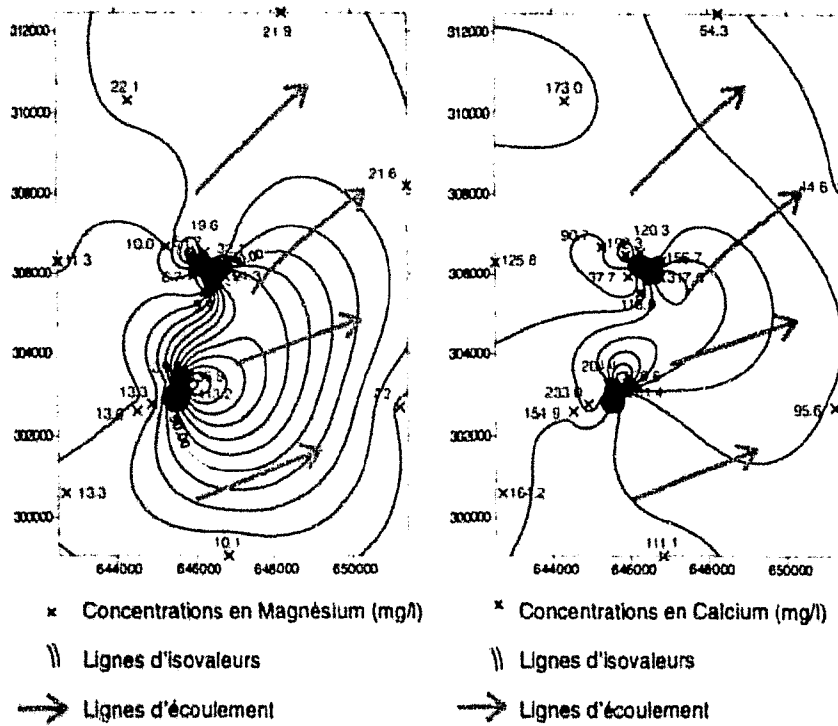


Fig. 3.60 et 3.61 : Concentration en magnésium et en calcium ( $\text{mg. l}^{-1}$ ) des eaux prélevées dans la nappe de la Craie.

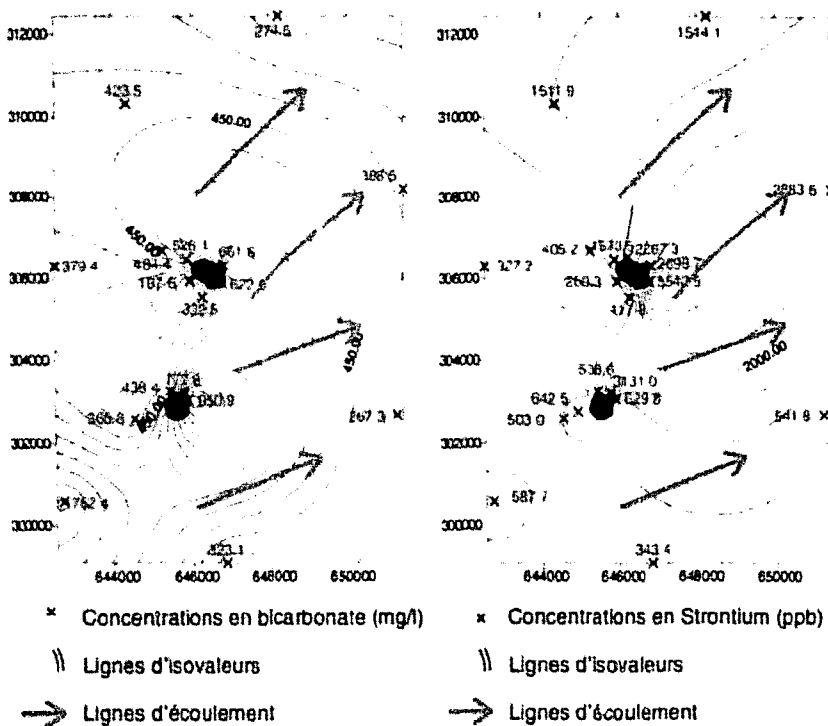


Fig. 3.62 et 3.63 : Concentration en bicarbonates ( $\text{mg. l}^{-1}$ ) et en strontium (ppb) des eaux prélevées dans la nappe de la Craie.

- essais de lixiviation réalisés en laboratoire et mesure du potentiel d'acidification et de neutralisation des stériles houillers et des résidus de bassin de décantation

Les mesures de potentiel d'acidification et de neutralisation réalisées ont montré que les stériles houillers et les résidus de bassin de décantation étaient potentiellement générateurs d'acide. Les essais de lixiviation réalisés sur ces deux types d'échantillons en présence d'acide et de base ont montré que pour des pH acides, Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca et K peuvent être relâchés en concentrations relativement importantes (surtout le fer et le calcium qui peuvent atteindre 1000 mg.l<sup>-1</sup>). Le fait que l'on retrouve certains de ces éléments (Mg et Ca) formant un panache plus concentré à l'aval des sites peut être relié :

à une dissolution d'éléments constitutifs de la Craie en raison d'un apport d'eau légèrement acide comme nous venons de le montrer ci-dessus. Mais il ne s'agit pas de la seule hypothèse et il convient d'aborder les autres explications potentielles :

ces plus fortes concentrations observées à l'aval des sites pourraient également être dues à un apport d'éléments venant du terril. Si l'on considère que ces éléments sont solubilisés à partir du terril, la faible concentration observée dans la nappe de la craie pour certains d'entre eux (Si, Al, Fe, Mn et K) pourrait s'expliquer par le fait que la quantité potentiellement mobilisable pour ces éléments est moindre que celle du calcium et du magnésium (c'est le cas pour Si, Al, Mn et K dont les plus importantes concentrations observées dans les éluats après les essais de lixiviation sont inférieures à 100 mg.l<sup>-1</sup> contre près de 1000 mg.l<sup>-1</sup> pour le calcium et le fer et un peu plus de 100 mg.l<sup>-1</sup> pour Mg) mais également par le fait que la libération maximale de ces éléments (Si, Al, Fe, K) se fait à pH très bas (pH < à 4 voire 2) puis qu'elle diminue considérablement aux valeurs proches de la neutralité tandis que le calcium et le magnésium montrent encore une mobilisation importante pour des valeurs de pH proches de la neutralité. Les éléments tels que Si, Al, Fe, et K pourraient donc être immobilisés une fois arrivés dans les eaux de la nappe de la Craie de pH proche de la neutralité tandis que le calcium et le magnésium, solubles sous ces conditions pourraient former un panache. On n'observe pas à l'aval des sites de panache de Mn qui présente pourtant lui aussi des concentrations maximales jusqu'à pH neutre, il faut toutefois noter à ce propos que la concentration de Mn mobilisée lors des essais est apparue nettement moindre que celle du Ca et du Mg (autour de 10 mg.l<sup>-1</sup>).

Il est important de noter que la première hypothèse est la plus réaliste car si l'on retient la seconde hypothèse, il est difficile de cerner pour quelles raisons aucun gradient surface - profondeur, donc aucune trace de lessivage de ces éléments n'est observée dans les analyses d'éléments majeurs réalisés sur les échantillons solides récoltés sur les deux sites.

Etude de la libération des sulfates en laboratoire : les essais de lixiviation réalisés en condition « saturé/non saturé » ont montré d'une part que le pH évoluait peu pendant l'essai et d'autre part que la quantité de sulfate relâchée variait au cours du temps (diminution des concentrations observées jusqu'à t0+3sem puis augmentation jusqu'à la fin de l'essai). Donc dans les conditions de l'essai, c'est-à-dire, une alternance de saturation du matériau en eau et de non saturation se rapprochant des périodes d'humidification et de séchage que l'on retrouve en surface des terrils (comparable à une zone vadose) et des bassins de décantation quand ceux-ci ne sont pas recouverts d'eau, on constate que la libération des sulfates se fait rapidement, dans les premières heures (12 h dans les conditions de l'essai), puis que la quantité de sulfate libérée diminue, atteignant des valeurs minimales à t0+3sem avant d'augmenter de nouveau. Cette observation pourrait être rapprochée des variations saisonnières observées dans d'autres cas de drainage acide minier pour lesquels on peut observer en fonction de la pluviosité du lieu des libérations périodiques de sulfates lorsqu'une forte période de pluie succède à une période plus sèche (Rapport EPA, 1994). La réalisation d'un suivi régulier (et notamment après des épisodes de pluie importants) de la quantité de sulfates présente dans la nappe de la Craie en aval des sites permettrait de vérifier l'existence de ce phénomène sur les sites étudiés.

Les essais de lixiviation réalisés en condition « saturée » montrent globalement que la quantité de sulfates relâchée augmente entre le début et la fin de l'essai : de manière assez faible pour les résidus de bassin de décantation et de manière irrégulière pour les stériles houillers comme cela a été souligné dans la présentation des résultats. En théorie, le fait de saturer les matériaux en eau devrait stopper ou tout au moins freiner la libération de sulfates puisque la quantité d'oxygène disponible pour oxyder la pyrite est moindre dans l'eau. Il existe pourtant plusieurs hypothèses pour tenter d'expliquer l'augmentation de la quantité de sulfate libérée entre le début et la fin de l'essai :

La mise en solution de produits d'oxydation des sulfures déjà présents avant le début de l'essai, ce phénomène, s'il a lieu doit cependant être limité car ces produits n'ont pas été détectés dans les analyses minéralogiques réalisées sur les échantillons testés (et la limite de détection par diffraction des rayons X est de 5 %)

L'entretien de l'oxydation des sulfures par libération de fer ferrique par dissolution d'oxyde ou d'hydroxyde de fer présent, il faut une fois encore noter que ces produits n'ont pas été détectés par les analyses minéralogiques mais que l'observation au MEB de stériles houillers a permis d'observer l'existence par endroit d'oxydes de fer.

## 2.6 – Comportement des métaux

- données de terrain



### *eaux souterraines*

Nous avons pu observer grâce aux analyses chimiques menées sur les solides prélevés en surface et en profondeur sur les deux sites qu'il n'existait pas de gradient de concentration pour les différents éléments analysés. Les concentrations rencontrées dans les schistes houillers étudiés sont très proches de la moyenne des shales, valeur de référence pour les analyses chimiques de roches sédimentaires de ce type. On ne constate donc pas de lessivage de métaux, associés ou non aux sulfures, et ce observé en profondeur (jusqu'à 2,5 m pour le site 1, 12,5 m pour le site 2 et 2 m pour le bassin de décantation) comme à haute résolution à l'échelle du premier mètre sous la surface des terrils.

On ne constate pas non plus de présence de panaches de concentrations élevées en métaux à l'aval des deux sites comme nous avons pu le constater dans le cas des teneurs en sulfates. Les teneurs en éléments traces, le strontium mis à part, des échantillons prélevés dans la nappe de la Craie sont faibles à très faibles (Tab. 3.23).

### *Autres prélèvements liquides*

On peut constater sur le tableau 3.23 que les eaux de pluie prélevées présentent des teneurs en Pb et Zn relativement élevées. Cette information, rapprochée du fait que certains échantillons solides de surface présentaient un enrichissement assez marqué en plomb, zinc et cadmium nous permet d'attribuer ces enrichissements à un apport atmosphérique.

On peut également remarquer que les eaux prélevées dans les mares temporaires sont appauvries notamment en Pb et en Zn par rapport aux eaux de pluie ce qui laisse pressager une éventuelle fixation ou une précipitation de ces éléments dans ces milieux. Par contre, on peut observer que l'échantillon d'eau prélevé dans le bassin de décantation montre des teneurs relativement proches pour le plomb et le zinc de celle des eaux de pluie, il n'y a donc pas, semble-t-il, à ce niveau de phénomènes de remobilisation (fixation ou précipitation) de ces métaux lourds. Ceci pourrait expliquer le fait qu'aucune augmentation des teneurs en plomb et en zinc n'ait été reconnue pour les échantillons solides prélevés en surface du bassin de décantation au contraire des échantillons de stériles mis à terril et qui constituent le « substrat » des mares temporaires échantillonnées.

- essais de lixiviation réalisés en laboratoire et mesure du potentiel d'acidification et de neutralisation des stériles houillers et des résidus de bassin de décantation

Les stériles et les résidus de bassin de décantation sont potentiellement générateurs d'acide. Les essais de lixiviation réalisés sur ces deux types d'échantillons en présence d'acide et de base ont montré qu'à pH acide, certains éléments tels que As, Cr, Cd, Co, Cu, Sr, Pb et Zn pouvaient être libérés en solution. Il est toutefois important de noter que les quantités relâchées lors de ces tests sont faibles

puisque'elles ne dépassent que très rarement 1 mg.l<sup>-1</sup> (valeur reconnue pour le cuivre, le plomb et le zinc à pH inférieur à 2, donc dans des conditions extrêmement agressives qui ne se retrouvent vraisemblablement pas en conditions de terrain). Le fait qu'aucun panache concentré en ces différents éléments ne soit visible à l'aval des sites peut être expliqué de différentes manières :

Si ces éléments sont exportés dans les eaux d'infiltration et de ruissellement, ce qui ne semble pas être le cas puisque'aucun gradient surface-profondeur n'a été détecté dans les échantillons solides analysés, ils peuvent vraisemblablement précipiter une fois arrivés dans les eaux de la nappe de la craie de pH proche de la neutralité, il est également envisageable que cette immobilisation puisse se faire plus tôt, au sein même du terril dans des micro-environnements plus riches en carbonates, par neutralisation des eaux acides et augmentation des valeurs de pH ;

Il se peut également que la quantité d'acide produite par l'oxydation des sulfures ne soit pas ou plus suffisante pour entraîner une mobilisation importante de ces différents éléments : on constate en effet grâce aux essais de lixiviation réalisés que pour la plupart des éléments cités auparavant, le maximum de libération se fait pour des valeurs de pH inférieures à 4 voire 2 pour des éléments tels que le cuivre, le plomb et le zinc.

## **2.7 – Les minéraux secondaires : des témoins d'un drainage acide minier limité**

L'observation des coupes et fosses réalisées sur les deux sites a permis de mettre en évidence la présence de taches pulvérulentes de couleur ocre. L'analyse par diffraction des rayons X des poudres réalisées à partir de ces échantillons a permis de montrer la présence de jarosite et de natrojarosite (Fig. 3.4).

L'observation au Microscope Electronique à Balayage de taches similaires prélevées sur le site 2 (Aglave, 2000) a confirmé la présence de jarosite ( $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ), minéral cristallisant dans le système hexagonal (sous système rhomboédrique) en cristaux bipyramidaux. Ce minéral atteste de l'oxydation de la pyrite en profondeur et de la formation de sulfates.

Il a également été possible d'observer sur les parois des ravines et autour des mares temporaires (site 2) la présence d'efflorescences blanches. Leur observation au microscope électronique à balayage de ces dépôts a notamment permis de mettre en évidence la configuration en « fer de lance » typique des cristaux de gypse qui témoignent d'un milieu saturé en sulfates (Aglave, 2000).

Enfin, nous avons pu observer par endroit sur le site 2 la présence sur le fond de mares temporaires la présence d'une substance de couleur rouille qui a été échantillonnée. L'observation de ces prélèvements au MEB (Aglave, 2000) a montré la présence de ferrihydrite, hydroxyde de fer qui résulte là aussi des réactions d'oxydation de la pyrite. La formation de ces précipités permet une

immobilisation du fer *in situ*, ce qui peut également expliquer, du moins en partie, l'absence de variation reconnue pour cet élément à l'aval des sites étudiés.

L'extension de ces minéraux secondaires sur les sites étudiés est très faible mais témoigne tout de même de l'existence d'un drainage acide minier limité.

### 3 - Conclusion

Les deux terrils étudiés exportent des ions sulfate dans l'aquifère de la Craie, en réponse à la lixiviation d'origine météorique de ces édifices.

L'utilisation des isotopes du soufre comme marqueurs des différentes sources de sulfates a permis d'identifier deux sources d'apport au niveau des sites d'étude : une source « terril » avec un  $\delta^{34}\text{S}$  faiblement négatif (-6‰ à -2‰), correspondant à une oxydation des sulfures contenus dans les schistes houillers et une autre source ( $\delta^{34}\text{S} = -20‰$ ), correspondant au gypse contenu dans les Sables d'Ostricourt reconnue uniquement au niveau du second site où les sables tertiaires sont présents.

D'autre part, sur le site 1, en zone de nappe libre, la lixiviation du terril entraîne directement l'exportation de sulfates à la nappe tandis qu'en zone de nappe captive, sur le site 2, une partie des sulfates exportés à la nappe est réduite. Cette réduction bactérienne des sulfates est rendue possible par la lixiviation du carbone concomitante de celle du soufre sur les terrils. Cet apport de carbone a été confirmé par l'analyse de l'activité  $^{14}\text{C}$  des eaux prélevées, sensiblement plus faible en aval des sites qu'en amont, cette diminution est à rattacher à un apport de carbone « mort » provenant des terrils, carbone qui entre alors en jeu dans la réduction des sulfates ( $2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{HS}^-$ ).

Les analyses d'éléments majeurs et d'éléments traces réalisées sur les solides prélevés en surface et en profondeur sur les terrils et l'un des bassins de décantation n'ont pas permis de mettre en évidence de départ de ces éléments à partir des sites. La présence de concentrations plus importantes en plomb, zinc et cadmium visible en surface surtout sur le site 1 a pu être attribué à un apport atmosphérique au regard des analyses de pluie effectuées.

On ne constate d'ailleurs pas non plus de présence de panache, notamment de métaux lourds à l'aval des sites. Les essais de lixiviation réalisés ont montré à ce propos que ces métaux lourds étaient potentiellement mobilisables à pH très bas donc en conditions très agressives mais que la quantité mobilisée dans les conditions de l'essai était très faible, ne dépassant jamais le milligramme par litre.

Contrairement à l'exploitation des minerais de sulfures métalliques qui sont souvent riches en pyrite et aboutissent à des eaux très acides riches en fer et autres métaux, les stériles étudiés ici provoquent la formation d'un drainage acide minier de faible ampleur, neutralisé par le milieu tampon que constitue la nappe de la Craie et dont le principal témoin est l'augmentation sensible des teneurs en sulfates reconnue à l'aval des sites étudiés.

**CHAPITRE IV :**  
**COMPORTEMENT DES EAUX METEORIQUES,**  
**MODALITES DE DEPLACEMENT : RUISSELLEMENT ?**  
**INFILTRATION ?**



Il est important de connaître quelle quantité de résidus miniers est en contact avec les eaux météoriques et quelle est la nature de ce contact afin d'évaluer quel peut être l'impact d'un terril sur l'environnement et notamment sur les aquifères sous-jacents (Hawkins, 1998). En effet, il est peu probable que l'intégralité des matériaux d'un terril puisse entrer en contact avec les eaux météoriques. Par conséquent, pour approcher la quantité de sulfate relargable à terme par oxydation de sulfure dans un terril, il convient de pouvoir approcher la quantité de matériau pouvant entrer en contact, tôt ou tard, avec les éventuelles eaux d'infiltration. Par conséquent, il est nécessaire de déterminer l'existence d'infiltrations d'eau et, si elles existent, les modalités de pénétration de ces eaux météoriques dans les édifices que constituent les terrils.

## **1 - Caractéristiques hydrogéologiques des terrils et conséquences sur la production d'AMD et la libération d'ions sulfates**

Dans la littérature, deux types d'écoulement d'eau peuvent être distingués dans le cas de résidus miniers : un écoulement « poral », similaire à un écoulement dans des alluvions non consolidées, et un écoulement au travers d'un système de vides de grande taille en connexion (Hawkins et Aljoe, 1992). Ce double système d'écoulement peut exister en raison du caractère très hétérogène et anisotrope du matériau. Cette hétérogénéité trouve son origine à la fois dans les procédés d'extraction et d'entassement des matériaux constitutifs des terrils et les procédés de réhabilitation de ces derniers.

### **1.1 – Origine de l'hétérogénéité du matériau constitutif des terrils**

Ainsi que l'ont souligné Gerke *et al.* (1998), les terrils présentent une grande hétérogénéité en raison des niveaux sédimentaires originels exploités et des techniques d'exploitation utilisées. Les terrils étudiés ici présentent une hétérogénéité importante dont l'origine est à rechercher d'une part dans le type de matériau mis à terril : ceux-ci ont en effet été édifiés par l'amoncellement de roches provenant du creusement des galeries de mine et du tri des matériaux remontés de la fosse. Le principal matériau constitutif des terrils est le schiste houiller, on peut toutefois noter la présence plus ou moins importante de grès et de résidus charbonneux au sein de ces édifices. Il est important de noter que les moyens mis à disposition pour le tri ont évolué au cours de l'exploitation et que la teneur en éléments charbonneux résiduels des terrils était sans doute plus importante au début de l'exploitation qu'à la fin. D'autre part, le tri manuel et le passage dans un lavoir permettaient, à l'époque de l'exploitation, de séparer les stériles grossiers « mis à terril », des fractions fines dirigées vers des bassins de décantation. Les résidus grossiers étaient par la suite amassés par dépôt gravitaire sur les terrils. Ce mode d'édification a entraîné un tri granulométrique fruste le long des pentes (éléments grossiers à la base, plus fins au sommet) et donc une hétérogénéité supplémentaire (Hawkins, 1998, Petit, 1980).

De plus, suivant les veines exploitées, le type de matériau, ou du moins sa quantité pouvait varier d'une mise à terril à l'autre (par exemple : plus de grès dans une veine entraînait plus de grès sur le terril). Enfin, comme nous l'a montré l'historique d'édification des deux terrils étudiés réalisé dans le chapitre 2, les stériles entassés peuvent provenir de différentes concessions situées autour du terril, ce qui accentue l'hétérogénéité si les couches exploitées ne présentent pas les mêmes caractéristiques.

En résumé, l'hétérogénéité des terrils est due aux différents types de matériaux remontés de la fosse, à leur mise à terril par dépôt gravitaire, à l'âge des mises à terrils (les dépôts les plus anciens contenant *a priori* plus de charbon résiduel que les dépôts récents), et enfin à l'historique d'édification de ces édifices et donc à la provenance des stériles entassés.

## 1.2 - Facteurs influençant la circulation des eaux

### 1.2.1 - Lithologie et granulométrie

La lithologie des résidus peut influencer la conductivité hydraulique. En effet, Aljoe et Hawkins (1994 ; in Hawkins, 1998) ont montré, en prenant l'exemple d'un site situé au nord des Appalaches, que l'augmentation de la proportion de grès et donc la diminution de celle de shales dans les résidus miniers entraînait une augmentation des valeurs de conductivité hydraulique moyenne (Fig. 4.1). Ceci peut s'expliquer de la façon suivante : les zones de stériles majoritairement constituées de grès ont tendance à présenter une granulométrie plus importante que les zones riches en shales. En effet les grès, cimentés, résistent mieux à l'altération que les shales qui, en s'altérant, forment des particules de taille décroissante, diminuant ainsi la conductivité hydraulique. Les procédés d'exploitation et de mise à terril augmentent encore cette hétérogénéité en créant des zones constituées majoritairement d'une seule lithologie.

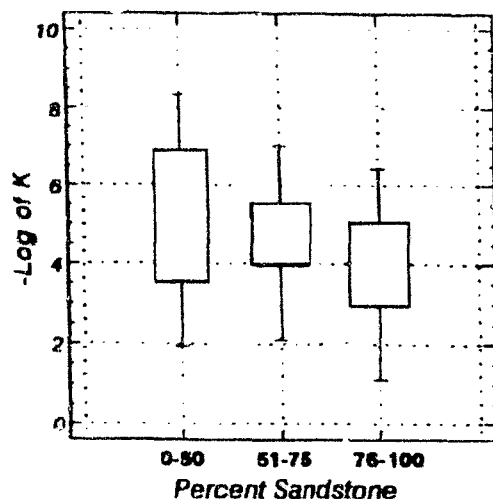


Fig. 4.1 : Diagramme illustrant la relation existant entre lithologie des résidus et conductivité hydraulique dans l'étude faite sur les terrils houillers de Pennsylvanie (Hawkins, 1998)

La lithologie et la granulométrie des stériles mis à terril peuvent donc influencer le drainage acide minier et donc la quantité de sulfates exportée : en effet, comme le souligne le rapport EPA (1994), le matériau à grains très grossiers, tel qu'il existe dans les terrils, présente une surface spécifique moins importante que celle de particules fines mais permet à l'eau et à l'air de pénétrer plus profondément dans l'édifice, exposant ainsi plus de matériau à l'oxydation et permettant ainsi une plus grande production d'eau acide. Au contraire, le matériau à grains fins peut restreindre la pénétration de l'air et le matériau très fin, limiter le flux d'eau.

### 1.2.2 - Le mode de « mise à terril »

Les résidus situés au droit des chemins de circulation des engins et équipements lourds, utilisés lors de la mise à terril, peuvent être compactés de manière plus importante que les terrains adjacents, ce qui peut influencer la circulation des eaux.

### 1.2.3 - Compaction et âge des résidus

Peu de temps après la mise à terril, un tassement différentiel des dépôts les plus fins débute. Aljoe et Hawkins (1994 ; in Hawkins, 1998) ont observé des variations de conductivité hydraulique lorsque l'âge du dépôt augmente. Ainsi, dans leur étude, des résidus de mine de surface vieux de 30 mois ou moins montraient une conductivité hydraulique moyenne plus haute que celle des résidus vieux de plus de 30 mois (Fig. 4.2).

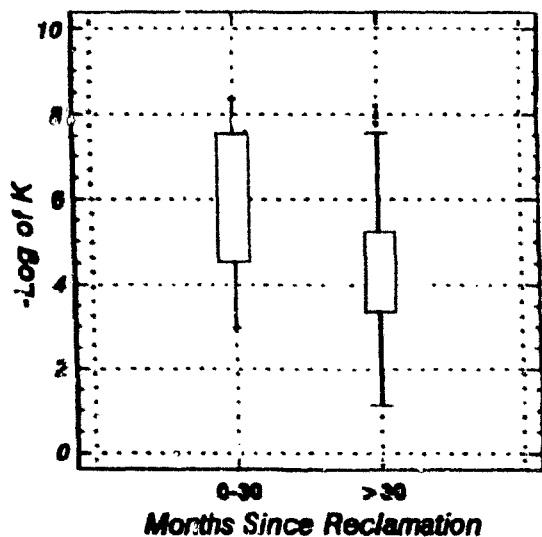


Fig. 4.2 : Diagramme illustrant la relation existant entre la durée de la « mise à terril » et la conductivité hydraulique dans le cas de stériles issus de terrils houillers de Pennsylvanie (Hawkins, 1998)



De même, comme nous venons de le voir, en raison des procédés d'exploitation minière, la granulométrie des stériles est très hétérogène et Schüring *et al.* (1997) estiment que ce type de matériau peut être en grande partie compacté, ce qui par voie de conséquence diminue la conductivité hydraulique. Si la conductivité hydraulique dans les stériles compactés est extrêmement basse, le transport par advection devient négligeable et l'on peut supposer que le front d'oxydation se déplace dans le matériau uniquement par diffusion ce qui, par voie de conséquence, diminue l'épaisseur de la couche oxydable, le drainage acide minier qui en découle et donc, en ce qui nous concerne, la quantité de sulfate relâchée.

L'hétérogénéité des stériles entassés sur les deux sites nous amène à nous poser la question du mode d'infiltration des eaux météoriques au sein des édifices.

Les eaux météoriques ont-elles pu s'infiltrer au cours de l'édification du terril et peuvent-elles encore s'infiltrer aujourd'hui ? Si oui, jusqu'à quelle profondeur ? L'infiltration, si elle existe, est-elle homogène ou se fait-elle le long de chemins de percolation ? Le processus mis en cause conditionne en effet le volume de matériau concerné par la lixiviation et donc, la quantité de sulfate qui peut être libérée à partir des résidus miniers. Afin de tenter de répondre à ces interrogations, nous avons eu recours à différentes techniques de prospections géophysiques de subsurface : la méthode radiomagnéto-tellurique (RMT), les panneaux électriques, la méthode électromagnétique « slingram », le georadar également utilisé n'a pas fourni de résultat probant (annexe 3). Des essais « Perméafor » ont également été réalisés dans le but de déterminer l'éventuelle existence de contrastes de perméabilité en profondeur, et à la suite de ces essais un échantillonnage des stériles en subsurface (3 m) a été réalisé au niveau des points Perméafor (tranchées creusées à la pelle mécanique).

L'ensemble de ces moyens a été mis en œuvre sur le site 2 (Fig. 4.3 et 4.4) en raison de sa relative facilité d'accès pour les engins nécessaires à ce type d'entreprise. Le site 1 n'a malheureusement pas pu faire l'objet de cette étude géophysique en raison de sa forme conique et de l'impossibilité d'y transporter le matériel.

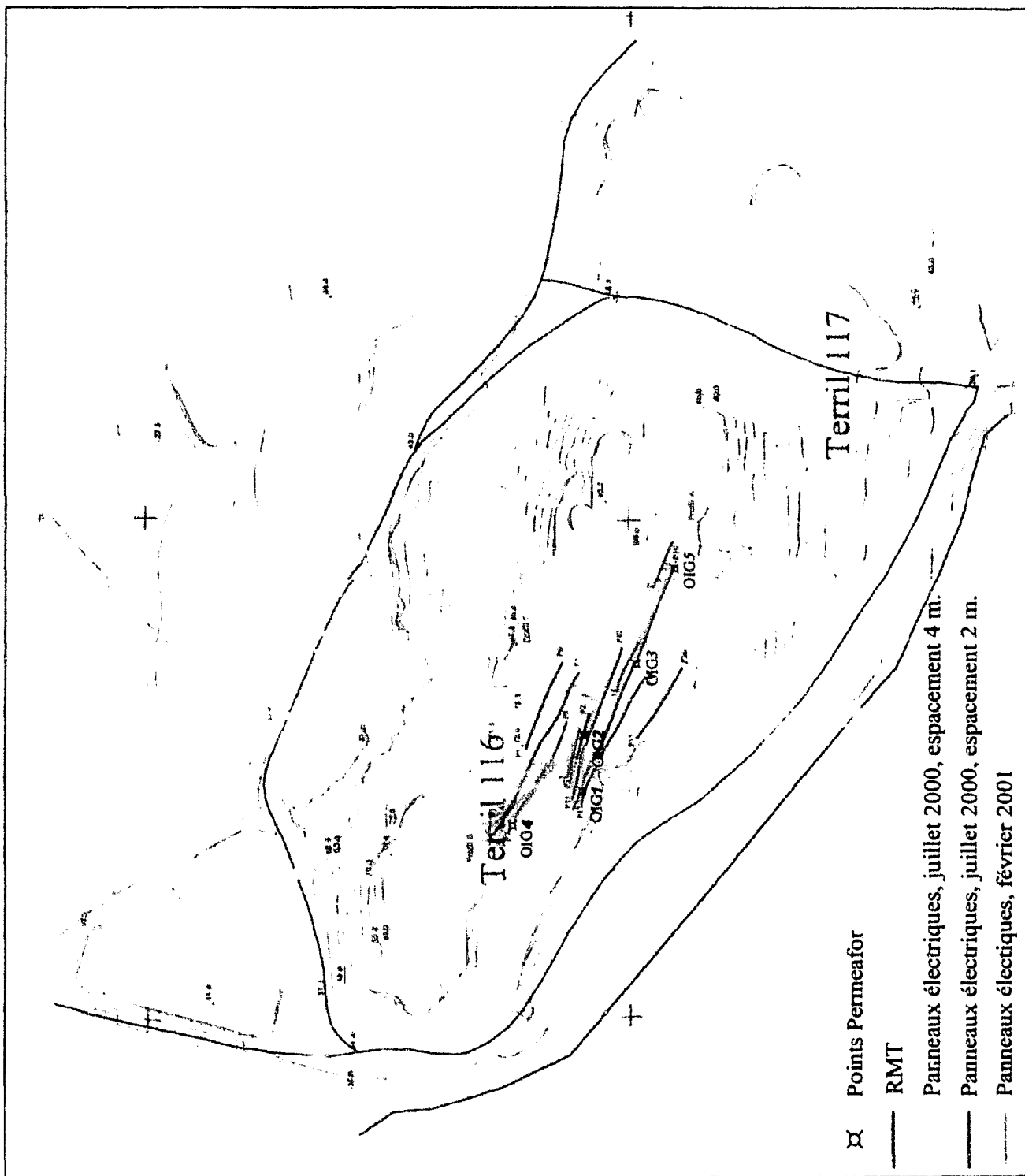
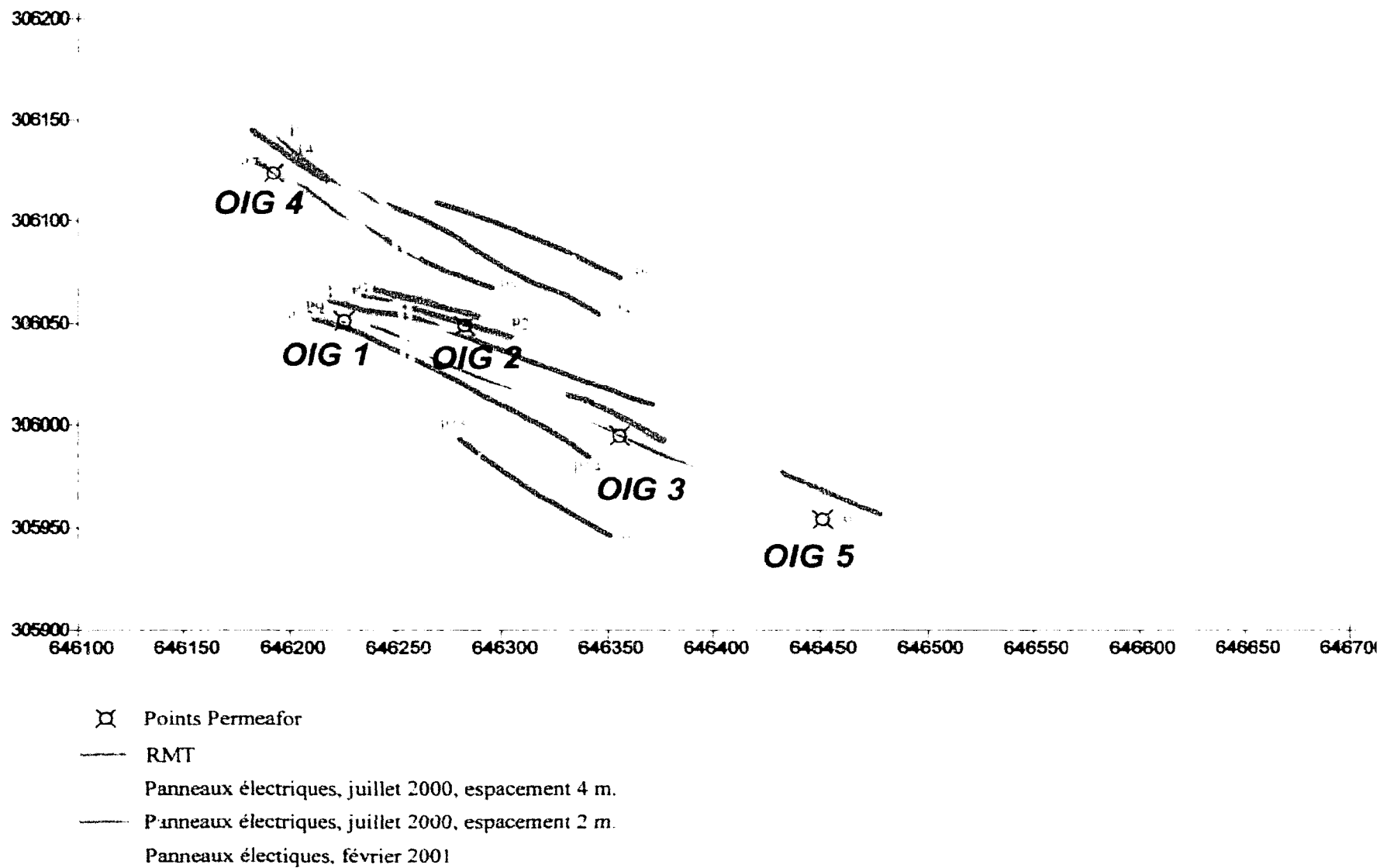


Fig. 4.3 : Plan de position des moyens mis en œuvre sur le site 2 pour déterminer l'existence ou l'absence d'infiltration des eaux météoriques

Fig 4 4 Agrandissement du plan de position des moyens mis en oeuvre sur le site 2.



## 2 – Méthodes utilisées et résultats

### 2.1 - La méthode Radiomagnéto-Tellurique

#### 2.1.1 - Principe et méthode

La méthode Radiomagnéto-Tellurique a été mise à notre disposition par le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement Nord-Picardie et le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille. Il s'agit d'une méthode électromagnétique de prospection géophysique qui permet la mesure en continu de la résistivité apparente du sous-sol (Dupis *et al.*, 1995 ; Tezkan *et al.*, 1996). La résistivité apparente enregistrée dépend de la nature et de l'état hydrique des couches de terrain concernées par la mesure. Elle permet de définir des zones par type de matériaux homogènes.

Une unité de mesure tractée se déplace en continu à la surface du sol (Fig. 4.5) L'appareillage se compose d'un capteur de champ magnétique (spire de cuivre associée à un transformateur qui mesure le champ  $H_y$ ), d'un capteur de champ électrique (feuilles de laiton noyées dans un tapis de caoutchouc qui mesure le champ  $E_x$ ), d'un capteur de déplacement et d'une centrale d'acquisition. Cette méthode permet grâce à son capteur électrique une acquisition continue des données.

La méthode est fondée sur la mesure de l'influence du sous-sol sur les champs électromagnétiques produits par les émetteurs de radiodiffusion. Le choix de la fréquence de radiodiffusion mesurée permet de choisir la profondeur d'investigation.

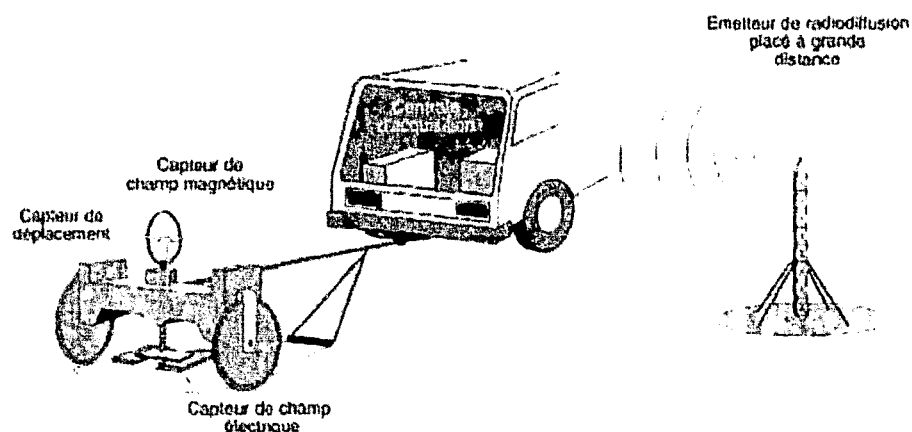


Fig. 4.5 : Schéma du dispositif Radiomagnéto-Tellurique (CETE-Nord, 1998).

## 2.1.2 – Résultats

Deux prospections Radiomagnéto-Telluriques (RMT) ont été réalisées sur le site 2 : la première en septembre 1999 et la seconde en novembre 1999 après une période de pluie. Huit profils de résistivité, localisés à l'aide d'un GPS (Fig. 4.3 et 4.4), ont été effectués en septembre et 5 de ces profils ont pu être à nouveau étudiés en novembre (P3-4, P7-8, P9-10, P13-14, P15-16). Les profils réalisés ont été comparés (Fig. 4.6 à 4.10) d'une prospection à l'autre afin de déterminer les zones d'infiltration préférentielle de l'eau sur le terrain étudié. En effet, à nature constante du matériau étudié (granulométrie et porosité), une diminution de la résistivité et donc une augmentation de la conductivité entre les deux passages atteste une infiltration d'eau.

On peut observer que les profils P7-P8, P9-P10 et P15-P16 montrent une diminution globale de la résistivité apparente mesurée entre le mois de septembre et le mois de novembre. En ce qui concerne les profils P3-P4 et P13-P14, les résultats sont plus contrastés. On note ainsi, pour le profil P3-P4, une première partie de profil (0-60 m) caractérisée par une diminution de la résistivité apparente et une deuxième partie où la résistivité apparente mesurée en novembre est supérieure à celle de septembre. Le profil P13-P14 montre quant à lui une augmentation de résistivité sur presque toute sa longueur.

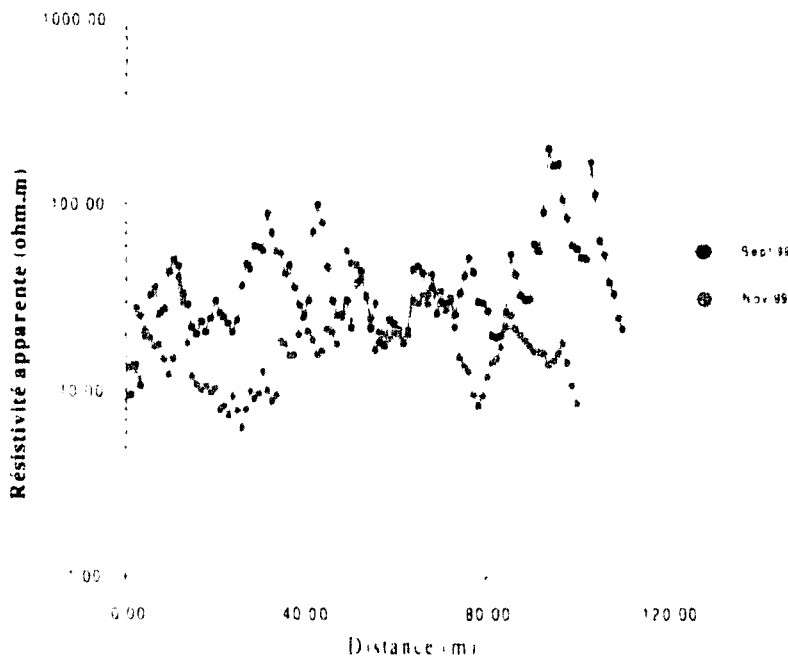


Fig. 4.5 : Profil RMT P7-P8

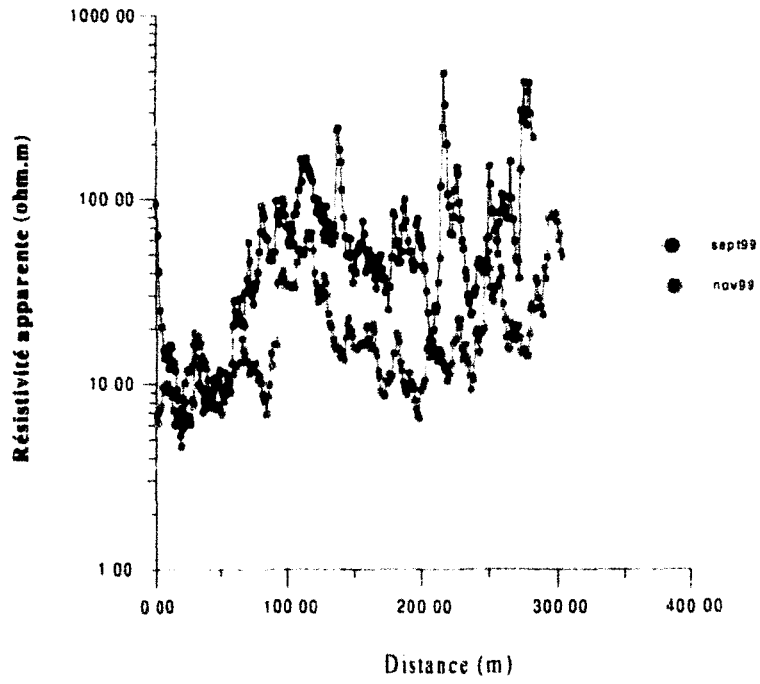


Fig. 4.7 : Profil RMT P9-P10

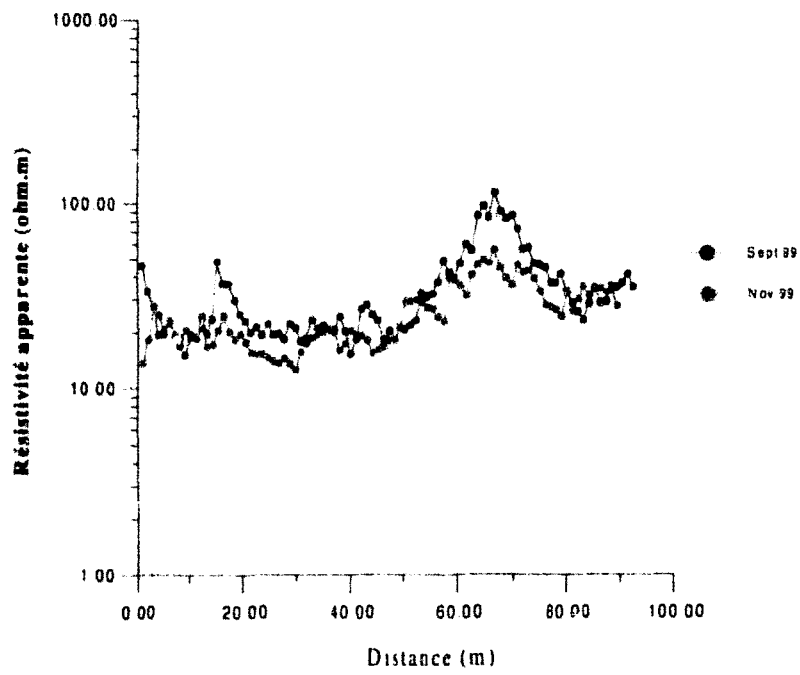


Fig. 4.8 : Profil RMT P15-P16

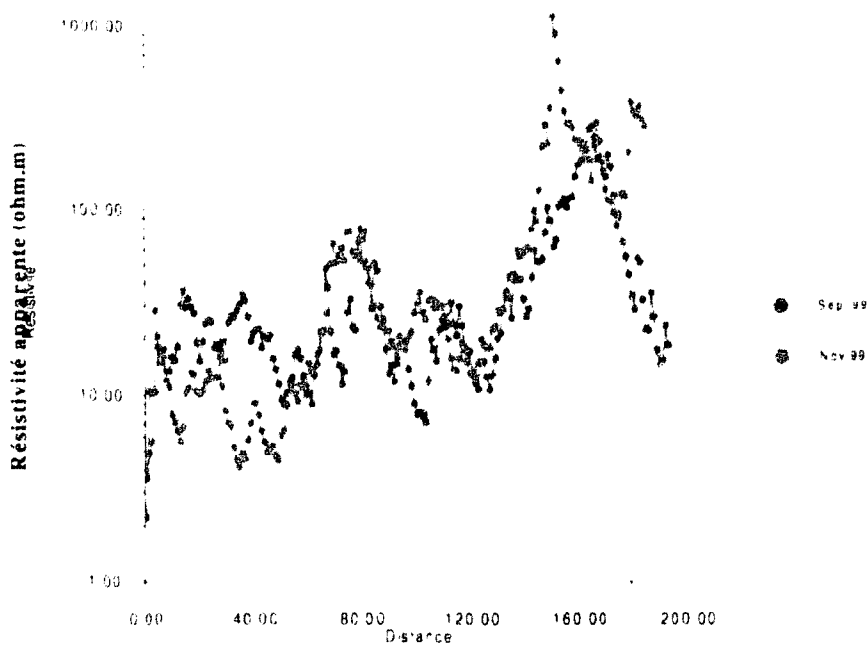


Fig 4 9 Profil RMT P3 P4

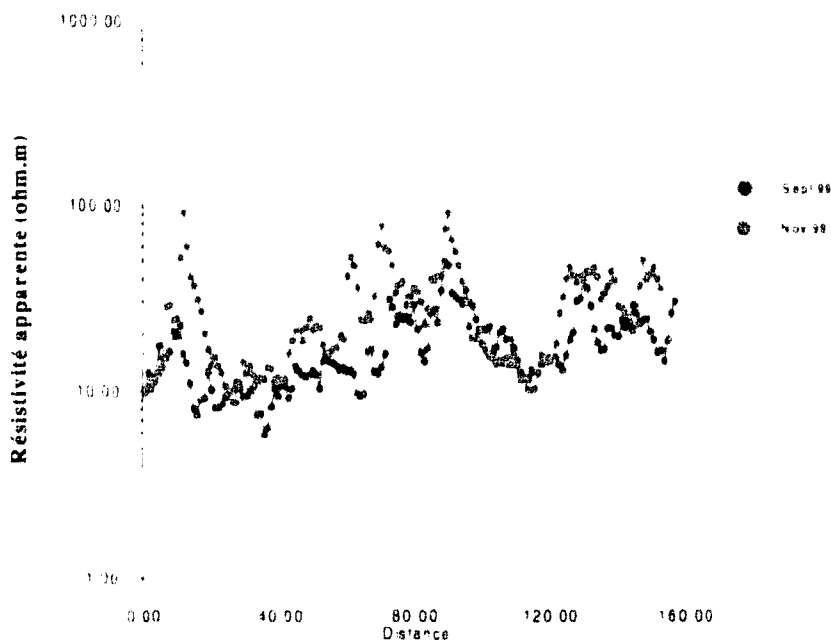


Fig 4 10 Profil RMT P13-P14

## 2.2 - Panneaux électriques

### 2.2.1 - Principes et méthodes

Deux prospections de panneaux électriques ont été effectuées sur le site 2, la première au mois de juillet 2000 et la seconde au mois de février 2001.

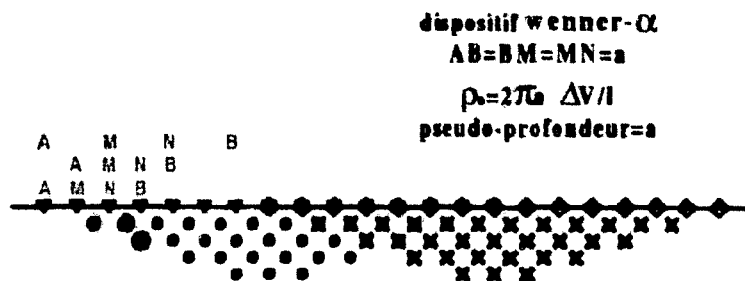
La première prospection a été réalisée à l'aide d'un résistivimètre STING R1 muni de 24 électrodes et la seconde d'un résistivimètre Syscal R1 et d'un dispositif de connexion de 32 électrodes.

Le but de cette méthode est de déterminer la résistivité de subsurface par des mesures non destructives réalisées en surface de la zone à étudier. La méthode électrique permet la mesure de la résistivité apparente (en  $\Omega.m$ ) du sous-sol, et à partir de ces mesures, la résistivité réelle des terrains peut être estimée. La résistivité d'un terrain dépend de plusieurs paramètres tels que la granulométrie, la porosité, le degré de saturation en eau ou encore de la minéralisation de l'eau présente (Loke, 1999 ; Aristodemou et Betts, 2000 ; Sevin, 2000 ; Yaramanci, 2000 ; Berger *et al.*, 2001 ; Guérin *et al.*, 2001).

Les mesures de résistivité sont faites en injectant un courant dans le sol. L'injection du courant et la mesure de la différence de potentiel sont faites à partir d'électrodes plantées dans le sol. Le volume de terrain analysé dépend de la position et de la géométrie du dispositif utilisé. Le dispositif de mesure est constitué de deux paires de pôles, la première paire (électrodes A et B, Fig. 4.11) a pour rôle d'injecter le courant et la seconde paire (électrodes M et N) a pour rôle de mesurer la différence de potentiel résultante de l'injection du courant dans le milieu environnant. La résistivité apparente ( $\rho_a$ ) est calculée à partir du courant (I) et de la tension (V) :

$$\rho_a = k V/I$$

k est le facteur géométrique et dépend de l'arrangement des 4 électrodes (Fig. 4.12).



A et B : électrodes d'injection de courant +I et -I

M et N : électrodes de mesure de différence de potentiel  $\Delta V = V_M - V_N$

Fig. 4.11 : Exemple de dispositif utilisé pour la réalisation de panneaux électriques, avec A et B, électrodes d'injection et M et N, électrodes mesurant la différence de potentiel (d'après Guérin *et al.*, en cours).



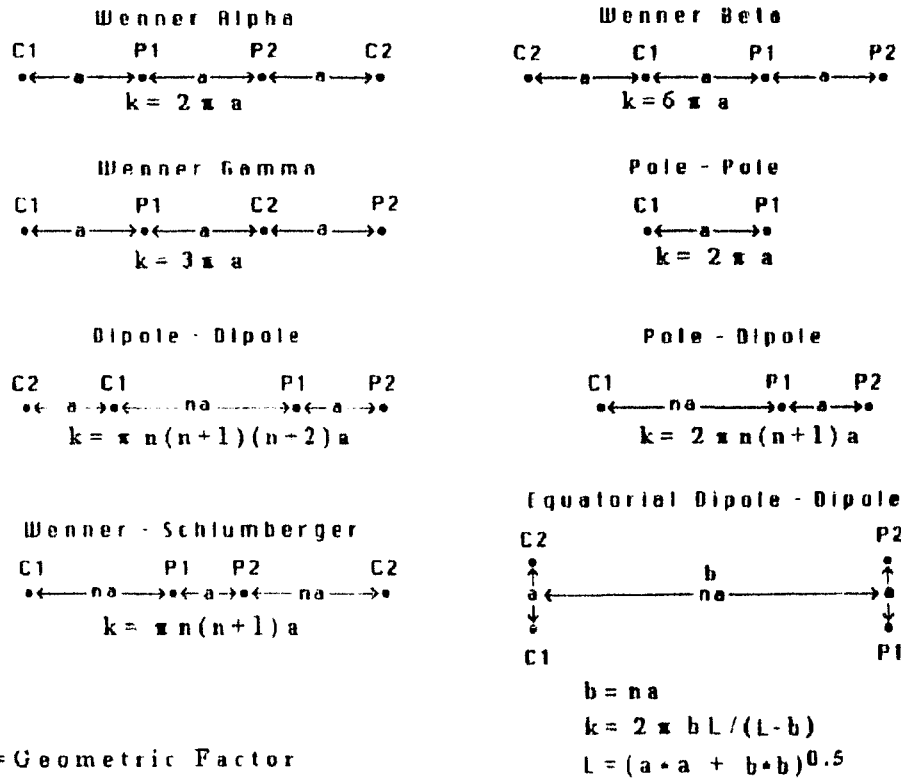


Fig 4.12 Exemples de configurations utilisées dans la réalisation de panneaux électriques et coefficients géométriques correspondants (d'après Loke, 1999)

La valeur mesurée n'est pas une valeur de résistivité réelle mais une valeur de résistivité apparente, c'est-à-dire la résistivité d'un terrain homogène qui donnerait la même valeur pour le même arrangement d'électrode. La relation entre résistivité apparente et résistivité réelle est une relation complexe. Le programme Res2DINV a été utilisé pour effectuer l'inversion des données de résistivité apparente par itérations successives et ainsi déterminer la résistivité réelle. Les données sont ensuite traitées grâce au logiciel de contourage automatique Surfer et présentées soit en profil soit en coupes de profondeur.

On ne peut pas attribuer de valeur précise de résistivité à un milieu donné cependant on peut fixer des limites de valeurs de résistivités pour certaines roches communes (Tab. 4.1). Ainsi, on constate que les roches sédimentaires, plus poreuses et riches en eau que des roches ignées montrent des valeurs de résistivité plus basses. Les sols argileux montrent des résistivités plus basses que celles des sols sableux. Certains contaminants industriels tels que le fer ou encore des électrolytes forts peuvent également fortement réduire la résistivité des eaux : les hydrocarbures montrent quant à eux généralement de très hautes valeurs de résistivité.

Material	Resistivity ( $\Omega \cdot m$ )	Conductivity (Siemen/m)
<b>Igneous and Metamorphic Rocks</b>		
Granite	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalt	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Slate	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Quartzite	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
<b>Sedimentary Rocks</b>		
Sandstone	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Shale	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Limestone	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
<b>Soils and waters</b>		
Clay	1 - 100	0.01 - 1
Alluvium	10 - 800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Groundwater (fresh)	10 - 100	0.01 - 0.1
Sea water	0.2	5
<b>Chemicals</b>		
Iron	$9.074 \times 10^8$	$1.102 \times 10^7$
0.01 M Potassium chloride	0.708	1.413
0.01 M Sodium chloride	0.843	1.185
0.01 M acetic acid	6.13	0.163
Xylene	$6.998 \times 10^{16}$	$1.429 \times 10^{-17}$

Tab. 4.1 : Quelques exemples de valeurs de résistivité (d'après Loke, 1999).

## 2.2.2 - Résultats

### *2.2.2.1 - Prospection de Juillet 2000 :*

Cette prospection (Fig. 4.13 à 4.17) a été réalisée en utilisant la configuration dipôle-dipôle, seize profils ont été réalisés à l'aide d'une chaîne de vingt quatre électrodes. Douze de ces profils (représentés en rose sur les figures 4.3 et 4.4) ont été effectués avec un espacement entre électrodes de 4 m et présentent ainsi une longueur totale de 96 m. Quatre profils (représentés en rouge sur les Figures 4.3 et 4.4) ont été réalisés avec un écart de 2 m (longueur totale = 48 m) au niveau des essais Perméafor OIG 2, 3, 4 et 5 afin d'obtenir une meilleure résolution au niveau de ces points dans les premiers mètres ayant subi un échantillonnage et ainsi tenter de corréler les deux informations. Un cinquième profil avec écartement entre électrodes de 2 m a également été réalisé au point Perméafor OIG 1 mais un problème technique rencontré lors de l'acquisition a empêché l'exploitation des données.

Pour une meilleure lisibilité des profils on distinguera par la suite quatre classes de résistivité :

- les zones de résistivité basse (<10 ohm.m), représentées en bleu sur les profils ;
- les zones de résistivité moyenne (10-50 ohm.m), dessinées en vert ;

- les zones de forte résistivité (50-150 ohm.m), données en jaune sur les panneaux ;
- les zones de résistivité très élevée (> 150 ohm.m) représentées par des couleurs orange, rouge et marron de résistivité croissante.

(attention, les qualificatifs «basse », « moyenne », « forte » et « très élevée » sont à prendre en relatif, par exemple : les zones de couleur rouge présentent une résistivité très élevée par rapport aux zones de couleur bleu)

Zone 1 : Profils 1, 2, 3 et 4 (Fig. 4.13)

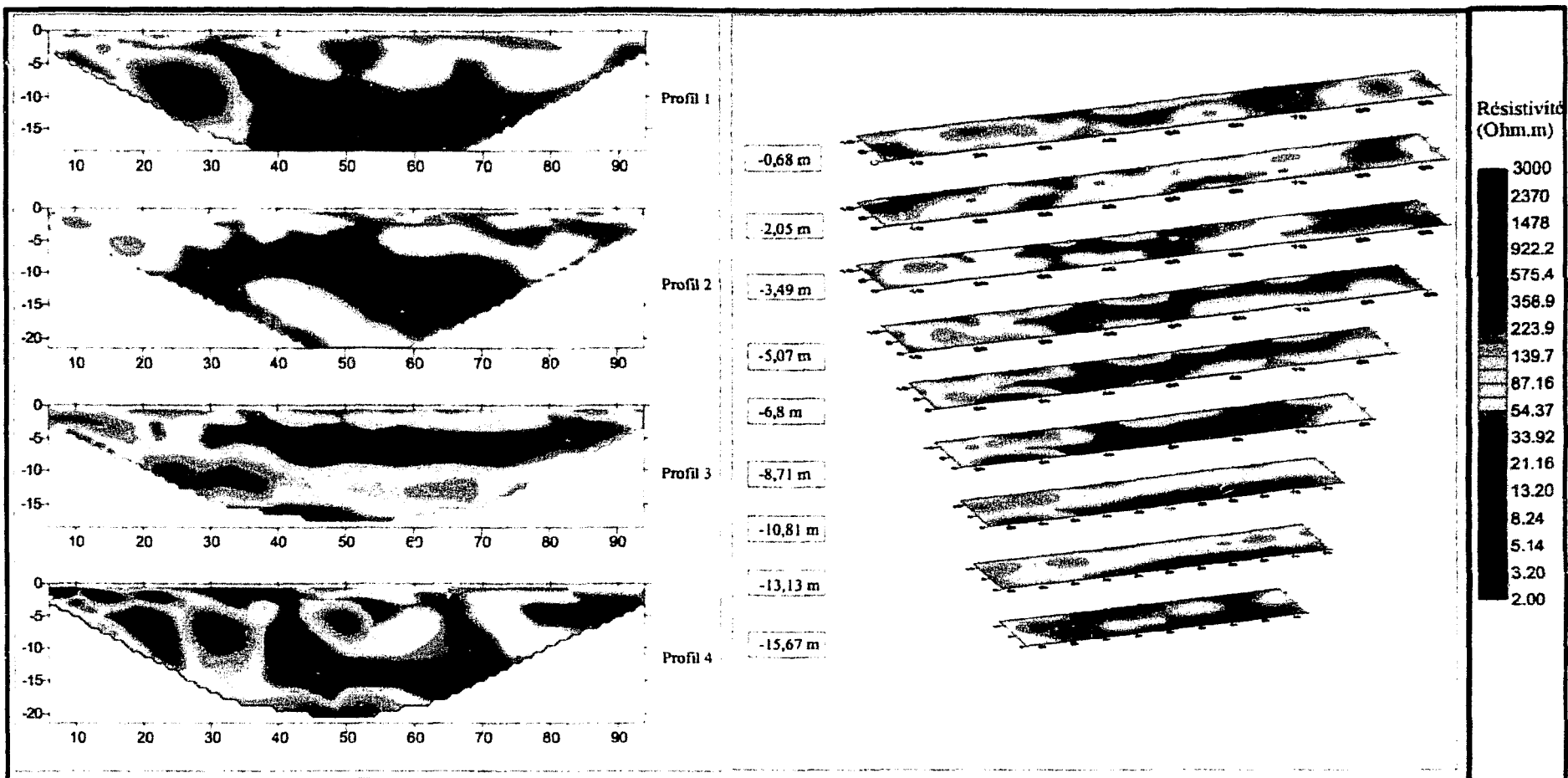
Profil 1 : Ce profil présente des résistivités moyennes à fortes (couleur vert et jaune) sur sa majeure partie, on constate une augmentation non homogène des valeurs de résistivité du bas vers le haut du profil et surtout la présence, entre 20 et 35 m à partir du début du profil et à une profondeur comprise entre 5 et 15 m, d'une zone de très forte conductivité (> 1000 ohm.m), ainsi que d'une zone de faible résistivité (bleue) à la même profondeur autour de 40 m.

Profil 2 Des résistivités moyennes sont ici « encadrées » en surface et en profondeur par une proportion importante de valeurs de résistivités fortes. On ne retrouve sur ce profil ni les très fortes, ni les très faibles valeurs de résistivité présentes sur le profil 1.

Profil 3 : On constate sur ce profil la présence d'une zone de résistivité moyenne qui s'étend entre la surface et 10 m de profondeur (entre 35 et 90 m à partir du début du profil). Des zones de forte résistivité (50 à 300 ohm.m) entourent cette zone bien que quelques « passages » de faible résistivité subsistent en surface. On observe sur ce profil la présence de résistivités atteignant 200 à 300 ohm.m présentes surtout dans la partie gauche du profil, en surface et en profondeur mais également la présence de deux zones de résistivités basses entre 40 et 60 m, entre 5 et 10 m de profondeur.

Profil 4 : Ce profil est marqué par une hétérogénéité importante des valeurs de résistivité. On distingue principalement une zone de très faible résistivité au début du profil (autour de 20 m) à une profondeur de 5 à 8 m et autour de cette tâche la présence de zones de très forte résistivité (jusque plus de 1000 ohm.m) reliées entre elles par des zones de conductivités moyennes (une centaine d'ohm.m). On constate dans les deux derniers tiers du profil la présence de 3 zones de résistivité forte à très forte (50 à 350 ohm.m) entourée de zones de faibles résistivités. On observe également dans cette partie la présence de poches de résistivités basses entre 5 et 15 m de profondeur et entre 40 et 70 m en partant du début du profil.

Fig. 4.13 : Profils et coupes de résistivités réalisés dans la zone 1, prospection de Juillet 2000 configuration dipôle-dipôle



### Zone 2 : Profils 5, 6, 7 et 8 (Fig. 4.14)

Profil 5 : Ce profil présente dans sa majeure partie des résistivités moyennes à fortes. On constate à mi-profil et mi-profondeur la présence d'une zone de résistivité basse

Profil 6 : Ce profil est, une fois encore, dominé par des résistivités moyennes à fortes. Les très fortes résistivités visibles en base de profil sont dues aux effets de bord du logiciel de contourage automatique utilisé (Surfer)

Profil 7 : Ce profil est marqué par la présence entre 5 et 15 m de profondeur dans les deux premiers tiers d'une zone de résistivité moyenne entourée d'une zone de résistivité forte non continue (problème de contourage ?) dans sa partie supérieure et l'on retrouve en surface des valeurs de résistivité moyennes. On constate également la présence de zones de résistivité faible réparties pour la plupart entre 5 et 10 m de profondeur autour de 10, 25, 40, 60 et 70 m.

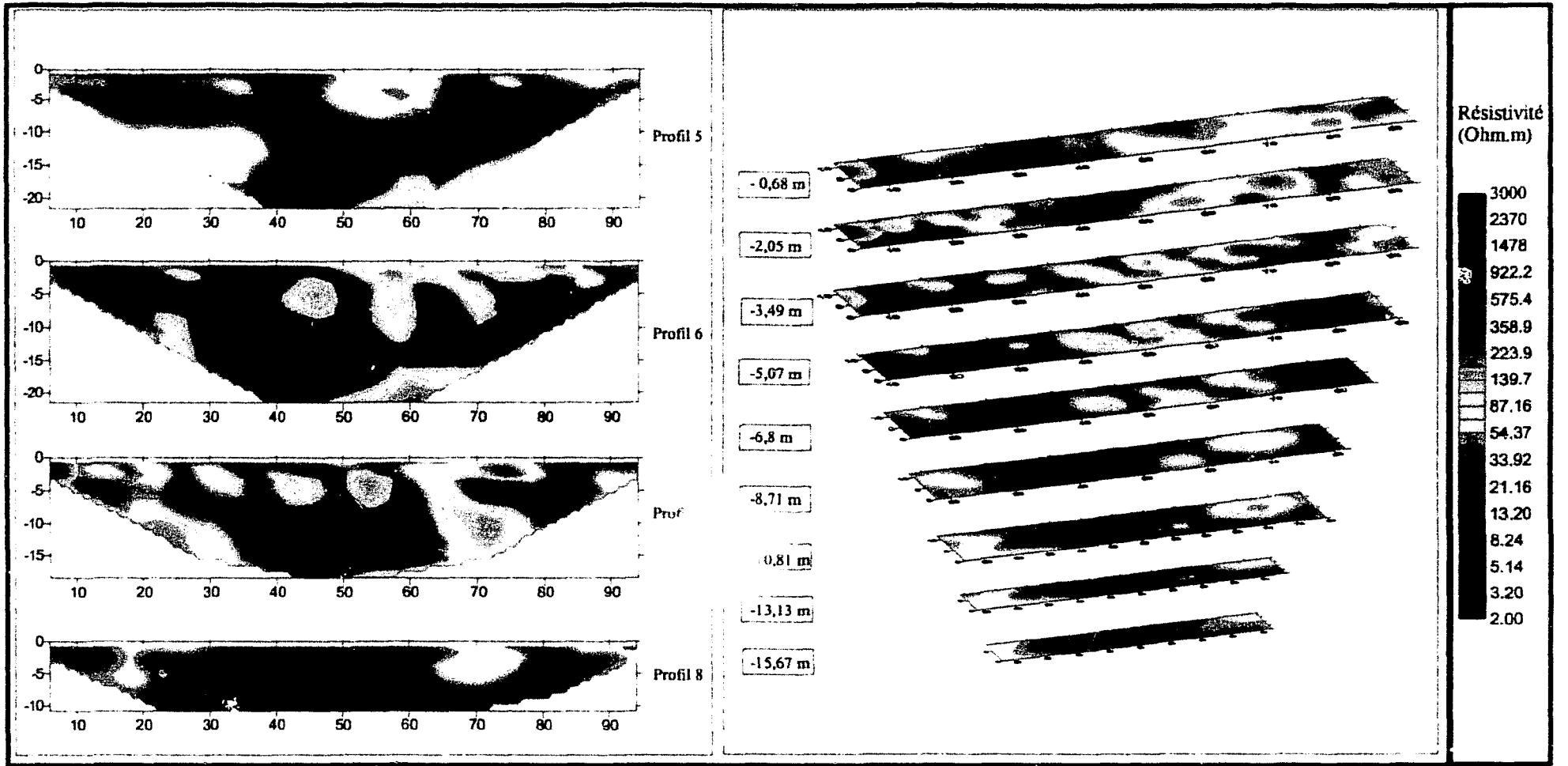
Profil 8 : Ce profil, tronqué en profondeur par rapport aux trois précédents, ne montre pas de variations de résistivité très importantes. On constate notamment l'existence de deux zones de résistivité forte autour de 20 et 70 m en surface du profil

### Zone 3 : Profils 9 et 10 (Fig. 4.15)

Profil 9 : Ce profil est caractérisé par une proportion plus importante de résistivités fortes à très fortes, on constate notamment la présence, entre 5 et 10 m de profondeur, de zones de très fortes résistivités séparées entre elles par de plus faibles valeurs.

Profil 10 : Tout comme le précédent, ce profil est caractérisé par une proportion importante de valeurs de résistivité forte. Les très fortes valeurs de résistivités rencontrées sur le profil précédent ne sont toutefois pas reconnues sur celui-ci.

Fig. 4.14: Profils et coupes de résistivités réalisés dans la zone 2, prospection de juillet 2000  
 configuration dipôle-dipôle  
 163



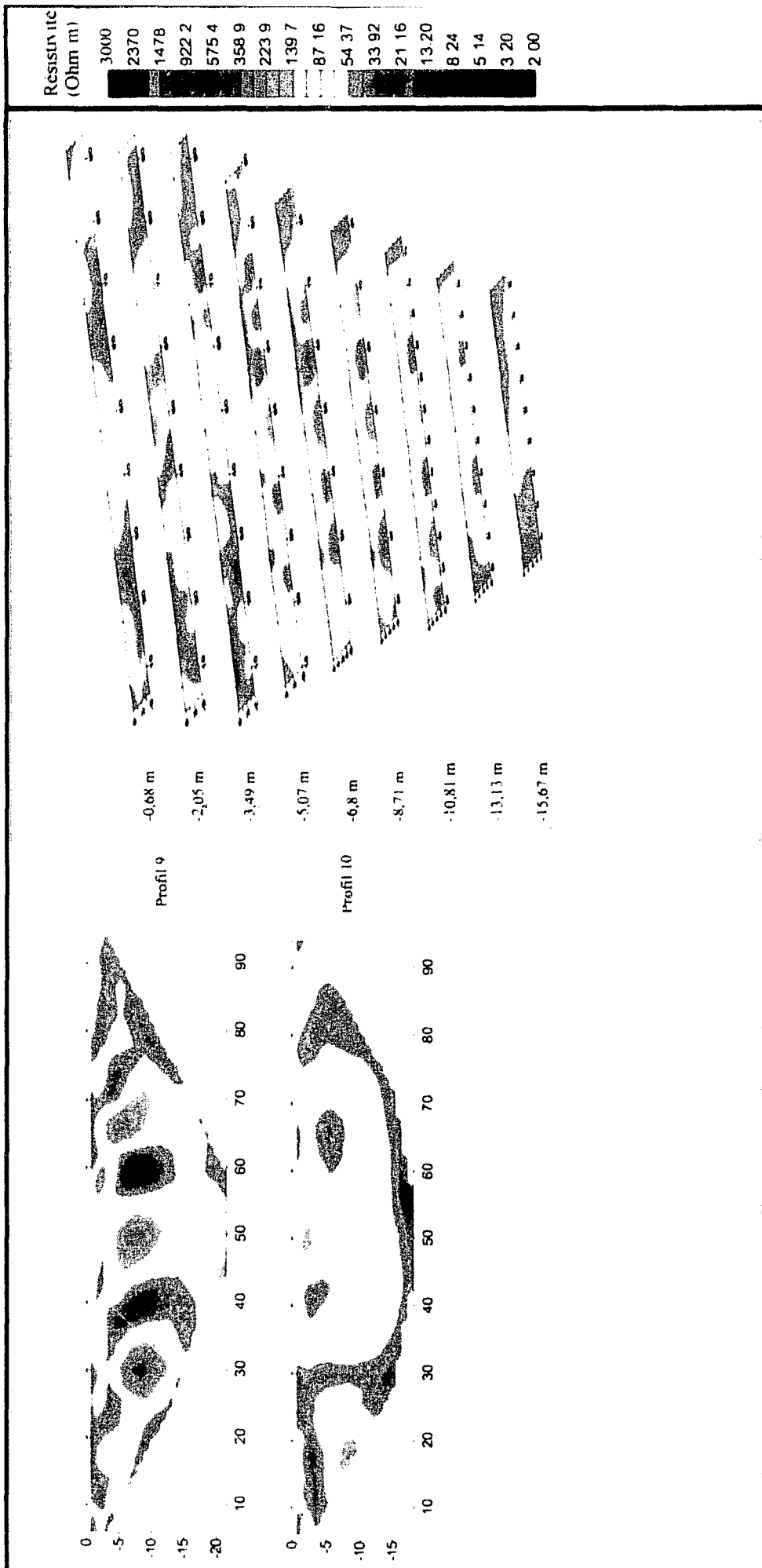


Fig. 4.15. Profils et coupes de résistivités réalisés dans la zone 3, prospection de Juillet 2000 configuration dipôle-dipôle

#### Zone 4 : Profils 11 et 12 (Fig. 4.16)

Profil 11 : Le début du profil est marqué par la présence d'une zone de résistivité moyenne à forte (de 50 à 300 ohm.m), les résistivités fortes (300 ohm.m) étant concentrées à proximité de la surface. Le reste du profil est dominé par de faibles valeurs (autour de 20-30 ohm.m), toutefois, quatre zones de résistivité légèrement plus élevée (50-100 ohm.m) peuvent être observées (trois en surface entre 0 et 5 m) et une entre 5 et 15 m de profondeur au centre du profil.

Profil 12 : Ce profil ressemble beaucoup au précédent, avec une zone de résistivité forte à très forte au début du profil, une dominance de résistivités plus faibles sur le reste du profil et des zones de résistivité plus élevée qui apparaissent moins individualisées que sur le profil précédent. On constate également sur ce profil la présence de deux zones de faible résistivité entre 5 et 12 m de profondeur autour de 30 m et entre 50 et 60 m en partant du début du profil.

#### Profils réalisés au niveau des points Perméafor : Profils 13, 14, 15 et 16 (Fig. 4.17)

Profil 13 : Ce profil est caractérisé par une résistivité moyenne à forte dominante. On constate ici encore que les résistivités fortes sont préférentiellement situées en sommet de profil. Il existe de plus, autour de 10 m une zone de faible résistivité située entre 2 et 4 m de profondeur et autour de 40 m une poche peu conductrice entre 1 et 6 m de profondeur.

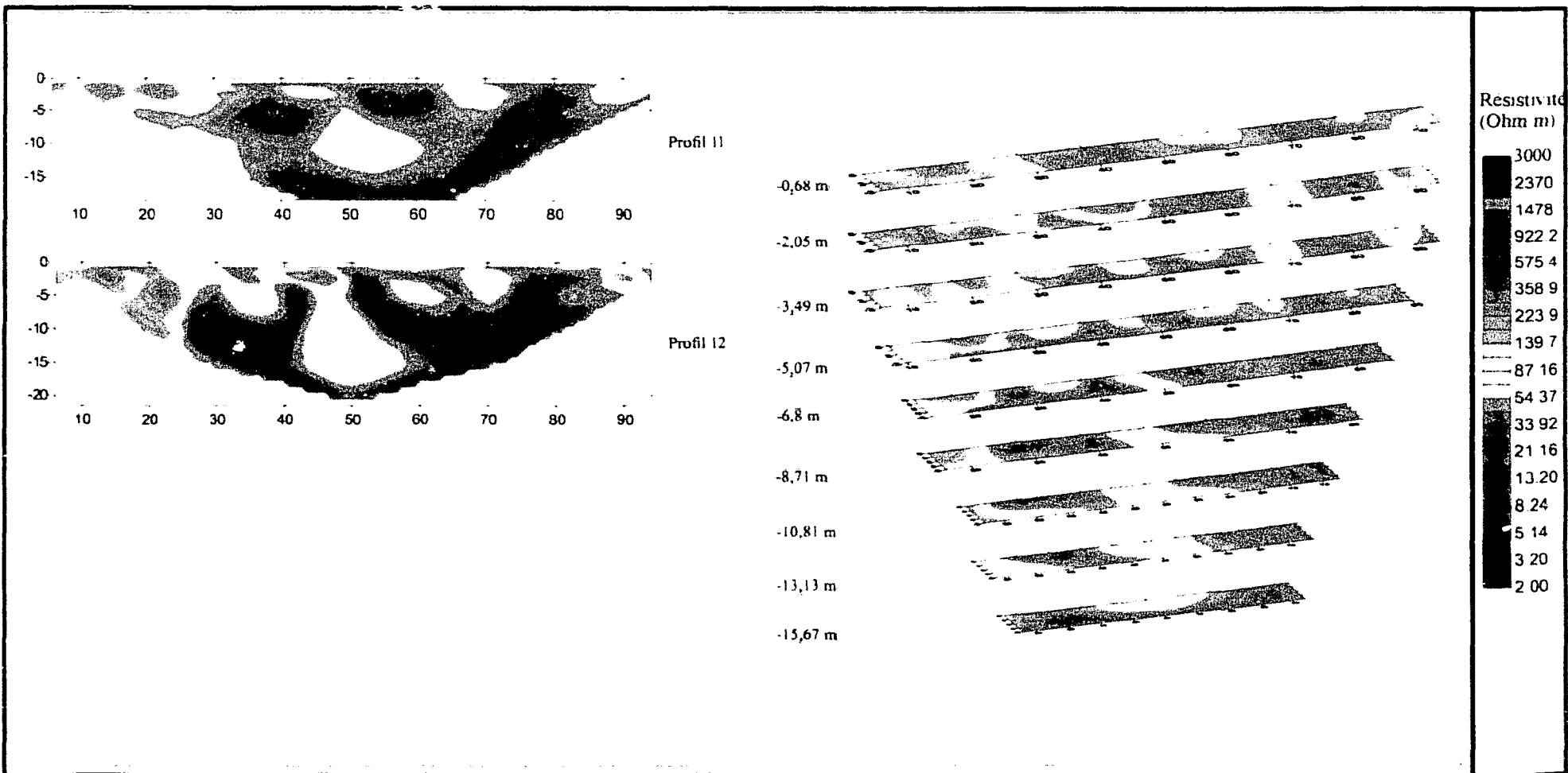
Profil 14 : On constate dans la première moitié de ce profil la présence en subsurface de poches de résistivité forte tandis que le reste du profil montre des valeurs de résistivité moyennes avec en plus, la présence entre 10 et 15 m d'une zone de faible résistivité située entre 4 et 8 m de profondeur.

Profil 15 : Ce profil montre à mi-profondeur la présence de poches de résistivité moyenne entourées de manière plus ou moins continue par des zones de résistivité forte. On constate d'ailleurs que la surface du profil est caractérisée presque en totalité par des valeurs de résistivité forte.

Profil 16 : Une fois encore, la surface du profil est caractérisée par des zones de résistivité fortes qui présentent des digitations en profondeur. On constate également la présence en début de profil entre 2 et 6 m de profondeur d'une poche peu conductrice et à droite de cette zone, une poche de résistivité faible. Le reste du profil présente des résistivités moyennes.



Fig. 4.16 : Profils et coupes de résistivités réalisés dans la zone 4, prospection de Juillet 2000  
 configuration dipôle-dipôle



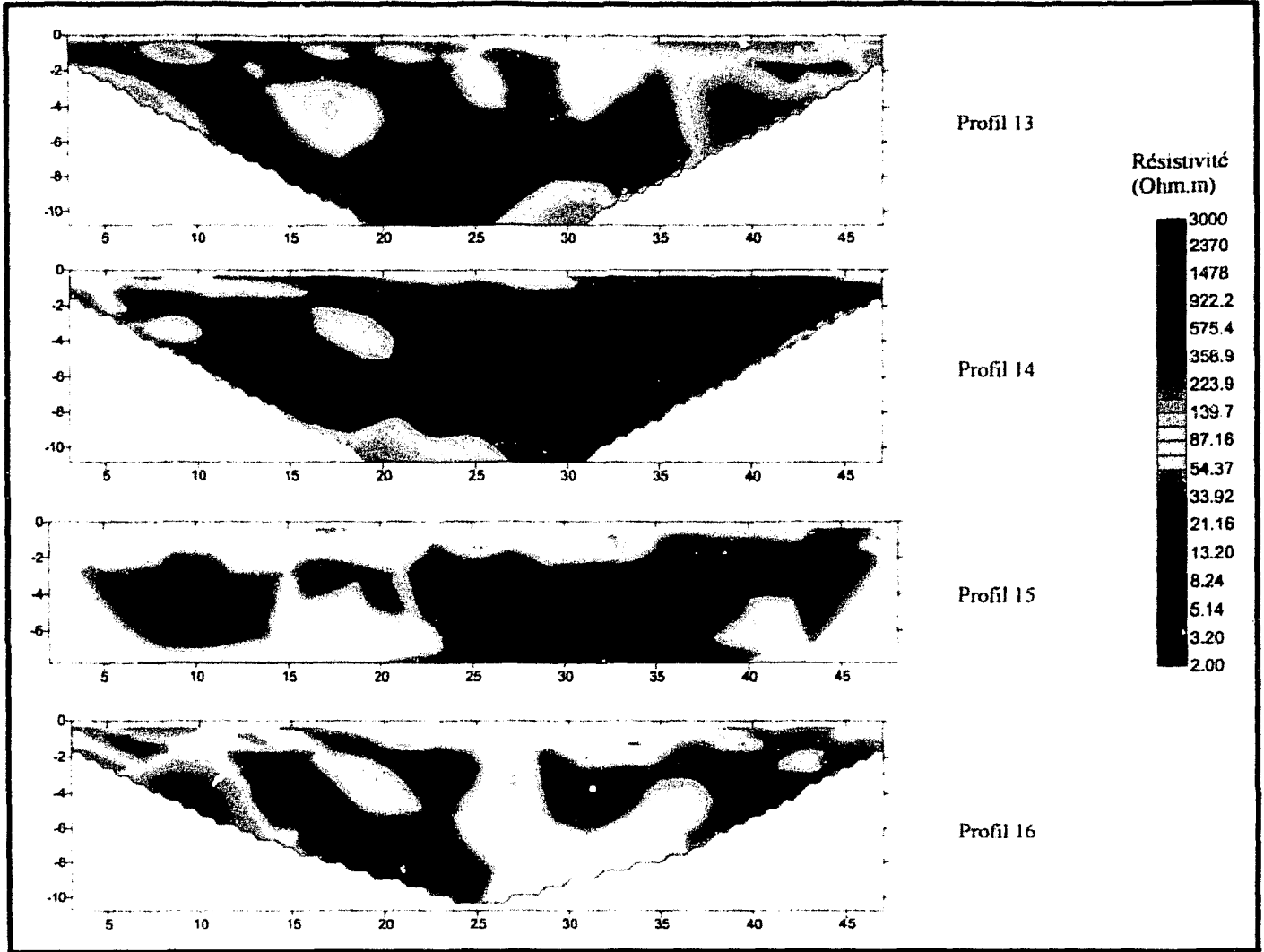


Fig. 4.17: Profils de résistivités réalisées au niveau des points Permeafor, prospection de Juillet 2000 configuration dipôle-dipôle

### 2.2.2.2 - Prospection de Février 2001

La seconde prospection, réalisée par le DFSS de géophysique appliquée de Paris VI a été réalisée en utilisant les configurations wenner  $\alpha$  et wenner  $\beta$ . Les résultats sont exposés en Fig. 4.18 et 4.19.

A cette occasion deux profils ont été réalisés sur le plateau (Fig. 4.3 et 4.4), le premier (profil A) présente une longueur de 315 m en configuration wenner  $\alpha$  et une longueur de 280 m en wenner  $\beta$ , il relie les points Permeator OIG 1, 3 et 5, tandis que le second (profil B) d'une longueur totale de 120 m longe le point Permeator OIG 4 et continue en direction du point Permeator OIG 2. Un troisième panneau électrique (profil C) a permis d'étudier la résistivité des terrains sur le flanc nord-est du terril (Fig. 4.3 et 4.4) sur une longueur totale de 180 m.

Le wenner  $\alpha$  est une configuration intéressante pour mettre en évidence les structures tabulaires, les interfaces horizontales, cette configuration n'est par contre pas très appropriée s'il s'agit de détecter des structures verticales étroites (Loke, 1999). A l'inverse, le wenner  $\beta$  permet de souligner les structures verticales mais est moins approprié dans le cas de structures horizontales (Loke, 1999), en cela, cette configuration se rapproche de la configuration dipôle-dipôle utilisée lors de la première prospection (d'autant plus si  $n = 1$  car dans ce cas wenner  $\beta =$  dipôle-dipôle). Les deux configurations sont donc complémentaires.

wenner  $\alpha$  (Fig. 4.18)

Le profil A réalisé en wenner  $\alpha$  a permis, après modélisation, d'obtenir des informations sur la résistivité réelle jusque 20 m de profondeur sur la première partie du profil (de 0 à 140 m) et jusque 10 à 15 m sur la deuxième partie. Le profil B réalisé en wenner  $\alpha$  donne quant à lui des valeurs jusqu'à 9,6 m de profondeur. Enfin, le profil C, réalisé sur la pente donne accès aux valeurs de résistivité jusqu'à une profondeur de 12 m.

Profil A - Ce profil est caractérisé par une zone sommitale de résistivité forte à très forte (50-300 ohm m), cette zone peut présenter par endroit des digitations atteignant une profondeur de 10 à 20 m. La zone basale de ce profil montre quant à elle des valeurs de résistivité moyennes (20-50 ohm m).

Profil B - Tout comme le profil A, ce profil est caractérisé par une zone sommitale (entre 0 et 4 m) de résistivité forte (50-300 ohm m) et une zone basale de résistivité moyenne (20-50 ohm m). On peut toutefois noter que la zone de faible résistivité atteint la surface au début du profil, entre 20 et 30 m.

Profil C - Ce profil montre des valeurs de résistivité globalement plus élevées que celles des deux profils précédents. On distingue toujours des valeurs plus faibles en profondeur, même si ces résistivités fortes sont du même ordre que celles des zones sommitales des profils A et B. La zone

sommitale du profil C est caractérisée par des valeurs de résistivité très élevées (200-1500 ohm.m). On constate la présence d'une zone de résistivité moyenne (20-50 ohm.m) entre 60 et 80 m à une profondeur comprise entre 4 et 10 m.

#### wenner $\beta$ (Fig. 4.19)

Dans cette configuration, la profondeur d'investigation est moins importante qu'en wenner  $\alpha$ . La profondeur d'investigation pour le profil A est ici de 17 m dans la première partie du profil et entre 5 et 15 m dans la seconde partie. Le profil B montre des valeurs jusqu'à une profondeur légèrement supérieure à 6 m et le profil C jusqu'à 10 m de profondeur.

Profil A : Tout comme pour la configuration wenner  $\alpha$ , ce profil est caractérisé par une zone sommitale de résistivité forte à très forte (50-300 ohm.m), qui peut présenter des digitations atteignant une profondeur plus importante. La zone basale de ce profil est caractérisée par des résistivités moyennes (20-50 ohm.m).

Profil B : Ce profil est, une fois encore, caractérisé par une zone sommitale de résistivité forte à très forte (50-300 ohm.m) et une zone basale de résistivité moyenne (20-50 ohm.m). Tout comme en configuration wenner  $\alpha$ , la zone de faible résistivité atteint la surface au début du profil, entre 20 et 30 m. La comparaison de ce profil réalisé en wenner  $\beta$  avec le profil réalisé en wenner  $\alpha$  nous montre bien l'accentuation en wenner  $\beta$  des structures verticales : ainsi, dans la seconde partie du profil, entre 70 et 80 m ainsi qu'entre 100 et 110 m, des digitations de résistivité moyenne atteignent 7 m de profondeur, ce qui n'était pas visible en wenner  $\alpha$  (qui semble-t-il lisse ce type d'information).

Profil C : On retrouve sur ce profil réalisé sur le flanc du terrain des valeurs de résistivité plus élevées que celles des deux profils précédents. La résistivité est plus faible en profondeur qu'en surface, même si ces résistivités fortes sont, comme en wenner  $\alpha$  du même ordre que celles des zones sommitales des profils A et B. Le profil C présente au sommet des valeurs de résistivité très élevées atteignant plus de 1500 ohm.m et en profondeur des valeurs fortes (50-250 ohm.m).

Que ce soit en wenner  $\alpha$  ou en wenner  $\beta$ , les profils montrent globalement les mêmes caractéristiques à savoir pour les trois profils une résistivité plus élevée en surface qu'en profondeur et pour le profil C des valeurs de résistivité globalement plus importantes que celle des deux autres profils. Les panneaux électriques de la première prospection montrent également dans leur majorité une résistivité plus importante en surface qu'en profondeur même si ce gradient apparaît beaucoup moins homogène, ce qui pourrait résulter de la configuration utilisée, le dipôle-dipôle, qui met l'accent sur les contrastes verticaux.

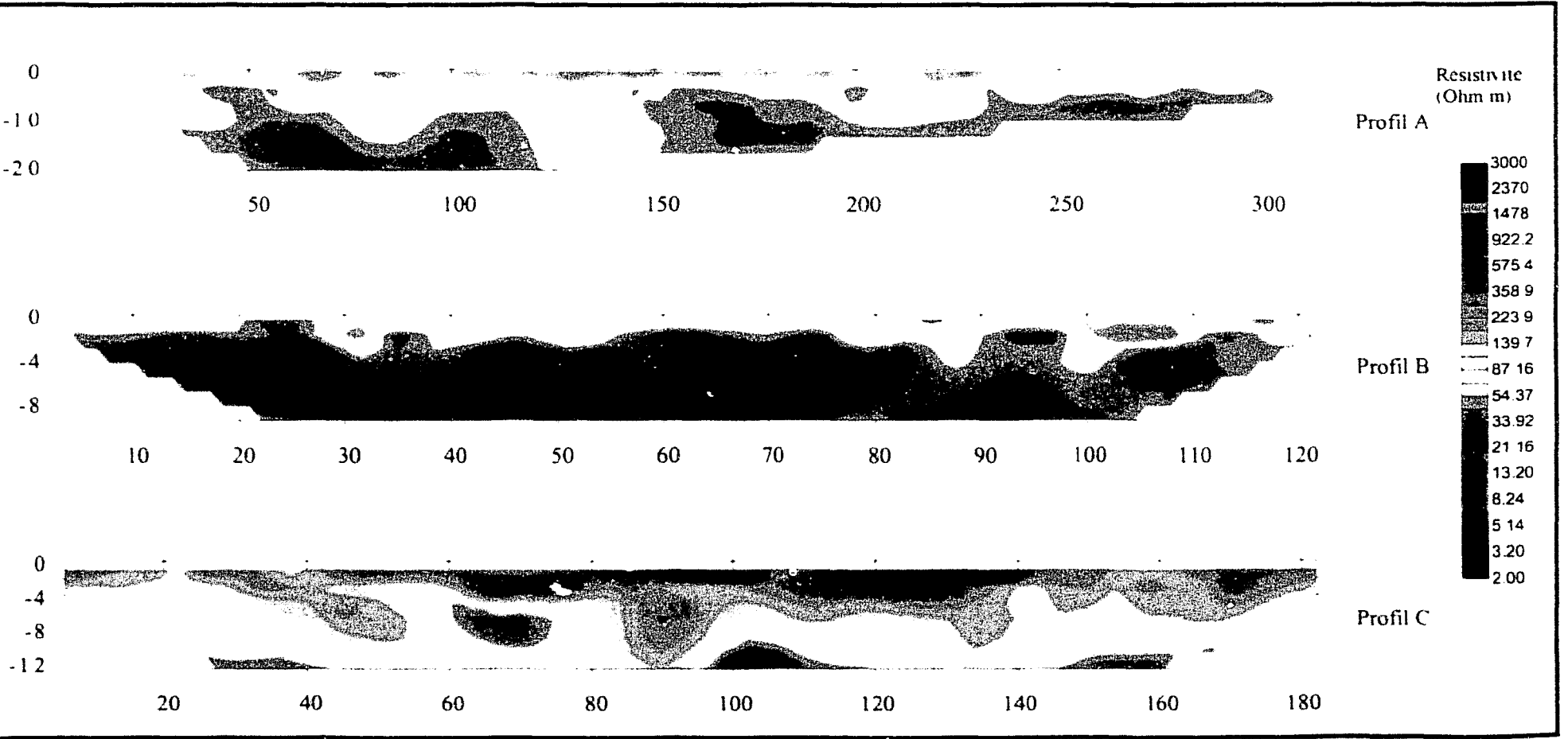


Fig. 4.18. Profils de résistivités A, B et C réalisés au cours de la prospection de février 2001 configuration werner  $\alpha$

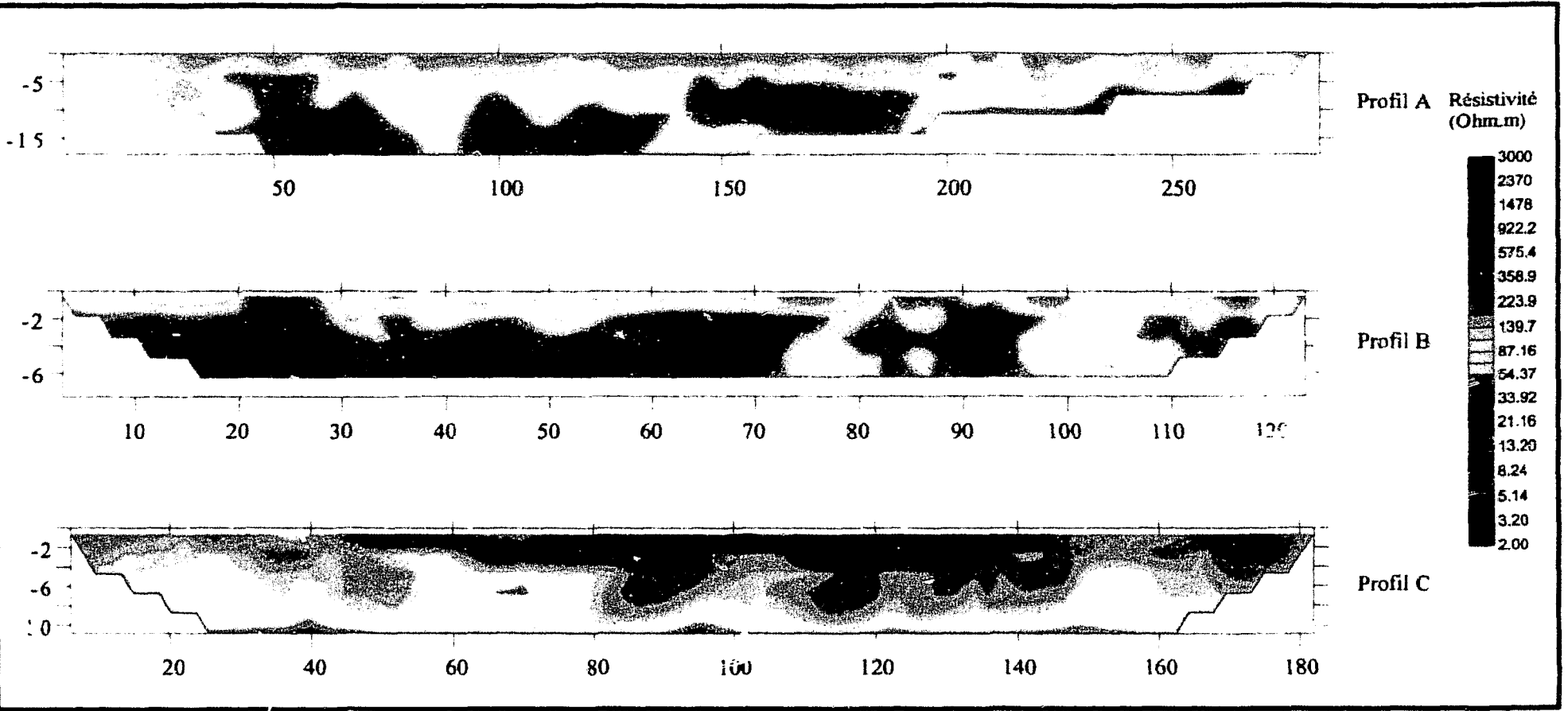


Fig. 4.19 : Profils de résistivité A, B et C réalisés au cours de la prospection de février 2001 configuration wagner  $\beta$

## 2.3 - Cartographie électromagnétique Slingram (EM 31)

### 2.3.1 - Principe et méthode (Fig. 4.20)

Il s'agit d'une méthode électromagnétique à faible nombre d'induction. Un courant alternatif parcourt une bobine émettrice, ce qui génère un champ magnétique primaire. Celui-ci engendre dans le sol des courants de Foucault qui créent à leur tour un champ magnétique secondaire, de fréquence identique au champ primaire. Une bobine réceptrice, dont la distance avec l'émettrice est petite, mesure la somme des champs primaire et secondaire. Le rapport du champ secondaire en quadrature au champ primaire est proportionnel à la conductivité électrique apparente (en  $\text{mS}\cdot\text{m}$ ), inverse de la résistivité. La profondeur d'investigation dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur, et est indépendante de la fréquence du signal émis. La configuration utilisée est soit celle où les deux bobines sont horizontales coplanaires (HCP), soit le mode de mesure dipôle magnétique vertical (DMV). L'appareil utilisé est un EM31 (Geonics Ltd) a une distance inter-bobines fixe de 3,66 m. La profondeur d'investigation est ici d'environ 6 m. Cette technique permet d'obtenir une cartographie rapide de la conductivité apparente des terrains superficiels.

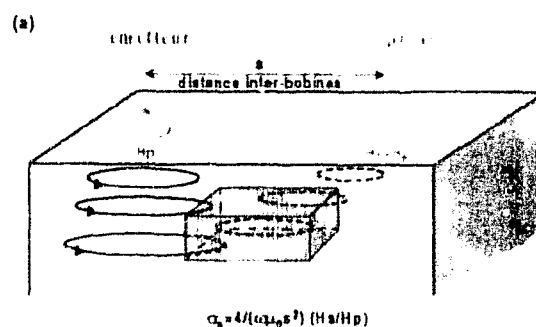


Fig. 4.20 - Principe de la méthode électromagnétique Slingram (d'après Guérin *et al.*, en cours)

### 2.3.2 Résultats

La cartographie électromagnétique a été réalisée en Février 2001 par le DESS de géophysique appliquée de Paris VI. Les valeurs de conductivité apparente visibles sur la Fig. 4.21 s'échelonnent entre 4 et 30  $\text{mS}\cdot\text{m}$ . La partie centrale de la carte est caractérisée par une conductivité plus élevée que celle des zones latérales. On peut également observer que la conductivité apparente mesurée sur le flanc nord est du terrain, le long du panneau électrique C, présente une conductivité apparente globalement moins élevée que celle du plateau et donc une résistivité apparente plus élevée, ce qui concorde bien avec les données des panneaux électriques de la deuxième prospection qui montraient pour le panneau C une résistivité plus importante que celle des panneaux A et B dans les premiers mètres superficiels.

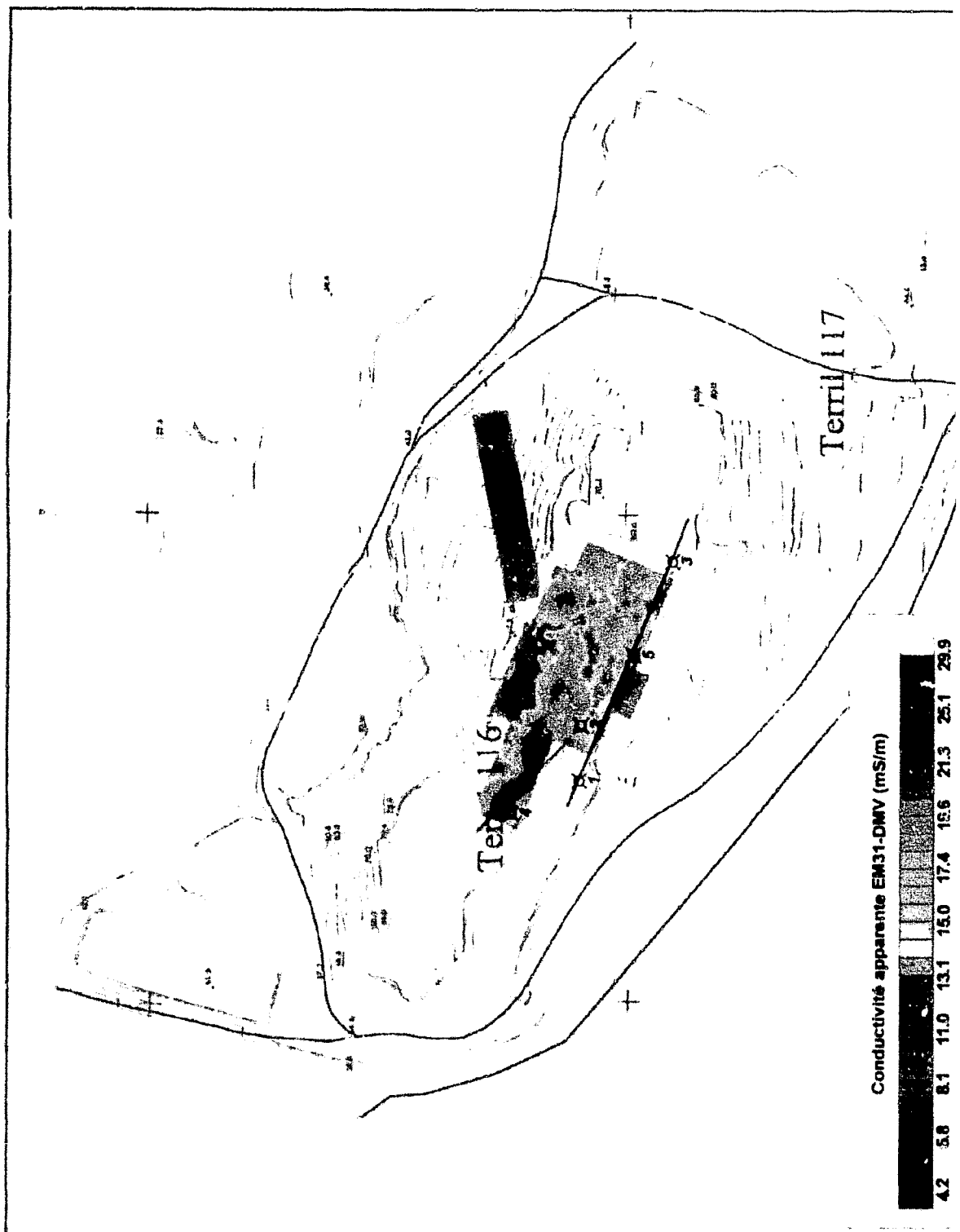


Fig. 4.21 : Cartographie electromagnétique de la conductivité apparente mesurée sur le site 2.



## 2.4 - Essais Perméafor

D'après Cammaer (1998), une fois les résidus mis à terre, des réductions de taille de particules prennent place et dépendent de la lithologie et du temps d'exposition à la météorisation. L'altération physique tend à réduire la taille du grain, comme la majeure partie des stériles est constituée de schistes ceci produit un niveau argileux plus ou moins imperméable.

Afin de déterminer l'éventuelle existence ou l'absence de barrières de perméabilité en profondeur et donc de savoir si les eaux météoriques ont ou non la possibilité de s'infiltrer en profondeur dans le terrain, des essais « Perméafor » ont été effectués.

### 2.4.1 Principes et méthodes (Fig. 4.22)

Le Perméafor est un appareil destiné à l'étude des perméabilités, mis au point par le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement Est et mis à notre disposition par leurs services et ceux du CETE Nord-Picardie. Il combine un test d'injection d'eau à un test de fonçage, permettant ainsi l'analyse simultanée de l'écoulement de l'eau dans le sol et la compacité des couches traversées. Le Perméafor permet de réaliser des essais simplifiés de type « Lefranc par injection » à travers une crépine spéciale mise en œuvre par battage ou vibrofonçage dans le cas de terrains présentant des perméabilités situées entre  $10^{-6}$  et  $10^{-2}$  m/s.

Les tests sont effectués tous les 20 cm de profondeur, la grandeur mesurée est le débit injecté « Q » rapporté à la pression d'injection « H » elle-même corrigée des pertes de charge ( $H' = H - \Delta H$ ), soit :

$$Q/H' = f(z)$$

Le ratio débit (Q) sur charge effective (H') est exprimé en  $m^2/s$ .

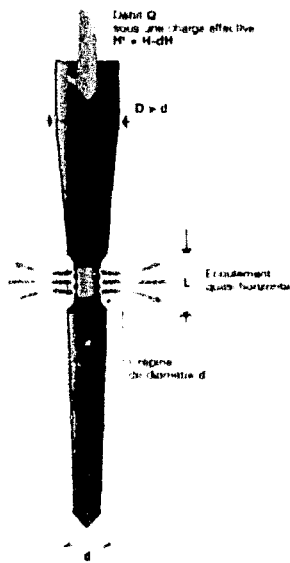


Fig. 4.22 Schéma de principe de fonctionnement du Perméafor (CETE-Est, 2000)

La dimension de la crépine et le pas de mesure retenu (20 cm) permettent, en reportant le ratio  $Q/H'$  en fonction de la profondeur, d'obtenir une image très fine des hétérogénéités en perméabilité et des limites de couches sur toute la profondeur testée : on parle de diagraphie de perméabilité.

Il est important de noter que les essais Permeafor ne donnent pas accès à la perméabilité « moyenne » mais permettent au contraire d'établir les variations de transmissivité tout au long du forage. L'appareil n'ayant pas été conçu pour donner le coefficient de perméabilité mais une série continue et systématique d'un ratio proche de  $k$  à un coefficient de forme près, les résultats des essais Permeafor doivent être lus en « classes de perméabilité », il est préférable de conclure à un ordre de grandeur de perméabilité plutôt qu'à une valeur unique. Un classement, centré sur les puissances 10 des résultats  $Q/H'$  a ainsi été retenu (Fig. 4.23).

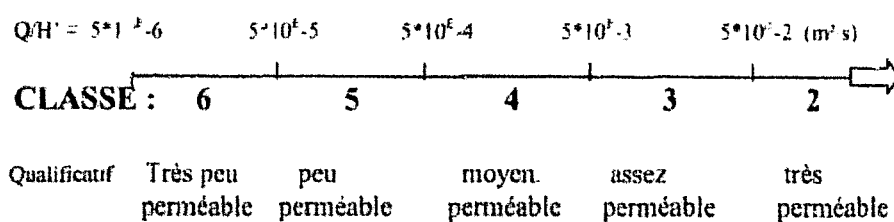


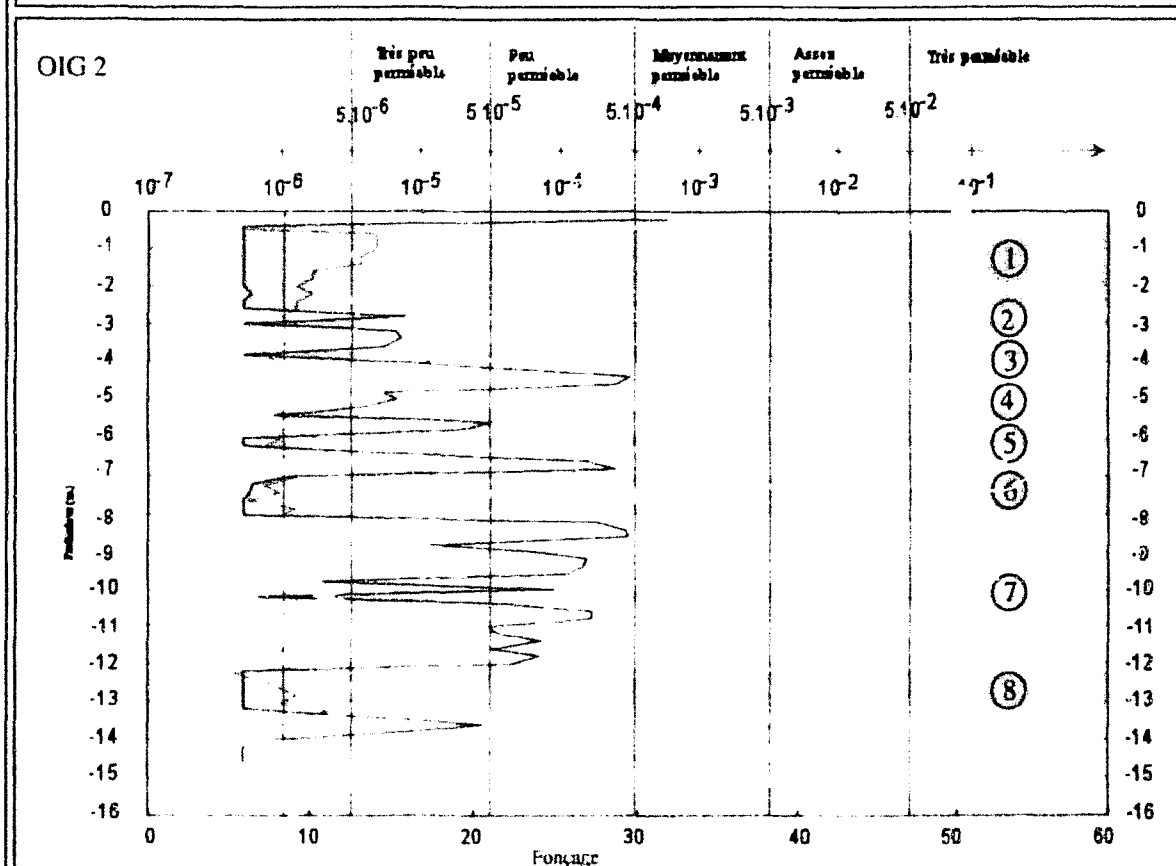
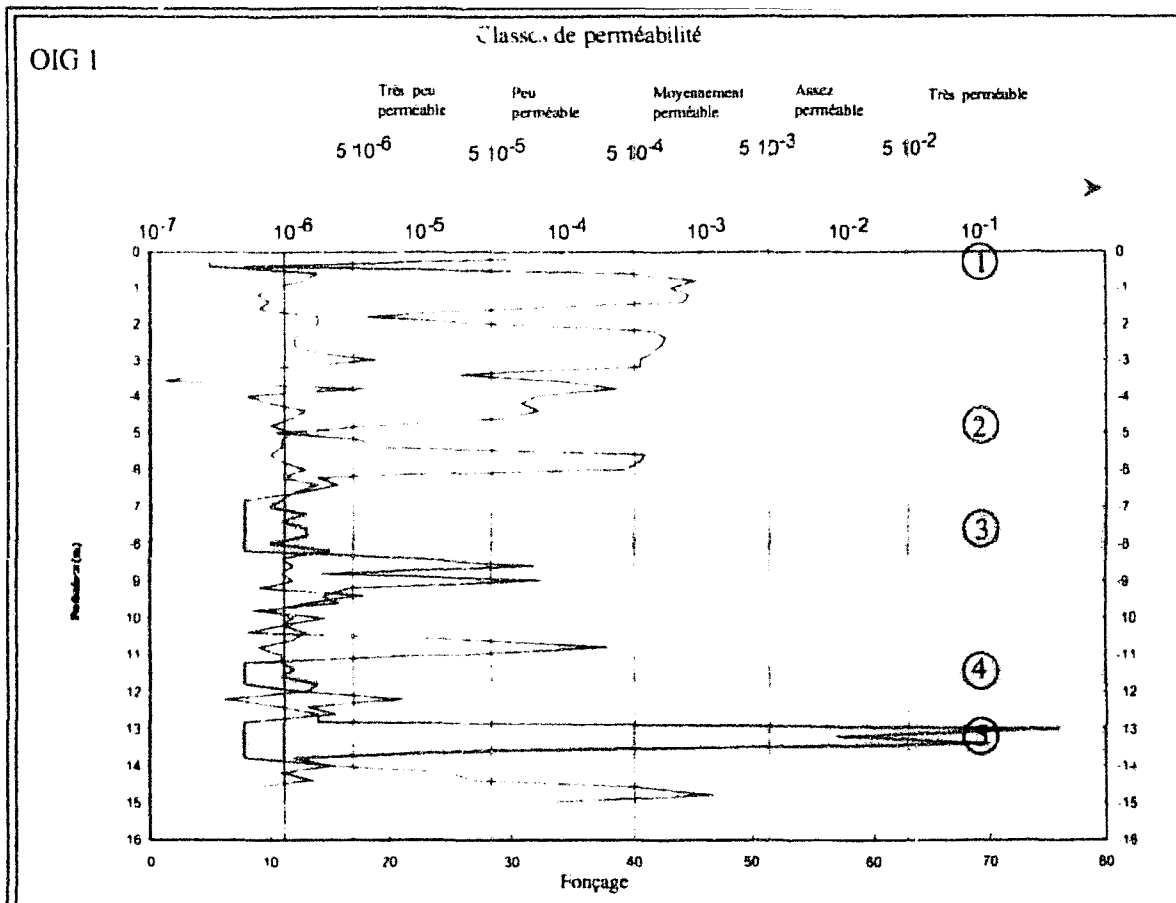
Fig. 4.23 : Classes de perméabilité qu'il est possible de déterminer par les essais Permeafor (CETE-Est, 2001)

#### 2.4.2 – Résultats

Cinq essais Permeafor ont été réalisés sur le site 2, la position de ces points est reportée en Fig. 4.3 et 4.4 (OIG1 à OIG5) et les résultats de ces essais sont exposés de la figure 4.24 à la figure 4.26.

**OIG1** : Ce test Permeafor, réalisé jusqu'à une profondeur de 15 m présente des valeurs s'échelonnant entre la classe de perméabilité « moyennement perméable » et « imperméable » (les valeurs situées sous un rapport  $Q/H' = 10^{-6}$  caractérisent des niveaux imperméables). On constate la présence en profondeur de 5 niveaux imperméables (représentés en jaune sur la Fig. 4.24) dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à plus de 1 mètre. Sur cet essai, les deux premiers niveaux imperméables sont de faible épaisseur (10 cm) tandis que plus en profondeur l'épaisseur des derniers niveaux imperméables est plus importante, pouvant atteindre 1,4 m.

La courbe de fonçage (représentée en rose sur la Fig. 4.24) ne montre pas de variations remarquables entre les niveaux imperméables et les autres niveaux, le 5<sup>ème</sup> niveau mis à part, puisque ce dernier présente une nette augmentation du temps nécessaire à l'enfoncement de la crépine dans les terrains étudiés. Cette variation est vraisemblablement à attribuer à la présence à ce niveau de blocs ayant freiné la progression du forage.



- Courbe de fonçage (s/20cm)
- Transmissivité (m<sup>2</sup>/s)
- Zones imperméables

Fig. 4.24 : Résultats des essais Permeafor OIG 1 et OIG 2

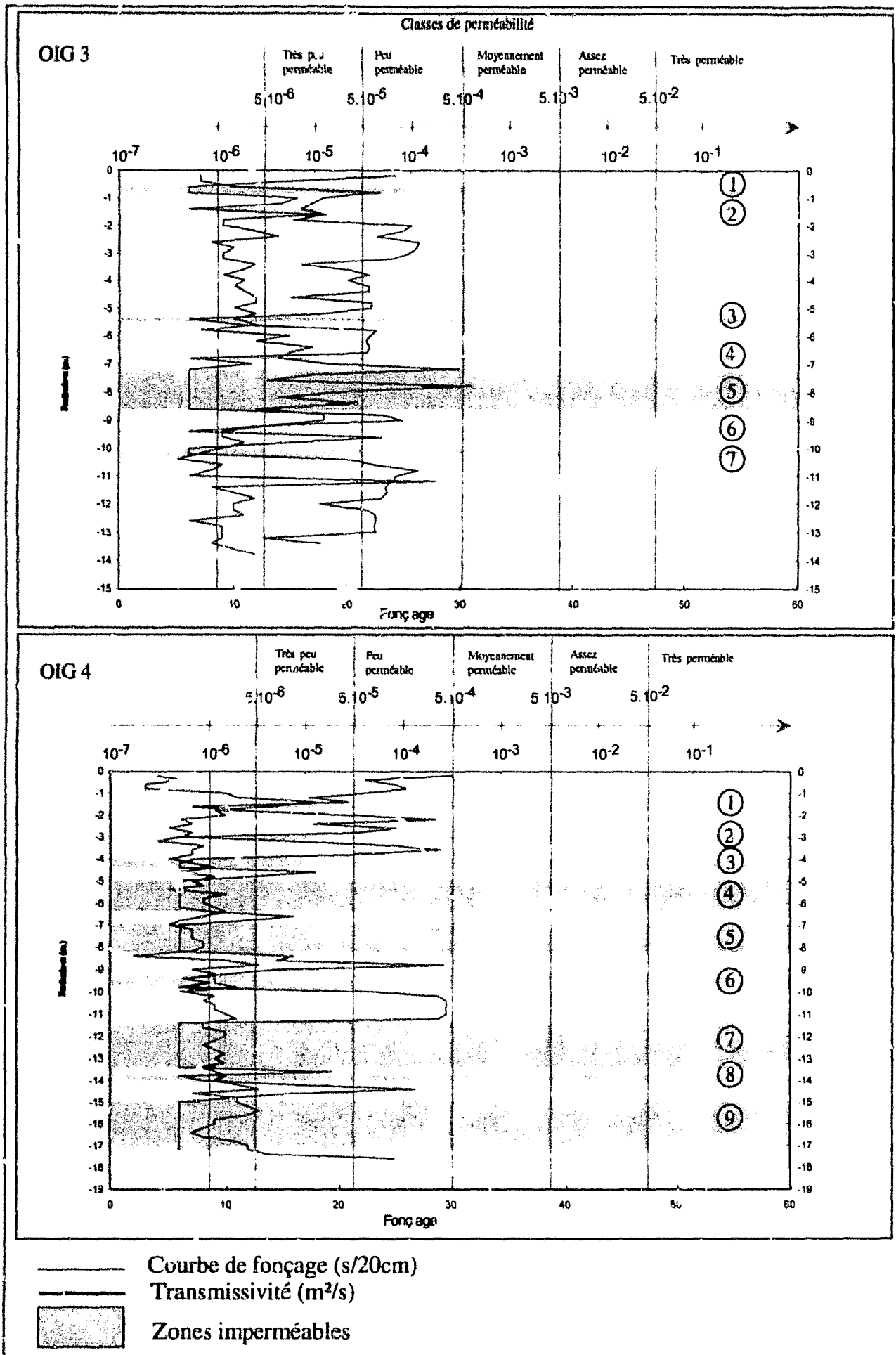


Fig. 4.25 : Résultats des essais Permeafor OIG 3 et OIG 4

OIG2 : On observe ici aussi en profondeur jusqu'à 14 m une alternance de zones peu perméables, très peu perméables et imperméables. La diagraphie de perméabilité n'atteint pas ici la classe « moyennement perméable » comme c'était le cas pour l'essai Permeafor OIG1.

On constate donc la présence en profondeur de huit niveaux imperméables (en jaune sur la Fig. 4.24), cinq de ces niveaux ont une épaisseur de l'ordre de la dizaine de centimètres (2, 3, 4, 5 et 7) et les trois zones imperméables restantes (1, 6 et 8) présentent une épaisseur plus importante allant de 1 m à plus de 2 m pour le niveau 1.

La courbe de fonçage ne montre pas de variations très importantes, comme c'était le cas pour le niveau 5 du test Permeafor OIG1. On constate par exemple une légère augmentation du temps nécessaire au fonçage dans la première partie (de 0,5 à 1,5 m) du niveau 1. Les valeurs de fonçage du forage sont situées entre 5 et 15 s/20 cm, ce qui semble signifier une certaine homogénéité dans les terrains traversés.

OIG3 : Les classes de perméabilité rencontrées en profondeur sur cet essai Permeafor varient de peu perméable à imperméable. Les valeurs de  $Q/H$  atteignent ici des valeurs de  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  tandis que l'essai OIG2 pouvait atteindre des valeurs de  $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , cet essai montre donc que les terrains testés au point OIG3 sont globalement encore moins perméables que ceux du point OIG2. On rencontre en profondeur sept niveaux imperméables : six de faible à moyenne extension (niveaux 1, 2, 3, 4, 6 et 7 : 10 à 30 cm) et un d'épaisseur plus importante (niveau 5).

La courbe de fonçage, dont la plupart des valeurs se situent autour de 10 s/20 cm, présente à certaines profondeurs une augmentation du temps nécessaire au fonçage. C'est le cas notamment dans le niveau imperméable 1 autour de 80 cm de profondeur où l'on observe une valeur supérieure à 20 s/20 cm mais également dans le niveau 5 où l'on constate trois augmentations consécutives (à 7,2 m, 8 m et 8,5 m) et à 11,2 m dans une zone classée peu perméable.

OIG4 : La diagraphie de perméabilité réalisée jusqu'à 17 m montre ici des terrains allant de la classe moyennement perméable à imperméable. Ce profil est marqué par l'abondance des niveaux imperméables reconnus en profondeur : on dénombre ainsi neuf niveaux imperméables de puissance variable : de l'ordre de la dizaine de centimètres pour les deux premiers niveaux et le niveau 8 et de 40 cm à plus de 2 m pour les autres niveaux.

La courbe de fonçage montre peu de variations importantes avec des valeurs centrées autour de 10 s/20 cm, on note toutefois la présence à 1,5 m d'une légère augmentation du temps nécessaire au fonçage.

OIG5 : Ce test Permeafor réalisé jusqu'à 17 m présente des valeurs  $Q/H$  situées de la classe peu perméable à imperméable. On constate une fois encore la présence de nombreuses zones imperméables en profondeur. Ces niveaux, au nombre de onze, présentent une nouvelle fois des

puissances variables : les niveaux 2, 8, 9 et 11 ont une épaisseur de l'ordre de la dizaine de centimètres (30 cm pour le niveau 8) et les autres niveaux vont de 50 cm à plus d'1 m pour le niveau 5.

La courbe de fonçage dont la majeure partie présente des valeurs situées autour de 10 s/20 cm montre tout de même de brusques augmentations. On constate ainsi à 1,2 m de profondeur, entre les niveaux imperméables 1 et 2, une augmentation du temps de fonçage qui passe à 40 s/20 cm ; de même, au sein du niveau 5, à 9,4 m de profondeur, la courbe de fonçage passe de 10 s/20 cm à 25 s/20 cm. Les variations de la courbe de fonçage rencontrées plus en profondeur sont de moindre amplitude (entre 15 et 20 s/20 cm pour les niveaux imperméables 7 et 8).

L'ensemble des essais Permeafor réalisés sur le site 2 montre en profondeur la présence de niveaux imperméables d'épaisseur variable. Il est bien sûr impossible de corrélérer ces barrières entre elles, les essais étant trop éloignés les uns des autres et le matériau étant extrêmement hétérogène en raison notamment de son mode de mise en place. Il est également important de souligner que ces niveaux imperméables sont distribués au sein d'un ensemble que l'on peut qualifier lui-même de peu perméable.

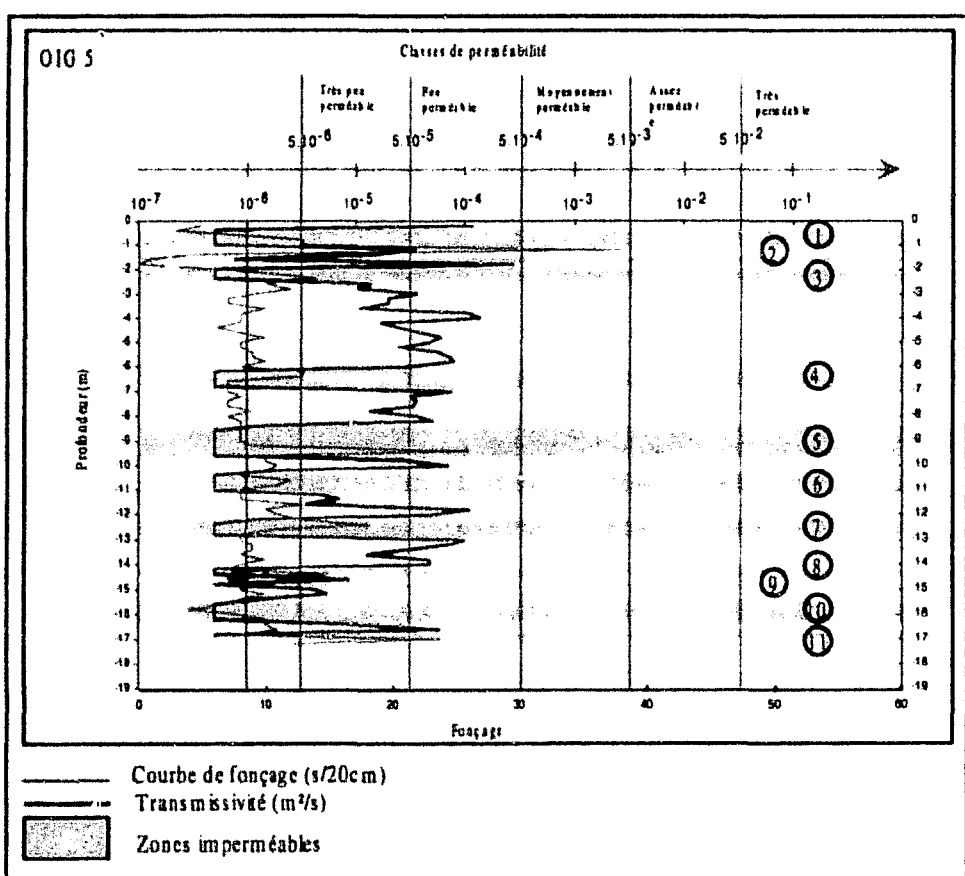


Fig. 4.26 : résultats de l'essai Permeafor OIG 5.

## 2.5 - Sondages et analyses granulométriques

La réalisation de sondages de 3 m effectués en tranchées à la pelle mécanique a permis un échantillonnage des solides en subsurface au niveau des essais Permeafor précédemment réalisés. A chaque point de prélèvement, 1 à 2 kg de matériau ont été échantillonnés afin d'obtenir des analyses granulométriques les plus représentatives possibles.

### 2.5.1 - Méthode

Les échantillons ont été traités suivant deux procédés : le tamisage à sec, et le tamisage sous eau. Il est important de noter que ces deux méthodes entraînent chacune un biais.

- Le tamisage à sec : les échantillons récoltés sur le terrain sont tout d'abord passés à l'étuve (40 °C), afin d'obtenir une masse de référence (sans eau) au moment de la pesée, puis disposés sur une colonne de tamis (20 mm à 63 µm), les refus de tamis sont ensuite pesés, ce qui permet d'établir des courbes granulométriques.

Les échantillons ainsi traités n'ont pas été mis à déliter préalablement donc, une partie des fines restent agglomérées, soit les unes aux autres, soit sur des particules plus grosses. Ainsi, lors de la pesée, ces fines n'apparaissent pas en tant que telles mais leur masse s'ajoute à celle des particules plus grosses. Cette méthode de tamisage a donc pour effet de restreindre la quantité de fines présente dans un échantillon et d'augmenter d'autant la masse des particules plus grossières.

- Le tamisage sous eau : l'échantillon est passé à l'étuve (40°C) puis pesé, il est ensuite disposé sur une colonne de trois tamis destinés à séparer trois fractions pour faciliter le nettoyage sous l'eau des roches. Ceci permet de détacher la fraction fine collée aux particules plus grosses et également de séparer les agrégats. L'eau de rinçage est recueillie et mise à décanter, tandis que les particules présentes dans les tamis sont remises à sécher, pesées puis passées dans une colonne de tamis suivant la méthode de tamisage à sec décrite précédemment. Le biais vient ici des alternances chauffage humectation qui, en désagrégeant les particules de schiste, augmentent la quantité de fines dans les échantillons.

Les particules fines issues du tamisage sous eau ont ensuite été analysées au granulomètre laser (annexe 1).

La majeure partie des échantillons a été traitée par tamisage à sec et douze échantillons ont été tamisés sous eau. En effet, certains échantillons contenant plus de fines que les autres étaient impossibles à analyser à sec, en raison de l'agglomération des particules fines entre elles et ont dû être traités sous eau. De ce fait, il n'est pas possible de comparer dans certaines fosses les échantillons entre eux.

puisque certains ont été analysés par voie sèche et d'autres pas voie humide (c'est le cas du point OIG2 et du point OIG3). La lourdeur du protocole d'analyses granulométriques par voie humide n'a pas permis d'effectuer ces analyses sur l'ensemble des échantillons récoltés. D'autre part il nous a semblé que dans le cas d'échantillons « typiques », c'est-à-dire ne présentant pas de trace d'agglomérations de fines et dans lesquelles la teneur en fine semblait faible, les analyses granulométriques par voie sèche entraînaient un biais moins important que les analyses granulométriques réalisées sous eau et que les éventuels agrégats de fines existants étant une réalité de terrain, ils se comportaient dans le milieu « naturel » (donc dans le terri) comme des particules plus grossières et pouvaient donc être comptabilisés comme telles.

### 2.5.2 - Résultats

OIG 1 : Six échantillons ont été prélevés à 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 et 3 m dans la fosse creusée au point Perméafor OIG 1 (Fig. 4.3 et 4.4). L'observation du matériau dans la fosse n'a pas permis de mettre en évidence de niveau fin pouvant correspondre à une barrière de perméabilité. Ces observations sont appuyées par l'essai Perméafor OIG 1 qui ne montre pas de tel niveau avant 5 m de profondeur. Ces six échantillons ont été tamisés à sec (Fig. 4.27 et 4.28), les histogrammes nous montrent une granulométrie dominée par la présence de particules grossières, supérieures à 20 mm. On observe sur la Fig. 4.28 que les échantillons prélevés à 2 et 2,50 m, très proches l'un de l'autre d'un point de vue granulométrique, sont presque exclusivement formés d'une accumulation de blocs, ils présentent en effet une proportion de particules très grossières (blocs) plus importante que celle des autres échantillons prélevés dans cette fosse.

OIG 2 : Sept échantillons ont été prélevés à 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 ; 2,8 et 3 m au point Perméafor OIG 2. L'observation de la fosse réalisée a montré l'existence entre 0,5 et 1,5 m d'un niveau fin, très plastique et difficile à échantillonner. Il est apparu que l'eau de pluie tombant le jour de l'échantillonnage s'infiltrait jusqu'à ce niveau où elle était stoppée et ruisselait ensuite dans la fosse. Ce niveau que nous interprétons comme une barrière de perméabilité se retrouve sur l'essai Perméafor OIG 2 avec une extension toutefois plus importante (de 0,5 à 2,5 m). Les échantillons prélevés dans ce niveau (à 0,5 ; 1 et 1,5 m) ont été tamisés sous eau en raison de la quantité de fines agglomérées présentes. Les autres échantillons ont été tamisés à sec (Fig. 4.29). Comme attendu, les trois échantillons prélevés dans la barrière de perméabilité montrent une quantité de fines (< 63 µm) plus importante (de 4,9 % à 18,8 % de particules inférieures à 63 µm) que celle présente dans les autres échantillons. Dans cet exemple, l'échantillon OIG2-1m (et dans une moindre mesure les échantillons OIG2-0,50m et OIG2-1,50m) montre une quantité de fines inférieures à 63 µm très élevée qui ne semble pas devoir être attribuée à la technique utilisée pour le tamisage (sous eau) mais bien à une réalité de terrain.



La fraction inférieure à 63 µm des échantillons tamisés sous eau ont été analysés au granulomètre laser (Tab. 4.2 et Fig. 4.30). On constate que les échantillons OIG2-0,50m et OIG2-1,50m présentent une proportion de particules inférieures à 63 µm de 4,9 à 6,9 % et que la proportion d'argile dans cette fraction se situe entre 20 et 28 %. L'échantillon OIG2-1m montre une proportion de fines inférieures à 63 µm de près de 19 % et dans cette classe granulométrique une quantité d'argile de 28%.

Nom échantillon	< 63 µm	Sable très fin	Sable fin	Sable moyen	Sable grossier	Sable très grossier	Granules	Blocs
OIG2-0,50m	4,93	1,54	2,26	2,83	3,83	5,43	7,38	71,81
OIG2-1m	18,81	5,23	9,47	10,29	7,82	6,70	8,74	32,88
OIG2-1,50m	6,93	2,13	3,19	4,33	5,67	5,94	7,82	64,00

Nom échantillon	argile	silt très fin	silt fin	silt moyen	silt grossier
OIG2-0,50m	20,73	14,81	16,06	21,81	26,60
OIG2-1m	27,12	19,48	19,20	18,74	15,45
OIG2-1,50m	27,97	21,11	19,85	17,43	13,89

Tab 4.2 Répartition en classes granulométriques des échantillons de la fosse OIG 2 tamisés sous eau.

OIG 3 : Six échantillons ont été prélevés à 0,4 ; 0,8 ; 1 ; 1,5 ; 2 et 2,5 m (Fig. 4.31) au point Perméafor OIG3. Il a été observé dans la fosse un petit niveau plus plastique à 0,80 m. Cette fosse a montré dans son ensemble des stériles plus grossiers et une humidité plus importante que les autres fosses réalisées. L'essai Perméafor OIG 3 montre également la présence d'une petite barrière de perméabilité vers 0,80 m. La présence d'un niveau contenant plus de fines à 0,4 m, niveau qui n'a pas été observé de manière franche au niveau de l'essai Perméafor, correspond à une diminution de perméabilité (et non une perméabilité nulle) sur ce même essai.

Les échantillons prélevés à 0,4 et 0,8 m ont subi un tamisage sous eau, les autres échantillons ont quant à eux été tamisés à sec. Les histogrammes nous montrent, comme attendu une quantité plus importante de fines (de 9,6 et 12,9 %) pour les échantillons prélevés à 0,4 et 0,8 m par rapport aux autres échantillons de cette fosse (de 0,08 à 0,27 %), ces valeurs n'atteignent toutefois pas la quantité de fines rencontrée pour l'échantillon OIG2-1m de l'essai Perméafor OIG2, échantillon référence d'une barrière de perméabilité avérée. Il n'est donc pas possible en l'état actuel des analyses de faire la part, pour les échantillons prélevés à 0,4 et 0,8 m, entre les fines présentes initialement sur le site et les fines « créées » par la méthode de tamisage sous eau.

La fraction inférieure à 63 µm des échantillons tamisés sous eau a été analysée au granulomètre laser (Tab. 4.3 et Fig. 4.32). On y observe que la proportion de particules inférieures à 63 µm est respectivement de 9,7 et 13 % pour les échantillons OIG3-0,40m et OIG3-0,80m et que les argiles représentent 30 % de cette classe granulométrique.

Nom échantillon	< 63 µm	Sable très fin	Sable fin	Sable moyen	Sable grossier	Sable très grossier	Granules	Blocs
OIG3-0.40m	9,66	2,43	4,46	4,92	7,10	7,74	9,97	53,73
OIG3-0.80m	12,93	3,35	5,14	6,16	7,92	9,88	12,52	42,10

Nom échantillon	argile	silt très fin	silt fin	silt moyen	silt grossier
OIG3-0.40m	31,29	21,15	18,69	16,37	12,51
OIG3-0.80m	31,83	21,50	17,86	14,61	14,19

Tab. 4.3 : Répartition en classes granulométriques des échantillons de la fosse OIG 3 tamisés sous eau.

OIG 4 : Sept échantillons ont été prélevés à 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 et 2,8 m (Fig. 4.33 et 4.28) au point Perméafor OIG 4. L'observation du matériau dans la fosse n'a pas permis de mettre en évidence de niveau fin pouvant correspondre à une barrière de perméabilité. L'essai Perméafor OIG 4 montre quant à lui une barrière de perméabilité située vers 1,6-1,7 m de profondeur, barrière que nous n'avons pas observée sur le terrain car peut être discontinue ou trop mince pour pouvoir être observée. Les six échantillons ont été tamisés à sec, les histogrammes nous montrent une granulométrie dominée par la présence de particules grossières, supérieures à 20 mm (Fig. 4.33). On observe également sur la figure 4.28 la prédominance des classes granulométriques grossières (granules et blocs) sur les autres classes avec des proportions comprises entre 80 et 90 %

OIG 5 : Sept échantillons ont été prélevés à 0,3 ; 0,6 ; 0,9 ; 1,3 ; 1,8 ; 2,3 et 2,7 m (Fig. 4.34, 4.35 et 4.28) au point Perméafor OIG 5. Nous avons pu observer dans la fosse un niveau très plastique et gorgé d'eau à 1,8 m de profondeur. La comparaison des observations faites dans la fosse avec l'essai Permeafor OIG 5 pose différents problèmes : il existe en effet une barrière de perméabilité située autour de 1,8 m mais l'observation dans la fosse n'a pas pu mettre en évidence de lithologie particulière (accumulation de fines) au niveau des deux autres barrières visibles sur l'essai Permeafor entre 0,5-1 m et 2-2,4 m.

Tous les échantillons prélevés dans la fosse, l'échantillon OIG5-1,80 m mis à part (contenant une grande part de fines agglomérées), ont été tamisés à sec (Fig. 4.34) ; l'ensemble des échantillons a ensuite été tamisé sous eau ce qui nous permet de faire une comparaison entre les deux résultats et d'estimer les variations induites par les deux méthodes.

Résultats du tamisage sous eau (Fig. 4.35 et 4.28) : Les échantillons prélevés à 0,6 ; 0,9 ; 1,8 et 2,3 m (donc au niveau des barrières visibles sur l'essai) présentent une quantité de fines respectivement de 6,2 ; 5,2 ; 7,8 et 7,4 %. Ces échantillons ne montrent pas de différence sensible vis-à-vis des échantillons prélevés entre les zones imperméables visibles sur l'essai Permeafor OIG5. On constate

ainsi que la quantité de fines inférieures à 63 µm est respectivement de 3,8 %, 7,9 % et 5 % pour les échantillons OIG5-0.30m, OIG5-1.30m et OIG5-2.70m.

Résultats des analyses granulométriques réalisées sur la fraction inférieure à 63 µm : Les particules inférieures à 63 µm représentent entre 4 et 8 % de la masse totale tamisée et dans cette classe granulométrique, les argiles ne représentent que 25 à 29 % (Tab. 4.4 et Fig. 4.36). On observe donc là encore, aucune différence sensible entre les échantillons prélevés en zone perméable et imperméable.

Nom échantillon	< 63 µm	Sable très fin	Sable fin	Sable moyen	Sable grossier	Sable très grossier	Granules	Blocs
OIG5-0.30m	3,77	0,93	1,34	2,02	1,76	2,54	3,75	83,88
OIG5-0.60m	6,18	1,53	2,23	2,82	3,68	4,57	6,20	72,79
OIG5-0.90m	5,16	1,56	2,43	3,21	4,27	5,44	7,14	70,78
OIG5-1.30m	7,89	1,91	2,92	4,27	3,85	5,99	9,16	64,01
OIG5-1.80m	7,76	1,50	2,46	3,03	4,24	5,23	6,80	68,98
OIG5-2.30m	7,42	1,94	3,05	3,87	4,84	5,89	6,77	66,22
OIG5-2.70m	4,98	1,50	2,30	3,61	3,22	4,78	6,35	73,26

Nom échantillon	argile	silt très fin	silt fin	silt moyen	silt grossier
OIG5-0,30m	28,34	19,52	18,28	17,01	16,85
OIG5-0,60m	27,31	18,90	17,20	17,12	19,48
OIG5-0,90m	25,28	19,41	17,63	17,45	20,23
OIG5-1,30m	25,67	19,41	19,16	18,08	17,68
OIG5-1,80m	28,54	20,04	18,99	17,58	14,85
OIG5-2,30m	29,38	20,30	18,40	16,91	15,00
OIG5-2,70m	29,41	22,06	21,41	17,41	9,72

Tab. 4.4 : Répartition en classes granulométriques des échantillons de la fosse OIG 5 tamisés sous eau.

Comparaison tamisage sous eau et tamisage à sec : la comparaison des résultats obtenus par tamisage à sec (Fig. 4.34) et tamisage sous eau (Fig. 4.35) montre, comme attendu, que le tamisage sous eau met en évidence une présence de particules inférieures à 63 µm beaucoup plus importante que dans le cas du tamisage à sec (de 4 à 8 % contre 0,05 à 0,2 %). Les particules fines semblent soit initialement agglomérées sur les particules grossières, soit sont produites par une désagrégation des particules grossières en raison de la technique utilisée (puisque l'augmentation de la proportion de fines pour le tamisage sous eau se fait au détriment des particules grossières et majoritairement celles de la classe des blocs).

Il apparaît au vu des résultats très homogènes que la teneur en fines ne permet pas d'expliquer à elle seule le comportement perméable ou imperméable du matériau, la disposition de ces fines (soit agglomérés sur les particules plus grossières, soit agglomérées entre elles, soit disposées en petits niveaux d'accumulation), l'agencement des grains ainsi que la compaction des niveaux en profondeur doivent également jouer un rôle.

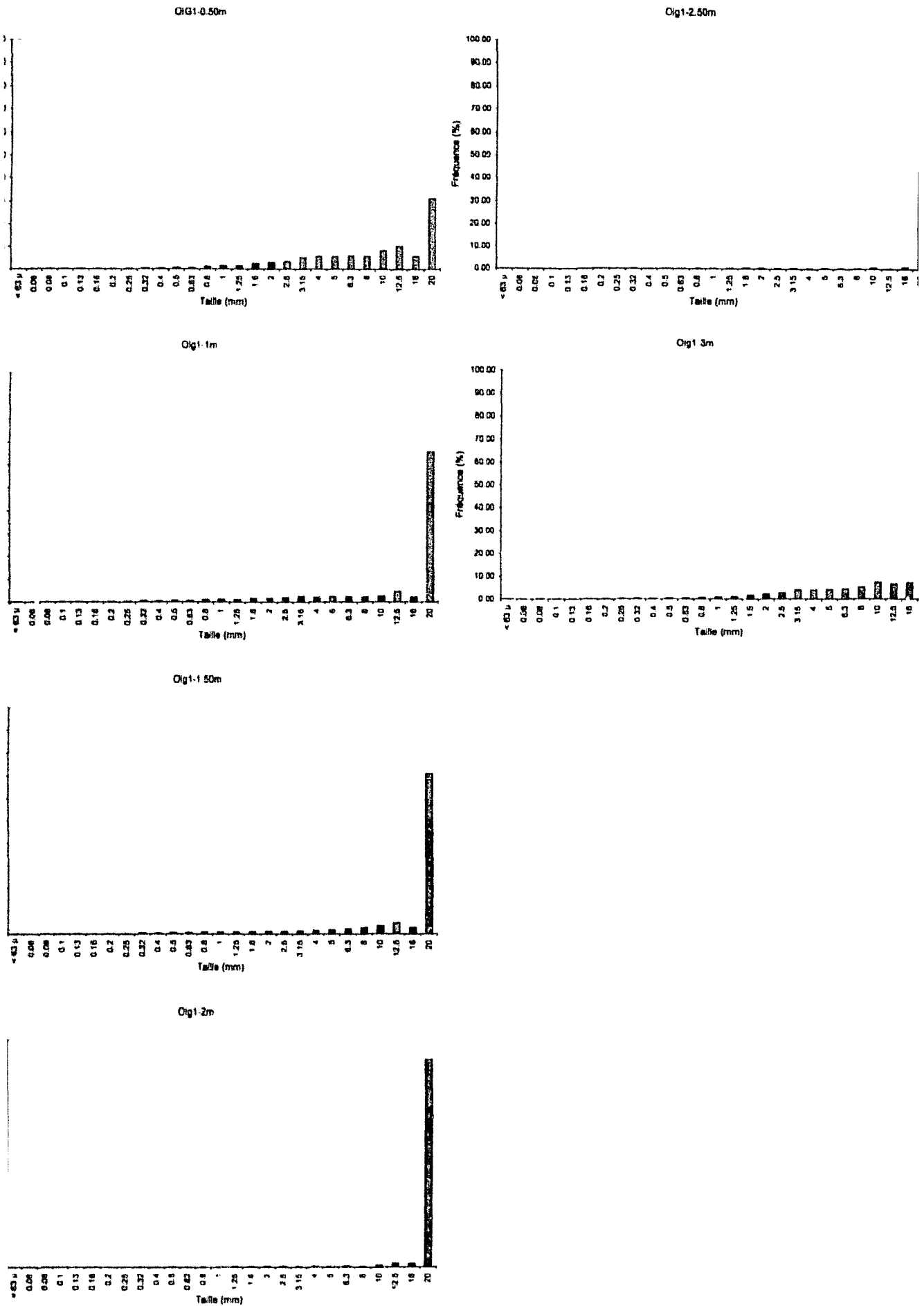


Fig. 4.27 : Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG 1

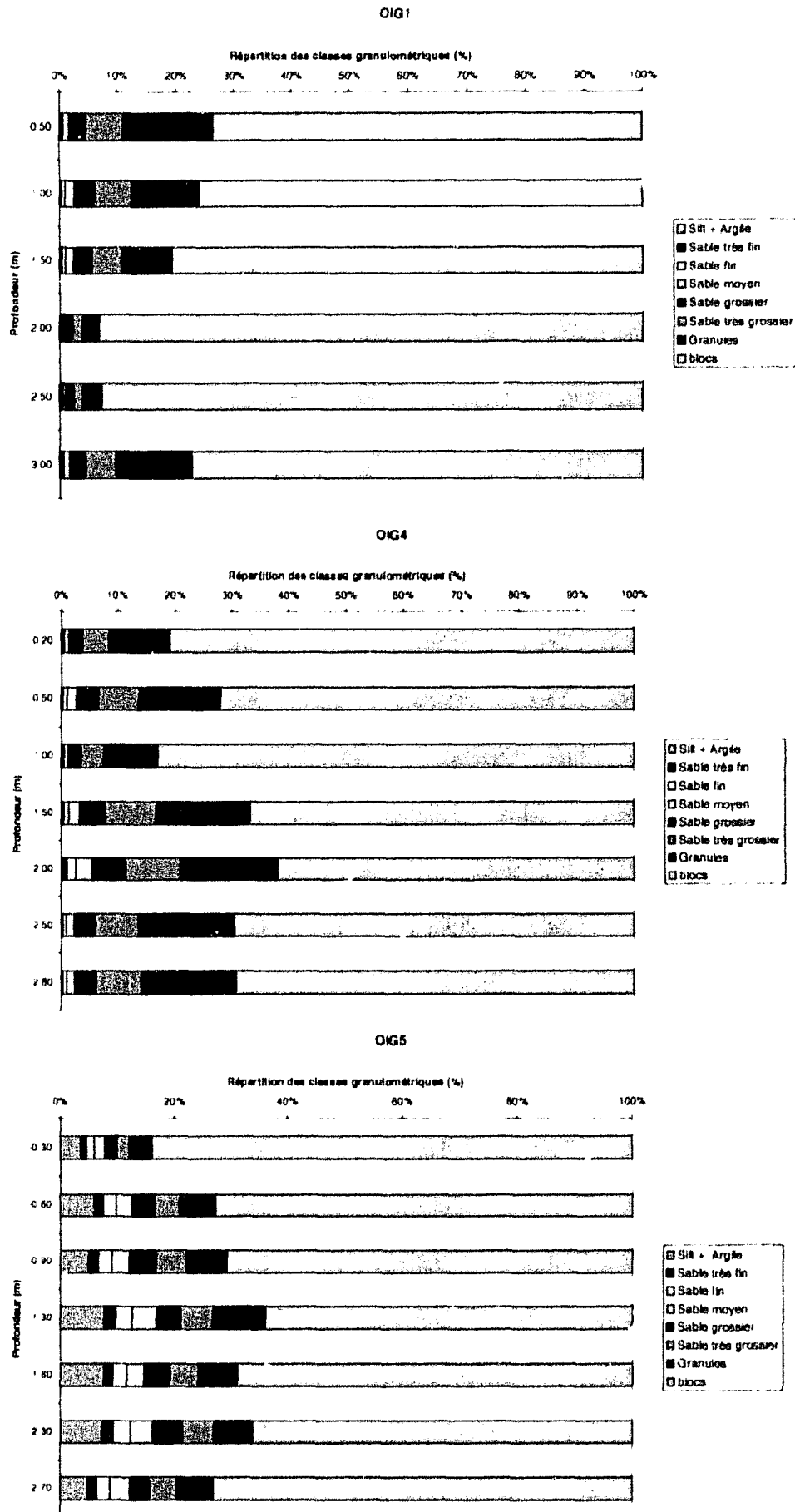


Fig. 4.28 Répartition des classes granulométriques représentées dans les échantillons prélevés en profondeur dans les fosses OIG1, OIG4 et OIG5 (OIG1 et 4 : tamisage à sec, OIG 5 : tamisage sous eau)

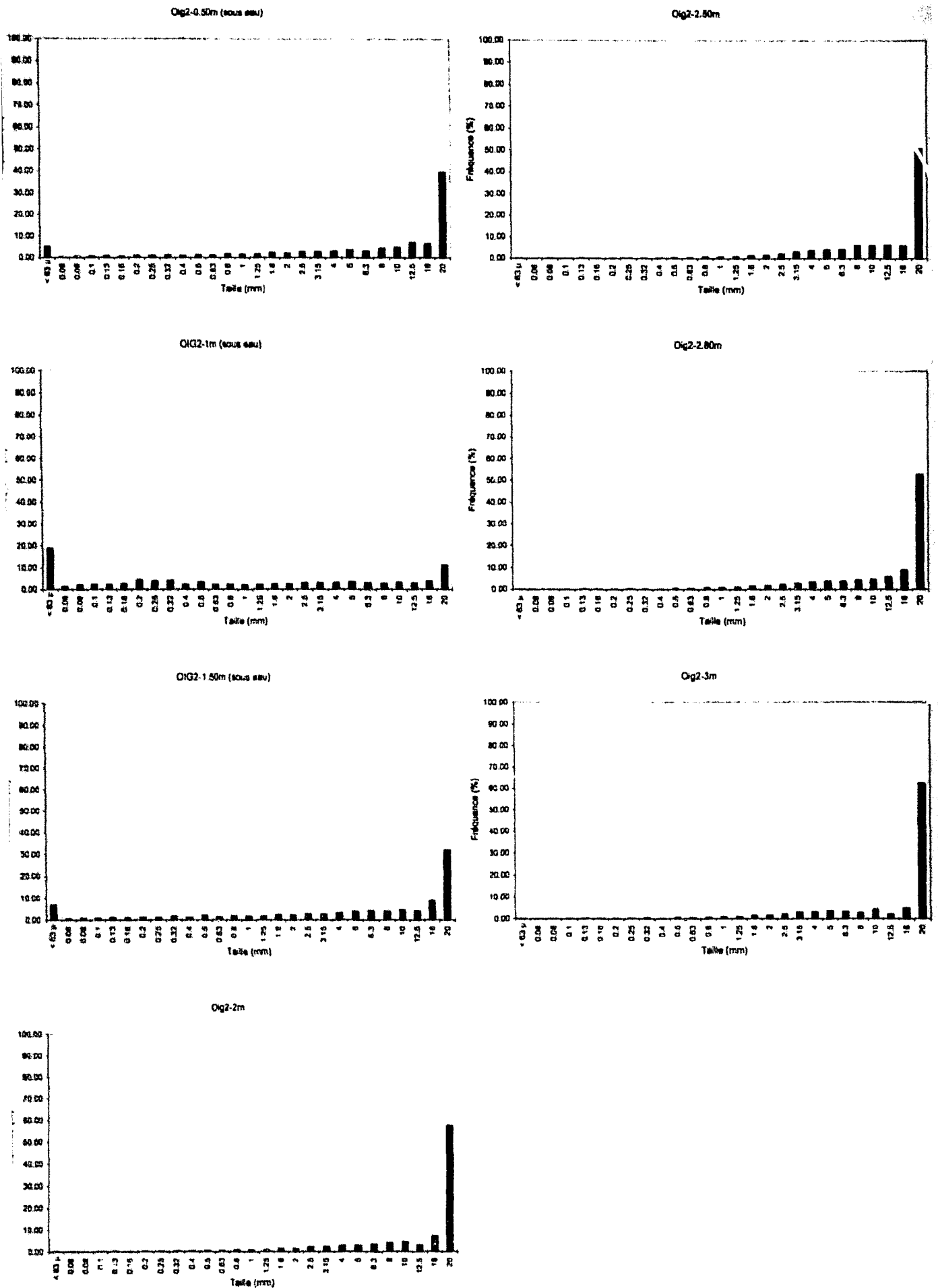


Fig. 4.29 : Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG 2

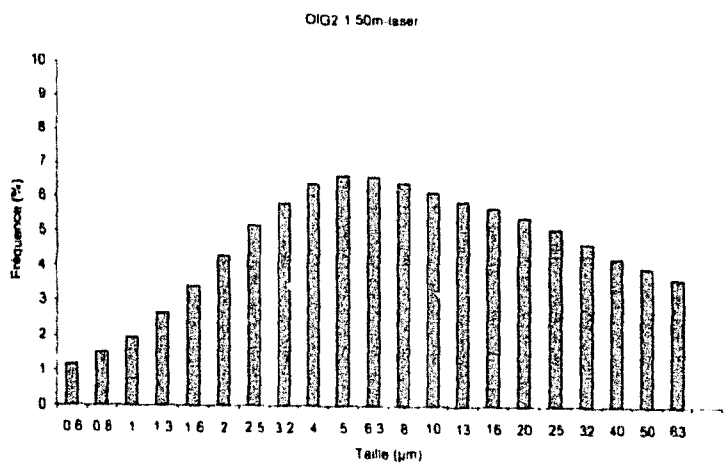
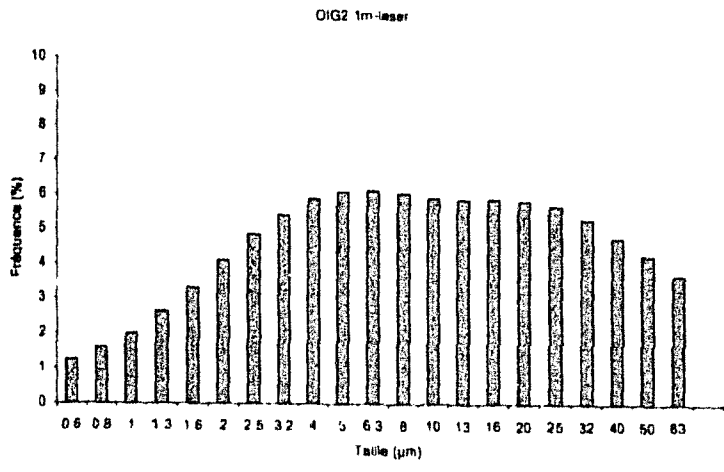
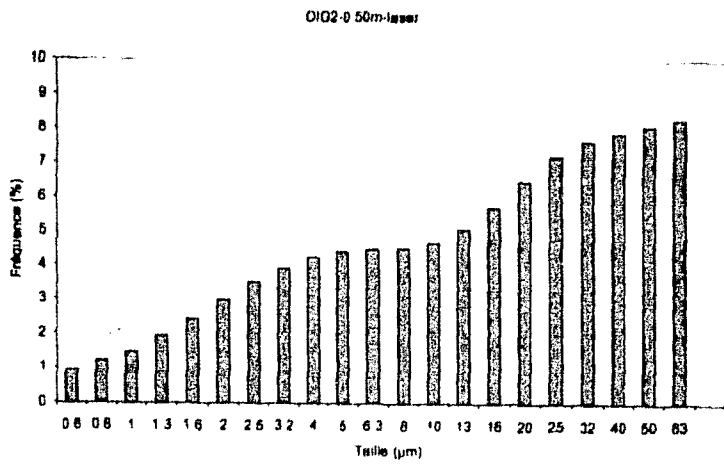


Fig 4.30 . Analyse granulométrique (laser) des échantillons prélevés dans la fosse OIG 2 (Fraction < 63µm)





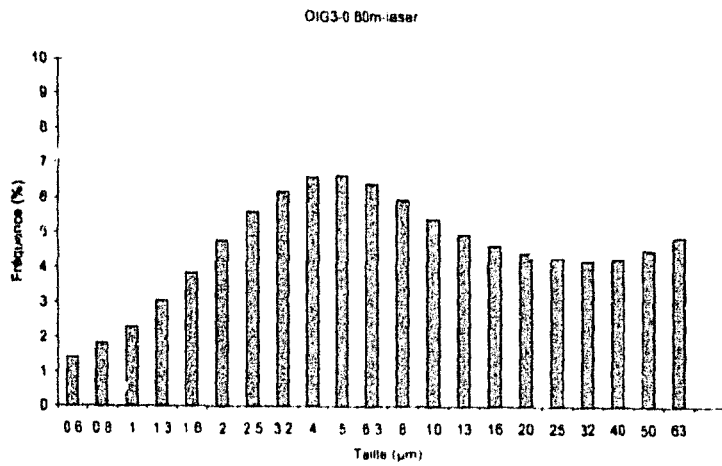
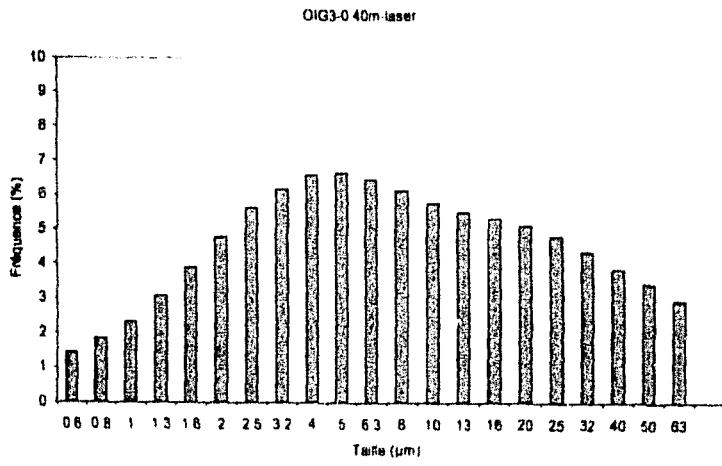


Fig 4 32 Analyse granulométrique (laser) des échantillons prélevés dans la fosse OIG 3 (Fraction <math>< 63\mu\text{m}</math>)

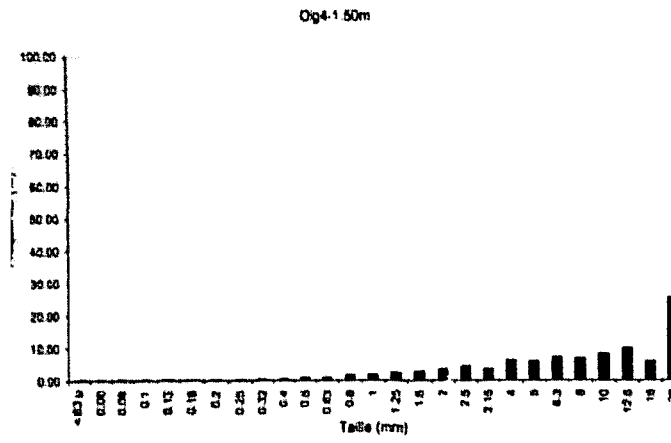
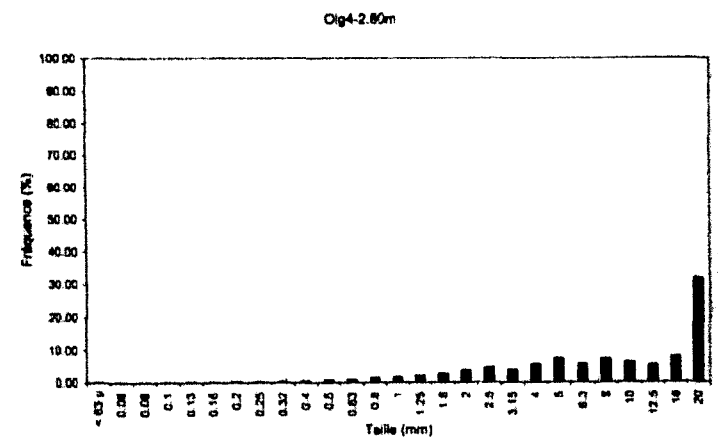
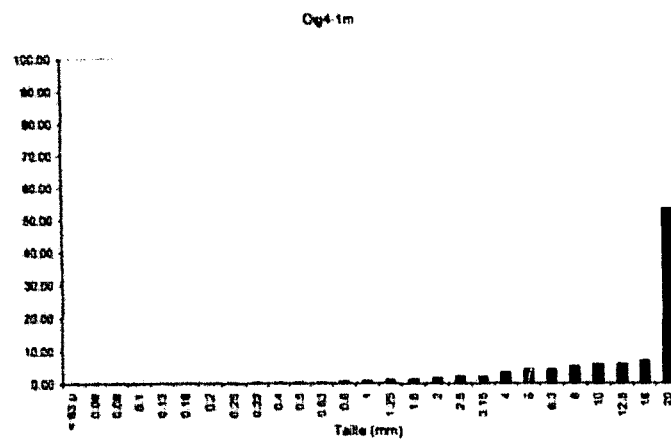
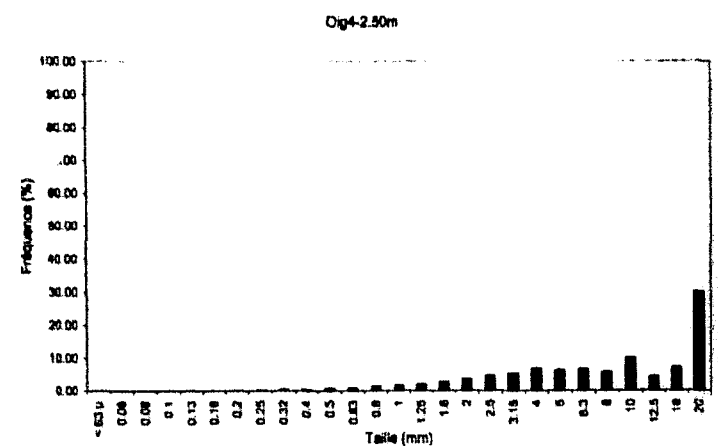
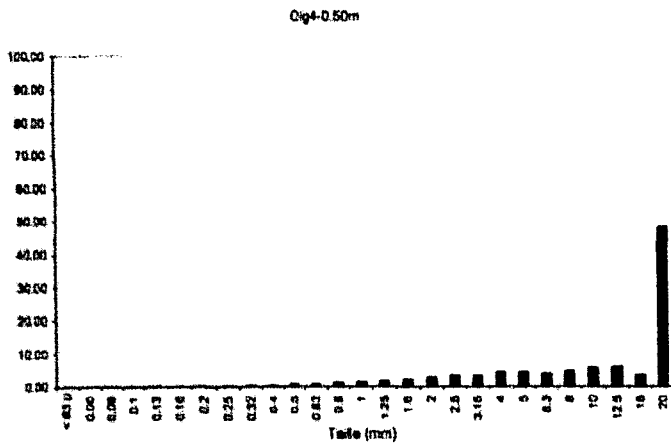
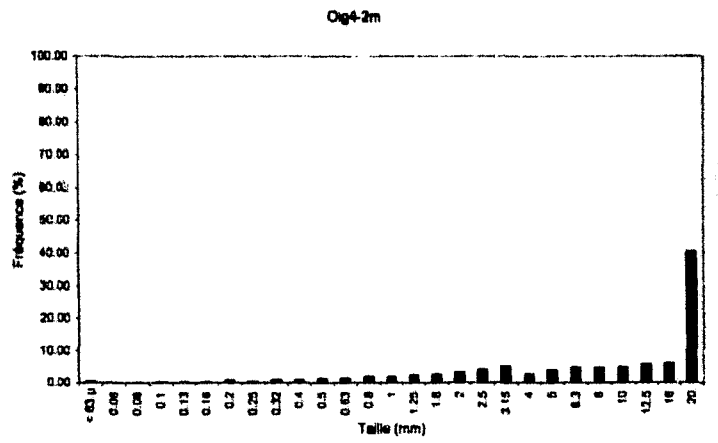
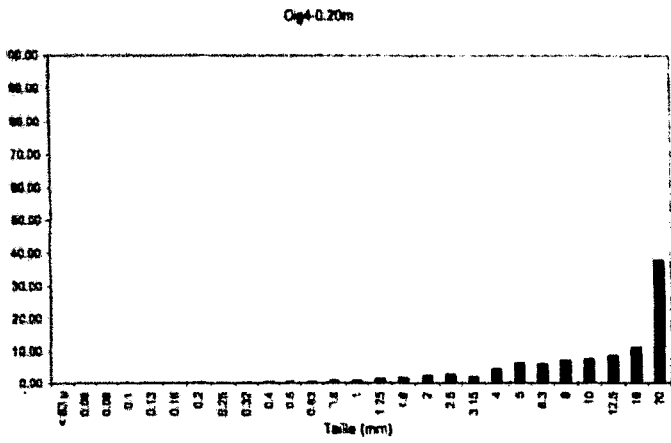


Fig. 4.33 : Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG 4

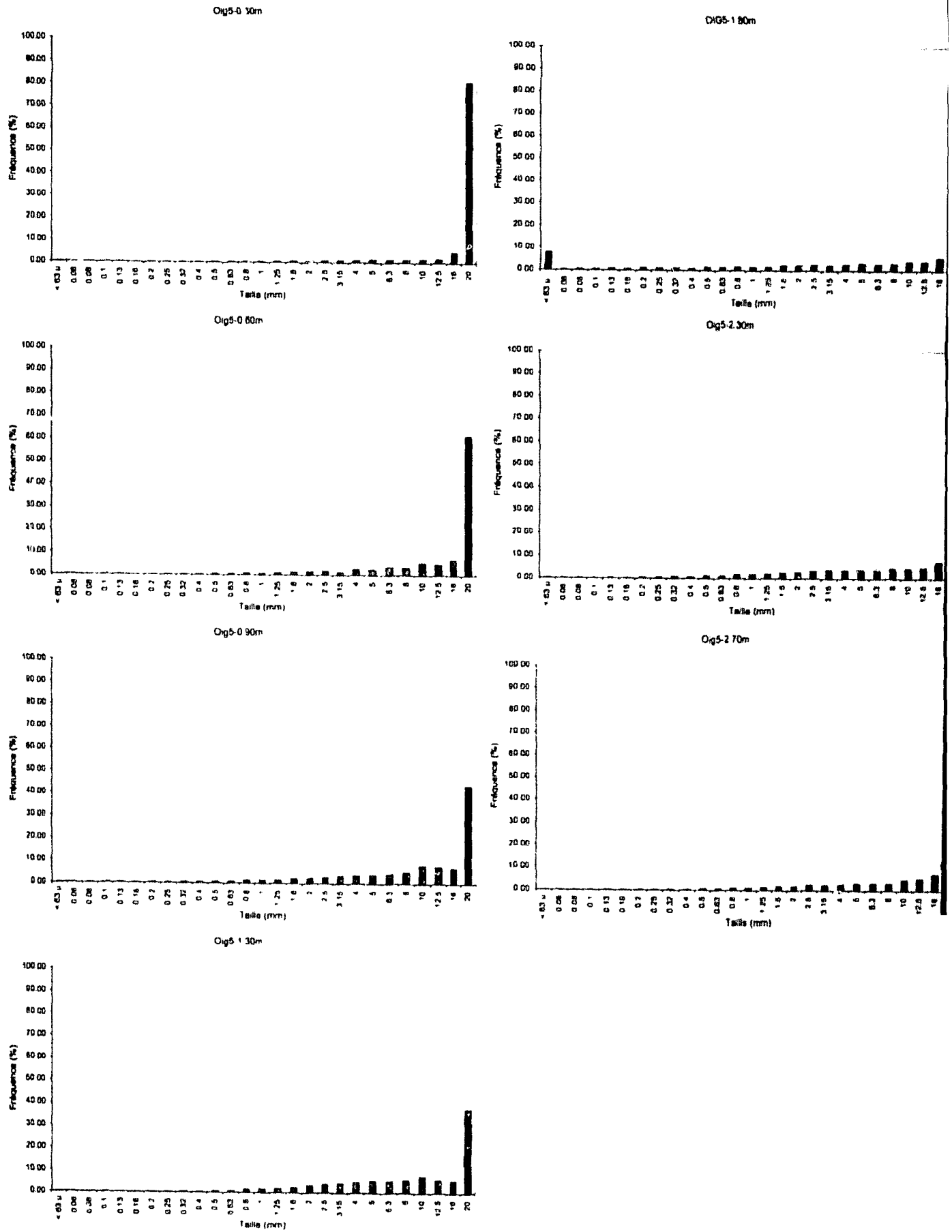


Fig. 4.34 . Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG 5 (tamisage à sec)

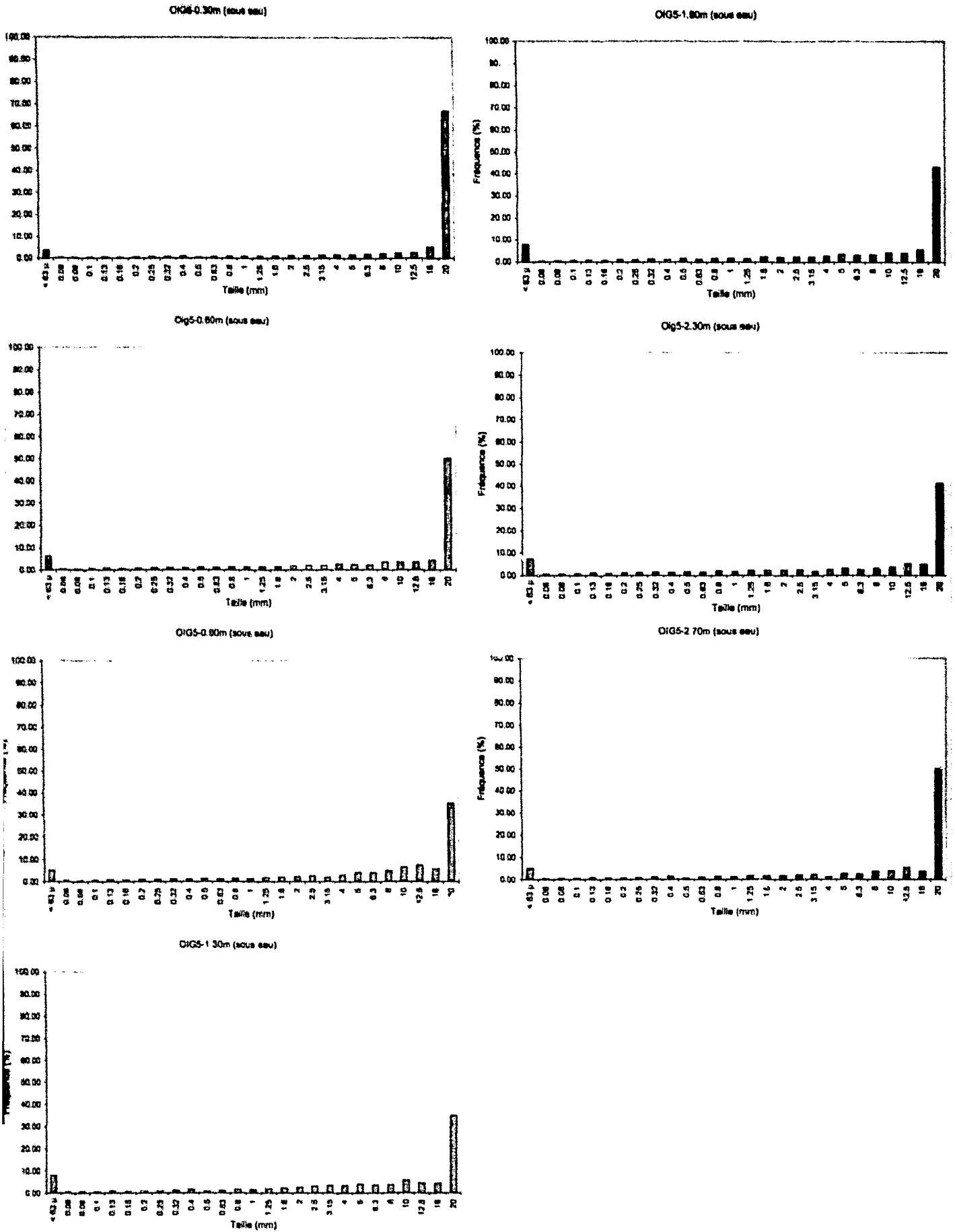


Fig. 4.35 : Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG 5 (tamisage sous eau)

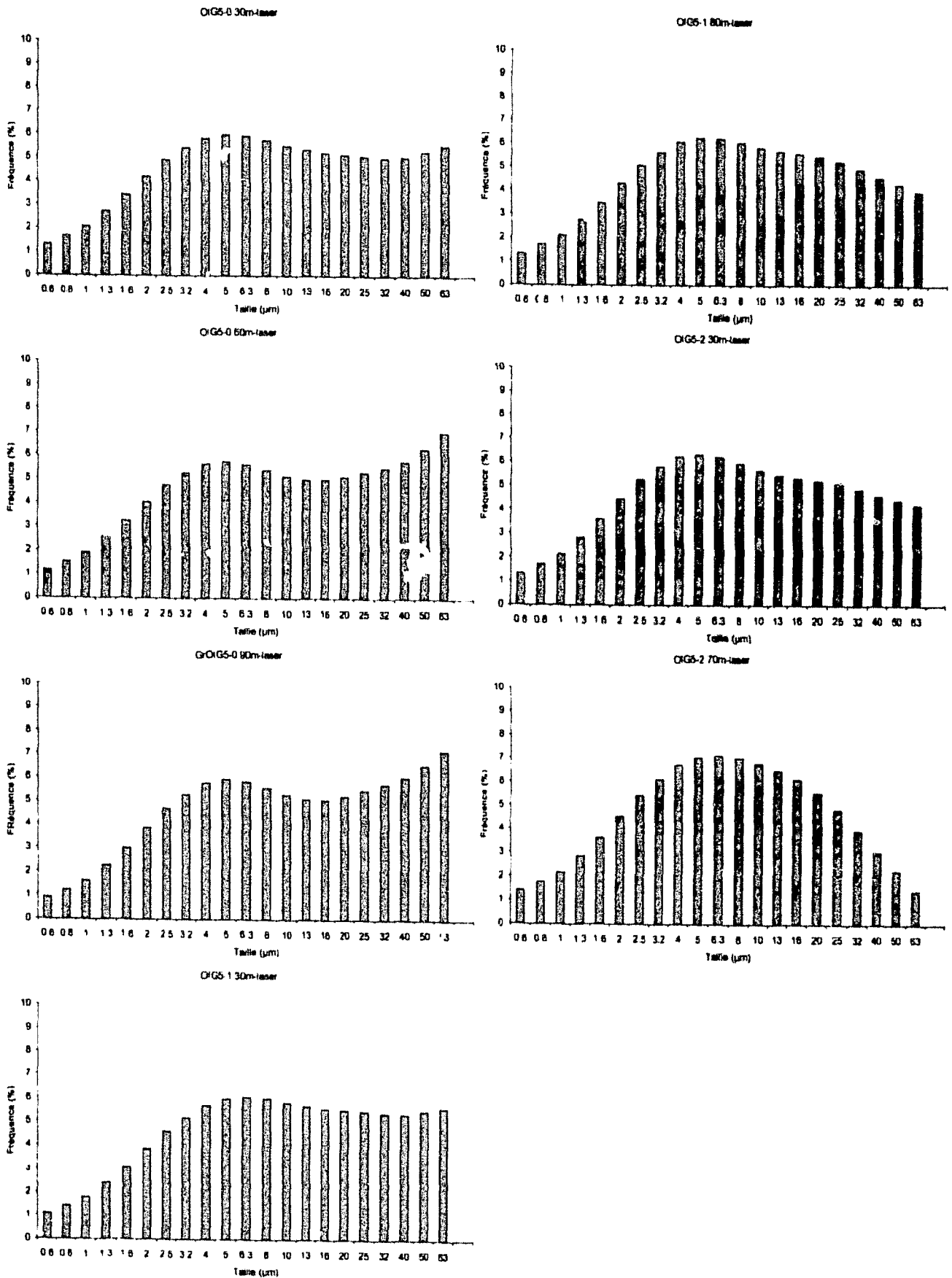


Fig 4.36 - Analyse granulométrique (laser) des échantillons prélevés dans la fosse OIG 5 (Fraction <math><63\mu\text{m}</math>)

Discussion sur la méthode : il faut garder à l'esprit que les analyses granulométriques, qu'elles soient données en pourcentage massique (colonne de tamis) ou en pourcentage volumique (granulomètre laser), mettent la présence de particules grossières, et donc plus denses et plus volumineuses, en exergue. Dans notre cas, nous étions limités pour l'échantillonnage à une masse de 2 kg : en effet, les échantillons solides récoltés devaient être représentatifs des essais Permeafor réalisés, or ces essais étant effectués de manière ponctuelle, il nous était impossible de nous éloigner de manière importante du lieu de l'essai, sous peine d'obtenir des échantillons non représentatifs de ces essais, en raison du caractère granulométrique très hétérogène du matériau d'un endroit à l'autre.

### **3 - Interprétations**

#### **3.1 – Détermination de zones d'infiltration préférentielle des eaux météoriques, apports de la Radiomagnéto-Tellurique**

Les résultats obtenus grâce aux deux prospections Radiomagnéto-telluriques nous montrent qu'en certains endroits du terroir étudié (site 2), les eaux météoriques semblent pouvoir s'infiltrer. En effet, 3 des profils étudiés montrent entre Septembre et Novembre 1999, une diminution de la résistivité et donc une augmentation de la conductivité, attribuable comme nous l'avons vu précédemment, à une variation de la teneur en eau (infiltration des eaux météoriques) le long de ces profils. En toute rigueur, si la diminution de résistivité visible sur les autres profils est attribuée à une infiltration des eaux météoriques, l'augmentation de résistivité et par conséquent la diminution de conductivité visible sur les profils P13-P14 et P3-P4 pourrait signifier le départ visible lors de la deuxième prospection d'une eau qui était présente lors de la première. L'évaporation de cette eau semble être une hypothèse très peu vraisemblable puisque la dernière prospection a été réalisée en Novembre en période de pluie assez importante. Une seconde hypothèse consiste à dire que l'eau aurait pu soit migrer en profondeur, soit plus bas suivant le sens de la pente, mais dans ce dernier cas il est difficile de cerner pour quelle raison seuls deux profils se comportent de cette façon alors que d'autres profils ont également été réalisés dans la pente et notamment le profil P9-P10, très proche du profil P13-P14 ; une troisième hypothèse envisageable est de considérer l'existence lors de la première prospection, d'eaux très minéralisées en surface, eaux qui auraient été diluées entre septembre et novembre par l'apport d'eaux météoriques moins chargées.

L'augmentation de résistivité visible sur ces profils reste difficilement interprétable et pourrait également être due soit au couvert végétal empêchant un contact optimum avec le sol sur ces profils soit à un décalage lors du positionnement GPS.

La méthode Radiomagnéto-Tellurique nous donne accès à la mesure de la résistivité apparente, on ne peut toutefois pas, en toute rigueur, considérer qu'il s'agisse de véritables sondages analogues aux sondages électriques (Dupis *et al.*, 1995). Cette méthode nous donne en effet accès à la mesure de la résistivité apparente du sous-sol, c'est-à-dire à la résistivité globale des couches de terrain concernées par la mesure.

Il est impossible par l'intermédiaire de cette méthode de savoir si l'eau présente est située sur l'ensemble de la profondeur, en surface ou répartie en couches à différentes profondeurs. La RMT, méthode rapide et aisée à mettre en œuvre, a donc permis de mettre en évidence que l'eau de pluie pouvait s'infiltrer sur une certaine profondeur, vraisemblablement faible, que nous devons tenter de déterminer par d'autres méthodes, la RMT ne le permettant pas.

### **3.2 – Mise en évidence de barrières de perméabilité naturelles et impact sur la quantité de sulfate potentiellement exportable.**

Les essais Permeafor réalisés ont permis de montrer d'une part que le terriil étudié était globalement très peu perméable et d'autre part qu'il existait en plus en profondeur dans le terriil des niveaux imperméables de puissances variables, qui en raison de l'hétérogénéité du matériau ne sont pas continues et donc bien entendu non corrélables entre elles. Il est toutefois important de souligner que, même si ces barrières ne sont pas continues, en chaque point testé sur le site, plusieurs niveaux imperméables ont été mis en évidence. Il apparaît donc que les eaux météoriques, lorsqu'elles s'infiltrèrent dans le terriil, ne semblent pas pouvoir pénétrer à plus de quelques mètres de profondeur, suivant la position de la première barrière de perméabilité efficace. Les analyses granulométriques menées sur les échantillons prélevés au niveau des essais ont permis de distinguer deux types de barrières : les barrières résultant d'une accumulation de particules fines (OIG2-0,50m à OIG2-1,50m) et les barrières vraisemblablement issues d'un agencement particulier de particules, sans qu'une proportion nettement plus importante de fines ne soit mise en évidence.

Ces zones imperméables, si elles limitent l'infiltration des eaux en profondeur, limitent également la quantité de sulfure potentiellement oxydable et donc la quantité de sulfates entraînée vers la nappe de la Craie. Leur rôle est donc primordial.

Si l'on s'intéresse à l'origine possible de ces zones imperméables, plusieurs hypothèses peuvent être formulées

Le départ de fines en profondeur : Le climat du Nord-Pas-de-Calais est caractérisé par une moyenne annuelle de 50 jours de gel par an (Mothes *et al.*, 1973). Les deux sites étudiés sont donc soumis à l'action du gel. Celui-ci a pour effet de fracturer les roches très fragiles que sont les schistes, principaux constituants des terriils. Les alternances gel-dégel entraînent un délitement et une

fracturation donc une diminution de la taille des particules schisteuses au cours du temps. D'après Aglave (2000), l'eau de pluie pourrait se charger en éléments fins dans les horizons superficiels, s'infiltrer et déposer en profondeur les particules ainsi prises en charge, colmatant à terme la porosité initiale.

L'action du climat : Comme nous l'avons expliqué précédemment, les stériles disposés en surface sont soumis à l'action du gel et donc fracturés en particules fines. Si pendant une période de temps suffisante une partie du terril est restée à l'air libre sans qu'une nouvelle couche de stériles n'ait recouvert la précédente, les particules fines formées par les alternances gel-dégel restent en profondeur.

D'après Cammaer (1998), des réductions de taille de particules prennent place sur le terril et dépendent de la lithologie et du temps d'exposition. Les facteurs climatiques déterminants étant l'insolation, les cycles période sèche/période humide, les différences de température, l'action du gel et l'expansion des minéraux argileux. La pénétration de racines et la cristallisation de sels (sulfates issus du lessivage de sulfures) peuvent également influencer ce processus. L'altération physique tend à réduire la taille du grain ce qui peut conduire à la formation d'un niveau de granulométrie très fine plus ou moins imperméable.

Un matériau originel fin : Les matériaux de la fosse étant très hétérogènes, des couches de particules fines ont pu être disposées sur les terrils puis recouvertes par des stériles grossiers et ainsi former des couches de fines imperméables en profondeur. Cette hypothèse semble toutefois controversée par le fait que les stériles remontés subissaient un pré-tri granulométrique avant d'être mis à terril : les fines (< 0.5 mm) étaient dirigées vers les bassins de décantation tandis que les matériaux plus grossiers étaient disposés en terril. Une autre hypothèse pour expliquer l'existence de ces barrières de perméabilité est l'épandage sur le terril des particules issues du curage des bassins de décantation. Mais aucune trace de ce type de pratique n'a pu être mise en évidence par l'étude historique du site.

### **3.3 - Panneaux électriques et cartographie électromagnétique**

#### **3.3.1 - Panneaux électriques**

La technique des panneaux électriques a été initialement utilisée afin d'une part de tenter de déterminer si les eaux météoriques pouvaient pénétrer en profondeur dans le terril et d'autre part, de voir si les barrières de perméabilité mises en évidence par les essais Permeafor pouvaient être reconnues à l'aide des panneaux électriques ce qui pourrait permettre d'estimer leur extension latérale.

Utilité de la méthode électrique dans la détection de panaches d'eaux minéralisées : Des études ont montré l'intérêt de ce type de méthode pour cartographier les mouvements d'eaux salées dans divers environnements (Aristodemou et Betts, 2000 ; Yaramanci, 2000 ; Berger *et al.*, 2001 ; Guerin *et al.*,



2001). L'inversion des données de résistivité apparente permet en effet d'attribuer une valeur de résistivité à une profondeur, les panneaux électriques peuvent donc en théorie, permettre de déterminer à quelle profondeur se trouvent les eaux météoriques si celles-ci parviennent à s'infiltrer. Cette méthode semble d'autant plus adaptée dans cette étude que, si les eaux météoriques s'infiltrent, elles peuvent vraisemblablement se charger en sulfates issus de l'oxydation de la pyrite comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent et ainsi encore accentuer la réponse obtenue, en provoquant une diminution importante de la résistivité sur les profils aux endroits où des eaux très minéralisées sont présentes. En effet, comme le soulignent Berger *et al.* (2001), la conductivité électrique et donc la résistivité du sol dépendent surtout de la saturation en eau et de la conductivité électrolytique de l'eau contenue dans les pores.

Utilité de la méthode électrique dans la détection des barrières de perméabilité : comme nous l'avons vu, le fait que les sols argileux montrent des résistivités plus basses que celles des sols sableux nous laissait espérer une possible détermination de l'extension des barrières de perméabilité, dans le cas où celles-ci présentent une teneur en fine plus importante que les terrains adjacents (comme c'était le cas pour OIG2-1m).

Les terrils sont principalement constitués de schistes et contiennent une faible part de grès. La littérature permet de définir une gamme de résistivité pour ces constituants, ainsi, les schistes présentent des résistivités comprises entre 40 et 250 ohm.m, tandis que les grès se situent entre 500 et 10000 ohm.m.

L'interprétation des panneaux électriques réalisés sur le site 2 n'est pas simple car dans cet environnement particulier que sont les terrils, la présence d'eau minéralisée ou d'argile ne sont pas les seules causes pouvant expliquer les variations de résistivité observées. En effet, les variations de résistivité visibles sur les profils peuvent avoir d'autres origines telles que des variations de saturation en eau, des variations de porosité, des variations de température, ou encore des variations dans la quantité de charbon résiduel contenu mais également la présence sur le site de déchets tels que bandes de convoyage ou morceaux de métaux.

Comme nous l'avons vu, quatre classes de résistivité peuvent être distinguées sur les panneaux électriques réalisés pour le site étudié : les zones de résistivité basse (<10 ohm.m), représentées en bleu sur les profils ; les zones de résistivité moyenne (10-50 ohm.m), dessinées en vert ; les zones de forte résistivité (50-150 ohm.m), données en jaune sur les panneaux et les zones de résistivité très élevée

(> 150 ohm.m) représentées par des couleurs orange, rouge et marron de résistivité croissante.

On constate que l'ensemble des profils est caractérisé par des résistivités moyennes à fortes allant de 10 à 150 ohm.m qui correspondent bien aux valeurs caractéristiques des schistes. On remarque

cependant sur certains des profils des anomalies soit de faible résistivité (en bleu), soit de très forte résistivité (orange, rouge et marron). Nous allons, dans la suite du paragraphe, avancer des hypothèses pour expliquer les anomalies de résistivité visibles sur les profils et nous nous attarderons sur les variations de résistivité visibles sur les profils A, B et C de la deuxième prospection.

Zones de faible résistivité (Zones bleues) : ces zones visibles sur les profils 1, 3, 4, 5, 7, 12, 13, 14 et 16 sont presque toujours situées entre 5 et 10 m de profondeur. Différentes hypothèses peuvent être avancées pour expliquer leur présence :

- La présence de poches d'eaux minéralisées, ces eaux peuvent en effet présenter une conductivité élevée puisqu'il a été reconnu dans les prélèvements d'eau effectués dans les mares temporaires du site 2 des concentrations en sulfate atteignant  $1400 \text{ mg.l}^{-1}$ . Il n'est pas possible à l'heure actuelle d'exclure définitivement cette hypothèse, puisque même si le terril apparaît globalement très peu perméable, il reste constitué d'un matériau très hétérogène et il n'est pas exclu que des poches d'eau de faible extension aient pu se former en profondeur par infiltration dans une zone de matériau de granulométrie importante.

- La présence en profondeur de matériau plus riche en argile : cette hypothèse irait dans le sens des constatations faites par ailleurs, avec notamment les résultats des essais Permeafor réalisés. Nous verrons par la suite s'il est possible de corréler ces zones de faible résistivité aux barrières de perméabilité visibles sur les essais Permeafor.

- Une augmentation de température liée à une concentration importante en charbon résiduel et pyrite pourrait expliquer ces anomalies. En effet, le phénomène d'augmentation de température avec la profondeur est bien connu dans certains terrils, mais on s'attend plutôt à avoir une augmentation relativement régulière de la température avec la profondeur ; en effet, les techniques de séparation schiste-charbon ayant évolué au cours du temps, en théorie, plus on s'enfonce dans le terril, et donc plus les matériaux sont anciens, plus ils sont susceptibles de contenir de teneur importante en charbon résiduel. Cependant, il n'est pas exclu que des zones de taille plus restreinte renferment d'importantes concentrations en pyrite et charbon résiduel qui pourraient expliquer ces anomalies.

- La présence de déchets métalliques ne semble pas être l'hypothèse la plus favorable en raison de l'extension des poches de faible résistivité (supérieure au mètre).

Zones de fortes résistivités (orange, rouge et marron) : ces anomalies sont présentes sur tous les profils de la zone 1, les profils 6 (petites anomalies en surface, l'anomalie située à la base d'un profil étant

plutôt à relier à un effet de bord), 7, 9, 10, 11, 12, 13 et 16. Ce type d'anomalie visible également sur les profils A, B et C de la deuxième prospection seront discutées à la suite de ce paragraphe.

Une fois encore plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces anomalies :

- L'existence de zones plus riches en grès, dont la résistivité est beaucoup plus élevée que celle des schistes. Cette hypothèse est plausible étant donnée l'hétérogénéité du site.

- La présence de zones très sèches en comparaison des zones adjacentes : cette hypothèse fonctionnerait assez bien avec l'existence de poches de grès, en effet, ces roches de compétence nettement supérieure à celle des schistes peuvent ménager entre les blocs une porosité importante qui peut rester sèche si les matériaux alentours sont imperméables comme nous le montrent les essais Permeafor.

- On trouve sur le site 2 de nombreuses bandes de convoyage faites de caoutchouc, dont le comportement isolant pourrait provoquer le même type d'anomalies, cependant l'extension de ces anomalies rend cette hypothèse caduque : il semble en effet difficilement envisageable de trouver des accumulations de plus de 5 à 10 m d'épaisseur de ce type de déchets en profondeur.

Les profils A, B et C, qu'ils aient été réalisés en wenner  $\alpha$  ou en wenner  $\beta$ , présentent un contraste de résistivité relativement homogène, sur chaque profil et entre chacun des profils, qui mérite d'être souligné : on constate ainsi comme nous l'avons dit plus haut un gradient avec, pour les profils A et B des valeurs de résistivité moyennes à la base qui passent vers la surface à des résistivités élevées à très élevées, il est important de s'intéresser à ce gradient même si ces profils montrent des valeurs de résistivité qui restent dans la gamme des schistes. Le profil C présente le même schéma avec toutefois une augmentation globale des valeurs de résistivité constatées : on passe ainsi en profondeur de résistivités élevées, là où sur les profils A et B, on constatait des résistivités moyennes, à des résistivités très élevées, là où sur les deux autres profils les résistivités élevées dominaient.

Ici encore, plusieurs hypothèses peuvent être invoquées pour expliquer l'existence de ce gradient :

- La présence de roches plus sèches en surface qu'en profondeur. Cette hypothèse est controversée par le fait que les essais Permeafor montrent que le terrain est un environnement globalement très peu perméable et qu'il existe de nombreuses barrières de perméabilité en profondeur. Il semblerait donc logique d'avoir le schéma inverse à savoir, une infiltration d'eau en surface limitée en profondeur par des zones imperméables, donc des résistivités plus faibles en surface qu'en profondeur. De plus, l'observation sur le terrain n'a pas permis de mettre en évidence la présence de sources d'eau sur les flancs du terrain, sources qui permettraient l'évacuation de l'eau présente en

profondeur. Si l'eau pénètre dans le terril c'est donc vraisemblablement en petites quantités et il semble difficile à imaginer que les zones de faible résistivité (en vert) visibles sur les profils A, B et C constituent une sorte d'aquifère d'extension assez importante. Les valeurs de 20 à 50 ohm.m rencontrées à ces niveaux apparaissent de plus relativement élevées pour des eaux qui en toute logique devraient être minéralisées.

- Présence de quantités plus importantes de matériau fin, type argile en profondeur, la littérature donne en effet comme résistivité caractéristique des argiles des valeurs situées entre 1 et 100 ohm.m : le gradient visible sur les profils semble cependant trop homogène pour que cette hypothèse ne soit retenue. Il faut en effet rappeler qu'au moment de l'exploitation, les fines étaient séparées des matériaux grossiers mis à terril. Ainsi, les fines présentes sur le site sont *a priori* issues des phénomènes d'altération climatiques et leur quantité devrait être réellement très importante pour provoquer ces changements de résistivité.

- Présence de teneurs plus importantes en charbon résiduel en profondeur qu'en surface, en effet, le charbon est un élément conducteur et la présence de charbon résiduel peut donc entraîner une diminution de la résistivité. Si tel est le cas, les zones de forte et très forte résistivité représentées en jaune, orange et rouge sur les profils A, B et C pourraient correspondre soit au gradient « normal » issus des variations de méthodes de triage au cours du temps soit, et ce qui est le plus logique au vu du fait que le terril étudié est un terril de lavoir, aux couches de terrains ayant subi ou subissant encore le lessivage par les eaux météoriques, couches contenant à l'heure actuelle moins de charbon résiduel que les couches situées en profondeur. Cette hypothèse serait en accord avec la diminution d'activité  $^{14}\text{C}$  visible à l'aval du site (cf chapitre 3) interprétée comme un départ de carbone isotopiquement mort, comme c'est le cas pour le charbon résiduel d'âge carbonifère et également avec le fait que les croûtes de battance (niveau imperméable formé par l'impact des gouttes de pluie) qui peuvent exister sur le plateau peuvent difficilement se former quand la pente est forte, ce qui laisse les pores ouverts à l'infiltration et ce qui pourrait expliquer les variations de résistivité constatées entre le plateau et le flanc du terril.

Il faut toutefois noter que les analyses de teneurs en carbone faites sur les échantillons prélevés sur la coupe de 12 m sur le site 2 montrent que les teneurs des échantillons de surface sont plus faibles qu'en profondeur mais ces analyses ne montrent pas de gradient continu sur l'ensemble de la coupe ce qui nous a laissé supposer que le lessivage intéressait uniquement la surface du terril. Ce constat rend donc très peu probable une infiltration des eaux et un départ de carbone dans la dizaine de mètres supérieurs du terril.

- Augmentation de température avec la profondeur : la résistivité diminue en effet de 2 % lorsque la température augmente de 1°C. Cet effet va de pair avec la présence éventuelle de plus grandes quantités de charbon résiduel et de pyrite en profondeur.

- Variations de porosité : dans le cas d'une porosité sèche, plus la porosité est importante, plus les terrains sont résistants et plus la porosité est faible, plus les terrains sont conducteurs et donc de faible résistivité. Si il y a présence d'eau, plus la porosité est importante et plus il y a d'eau, plus les terrains sont conducteurs donc peu résistants et plus la porosité est faible moins il y a d'eau et donc plus les terrains sont résistants. Dans ce cas, partant de l'hypothèse qu'il n'existe pas d'eau en profondeur (cette hypothèse étant étayée par la faible perméabilité du terril et la probable existence d'un gradient thermique), l'évolution constatée pourrait être due à une diminution en profondeur de la porosité que l'on pourrait attribuer au tassement du matériau mis à terril.

- La présence de déchets type plaques métalliques, excellents conducteurs et donc de faible résistivité, dispersés çà et là sur le site peuvent constituer des « artéfacts » mais il faut garder à l'esprit que ces objets ne présentent pas un volume très important et qu'il n'est pas possible d'invoquer leur présence pour expliquer les variations visibles sur les profils A, B et C.

La difficulté de l'interprétation des panneaux électriques réside dans le fait que des causes différentes peuvent entraîner le même type de variation de résistivité : ainsi, une teneur importante en argile ou en charbon résiduel de même qu'une saturation en eau plus importante causent une augmentation de conductivité et donc une diminution de résistivité. Bien entendu, la porosité joue également un rôle important, ainsi, une porosité moins importante peut entraîner une teneur en fluides moins importante et donc une augmentation de la résistivité globale (Aristodemou et Betts, 2000).

Essais de corrélation entre panneaux électriques et essais Permeafor : Des panneaux électriques ont été réalisés à proximité des essais Permeafor (profils 13, 14, 15, 16 et profils A, B) dans le but de tenter de les repérer sur les panneaux et avoir ainsi une idée de leur extension en profondeur. Les figures 4.37 et 4.38 correspondent aux panneaux électriques sur lesquels ont été reportés les niveaux imperméables visibles sur les essais Permeafor. Au regard de ces figures, il ne paraît pas possible d'attribuer une résistivité ou une gamme de valeurs de résistivité aux barrières de perméabilité mises en évidence grâce aux essais Permeafor. Ceci est soit dû au fait que ces barrières sont dues à un agencement particulier des particules et non à une teneur plus importante en fines mais également sûrement en partie dû à la résolution des panneaux électriques, en effet, la modélisation est réalisée pour ces profils autour de points distribués en profondeur tous les 0,8 à 1 m au sommet (jusque 3-4 m) pour les profils de la première prospection et tous les mètres (jusqu'à 10 m) pour les panneaux de la deuxième prospection. La résolution, en raison de l'écart croissant entre les points, diminue encore avec la profondeur sur l'ensemble des profils.

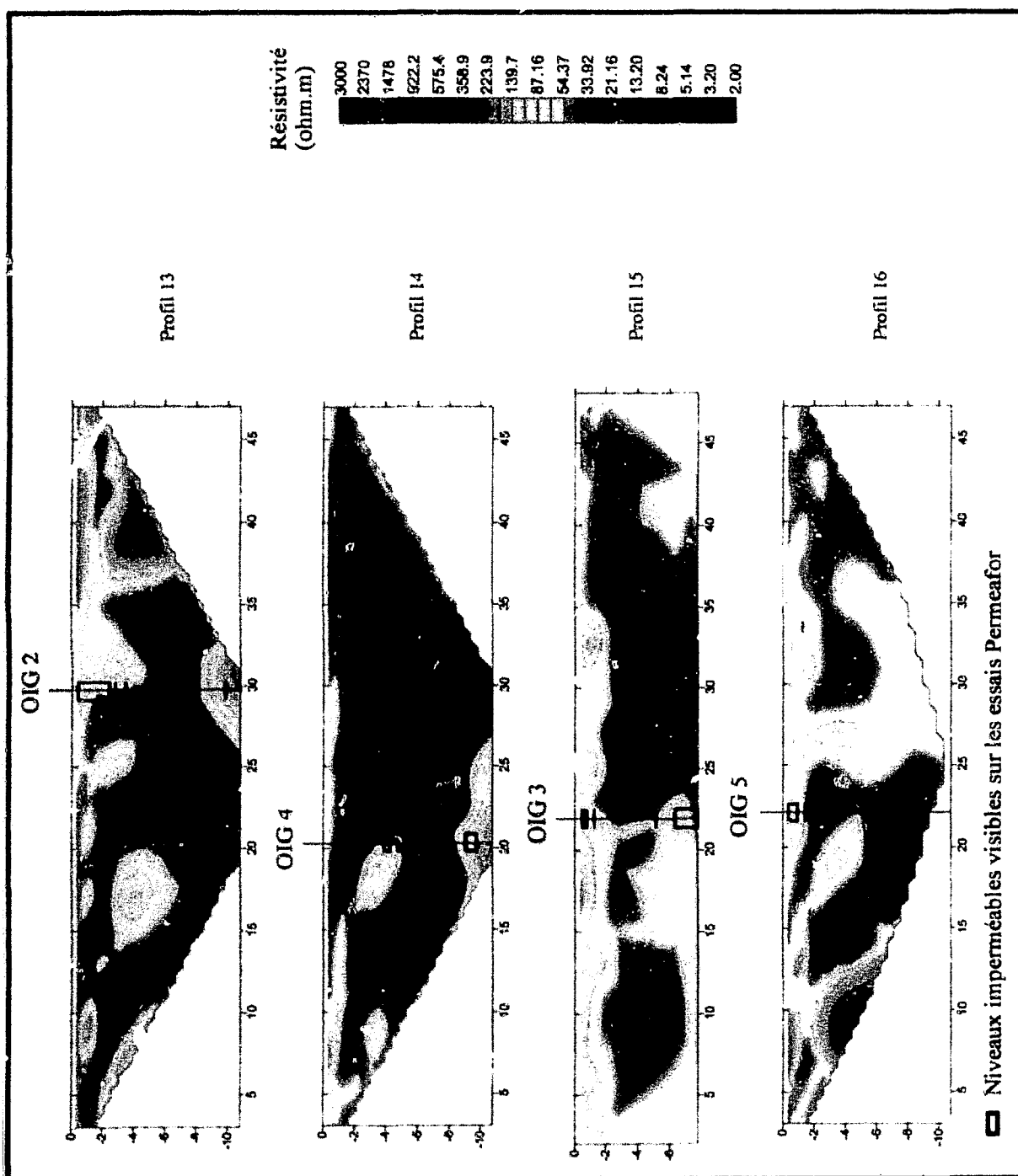
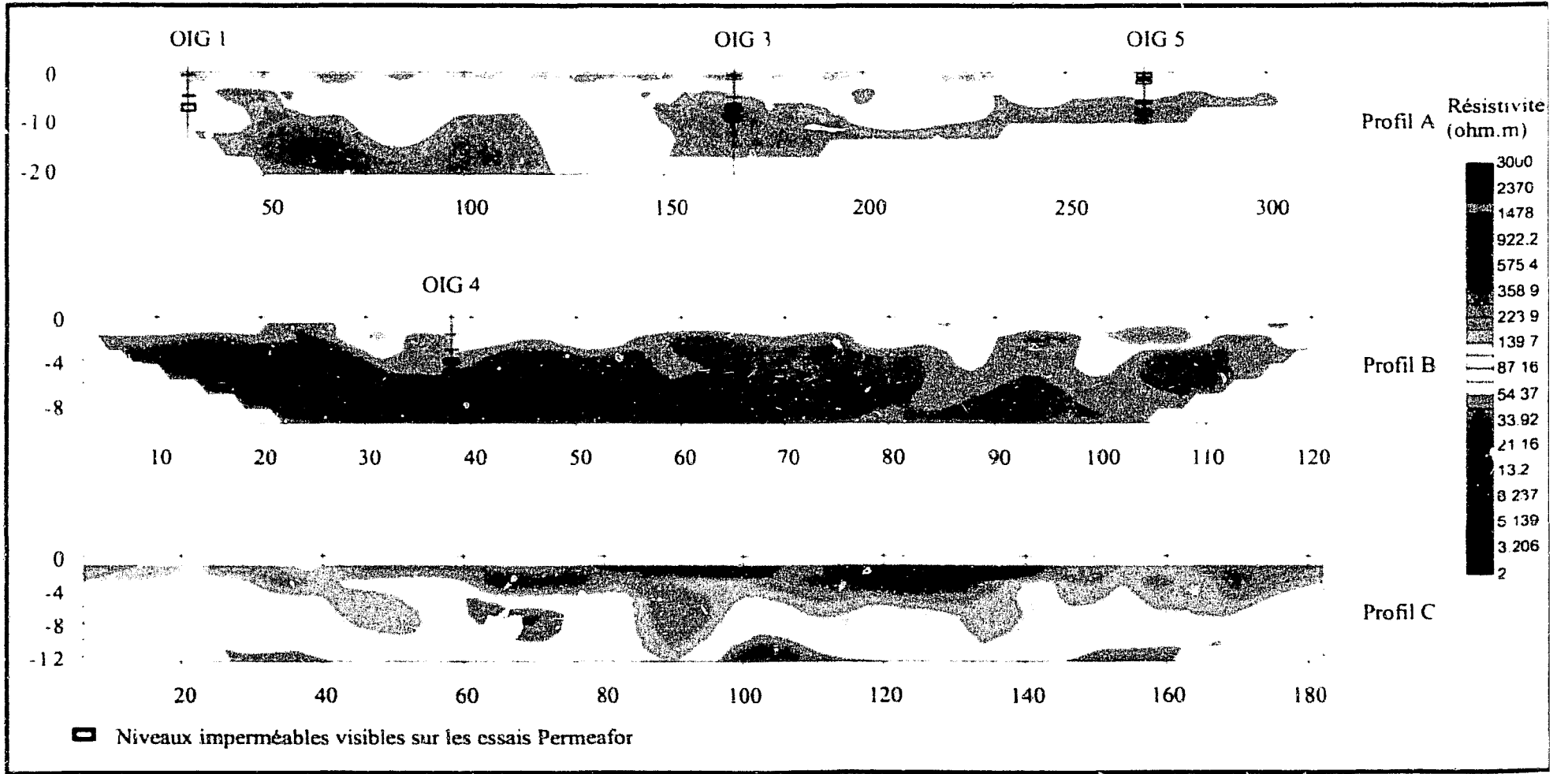


Fig. 4.37 : Panneaux électriques de la première prospection, réalisés à proximité des essais Permeafor, sur lesquels sont reportés les niveaux imperméables

Fig. 4 38 Panneaux électriques de la deuxième prospection Wenner α) sur lesquels sont reportés les niveaux imperméables visibles sur les essais Permeafor



### 3.3.2 - Cartographie électromagnétique

Nous avons pu observer que les conductivités apparentes mesurées sur le flanc du terril étaient plus basses que celles du centre du plateau. Cette constatation suit les observations faites sur les panneaux électriques puisque nous y avons observé que les résistivités étaient plus élevées sur le profil pris sur le flanc que sur les profils A et B du plateau. La carte réalisée nous permet de voir que la zone étudiée sur le flanc ainsi que certaines zones situées sur le pourtour du plateau montrent une gamme de conductivité apparente différente et donc un comportement différent de celui de la zone centrale du plateau. Ce comportement différent est à relier aux hypothèses faites pour expliquer les différences de même type visibles entre les profils A, B d'une part et le profil C d'autre part.

## **4 - Conclusion**

Nous avons tenté d'approcher dans ce chapitre le comportement des eaux météoriques sur l'un des sites étudiés.

Les eaux météoriques ont éventuellement pu s'infiltrer au cours de l'édification du terril, à un moment où les stériles ne présentaient pas la même compaction qu'actuellement. Si l'on en croit Hawkins (1998), cette compaction a pu se faire dans un délai relativement rapide après les mises à terril. Certains arguments, et notamment le caractère très peu perméable à imperméable des stériles, mis en évidence grâce aux essais Permeafon, nous font penser que les eaux météoriques ne peuvent vraisemblablement pas ou plus s'infiltrer de manière importante dans le terril. Il n'est toutefois pas exclu qu'il subsiste encore des chemins de percolation de taille restreinte, se formant à la faveur de zones constituées de matériau plus grossier et plus compétent. Dans ce cas, si les zones alentour présentent un comportement très peu perméable à imperméable (ce qui a été le cas pour les différentes zones testées sur le site), l'eau éventuellement présente en profondeur ne pourra pas ressortir sans difficulté. Ce type d'infiltrations, si elles existent peuvent poser problème si elles se font à proximité des flancs du terril, en effet, leur moindre stabilité et l'impossibilité d'y former des croûtes de battance peut y laisser la porosité ouverte et donc permettre le départ des eaux minéralisées vers l'extérieur du terril. Toutefois, de telles « résurgences » n'ont pas été identifiées sur le site. Tout au plus peut-on évoquer des suintements sans grande amplitude qui sont visualisés de-ci de-là sur le site par la présence d'efflorescences blanchâtre-sulfatées.

Il faut de plus noter qu'il existe *a priori* un gradient thermique, qui doit restreindre voire empêcher l'enfoncement d'eau liquide au delà d'une certaine profondeur.

D'autres prospections électriques réalisées aux mêmes endroits à différentes périodes pourraient permettre de distinguer quelles sont les anomalies dues aux paramètres « invariables » liés essentiellement à la lithologie : présence d'argile, de grès, de charbon ... qui ne varient pas dans le



temps, et quelles sont les anomalies dues aux paramètres « variables » comme par exemple l'infiltration d'eau. La réalisation de ces panneaux électriques pourrait ainsi permettre un suivi des panaches d'eaux minéralisées s'ils existent en profondeur.

Pour conclure, l'état actuel du terri, tel qu'il est observé dans cette étude, permet de dire que les eaux météoriques ne peuvent pas s'infiltrer massivement dans l'édifice. Tout au plus peut-on évoquer des infiltrations localisées mais il n'existe pas d'observations univoques soutenant cette hypothèse. Les résultats présentés ici font penser que seule la partie extérieure de l'édifice est au contact répété des eaux météoriques. Ceci retentit bien évidemment sur la quantité de matériau lessivable par percolation et donc sur la quantité de sulfate potentiellement exportable.

**CHAPITRE V :**  
**SYNTHESE ET CONCLUSION :**  
**LES TERRILS DU BASSIN MINIER NORD-PAS-DE-**  
**CALAIS, LE CAS D'UN DRAINAGE ACIDE MINIER**  
**NEUTRALISE**



Cette étude a été réalisée dans le but d'évaluer l'impact potentiel des terrils du bassin minier Nord-Pas-de-Calais sur la qualité de la nappe de la Craie et s'est articulée suivant deux volets principaux : le premier correspond à une étude hydro-chimique de la minéralisation de la nappe de la Craie. Il a été choisi de baser cette réflexion sur le comportement des sulfates, très solubles, et qui peuvent être les témoins privilégiés de l'éventuelle existence d'un drainage acide minier dû à l'oxydation de la pyrite contenue dans les schistes houillers et pouvant entraîner une acidification du milieu conduisant à une éventuelle libération de métaux. Nous nous sommes attachés dans le deuxième volet à déterminer l'existence ou l'absence ainsi que les modalités d'une infiltration des eaux météoriques au sein des terrils. Pour réaliser cette étude, deux sites ont été choisis en collaboration avec Charbonnage de France en raison d'une part de leur bon équipement piézométrique permettant un échantillonnage des eaux de la nappe de la Craie en amont et en aval des terrils, et d'autre part de leurs contextes géologique et hydrogéologique différents puisque le site 1 est en domaine de nappe libre et le site 2 en domaine de nappe semi-captive puisqu'il est séparé de la craie Seno-Turonienne par les formations d'âge tertiaire (Argiles de Louvil et Sables d'Ostricourt).

## **1 - Mise en évidence de l'existence d'un drainage acide minier limité sur les sites étudiés (Fig. 5.1)**

Comme nous avons pu le constater dans le chapitre III, le drainage acide minier, bien que limité sur les sites étudiés est prouvé :

### **1.1 – Le lessivage du soufre en surface des terrils**

L'analyse des teneurs en soufre total des échantillons prélevés sur les terrils des deux sites montre que les échantillons de surface sont appauvris par rapport aux échantillons prélevés en profondeur. Ceci témoigne d'un lessivage de cet élément en subsurface des terrils étudiés. Il a également été possible de montrer un lessivage du carbone, concomitant de celui du soufre sur les deux sites.

### **1.2 - Mise en évidence d'un panache sulfaté à l'aval des sites**

Les prélèvements effectués dans les mares temporaires présentent sur les sites et formées par l'accumulation des eaux de ruissellement, ont montré une concentration en sulfate élevée (1400 mg.l<sup>-1</sup>). Ces teneurs importantes sont attribuées au fait que les eaux météoriques, au contact des stériles houillers entassés, se chargent en sulfate issu de l'oxydation de la pyrite contenue dans les schistes. Les piézomètres situés en amont et en aval des sites ont permis un échantillonnage des eaux de la nappe de la Craie et une confirmation de l'impact des terrils sur sa minéralisation : nous avons en

effet pu observer une augmentation significative des concentrations en sulfate mesurées entre l'amont et l'aval des sites. Le site 1 a notamment montré des concentrations en sulfate de l'ordre de 700 mg.l<sup>-1</sup> en aval (le piézomètre SHS3 (Fig. 3.17) est exclu de cette constatation car il s'agit d'un piézomètre creusé dans un bassin à cendres baigné par les eaux de la nappe de la Craie ce qui explique la concentration en sulfates de 1500 mg.l<sup>-1</sup> mesurée).

### **1.3 – Confirmation du rôle joué par les terrils dans la minéralisation sulfatée de la nappe de la Craie**

L'oxydation de la pyrite contenue dans les schistes houillers des terrils ne constitue pas la seule source de sulfates dans le bassin minier Nord-Pas-de-Calais, on peut différencier d'autres sources potentielles (Bernard, 1979 ; Droz, 1985) : (i) la dissolution des minéraux évaporitiques présents dans les Calcaires carbonifères et pouvant contaminer localement *per ascensum* la nappe de la Craie ; (ii) la mise en solution du gypse contenu dans les couches tertiaires (Argiles de Louvil et Sables d'Ostricourt) ; (iii) les sulfates d'origine anthropique liés aux rejets d'eaux usées et/ou aux pratiques agricoles.

La géochimie isotopique et notamment l'utilisation des isotopes stables du soufre, marqueurs classiques des sources de sulfates, a été utilisée dans le but d'une part, de vérifier l'existence d'un apport de sulfates par les terrils vers la nappe de la Craie et d'autre part, de déterminer l'éventuelle existence d'une autre source sur les sites étudiés. Ainsi, cette étude a permis de montrer que les concentrations en sulfates présentes dans la nappe de la Craie à l'aval des sites étaient, au moins en partie, attribuables à l'oxydation de la pyrite contenue dans les schistes houillers formant les terrils. Des valeurs faiblement négatives ont ainsi été reconnues, notamment à l'aval du site 1 et sont caractéristiques d'une oxydation de la pyrite contenue dans les schistes houillers. Une autre source correspondant au gypse contenu dans les Sables d'Ostricourt a également été mise en évidence sur le site 2 grâce à la signature isotopique caractéristique de ces niveaux ( $\delta^{34}\text{S} = -20 \text{ ‰}$ ) reconnue dans les eaux prélevées dans l'un des piézomètres

### **1.4 – Les stériles houillers étudiés sont une source potentielle d'acidification**

Le potentiel net de neutralisation des stériles houillers mis à terril et des résidus de bassin de décantation, c'est-à-dire la différence entre leur potentiel de neutralisation et leur potentiel d'acidification s'est révélé négatif dans de nombreux cas, ce qui signifie que les stériles entassés sur les sites 1 et 2 sont potentiellement générateurs d'acide.

### **1.5 – Présence de minéraux secondaires typiques des cas de drainage acide minier sur les deux sites.**

Nous avons pu observer à de nombreuses reprises au cours des différents échantillonnages sur les deux sites, la présence en profondeur de taches de couleur jaune ocre de taille restreinte (le plus souvent centimétrique), présentant parfois une forme noduleuse ou une forme pulvérulente, sorte de couronne d'altération autour de grains de pyrite. Les analyses par diffraction des rayons X et les analyses au MEB-EDS ont montré qu'il s'agissait de jarosite et de natrojarosite qui sont tous deux des minéraux secondaires caractéristiques d'une oxydation de sulfure et qui sont bien connus pour être présents dans les cas de drainage acide minier.

Les terrils étudiés dans ce mémoire peuvent donc vraisemblablement être à l'origine d'un drainage acide minier limité par différents facteurs comme nous allons le voir dans la suite de cette partie.

## **2 - Limitations du drainage acide issu des sites étudiés**

Comme nous venons de le voir, le drainage acide minier résultant de l'oxydation de la pyrite contenue dans les schistes houillers des deux terrils étudiés est avéré mais ses conséquences sont très limitées puisque les seuls témoins de cet AMD sont d'une part la présence d'un lessivage superficiel du soufre sur les terrils, ceci est combiné à la fois aux concentrations élevées en sulfates des eaux prélevées dans les mares temporaires et des eaux souterraines situées à l'aval des terrils, et d'autre part, la présence au sein des terrils de minéraux secondaires tels que la jarosite, la natrojarosite ou encore la ferrihydrite, qui, même s'ils sont présents en petite quantité, témoignent tout de même d'une oxydation des sulfures et donc de la possibilité d'un drainage acide minier.

Face au volume conséquent des terrils étudiés (2,8 millions de m<sup>3</sup> pour le site 1 et 15 millions de m<sup>3</sup> pour le site 2), une question essentielle se pose : pourquoi ce drainage acide minier n'est-il pas plus « sévère » ?

Une combinaison de phénomènes mis en évidence grâce au travail réalisé permet de répondre, au moins en partie, à cette interrogation :

### **2.1 – La faible teneur en soufre des stériles mis à terril**

La teneur en soufre des échantillons prélevés sur les terrils est relativement faible. La concentration moyenne en soufre total des stériles du site 1 est de 0,2 %, de 0,3 % pour le site 2 et de 0,5 % pour les

résidus de bassin de décantation du même site. Or, plus la quantité de pyrite présente dans les stériles est importante et plus le drainage acide minier généré est important. Cependant, si le volume total des terrils était concerné par les phénomènes d'oxydation de la pyrite, la quantité de matériau étant considérable, l'impact de ces édifices, notamment sur la qualité des eaux serait loin d'être négligeable. Comme nous l'avons vu, il existe bien un lessivage du soufre sur les terrils étudiés mais ce lessivage ne semble concerner que la subsurface : les analyses réalisées sur les stériles montrent en effet un départ de soufre dans les premiers centimètres sur les terrils mais ce lessivage n'a pas été mis en évidence pour les échantillons prélevés dans le bassin de décantation C du site 2. Il ne semble pas exister de phénomène de lessivage dans ces bassins qui représentent pourtant en théorie, un risque conséquent en raison de leur teneur moyenne en soufre total plus élevée que celle des stériles mis à terri mais également en raison de la taille des particules entreposées : leur caractère fin permet en théorie une plus grande surface de contact avec l'air et l'eau et donc une optimisation des processus d'oxydation.

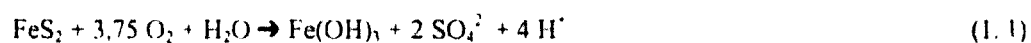
La faible teneur en pyrite reconnue globalement dans les schistes houillers étudiés ne doit pas masquer le fait qu'il s'agit de matériau hétérogène et qu'il peut exister par endroit ce que l'on nomme des micro-environnements, plus riches en pyrite et dont l'oxydation peut entraîner une acidification du milieu.

## 2.2 – L'absence de lessivage des métaux

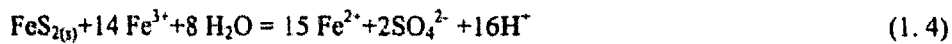
Les analyses d'éléments majeurs et d'éléments traces réalisés sur les solides prélevés sur les deux sites n'ont montré aucun lessivage de métaux, à la fois pour les échantillons profonds (jusque 2,5 m pour le site 1, 12 m pour le site 2) comme pour les échantillons prélevés à haute résolution dans le premier mètre sur les deux terrils. Aucun lessivage de ces éléments n'a pu être mis en évidence dans le bassin de décantation C du site 2. Il n'a également été reconnu aucun panache de forte concentration en métaux lourds à l'aval des sites.

Les résultats des tests de lixiviation réalisés de pH basique à pH acide sur les deux types d'échantillons (stériles mis à terri et résidus de bassin de décantation) prélevés sur le site 2 ont de plus confirmé que la plupart des métaux présents étaient solubles à pH bas voire très bas ( $\text{pH} < 2$ ) et que les quantités relâchées pour ces valeurs de pH étaient relativement faibles. Or comme nous venons de le rappeler dans le paragraphe précédent, il n'existe pas d'acidification « massive » des terrils puisque le lessivage du soufre ne se fait qu'en surface.

L'oxydation de la pyrite se fait suivant la réaction exothermique suivante :



qui peut être divisée en plusieurs réactions :



On reconnaît donc deux agents oxydants : l'oxygène et le  $\text{Fe}^{3+}$ . Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, Kleinmann *et al.* (1981) et Nordstrom (1982) déterminent trois étapes dans la production d'AMD :

- 1- à pH proche de la neutralité ou faiblement acide, il y a oxydation par la réaction (1.2),
- 2- à pH situé entre 4 et 5 l'oxydation se fait par une combinaison des réactions (1.2) et (1.4),
- 3- à pH inférieur à 3, la concentration en  $\text{Fe}^{3+}$  est suffisante pour que la réaction (1.4) domine et donc qu'il y ait plus d'acide généré (16  $\text{H}^+$  dans la réaction 1.4 contre 2  $\text{H}^+$  dans la réaction 1.2).

Les analyses isotopiques de l' $^{18}\text{O}$  des sulfates présents dans la nappe de la Craie à l'aval des sites a permis de montrer que l'oxydation de la pyrite par la réaction (1.2) dominait nettement celle qui était due à la réaction (1.4). Il apparaît donc que la concentration en  $\text{Fe}^{3+}$  du système n'est pas suffisante pour que la réaction (1.4) devienne le principal mécanisme de production acide. Au vu des résultats obtenus dans l'analyse de l' $^{18}\text{O}$  des sulfates, il semble que le processus d'oxydation actuel corresponde à un stade intermédiaire entre les étapes 1 et 2. Dans ce cas, la production acide est relativement lente, de plus, le pH n'atteint pas de valeurs extrêmement basses (il est de toute façon supérieur à 4), ce qui permet également d'expliquer pourquoi les métaux ne peuvent pas être solubilisés.

### 2.3 - L'apport d'oxygène et l'infiltration des eaux

L'apport d'oxygène atmosphérique est nécessaire soit à l'oxydation directe de la pyrite, soit à l'oxydation de  $\text{Fe}^{2+}$  en  $\text{Fe}^{3+}$  suivant la réaction (1.3). L'oxydation n'est donc possible que si l'oxygène peut pénétrer dans le terril. Ce transport se fait soit par diffusion, soit par advection (cf. chapitre 1) et ces deux modes sont liés notamment à la granulométrie des stériles mis à terril. Dans les sites étudiés, la taille des particules mais aussi leur nature (les stériles sont très majoritairement constitués de schistes relativement friables), leur agencement ainsi que le tassement qu'ils ont subi sous leur propre poids sont autant d'indices permettant de penser que le processus essentiel qui permettrait d'amener l'oxygène en profondeur est la diffusion. Dans ce cas, d'après Rose et Cravotta (1998), l'épaisseur de stériles concernée par l'oxydation est bien inférieure à celle pouvant être atteinte par advection, et demeure restreinte aux premiers mètres superficiels.



Dans les cas étudiés ici, l'épaisseur concernée par les processus d'oxydation de la pyrite ou de transport des produits d'oxydation est encore plus faible. Les méthodes géophysiques ainsi que les essais Permeafor réalisés sur le site 2 permettent d'expliquer ce phénomène.

#### **2.4 – La perméabilité des terrils**

Nous avons pu mettre en évidence l'existence, grâce à la réalisation d'essais Permeafor sur le site 2 que le terril était globalement très peu perméable et qu'il existait également en profondeur des niveaux imperméables d'épaisseur variable. Ce caractère très peu perméable des terrils est responsable du ralentissement, voire de l'absence d'infiltration des eaux météoriques en profondeur et les barrières de perméabilité soulignent l'impossibilité pour ces eaux, si elles parviennent à une certaine profondeur, de poursuivre leur chemin plus bas.

L'étude granulométrique des stériles prélevés aux points Permeafor réalisés met en évidence deux origines possibles pour ces barrières de perméabilité :

→ Les barrières présentant une quantité de fines importante peuvent être le résultat de l'altération mécanique entraînant une diminution de la taille des particules schisteuses avec le temps. Leur présence en profondeur peut résulter de deux processus principaux : soit une altération en surface suivie d'une migration des fines à un moment où le terril ne présentait pas le tassement actuel, ces fines bouchant à terme la porosité initiale et accentuant ainsi encore les effets du tassement sur l'infiltration, soit une création de ces barrières de perméabilité au moment du dépôt, toujours par une altération mécanique, ceci étant possible si les stériles sont restés suffisamment longtemps sous l'influence des agents météoriques pour qu'une diminution de la taille des grains puisse prendre place.

→ Les barrières qui ne présentent pas de teneur plus élevée en particules fines ont été attribuées à un agencement particulier des stériles, dans lequel une fois encore, le tassement doit jouer un rôle important, mais qu'il n'est pas possible de préciser à l'heure actuelle, sans la réalisation d'une étude de l'organisation de ces particules et de la porosité, étude de porosité qui s'avère extrêmement difficile dans ce type d'environnement non consolidé.

Les barrières de perméabilité mises en évidence ne sont bien sûr pas corrélables entre elles en raison du caractère granulométrique hétérogène et du mode de mise en place des schistes houillers. Cependant, il est important de constater que ces barrières ont été identifiées en grand nombre en chaque point testé sur le terril du site 2.

Il n'est toutefois pas possible d'exclure l'existence de petites infiltrations d'eaux météoriques dans le terril, notamment si des zones riches en matériau de compétence plus importante que les schistes existent : la présence de niveaux riches en grès pourrait ainsi permettre une meilleure infiltration des eaux de pluie en certains endroits. Cependant, étant donnée la prédominance du matériau schisteux sur les grès et la très faible perméabilité du terril, il est vraisemblable que le transfert de ces eaux vers

l'extérieur du système ne soit rendu très difficile. Il n'a d'ailleurs pas été observé sur le site de résurgence importante d'eau vers l'extérieur, ce qui confirme bien qu'une infiltration massive d'eau en profondeur est exclue pour le site étudié.

La présence en profondeur dans les terrils de minéraux secondaires (jarosite notamment) ne résulte pas, au vu du caractère très peu perméable de l'édifice, d'un processus d'oxydation actuel mais plutôt d'une oxydation ayant eu lieu soit au moment de l'exploitation (dans les galeries de mines, sur le front de taille), soit au moment du dépôt lorsque le terril n'avait pas encore atteint la compaction qu'il présente aujourd'hui et que l'eau et l'oxygène pouvaient pénétrer en profondeur.

Ces minéraux secondaires présentent de toute façon une extension limitée qui témoigne également du fait que les phénomènes de drainage acide sont extrêmement limités sur les sites étudiés.

## **2.5 – La neutralisation du drainage acide minier**

L'oxydation de la pyrite contenue dans les schistes houillers se fait en surface des terrils et permet l'exportation de sulfates mais aussi en toute logique d'eaux plus acides vers la nappe de la Craie. Cette dernière, de part sa nature carbonatée, permet de tamponner ces eaux, ce qui explique l'augmentation en calcium, magnésium, bicarbonate et strontium visible à l'aval des terrils.

Le fer issu de l'oxydation et pour lequel aucune augmentation de concentration n'est visible à l'aval des sites, peut être immobilisé soit *in situ* sous la forme de minéraux secondaires, soit précipiter une fois que la nappe de la Craie est atteinte, sous forme d'hydroxyde par exemple.

## **2.6 – Variations du contexte géologique et hydrogéologique entre les sites 1 et 2**

Les conséquences sur la qualité de l'eau du drainage minier sont différentes d'un site à l'autre en raison de leur contexte géologique et hydrogéologique : la présence en aval du site 2 des formations tertiaires et notamment des Argiles de Louvil qui rendent à cet endroit la nappe de la Craie semi-captive, permettent d'expliquer le caractère réducteur des eaux, reconnu à l'aval de ce site, et ce fait, combiné à la mise en évidence par la diminution de l'activité  $^{14}\text{C}$  mesurées dans les eaux de la nappe de la Craie entre l'amont et l'aval des terrils, d'un lessivage du carbone concomitant de celui du soufre sur les sites permet d'expliquer les concentrations plus basses en sulfate des eaux souterraines situées à l'aval du terril du site 2.

### 3 - Conclusions et perspectives

Les terrils étudiés ici exportent vers la nappe de la Craie des sulfates qui constituent le principal témoin d'un drainage acide minier neutralisé. Cette contribution des terrils à la minéralisation sulfatée a été confirmée par l'étude du  $\delta^{34}\text{S}$  des sulfates présents dans les eaux souterraines et qui en constitue un excellent marqueur.

Aucune trace de lessivage de métaux lourds n'a pu être mise en évidence sur les sites et parallèlement aucun panache riche en métaux n'a été détecté à l'aval des terrils.

Les schistes houillers entassés contiennent peu de pyrite et son oxydation se fait essentiellement dans la partie superficielle des terrils. Aucune trace d'oxydation de pyrite n'a pu être mise en évidence dans le bassin de décantation du site 2 étudié.

L'oxydation de la pyrite sur les terrils ne permet pas *a priori* d'atteindre des valeurs de pH très basses et dans ces conditions, les métaux présents ne peuvent pas être solubilisés. La réalisation d'essais de lixiviation en milieu basique et acide a d'autre part montré que même à pH bas, la quantité de métaux solubilisés était très faible.

L'un des principaux facteurs limitants du drainage acide minier sur le site 2 correspond à la faible perméabilité d'ensemble de l'édifice et à l'existence en profondeur de barrières de perméabilité qui limitent l'infiltration des eaux météoriques et l'oxydation de la pyrite en profondeur ainsi que le transport des produits d'oxydation éventuellement présents.

Cette étude apporte des réponses aux questions posées mais d'autres investigations pourraient permettre de les affiner :

- la réalisation d'un suivi des concentrations en sulfate des eaux de la nappe de la Craie à l'aval des sites pourrait permettre d'observer les variations saisonnières de cet élément. En effet, d'autres études ont montré qu'une pluviosité importante faisant suite à une période sèche entraînait une libération importante de sulfate tandis qu'une pluviosité mieux répartie dans le temps provoquait une libération graduelle des sulfates.
- la réalisation de panneaux électriques disposés aux mêmes endroits, à intervalles de temps réguliers pourrait permettre de distinguer quelles variations de résistivité sont dues à la lithologie et quelles sont celles qui sont éventuellement attribuables à une infiltration d'eaux minéralisées.
- la réalisation de mesures de teneur en oxygène en profondeur dans les terrils et les bassins de décantation pourrait également permettre de connaître quelle épaisseur exacte de stériles peut être concernée par les processus d'oxydation de la pyrite.
- la réalisation d'autres tests de lixiviation dits « statiques » et leur comparaison avec les calculs de potentiel net de neutralisation effectués dans cette étude pourrait apporter une confirmation du pouvoir

d'acidification des stériles étudiés. De même, la réalisation d'essais de lixiviation en colonnes, plus proches des réalités de terrain pourraient permettre d'aborder de manière fine la cinétique de libération des sulfates.

Cette étude de l'impact des terrils sur la qualité des eaux de la nappe de la Craie a été réalisée sur deux sites et ne peut pas, en conséquence, être généralisée à l'ensemble des terrils houillers du bassin minier Nord-Pas-de-Calais. En effet, d'autres terrils pourraient présenter une teneur en pyrite ou encore une granulométrie différentes et montrer une perméabilité plus importante permettant un apport d'oxygène et d'eau en profondeur, une oxydation de pyrite sur une épaisseur conséquente et donc un drainage acide minier plus sévère. Cependant, si les produits d'oxydation de la pyrite parvenaient dans ces zones à la nappe de la Craie, ce milieu tampon pourrait entraîner une neutralisation de l'acidité produite et une immobilisation des métaux lourds éventuellement présents.



**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**





## A

**Aglave, S. (2000).** Etude de la diagenèse précoce de dépôts miniers : les terrils. Mémoire de DEA, Université de Lille1. 51 p.

**Aljoe, W.W. et Hawkins, J.W. (1994).** Application of aquifer testing in surface and underground coal mines. *In: 5th International Mine Water Congress*, Nottingham, 3-21.

**Aristodemou, E. et Betts, A.T. (2000).** DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments. *J. Appl. Geophys.*, **44**, 275-302.

## B

**Bain, J.G., Blowes, D.W., Robertson, W.D. et Frind, E.O. (2000).** Modelling of sulfide oxidation with reactive transport at a mine drainage site. *Journal of Contaminant Hydrology*, **41**, 23-47.

**Beckelynick, J., Bosch, B. et Talbot, A. (1981).** Etude des possibilités d'exploitation d'eau chaude dans le hainaut, analyse du réservoir. 81SGN868NPC, BRGM.

**Bell, F.G. et Bullock, S.E.T. (1996).** The problem of acid mine drainage, with an illustrative case history. *Env. Eng. Geoscience*, **2**, 369-392.

**Berger, A.C., Bethke, C.M. et Krumhansl, J.L. (2000).** A process model of natural attenuation in drainage from a historic mining district. *Appl. Geochem.*, **15**, 655-666.

**Berger, W., Börner, F.D. et Petzold, H. (2001).** Consecutive geoelectric measurements reveal the downward movement of an oxidation zone. *Waste management*, **21**, 117-125.

**Bernard, D. (1979).** Contribution à l'étude hydrogéochimique de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Etat et acquisition du chimisme de l'eau. Thèse, Université de Lille1, 179 p.

**Bernard, D. (1998).** Les eaux souterraines dans le Bassin Minier du Nord Pas-de-Calais. *In: Colloque sur l'après charbon*, Lille.

**Bigham, J.M., Schwertmann, U., Traina, S.J., Winland, R.L. et Wolf, M. (1996).** Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 12, 2111-2121.

**Bouroz, A., Chalard, J., Dalinval, A. et Stievenard, M. (1962).** La structure du Bassin Houiller du nord de la région de Douai à la frontière belge. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXXXI**, 173-200.

**Bouroz, A., Chalard, J., Dalinval, A. et Stievenard, M. (1963).** Carte des zones stratigraphiques à la côte -300 du Bassin Houiller du Nord de la France. *Institut Géographique National Ed.*

**Bouroz, A. (1969).** Le carbonifère du nord de la France. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXXXIX**, 47-65.

**Bradley, J. et Herman, J.S. (1989).** Sulfate adsorption onto iron and aluminium hydroxides. *Eos*, **70**, 326.



**Brady, K.B.C. et Smith, M.W. (1990).** Pyritic sulfur analyses for coal overburden : differences between laboratories. *In: 1990 National Symposium on Mining*, University of Kentucky, Lexington, 53-58.

**Bullock, S.E.T., Bell, F.G. et Marsh, C.A. (1997).** The environmental impacts associated with a coal mine in the witbank coalfield, Republic of South Africa. *In: Engineering Geology and the Environment*, Athens, Greece, The Greek National Group of IAEG, 2327-2333.

## C

**Cammaer, C. (1998).** Coal mining and groundwater in Flanders (Belgium). *Aard. Meded.*, **9**, 83-96.

**Campbell, R.N., Lindsay, P. et Clemens, A.H. (2001).** Acid generating potential of waste rock and coal ash in New Zealand coal mines. *Int J. Coal Geol.*, **45**, 163-179.

**Carlier, S. (1989)** Remontées de la nappe de la craie dans le bassin minier Nord-Pas-de-Calais. Thèse, Université de Lille1, 339 p.

**Cathles, L.M. et Apps, J.A. (1975).** A model of the dump leaching processing that incorporates oxygen balance, heat balance, and convection. *Metallurgical Transactions*, **6B**, 617-624.

**Caulier, P. (1974)** Etude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. Thèse, Université de Lille1, 136 p.

**Celet, P., Bernard, D., Fievet, J. et Maillot, H. (1990).** Vulnérabilité de la nappe de la craie dans le Nord de la France *Ann. Soc. Géol. Nord.* **CIX**, 93-100.

**CETE-Nord (1998).** Plaquette de présentation de la méthode Radiomagnéto-tellurique.

**CETE-Est (2000)** Le Permeafor . Fiche technique.

**CETE-Est (2001).** Le Permeafor : guide technique - prescriptions techniques du besoin - principes d'interprétation - applications document provisoire, 20 p.

**Chalard, J. (1960).** Les Horizons à Gomatites du Namurien du Nord de la France. *In: IVème congrès pour l'avancement des études de stratigraphie et de géologie du Carbonifère*, Heerlen.

**Chapman, B.M., Jones, D.R. et Jung, R.F. (1983).** Processes controlling metal ion attenuation in acid mine drainage streams. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 1957-1973.

**Charlier, F., Jacquemin, C., Veschkens, M. et Goemare, E. (1998).** Contribution à l'étude de l'impact sur l'environnement des stériles charbonniers. Rapport n° 1998/2294/MV, Institut Scientifique de Service Public, 103 p.

**Chaudy, C. (1997).** Méthodologie de reconstitution 3D de la structure géologique du bassin minier Nord-Pas-de-Calais. DSR, Université de Lille1, 141 p.

**Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, M. et Zak, I. (1980).** The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chem. Geol.*, **28**, 199-260.

**COASTECH Research Inc (1989).** Investigation of prediction techniques for acid mine drainage. MEND Project 116.1a, Mine environment neutral drainage (MEND) program, 60 p.

**COASTECH Research Inc (1991).** Acid rock drainage prediction manual. MEND Project 1.16.1b, Mine environment neutral drainage (MEND) program.

**Coïbeaux, J.P., Dupuis, C., Robaszynski, F., Aufret, J.P., Haesaetr, P. et Somme, J. (1980).** Le détroit du Pas-de-Calais, un élément de la tectonique de blocs de l'Europe Nord-Occidentale. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 17, 4, 41-54.

**Coleman, M.L., Sheperd, T.J., Durham, J.J., Rouse, J.E. et Moore, G.R. (1982).** Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. *Anal. Chem.*, 54, 993-995.

**Cottez, S. et Dassonville, G. (1965).** Carte de la surface piézométrique de la nappe de la craie dans la région du Nord. BRGM, Service géologique régional du Nord et du Pas-de-Calais, Service d'hydrogéologie.

**Couteau, N. (1995).** Etude géologique et hydrogéologique d'une zone test dans le bassin minier Nord-Pas-de-Calais ; modélisation des écoulements. Mémoire de DEA, Université de Lille1, 73 p.

## D

**Dever, L. (1985).** Approches chimiques et isotopiques des interactions fluides - matrice en zone non saturée carbonatée. Thèse d'état, Université Paris-Sud, 181p.

**Doremus, C. (1978).** Les craies du nord de la France : corrélations entre la lithostratigraphie, la microstructure et les propriétés mécaniques. Thèse de 3ème cycle, Université de Lille1, 132 p.

**DRIRE (1988 à 1996).** La pollution atmosphérique dans la région Nord-Pas-de-Calais.

**Droz, B. (1985).** Influence de la structure et de la nature des terrains du Valenciennois sur la qualité de la nappe de la Craie (Nord de la France). Apport du krigeage à l'hydrochimie régionale et gestion qualitative des eaux souterraines. Thèse, Université de Lille1, 205 p.

**Duchesne, C. (1999).** Impacts des activités humaines sur le milieu naturel d'une zone centrale du bassin minier Nord-Pas-de-Calais. Thèse, Université de Lille1, 315 p.

**Dupis, A., Choquier, A. et Bossuet, G. (1995).** La radio magnéto-tellurique : une nouvelle méthode de la géophysique appliquée. *Bull. Soc. Géol. France*, 66, 2, 231-242.

## E

**E.P.A (1994).** Acid Mine Drainage Prediction. Rapport n° 530-R-94-036, 48 p.

**Edwards, K.J., Bond, P.L., Gruschel, G.K., McGuire, M.M., Hamers, R.J. et Banfield, J.F. (2000).** Geochemical and biological aspects of sulfide mineral dissolution : lessons from Iron Mountain, California. *Chem. Geol.*, 169, 383-397.

**Epstein, S. et Mayeda, T. (1953).** Variation of  $^{18}O$  content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4, 213-224.

## F

**Ferry, B. (1992).** Part. des transformations chimiques naturelles et provoquées dans la nappe de la craie du nord de la France. Mémoire de DEA, Université de Lille1, 57 p.

**Finkelman, R.B et Griffin, D.E. (1986).** Hydrogen peroxide oxidation : an improved method for rapidly assessing acid generating potential of sediments and sedimentary rocks. *Recr. Reveget. Res.*, **5**, 521-534.

**Foos, A. (1997).** Geochemical modeling of coal mine drainage, Summit County, Ohio. *Env. Geol.*, **31**, 205-210.

## G

**Geldenhuis, S. et Bell, F.G. (1998).** Acid mine drainage at a coal mine in the eastern Transvaal, South Africa. *Env. Geol.*, **34**, 2/3, 234-242.

**Gerke, H.H., Molson, J.W. et Frind, E.O. (1998).** Modelling the effect of chemical heterogeneity on acidification and solute leaching in overburden mine spoils. *J. Hydrology*, **209**, 166-185.

**Gosselet, J. (1908).** Note sur quelques failles communes aux terrains crétaciques et houiller de l'Artois. *Ann Soc. Géol. Nord*, **XXXVII**, 81-109

**Guerin, R., Panissod, C., Benderitter, Y., Bouzid, N., Tabbagh, A., Thiry, M. et Huet-Taillanter, S. (2001).** Méthodologie d'étude géophysique non destructive des sites industriels abandonnés. Cas du site pollué de Mortagne du Nord. In: Schmitt, J.M., Thiry, M. & Van Oort, F. (Eds.). *Industrie minière et environnement Aspects géochimiques, hydrogéochimiques, biogéochimiques*, Ecole des Mines de Paris, Soc. Géol. France, 85-88.

**Guérin, R., Panissod, C., Thiry, M., Benderitter, Y., Tabbagh, A. et Huet-Taillanter, S. (en cours).** La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59) . -III- Approche méthodologique d'étude géophysique non destructive des sites pollués par des eaux fortement minéralisées. *Bull. Soc. Géol. France*.

**Guo, W., Parizek, R.R. et Rose, A.W. (1994).** The role of thermal convection in resupplying O<sub>2</sub> to strip coal-mine spoil. *Soil Sci.*, **158**, 47-55.

## H

**Hawkins, J.W. (1998)** Hydrogeologic characteristics of surface-mine spoil. In : The Pennsylvania Department of Environmental Protection (Ed.), Coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania, 3-1, 3-11

**Hawkins, J.W. et Aljoe, W.W. (1992).** Pseudokarst groundwater hydrologic characteristics of a mine spoil aquifer. *Mine Water and the environment*, **11**, 2, 37-52.

**Heard, I. et Senftle, F.E. (1984).** Chemical oxidation of anthracite with hydrogen peroxide via the Fenton reaction. *Fuel*, **63**, 221-226.

**Hedin, R.S. et Erickson, P.M. (1988).** Relationships between the initial geochemistry and leachate chemistry of weathering of overburden samples. *In: Mine drainage and surface mine reclamation : Mine water and mine waste*, Pittsburgh, 21-28.

**Holser, W.T. et Kaplan, I.R. (1966).** Isotope geochemistry of sedimentary sulphates. *Chem. Geol.*, **1**, 93-135.

**Holtzapffel, T. (1985).** Les minéraux argileux, préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Soc. Géol. Nord*, **12**, 136 p.

## I

**INERIS (1995).** Etude historique du site de Sainte-Henriette d'Herzin-Beaumont (62). 23 p.

## J

**Johnson, R.H., Blowes, D.W., Robertson, W.D. et Jambor, J.L. (2000).** The hydrogeochemistry of the nickel Rim mine tailings impoundment. *J. Contam. Hydrol.*, **41**, 49-80.

## K

**Kania, T. (1998).** Laboratory methods for Acid-Base-Accounting : an update. *In : The Pennsylvania Department of Environmental Protection (Ed.), Coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania*, 6/1-6/9.

**Kleinmann, R.L.P., Crerar, D.A. et Pacelli, R.R. (1981).** Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Mining Eng.*, **33**, 300-305.

**Kölling, M. (1990).** Modellierung geochemischer Prozesse im Sickerwasser und Grundwasser. *Ber. Fachbereich Geowiss. Thesis, University of Bremen*, 135 p.

**Kwong, Y.T.J. (1993).** Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective. MEND Project 1.32.1, Mine environment neutral drainage (MEND) program, 47 p.

## L

- Lawrence, R.W. et Scheske, M. (1997).** A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Env. Geol.* **32**, 2, 100-106.
- Lawrence, R.W. et Wang, Y. (1996).** Determination of neutralization potential for acid rock drainage prediction. MEND Project 1.16.3, Mine environment neutral drainage (MEND) program, 38 p.
- Loke, M.H. (1999).** Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies : a practical guide to 2-D and 3-D surveys. 57 p.
- LRPC-ANTEA (1995).** Plateforme logistique d'intérêt européen de Dourges : étude de faisabilité technique. 52 p.
- Lu, N. et Zhang, Y. (non daté)** Thermally induced gas convection in mine wastes. Disposal safety Inc., Washington DC.

## M

- Mania, J. (1971).** Contribution à l'étude de la nappe des sables landéniens en Flandres franco-belges et dans le bassin d'Orchies. Thèse de 3ème cycle, Université de Lille1, 182 p.
- Mania, J. (1978).** Gestion des systèmes aquifères : application au nord de la France. Mém. Soc. Geol. Nord. **15**, 228 p.
- McCarthy, M.D.B., Newton, R.J. et Bottrell, S.H. (1998).** Oxygen isotopic compositions of sulphate from coals : implications for primary sulphate sources and secondary weathering processes. *Fuel*. **77**, 677-682.
- McCrea, J. (1950).** On the isotope chemistry of carbonates and paleotemperature scales. *J. Chem. Phys.* **18**, 849-857
- McKibben, M.A. et Barnes, H.L. (1986).** Oxidation of pyrite in low temperature acidic solutions - Rate laws and surface texture. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 1509-1520.
- Meüliez, F. (1989).** Pre-orogenic shallow stretching tectonism within the Namurian Beds in the northern France. *Bull. Soc. belge Géologie*. **98(2)**, 231-234.
- Michelot, J.L. (1988)** Hydrologie isotopique des circulations lentes en milieu cristallin fracturé : essai méthodologique. Thèse 180 p.
- Monterroso, C. et Macias, F. (1998a).** Drainage waters affected by pyrite oxidation in a coal mine in Galicia (NW Spain) : Composition and mineral stability. *The science of the total environment*, **216**, 121-132
- Monterroso, C. et Macias, F. (1998b)** Prediction of the acid generating potential of coal mine spoils. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, **12**, 5-9.

**Moore, D.M. et Reynolds, R.C. (1989).** X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, 322 p.

**Moses, C.O. et Hermann, J.S. (1991).** Pyrite oxidation at circumneutral pH. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 471-482.

**Moses, C.O., Nordstrom, D.K., Hermann, J.S. et Mill: A.L. (1987).** Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, 1561-1571.

**Mothes, J.L., Faure, B. et Boutonnet, M. (1973).** Quelques caractéristiques de l'hiver en France. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, **68**, 7-12.

## N

**Nicholson, R.V., Gillham, R.W. et Reardon, E.J. (1990).** Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution :2. Rate control by oxide coatings. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 395-402.

**Nordstrom, D.K. (1982).** Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. *In* : Kittrick, J.A., Fanning, D.S. & Hossner, L.R. (Eds.), Acid Sulfate weathering, Soil Science Society of America, 37-63.

## P

**Paktunc, A.D. (1999a).** Discussion of "A method to calculate the neutralization potential of mining wastes" by Lawrence and Scheske. *Env. Geol.*, **38**, 1, 82-84.

**Paktunc, A.D. (1999b).** Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage. *Env. Geol.*, **39**, 2, 103-112.

**Paproth, E., Conil, R., Bless, M.J.M., Boonen, P., Bouckaert, J., Carpentier, N., Coen, M., Delcambre, B., Deprijck, C., Deuzon, S., Dreesen, R., Groessens, E., Hance, L., Hennebert, M., Hibo, D., Hahn, G.R., Hilaire, O., Kasig, W., Laloux, M., Lauwers, A., Leess, A., Lys, M. (1983a).** Bio- and lithostratigraphic subdivisions of the Dinantian in Belgium : a review. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **106**, 185-239.

**Paproth, E., Dusar, M., Bless, M.J.M., Bouckaert, J., Delmer, A., Fairon-Demaret, M., Houllebergs, E., Laloux, M., Perard, P., Somers, Y. et Streef, M. (1983b).** Bio- and lithostratigraphical subdivisions of the Silesian in Belgium : a review. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **106**, 241-283.

**Perry, E.F. (1998).** Interpretation of Acid-Base Accounting. *In* : The Pennsylvania Department of Environmental Protection (Ed.), Coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania, 11/1-11/18.

**Petit, D. (1980).** La végétation des terrils du Nord de la France : écologie, phytosociologie, dynamisme. Thèse, Université de Lille I, 250 p.

**Pierre, C., Rouchy, J.-M., Laumondais, A. et Groessens, E. (1984).** Sédimentologie et géochimie isotopique ( $^{18}\text{O}$ ,  $^{34}\text{S}$ ) des sulfates évaporitiques givétiens et dinantiens du Nord de la France et de la Belgique ; importance pour la stratigraphie et la reconstitution des paléomilieus de dépôt. *C. R. Acad. Sci.*, t. 299, série II, n° 1, 21-26.

**Plummer, N., Wigley, T.M.L. et Parkhurst, D.L. (1978).** The kinetics of calcite dissolution in  $\text{CO}_2$  water systems  $5^\circ$  to  $60^\circ$  and 0.0 to 1.0 atm  $\text{CO}_2$ . *Amer. J. Sci.*, 278, 179-216.

**Price, M. (1997).** Multi-porosity behaviour in the chalk aquifer. *Ann. Soc. Geol. Nord*, 5, 289-294.

## R

**Robaszynski, F. (1987).** Du Boulonnais au Bassin de Mons : le Paléozoïque et les héritages varisques dans la couverture. Aspect et évolution géologiques du Bassin parisien. C. L. in CAVELIER, J., coord. Paris. *Bull. Inf. géol. Bas Paris*, mém. h-s. n° 6, 69-86.

**Rose, A.W. et Cravotta III, C.A. (1998).** Geochemistry of coal mine drainage. In The Pennsylvania Department of Environmental Protection (Ed.), Coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania, 1-22.

**Rose, S. et Elliot, W.C. (2000).** The effects of pH regulation upon the release of sulfate from ferric precipitates formed in acid mine drainage. *Appl. Geochem.*, 15, 27-34.

**Rose, S. et Ghazi, A.M. (1997).** Release of sorbed sulfate from iron oxyhydroxides precipitated from acid mine drainage with coal mining. *Env. Sci. Technol.*, 31, 7, 2136-2140.

**Rose, S. et Ghazi, A.M. (1998).** Experimental study of the stability of metals associated with iron oxyhydroxides precipitated in acid mine drainage. *Env. Geol.*, 36, 3-4, 364-370.

## S

**Schnaitman, C.A., Korczynski, M.S. et Lundgren, D.G. (1969).** Kinetic studies of iron oxidation by whole cells of *Ferrobacillus ferrooxidans*. *J. Bacteriology*, 99, 552-557.

**Schüring, J., Kölling, M. et Schulz, H.D. (1997).** The potential formation of acid mine drainage in pyrite-bearing hard-coal tailings under water-saturated conditions : an experimental approach. *Env. Geol.*, 31, 59-65.

**Sevin, I. (2000).** Détection de cavités souterraines par imagerie radar et électrique. Rapport de DESS, Université de Lille I, 46 p.

- Shakur, A. (1982).**  $^{34}\text{S}$  and  $^{18}\text{O}$  variations in terrestrial sulphates. Thesis, University of Calgary, 229 p.
- Silverman, M.P. et Lundgren D.G. (1959).** Studies of the chemautotrophic bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans* II. Manometric studies. *J. Bacteriology*, **78**, 326-331.
- Singer, P.C. et Stumm, W. (1970).** Acidic mine drainage - the rate determining step. *Science*, **167**, 1121-1123.
- Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. et Smith, R.M. (1978).** Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. EPA-600/2-78-054, U.S. Environmental Protection Agency, 38 p.
- Stumm, W. et Morgan, J.J. (1981).** Aquatic chemistry. Wiley Interscience, 470 p.
- Sverdrup, H.U. (1990).** The kinetics of base cation release due to chemical weathering. Lund University Press.

## T

- Taylor, B.E., Wheeler, M.C. et Nordstrom, D.K. (1984a).** Stable isotope geochemistry of acid mine drainage : experimental oxidation of pyrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 2669-2678.
- Taylor, B.E., Wheeler, M.C. et Nordstrom, D.K. (1984b).** Isotope composition of sulphate in acid mine drainage as measure of bacterial oxidation. *Nature*, **308**, 538-541.
- Tezkan, B., Goldman, M., Greinwald, S., Hördt, A., Müller, I., Neubauer, F.M. et Zacher, G. (1996).** A joint application of radiomagnetotellurics and transient electromagnetics to the investigation of a waste deposit in Cologne (Germany). *Appl. Geoph.*, **34**, 199-212.
- Thode, H.G., Monster, J. et Dunford, H.B. (1961).** Sulphur isotope geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **25**, 159-174.
- Tribovillard, N., Barbecot, F. et Denimal, S. (1998).** Traçage chimique et isotopique des eaux souterraines en relation avec les eaux de lixiviation de terrils. *Charbonnages de France*, 16 p.

## V

- Vachier, P., Cambier, P. et Prost, R. (1979).** Structure d'un milieu poreux : la craie. *Ann. Agro*, **30** (3), 247-263.
- Vachier, P., Dever, L. et Fontes, J.C. (1987).** Mouvements de l'eau dans la zone non saturée et alimentation de la nappe de la craie de champagne (France) : Approches isotopique et chimique. *In: Int. Symp. on Isotope Hydrology, I.A.E.A., Vienne.*



**VanDonkelaar, C., Hutcheon, I.E. et Krouse, H.R. (1995).**  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  in shallow groundwater : tracing anthropogenic sulfate and accompanying groundwater/rock interactions. *Water, Air and Soil Pollution*, **79**, 279-298.

**VanEverdingen, R.O. et Krouse, H.R. (1985).** Isotope composition of sulphates generated by bacterial and biological oxidation. *Nature*, **315**, 395-396.

## W

**Waterlot, M. (1960a).** Sur quelques aspects des eaux salées du terrain houiller du Nord de la France. *Ann. Soc. Geol. Nord*, **LXXX**, 3, 141-146.

**Waterlot, M. (1960b).** Matériaux pour l'étude des eaux du terrain houiller du Nord de la France. Diplôme d'études supérieures., Université de Lille1, 100 p.

**Webb, J.A. et Sasowsky, I.D. (1994).** The interaction of acid mine drainage with a carbonate terrane : evidence from the Obey River, north-central Tennessee. *J. of Hydrology*, **161**, 327-346.

**Wedepohl, K.H. (1991).** The composition of the upper earth's crust and the natural cycles of selected metals. In : Merian, E. (Ed.), Metals and their compounds in the environment, VCH-Verlagsgesellschaft, 3-17.

**Williams, T.M. et Smith, B. (2000).** Hydrochemical characterization of acute acid mine drainage at Iron Duke mine, Mazowe, Zimbabwe. *Env. Geol.*, **39**, 3-4.

**Williamson, M.A. et Rimstidt, J.D. (1994).** The kinetics and electrochemical rate determining step of aqueous pyrite oxidation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 5443-5454.

**Wisotzky, F. et Obermann, P. (2001).** Acid mine groundwater in lignite overburden dumps and its prevention - the Rhineland lignite mining area (Germany). *Ecological Engineering*, **17**, 115-123.

## Y

**Yaramanci, U. (2000).** Geoelectric exploration and monitoring in rock salt for the safety assessment of underground waste disposal sites. *J. Appl. Geoph.*, **44**, 181-196

**Yu, J.-Y. (1996)** Pollution of Osheepcheon Creek by abandoned coal mine drainage in Dogyae area, eastern part of Samcheok coal field, Kangwon-Do, Korea. *Env. Geol.*, **27**, 286-299.

## Z

**Zhixun, L. et Herbert, R.B.J. (1997).** Heavy metal retention in secondary precipitates from a mine rock dump and underlying soil, Dalarna, Sweden. *Env. Geol.*, **33**, 11-12.

**TABLE DES ILLUSTRATIONS**



## Liste des figures

### Chapitre 1 :

Fig. 1.1 : Schéma présentant l'évolution des terrils et bassins de décantation et leurs effets sur l'écoulement et la qualité des eaux souterraines (Cammaer, 1998).	11
Fig. 1.2 : Vue en plan et en coupe du panache de sulfates (mg/l) visible à l'aval du site de Watershei (Belgique) (Cammaer, 1998).	11
Fig. 1.3 : Evolution des concentrations en soufre total des éluats issus de l'oxydation de pyrite à différents pH ; a - solutions saturées en O <sub>2</sub> dissous ; b - solutions saturées en Fe (II). (Moses et al., 1987).	13
Fig. 1.4 : Comparaison des vitesses en fonction du pH pour : (1) l'oxydation de la pyrite par l'oxygène (réaction 1.2) ; (2) l'oxydation du fer ferreux par l'oxygène (réaction 1.3) ; (3) l'oxydation de la pyrite par le fer ferrique (réaction 1.4) (Rose et Cravotta, 1998).	14
Fig. 1.5 : Modélisation du temps nécessaire à la « dépyritisation » totale de stériles (1,5 m d'épaisseur) pour différentes porosités, en faisant l'hypothèse que l'oxygène est entièrement consommé par l'oxydation de la pyrite (Expériences réalisées sur 2 échantillons de stériles provenant des mines Hugo (Gelsenkirchen-Buer) et Prosper (Bottrop). (Schüring et al., 1997).	17
Fig. 1.6 : Taux de désorption des sulfates en fonction du pH après neutralisation par CaCO <sub>3</sub> des échantillons traités. (Rose et Elliot, 2000)	23

### Chapitre 2 :

Fig. 2.1 : Présentation des sites étudiés ; situation géographique (carte IGN 1 :25000) ; topographie (d'après Duchesne, 1999 (données SA/OMI, 1994)).	31
Fig. 2.2 : Présentation du site 1.	32
Fig. 2.3 : Carte des concessions (d'après Chaudy, 1997).	33
Fig. 2.4 : Localisation des industries dérivées du charbon sur les sites étudiés (d'après Duchesne, 1999).	33
Fig. 2.5 : Présentation du site 2.	35
Fig. 2.6 : Présentation détaillée du site 2 (d'après rapport LCPL-ANTEA, 1995).	36
Fig. 2.7 : Situation géographique du bassin minier Nord-Pas-de-Calais.	38
Fig. 2.8 : Coupe géologique Noyelle-Godault - Ostricourt (Duchesne, 1999).	40
Fig. 2.9 : Carte simplifiée des zones stratigraphiques à la cote -300, (d'après Bouroz et al (1962, 1963) (Chaudy, 1997)).	41
Fig. 2.10 : Contexte géologique des sites étudiés	42
Fig. 2.11 : Zones aquifères de la craie en régime libre et captif dans le bassin minier du Nord-Pas-de-Calais (Curlier, 1989).	45
Fig. 2.12 : Répartition des transmissivités krigées (10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s) dans le secteur étudié (Couteau, 1995).	46
Fig. 2.13 : Répartition des teneurs en sulfates dans le secteur Lens-Oignies-Vitry en Artois mesurées en 1977 (Bernard, 1979).	47

## Chapitre 3 :

Fig 3.1	Analyse diffractométrique de l'échantillon SHE99	57
Fig 3.2	Analyse diffractométrique de l'échantillon 2904OIG15	58
Fig 3.3	Analyse diffractométrique de l'échantillon SHB99C	59
Fig 3.4	Analyse diffractométrique de l'échantillon OIGJar1	60
Fig 3.5	Analyse diffractométrique de l'échantillon OIGBD13	61
Fig 3.6	Analyse à la sonde EDS des tâches pulvérulentes jaune-ocre	62
Fig 3.7	Analyse à la sonde EDS des tâches pulvérulentes jaune-ocre	63
Fig 3.8	Analyse à la sonde EDS des efflorescences blanchâtres	64
Fig 3.9	Analyse à la sonde EDS sur des stériles houillers montrant la présence d'oxydes de fer	64
Fig 3.10	Analyse à la sonde EDS sur des stériles houillers montrant la présence d'oxydes de magnésium	65
Fig 3.11	Comparaison des teneurs en carbone total et en soufre total des échantillons prélevés sur les terrils et dans les bassins de décantation (B et C) du site 2	69
Fig 3.12	Variations des teneurs en éléments traces des échantillons prélevés en profondeur sur le site 1	75
Fig 3.13	Variations des teneurs en éléments traces des échantillons prélevés à haute résolution sur le site 1	75
Fig 3.14	Variations des teneurs en éléments traces des échantillons prélevés en profondeur sur le site 2	75
Fig 3.15	Variations des teneurs en éléments traces des échantillons prélevés à haute résolution sur le site 2	75
Fig 3.16	Variation des teneurs en éléments traces des échantillons prélevés en profondeur dans le bassin de décantation C du site 2	78
Fig 3.17	Piézomètres et forages échantillonnés sur les sites et en dehors des sites	83
Fig 3.18	Carte piézométrique réalisée au niveau des sites d'étude	85
Fig 3.19	Comparaison entre les teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés dans les piézomètres situés à l'amont des sites et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy	89
Fig 3.20	Comparaison entre les teneurs en éléments traces des échantillons prélevés dans les piézomètres situés à l'amont des sites et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy	89
Fig 3.21	Comparaison entre les teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés dans les piézomètres situés à l'aval des sites et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy	90
Fig 3.22	Comparaison entre les teneurs en éléments traces des échantillons prélevés dans les piézomètres situés à l'aval des sites et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy	90
Fig 3.23	Comparaison entre les teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés dans les piézomètres extérieurs et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy	91
Fig 3.24	Comparaison entre les teneurs en éléments traces des échantillons prélevés dans les piézomètres extérieurs et les teneurs de l'échantillon prélevé dans le forage de Vimy	91
Fig 3.25	Comparaison entre les teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés dans les mares temporaires du site 2 et les teneurs des échantillons d'eau de pluie prélevés sur ce site	92
Fig 3.26	Comparaison entre les teneurs en éléments traces des échantillons prélevés dans les mares temporaires du site 2 et les teneurs des échantillons d'eau de pluie prélevés sur ce site	92

Fig. 3.27 : Comparaison entre les teneurs en éléments majeurs de l'échantillon prélevé dans l'un des bassins de décantation du site 2 et les teneurs des échantillons d'eau de pluie prélevés sur ce site.	93
Fig. 3.28 : Comparaison entre les teneurs en éléments traces de l'échantillon prélevé dans l'un des bassins de décantation du site 2 et les teneurs des échantillons d'eau de pluie prélevés sur ce site.	93
Fig. 3.29 : Bilan hydrique (cm mm) à la station de Loos-en-Gohelle	97
Fig. 3.30 : Valeurs de pH et concentrations en sulfates des eaux de pluie récoltées à Hénin-Beaumont entre 1988 et 1996	98
Fig. 3.31 : Valeurs de pH et concentrations en sulfates des eaux de pluie récoltées à Oignies entre 1988 et 1996.	99
Fig. 3.32 : Analyse diffractométrique de l'échantillon ST1LXI.	104
Fig. 3.33 : Analyse diffractométrique de l'échantillon ST2LXI.	105
Fig. 3.34 : Analyse diffractométrique de l'échantillon ST3LXI.	106
Fig. 3.35 : Analyse diffractométrique de l'échantillon BD1LXI.	107
Fig. 3.36 : Analyse diffractométrique de l'échantillon BD2LXI.	108
Fig. 3.37 : Analyse diffractométrique de l'échantillon BD3LXI.	109
Fig. 3.38 : Variations de pH observées à 48 h après mise en contact des stériles houillers avec des solutions de pH basique à acide	110
Fig. 3.39 : Variations de pH observées à 48 h après mise en contact des résidus de bassin de décantation avec des solutions de pH basique à acide	110
Fig. 3.40 : Concentrations en éléments majeurs en fonction du pH mesuré à 48 h des éluats obtenus après mise en contact des stériles houillers avec des solutions de pH basique et acide.	111
Fig. 3.41 : Concentrations en éléments majeurs en fonction du pH mesuré à 48 h des éluats obtenus après mise en contact des résidus de bassin de décantation avec des solutions de pH basique et acide.	112
Fig. 3.42 : Concentrations en éléments traces en fonction du pH mesuré à 48 h des éluats obtenus après mise en contact des stériles houillers avec des solutions de pH basique et acide.	113
Fig. 3.43 : Concentrations en éléments traces en fonction du pH mesuré à 48 h des éluats obtenus après mise en contact des résidus de bassin de décantation avec des solutions de pH basique et acide.	114
Fig. 3.44 : Evolution du pH pendant les essais réalisés en conditions saturées/non saturées.	120
Fig. 3.45 : Evolution du pH pendant les essais réalisés en conditions saturées.	120
Fig. 3.46 : Evolution des concentrations en sulfates des éluats obtenus par les essais réalisés en conditions saturées/non saturées.	121
Fig. 3.47 : Evolution des concentrations en sulfates des éluats obtenus par les essais réalisés en conditions saturées.	121
Fig. 3.48 : Comparaison des potentiels d'acidification et de neutralisation des échantillons prélevés sur les terrils et dans le bassin de décantation C du site 2.	126
Fig. 3.49 : Teneur en soufre total en fonction de la teneur en carbone total des échantillons solides prélevés en surface et en profondeur sur les deux sites.	127
Fig. 3.50 : Teneur en soufre total en fonction de la teneur en carbone total des échantillons solides prélevés en surface et en profondeur dans le bassin de décantation C du site 2	127

Fig 3 51 et 3 52 Carte d'isovaleurs de concentrations en sulfates (en mg l <sup>-1</sup> ) et de conductivité électrique (μS cm <sup>-1</sup> ) des eaux prélevées dans la nappe de la Craie	129
Fig 3 53 Diagramme [Ca <sup>2+</sup> ] + [Mg <sup>2+</sup> ] - [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] vs [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] La flèche ③ correspond à la réaction d'oxydation des sulfures et la flèche ② à la dissolution secondaire de carbonates	130
Fig 3 54 Carte d'isovaleurs de δ <sup>34</sup> S mesuré sur les échantillons prélevés dans la nappe de la Craie.	132
Fig 3 55 Graphique représentant la teneur en <sup>18</sup> O du sulfate formé par oxydation de sulfure en fonction de la teneur en <sup>18</sup> O de l'eau	135
Fig 3 56 Carte d'isovaleurs de potentiel redox mesurées dans la nappe de la Craie	136
Fig 3 57 Carte d'isovaleurs d'activité <sup>14</sup> C mesurées sur les eaux prélevées dans la nappe de la Craie	137
Fig 3 58 a - Teneurs en CTD vs activités <sup>14</sup> C, b - Teneurs en CTD vs δ <sup>34</sup> S	138
Fig 3 59 Carte des isovaleurs de pH	139
Fig 3 60 et 3 61 Concentration en Magnésium et en calcium (mg l <sup>-1</sup> ) des eaux prélevées dans la nappe de la Craie	140
Fig 3 62 et 3 63 Concentration en bicarbonates et en strontium (mg l <sup>-1</sup> ) des eaux prélevées dans la nappe de la Craie	140

## Chapitre 4 :

Fig 4 1 Diagramme illustrant la relation existant entre lithologie des résidus et conductivité hydraulique dans l'étude faite sur les terrils houillers de Pennsylvannie (Hawkins, 1998)	148
Fig 4 2 Diagramme illustrant la relation existant entre la durée de la « mise à terril » et la conductivité hydraulique dans le cas de stériles issus de terrils houillers de Pennsylvanie (Hawkins, 1998)	149
Fig 4 3 Plan de position des moyens mis en œuvre sur le site 2 pour déterminer l'existence ou l'absence d'infiltration des eaux météoriques	151
Fig 4 4 Agrandissement du plan de position des moyens mis en œuvre sur le site 2	152
Fig 4 5 Schema d'un dispositif Radiomagneto-Tellurique (CETE, 1998)	153
Fig 4 6 Profil RMT P7-P8	154
Fig 4 7 Profil RMT P9-P10	155
Fig 4 8 Profil RMT P15-P16	155
Fig 4 9 Profil RMT P3-P4	156
Fig 4 10 Profil RMT P13-P14	156
Fig 4 11 Exemple de dispositif utilisé pour la réalisation de panneaux électriques, avec A et B, électrodes d'injection et M et N, électrodes mesurant la différence de potentiel (d'après Guérin et al., en cours)	157
Fig 4 12 Exemples de configurations utilisées dans la réalisation de panneaux électriques et coefficients géométriques correspondants (d'après Loke, 1999)	158
Fig 4 13 Profils et coupes de résistivités réalisés dans la zone 1, prospection de Juillet 2000, configuration dipôle-dipôle	161
Fig 4 14 Profils et coupes de résistivités réalisés dans la zone 2, prospection de Juillet 2000, configuration dipôle-dipôle	163

Fig. 4.15 : Profils et coupes de résistivités réalisés dans la zone 3, prospection de Juillet 2000, configuration dipôle-dipôle	164
Fig. 4.16 : Profils et coupes de résistivités réalisés dans la zone 4, prospection de Juillet 2000, configuration dipôle-dipôle	166
Fig. 4.17 : Profils de résistivités réalisés au niveau des points Permeafor, prospection de Juillet 2000, configuration dipôle-dipôle	167
Fig. 4.18 : Profils de résistivités A, B et C réalisés au cours de la prospection de février 2001, configuration wenner $\alpha$ .	170
Fig. 4.19 : Profils de résistivités A, B et C réalisés au cours de la prospection de février 2001, configuration wenner $\beta$ .	171
Fig. 4.20 : Principe de la méthode électromagnétique $\sim$ Stingeram (d'après Guerin et al., en cours).	172
Fig. 4.21 : Cartographie électromagnétique de la conductivité apparente mesurée sur le site 2.	173
Fig. 4.22 : Schéma de principe de fonctionnement du Permeafor (CETE-EST, 2000)	174
Fig. 4.23 : Classes de perméabilité qu'il est possible de déterminer par les essais Permeafor (CETE-EST, communication personnelle)	175
Fig. 4.24 : Résultats des essais Permeafor OIG 1 et OIG 2.	176
Fig. 4.25 : Résultats des essais Permeafor OIG 3 et OIG 4.	177
Fig. 4.26 : Résultats de l'essai Permeafor OIG 5.	179
Fig. 4.27 : Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG1.	185
Fig. 4.28 : Répartition des classes granulométriques représentées dans les échantillons prélevés en profondeur dans les fosses OIG1, OIG4 et OIG5 (OIG1 et 4 : tamisage à sec, OIG5 : tamisage sous eau)	186
Fig. 4.29 : Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG2.	187
Fig. 4.30 : Analyse granulométrique (laser) des échantillons prélevés dans la fosse OIG 2 (fraction < 63 $\mu$ m).	188
Fig. 4.31 : Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG3.	189
Fig. 4.32 : Analyse granulométrique (laser) des échantillons prélevés dans la fosse OIG 3 (fraction < 63 $\mu$ m).	190
Fig. 4.33 : Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG4.	191
Fig. 4.34 : Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG5 (tamisage à sec).	192
Fig. 4.35 : Résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en subsurface au point Permeafor OIG5 (tamisage sous eau).	193
Fig. 4.36 : Analyse granulométrique (laser) des échantillons prélevés dans la fosse OIG 5 (fraction < 63 $\mu$ m).	194
Fig. 4.37 : Panneaux électriques de la première prospection, réalisés à proximité des essais Permeafor, sur lesquels sont reportés les niveaux imperméables.	203



Fig 4.38 Panneaux électriques de la deuxième prospection (wenner CJ) sur lesquels sont reportés les niveaux imperméables visibles sur les essais Permeafor ..... 204

## Chapitre 5 :

Fig 5.1 Schéma de synthèse ..... 217

## Liste des tableaux

### Chapitre 1 :

Tab 1.1 Détermination du volume et de la force de l'acide à utiliser dans le test ABA en fonction du résultat du test d'effervescence (Lawrence et Wang, 1996) ..... 24

### Chapitre 3 :

Tab 3.1 Nom des échantillons, profondeur du prélèvement (en cm) et analyses menées pour le site 1 (1 analyse réalisée, 0 pas d'analyse) .....	50
Tab 3.2a Nom des échantillons, profondeur du prélèvement (en cm) et analyses menées pour le site 2 .....	51
Tab 3.2b Analyses menées sur les échantillons tests représentatifs des derniers schistes houillers mis à terreil (site 2) sur lesquels ont été réalisés différents essais de lixiviation ainsi que sur l'échantillon particulier de couleur jaune ocre OIG.Jar 1 .....	52
Tab 3.3a Nom des échantillons, profondeur du prélèvement (en cm) et analyses menées pour les bassins de decantation du site 2 .....	53
Tab 3.3b Analyses menées sur les échantillons tests représentatifs des résidus du bassin de decantation B (site 2) sur lesquels ont été réalisés différents essais de lixiviation .....	53
Tab 3.4 Analyses mineralogiques menées sur les solides prélevés sur le site 1 (Qz = Quartz, Musc = Muscovite, Arg = Argiles, Sid = Siderite, Dol = Dolomite, Ank = Ankerite, Jar = Jarosite, Pyr = Pyrite) .....	54
Tab 3.5 Analyses mineralogiques menées sur les solides prélevés sur le site 2 (Qz = Quartz, Musc = Muscovite, Arg = Argiles, Cal = Calcite, Sid = Siderite, Dol = Dolomite, Ank = Ankerite, Jar = Jarosite, Natrojar = Natrojarosite) .....	55
Tab 3.6 Analyses mineralogiques menées sur les solides prélevés sur le site 2 (Qz = Quartz, Musc = Muscovite, Arg = Argiles, Cal = Calcite, Sid = Siderite, Pyr = Pyrite) .....	56
Tab 3.7 Teneurs en carbone et en soufre total (%o) des échantillons prélevés sur le site 1 .....	66
Tab 3.8 Teneurs en carbone et en soufre total (%o) des échantillons prélevés sur le site 2 .....	68
Tab 3.9 Teneurs en carbone et en soufre total (%o) des échantillons prélevés dans les bassins de decantation B et C du site 2 .....	68
Tab 3.10 Teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés sur le site 1 .....	71

Tab. 3.11 : Teneurs en éléments traces des échantillons prélevés sur le site 1. _____	72
Tab. 3.12 : Teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés sur le site 2. _____	73
Tab. 3.13 : Teneurs en éléments traces des échantillons prélevés sur le site 2 _____	74
Tab. 3.14 : Teneurs en éléments majeurs des échantillons prélevés dans les bassins de décantation B-C du site 2 _____	76
Tab. 3.15 : Teneurs en éléments traces des échantillons prélevés dans les bassins de décantation B-C du site 2 _____	77
Tab. 3.16 : Valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ mesurées sur les sulfures prélevés sur les sites de Rieulay, Divion et Fouquières. _	78
Tab. 3.17 : Teneurs en $\text{CaCO}_3$ d'échantillons prélevés sur le site 1. _____	79
Tab. 3.18 : Teneurs en $\text{CaCO}_3$ d'échantillons prélevés sur le site 2. _____	80
Tab. 3.19 : Teneurs en $\text{CaCO}_3$ d'échantillons prélevés en profondeur dans le bassin de décantation C du site 2. _____	81
Tab. 3.20 : Analyses effectuées sur les différents échantillons liquides récoltés. _____	84
Tab. 3.21 : Mesures in situ des paramètres hydrochimiques _____	84
Tab. 3.22 : Teneurs en éléments majeurs mesurées sur les eaux souterraines et les autres prélèvements liquides (Mares temporaires, bassin de décantation, pluies et canal). _____	87
Tab. 3.23 : Teneurs en éléments traces mesurées sur les eaux souterraines et les autres prélèvements liquides (Mares temporaire., bassin de décantation, pluies et canal). _____	88
Tab. 3.24 : Analyses isotopiques réalisées sur les eaux échantillonnées. _____	94
Tab. 3.25 : Coefficients de correction de Thornthwaite. _____	96
Tab. 3.26 : Calcul des pluies efficaces à la station de Loos-en-Gohelle pour la période 1989-1999. _____	97
Tab. 3.27 : Analyses des éléments majeurs des éluats obtenus par mise en contact des stériles houillers et des résidus de bassin de décantation avec des solutions de pH basique à acide. _____	102
Tab. 3.28 : Analyses des éléments traces des éluats obtenus par mise en contact des stériles houillers et des résidus de bassin de décantation avec des solutions de pH basique à acide. _____	103
Tab. 3.29 : Mesures de pH et concentrations en sulfate et en fer des éluats issus des essais réalisés en conditions saturées-non saturées. _____	119
Tab. 3.30 : Mesures de pH et concentrations en sulfate et en fer des éluats issus des essais réalisés en conditions saturées _____	119
Tab. 3.31 : Résultats des calculs de potentiel d'acidification (PA) et de neutralisation (carbonate PN) et donc du potentiel net de neutralisation (PNN) des stériles houillers échantillonnés sur le site 1. _____	123
Tab. 3.32 : Résultats des calculs de potentiel d'acidification (PA) et de neutralisation (carbonate PN) et donc du potentiel net de neutralisation (PNN) des stériles houillers échantillonnés sur le site 2. _____	124
Tab. 3.33 : Résultats des calculs de potentiel d'acidification (PA) et de neutralisation (carbonate PN) et donc du potentiel net de neutralisation (PNN) des résidus de bassin de décantation échantillonnés dans le bassin C du site 2 _____	125

## Chapitre 4 :

<i>Tab 4 1 Quelques exemples de valeurs de résistivité (d'après Loke, 1999)</i>	159
<i>Tab 4 2 Répartition en classes granulométriques des échantillons de la fosse OIG 2 tamisés sous eau</i>	182
<i>Tab 4 3 Répartition en classes granulométriques des échantillons de la fosse OIG 3 tamisés sous eau.</i>	183
<i>Tab 4 4 Répartition en classes granulométriques des échantillons de la fosse OIG 5 tamisés sous eau.</i>	184

## **Liste des photographies :**

<i>Photo 3 1 ravine échantillonnée sur le site 2</i>	52
<i>Photo 3 2 taches de couleur jaune-ocre</i>	52
<i>Photo 3 3 précipités blancs recouvrant en plaques certaines zones des terrils</i>	63

**ANNEXES**



## ANNEXE 1

### 1 - La diffraction des rayons X

#### 1.1 - Principe et appareillage

##### 1.1.1 - Principe

Le principe et les techniques d'étude des minéraux argileux par diffraction des rayons X ont été largement décrits (Holtzapffel, 1985). Seules les grandes lignes de cette technique seront présentées ici.

Le principe est celui de la diffraction d'un faisceau de rayons X incidents par un réseau de plans cristallins selon la loi de Bragg :

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

$\lambda$  = Longueur d'onde des rayons incidents

$d$  = Espace interréticulaire du réseau de plans cristallins

$\theta$  = Angle d'incidence du faisceau sur les plans cristallins

La variation de  $\theta$ , par rotation de l'échantillon autour d'un axe perpendiculaire au faisceau incident, permet de caractériser toutes les distances interréticulaires des minéraux présents dans l'échantillon.

##### 1.1.2 - Appareillage

L'appareil utilisé est un diffractomètre Philips 1710. L'installation se compose d'un générateur haute tension, d'un tube fixe de rayons X à anticathode de cuivre, d'un goniomètre, d'un système de comptage et d'un système d'enregistrement (Fig. X). Les spectres sont réalisés dans le domaine angulaire de  $2,51$  à  $32,49^\circ 2\theta$ , avec une vitesse de  $1^\circ 2\theta / \text{min}$ . Les spectres de poudre désorientées, réalisées dans le but de déterminer la minéralogie globale d'un échantillon, sont effectués dans un domaine angulaire de  $3$  à  $60^\circ 2\theta$ .

#### 1.2 - Préparation des échantillons

La diffraction des rayons X a pour but, d'une part, de caractériser les constituants cristallisés d'un échantillon (méthode des poudres) et d'autre part, de déterminer les proportions des différents

minéraux argileux présents dans la fraction granulométrique  $< 2\mu\text{m}$  des échantillons (technique des pâtes orientées).

### 1.2.1 – Préparation des poudres

L'échantillon est séché, broyé ( $40\mu\text{m}$ ) et homogénéisé. La poudre obtenue est ensuite désorientée et déposée dans le logement d'une plaque spéciale en aluminium. L'échantillon est alors passé aux rayons X. Les minéraux désorientés donnent des réflexions sur toutes les principales familles de plans réticulaires qui constituent leurs structures cristallines.

L'interprétation des diagrammes obtenus s'effectue au moyen de tableaux et de clefs tels les fichiers de l'ASTM (American Society for Testing and Materials).

### 1.2.2 – Préparation des pâtes orientées

Plusieurs opérations successives sont nécessaires à la confection de préparations orientées :

- Les échantillons indurés sont préalablement broyés ;
- Ils sont mis à déliter dans un erlenmeyer avec de l'eau distillée ;
- Ils sont ensuite décarbonatés avec de l'acide chlorhydrique N/5, l'excès d'acide est éliminé par rinçages successifs jusqu'à défloculation du matériel argileux ;
- La partie supérieure est prélevée à l'aide d'une seringue après homogénéisation et décantation selon un temps donné obéissant à la loi de Stokes (1 cm après 50 min).
- La suspension prélevée est ensuite centrifugée et le culot est récupéré et étalé sur une lame de verre rainurée afin de permettre l'orientation des minéraux argileux.

Pour les matériaux trop pauvre en matériel argileux, on utilise la technique des agrégats (Holtzapffel, 1985).

3 diffractogrammes sont réalisés pour chaque échantillon :

- après séchage à l'air libre à température ambiante : c'est l'essai dit « naturel » ;
- après saturation par l'éthylène glycol sous vide pendant 12 heures : c'est l'essai glycolé ;
- après chauffage à  $490^\circ\text{C}$  pendant 2 heures.

La détermination des minéraux argileux et leur semi-quantification ( $\pm 5\%$ ) sont rendus possible grâce à l'étude des 3 diffractogrammes obtenus

## 2 - Dosage du carbone organique et du soufre

L'échantillon préalablement mis à l'étuve (2h à 105°C) puis pesé, est calciné dans un courant d'oxygène. Les gaz de combustion déshydratés, sont amenés dans une cellule de mesure soumise à un rayonnement infrarouge. Sachant que CO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> absorbent les IR à 4,3 μ et 7,4 μ, un détecteur approprié enregistre tous les ¼ de seconde l'énergie transmise à ces longueurs d'onde. L'analyse s'arrête quand les concentrations en CO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> sont nulles. Les différentes lectures sont alors intégrées et corrigées en fonction de divers paramètres. Les résultats sont donnés directement en pourcentage de C et de S.

## 3 – Calcimétrie

Les teneurs en carbonate ont été mesurées à l'aide d'un calcimètre de Bernard.

L'échantillon est préalablement séché (étuve à 105°C) pendant 2 h afin de mesurer une masse de sédiment sec.

L'échantillon est pesé puis attaqué par de l'acide chlorhydrique dilué. Le calcimètre de Bernard permet de calculer le volume de CO<sub>2</sub> libéré lors de la réaction.

Un calcul simple permet ensuite de mesurer le pourcentage de carbonate (erreur engendrée ~ 1%) :

$$1. m_{CO_2} = \delta V (a_0 \cdot a \cdot P / P_0 \cdot T_0 / T)$$

$$2. m_{CaCO_3} = (m_{CO_2} \cdot 100) / 44$$

$$3. \% CaCO_3 = (m_{CaCO_3} \cdot 100) / m_{\text{échantillon}}$$

$$P_0 = 76 \text{ mmHg}$$

$$P = \text{Pression en mmHg}$$

$$T_0 = 273 \text{ °K}$$

$$T = \text{Température en ° K}$$

$$a_0 = 1,293 \cdot 10^{-3}$$

$$a = 44/29$$

## 4 – Analyses Granulométriques laser

La granulométrie laser a été utilisée pour traiter la fraction fine des échantillons prélevés dans les fosses réalisées au niveau des points Permeafor. Le principe de mesure est le suivant : l'échantillon est mis en suspension et circule dans une fenêtre traversée par un rayon laser. lorsqu'une particule passe devant le faisceau laser monochromatique, l'onde est diffractée avec un angle variable selon la taille



de cette particule. Elle est transformée en énergie électrique au niveau d'une plaque de récepteurs photoélectriques, proportionnellement à son intensité. Un logiciel adapté à l'appareil traite ensuite les données et fournit les différents paramètres granulométriques nécessaires à la caractérisation du sédiment.

## ANNEXE 2

<p>NORME FRANÇAISE HOMOLOGUÉE</p>	<p>POLLUTION ATMOSPHERIQUE MESURE DES "RETOMBEES" PAR LA METHODE DES COLLECTEURS DE PRECIPITATION</p>	<p>NF <b>X 43-006</b> MARS 1974</p>
<p style="text-align: center;"><b>1. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION</b></p> <p>La présente norme a pour objet de décrire un dispositif destiné à recueillir les retombées atmosphériques (*).</p> <p>L'utilisation d'un certain nombre d'appareils installés en réseau permet d'indiquer la distribution des retombées dans une région déterminée et pendant une période de temps donnée.</p> <p style="text-align: center;"><b>2. PRINCIPE</b></p> <p>Recueillir et conserver les retombées liquides ou solides, en suspension ou en solution, dans un récipient d'une capacité suffisante pour les y maintenir pendant une période spécifiée.</p> <p style="text-align: center;"><b>3. APPAREILLAGE</b></p> <p>Le collecteur de précipitation est un récipient cylindrique, à fond plat, de 200 mm de diamètre intérieur et de 400 mm de hauteur (**). Le bord supérieur doit être chanfreiné à 45° vers l'extérieur.</p> <p>Le matériau du collecteur ne doit pas réagir avec les retombées prélevées et doit être suffisamment résistant pour qu'il n'y ait aucune modification de la forme du collecteur et pour permettre le transport du collecteur plein.</p> <p>Des matériaux tels que le polyéthylène, le polychlorure de vinyle, l'acier inoxydable et l'aluminium anodisé peuvent être utilisés. La résine polyester renforcée de verre est attaquée par des bactéricides et ne convient, par conséquent, pas.</p> <p>Le collecteur doit être placé sur un support de diamètre inférieur à 240 mm. Le haut du support doit être situé à au moins 100 mètres de la surface de prélèvement. Le support doit être assez rigide pour ne pas fléchir et pour maintenir la surface de prélèvement exactement horizontale. Des haubans seront prévus à cet effet.</p> <p>Un perchoir de 400 mm de diamètre, réalisé à l'aide d'un fil métallique non corrodable et inerte, de diamètre compris entre 4 et 6 mm doit être fixé à l'aide du même fil à 100 mm au-dessus de la surface de prélèvement.</p> <p>Une protection contre le vent n'est pas recommandée.</p> <p>(*) La définition des "retombées" est donnée dans la norme NF X 43-001</p> <p>(**) Lorsque l'on s'intéressera tout particulièrement à l'analyse chimique des retombées précipitées, un dispositif en forme d'entonnoir placé sur un flacon pourra être utilisé. Dans ce cas, les résultats ne peuvent pas être comparés à ceux qui sont obtenus avec le collecteur à fond plat décrit dans cette norme.</p>		
<p>Homologuée par arrêté du 1974-02-25 J.O. 1974-02-28</p>	<p>La présente norme remplace la norme de même indice homologuée par arrêté du 26 juin 1967</p>	

Source: Association Française de Normalisation (AFNOR)

## 4. MODE OPERATOIRE

### 4.1 EXPOSITION DES COLLECTEURS

#### 4.1.1 Disposition

##### a) *Choix du site*

Deux types de site sont recommandés :

1) En terrain découvert, le site doit être horizontal et tel que l'angle formé par le plan horizontal de la surface de prélèvement et la droite joignant le centre de cette surface au sommet de l'objet le plus proche doit être inférieur à 30°. L'objet le plus proche ne doit pas être à moins de 3 mètres du collecteur.

2) En zone urbaine, les conditions requises en 1) ne sont alors pas possibles. Un toit horizontal et plat d'immeuble, de hauteur et de taille moyenne pour la ville, doit être choisi. L'angle formé par le plan horizontal de la surface de prélèvement et la droite joignant le centre de cette surface au sommet de l'objet le plus proche doit être inférieur à 30°. L'objet le plus proche ne doit pas être à moins de 3 mètres du collecteur. Le collecteur doit être placé aussi près que possible du centre du toit.

Dans les deux cas, le site doit être aussi loin que possible des sources spécifiques telles que cheminées, voies de circulation, arbres, sols poussiéreux.

Les résultats obtenus sur ces deux sortes de sites ne sont pas directement comparables, et les mesures sur un site en terrain découvert et sur un site voisin en zone urbaine ne doivent pas être rapprochées sans précaution spéciale.

##### b) *Position du collecteur*

L'ouverture du collecteur doit être située à une hauteur comprise entre 1,5 et 2,0 m au-dessus de la surface entourant immédiatement le collecteur.

L'ouverture supérieure du collecteur doit être exactement horizontale.

#### 4.1.2 Additifs

De l'eau doit être placée dans le collecteur en quantité suffisante, comprise entre 0,5l et 5l suivant le climat, afin qu'il ne s'assèche ni ne déborde.

On peut ajouter, en quantité correspondant à 5% de la concentration initiale, du méthoxyéthanol qui est un bactéricide et un algicide et prévient les dégâts provoqués par le gel. Il est non toxique et peut s'évaporer complètement (température d'ébullition: 120°) (\*)

#### 4.1.3 Durée de prélèvement

La durée d'exposition du collecteur doit être de 30 jours +/- 2 jours

### 4.2 TRANSPORT

Afin qu'il n'y ait pas d'échange entre le contenu du collecteur et l'extérieur pendant le transport de l'échantillon, du lieu de prélèvement au laboratoire, le collecteur devra être bouché hermétiquement et, si besoin est, placé dans un récipient de transport.

---

(\*) D'autres additifs, tels que le sulfate de cuivre, le chlorure d'ammonium, l'éthanol, l'isopropanol, le dichlorophénol, peuvent être utilisés

## **TRAITEMENT**

- a) Laver le collecteur afin d'enlever toutes les particules.
- b) Passer l'échantillon au travers d'un tamis de 1 mm d'ouverture de maille, afin d'éliminer les matières étrangères susceptibles de fausser grossièrement le résultat des mesures.
- c) S'il est nécessaire de déterminer séparément les particules insolubles dans l'eau, les enlever de l'échantillon:

par filtration sur papier filtre, sur filtres en fibres de verre ou sur tout autre matériau filtrant. Toutes précautions doivent être prises afin de supprimer l'apport d'impuretés chimiques qui pourraient être apportées par le matériau filtrant.

par centrifugation.

La méthode par filtration est recommandée en général afin de permettre une exploitation simple et courante des résultats aux fins de comparaison des quantités totales de retombées.

Pour les laboratoires plus spécialisés la méthode par centrifugation est recommandée parce qu'elle donne la possibilité d'effectuer des analyses physico-chimiques détaillées.

Sécher la partie recueillie à une température comprise entre 100 et 110 degrés jusqu'à obtenir une masse constante.

- d) Afin de déterminer la quantité de matières solubles dans l'eau, procéder à l'analyse suivante, sur une partie aliquote convenable, par exemple 100 ml du filtrat liquide.

Evaporer lentement l'eau et le méthoxyéthanol.

Calciner l'échantillon à 105°C jusqu'à obtenir une masse constante. Utiliser des creusets en verre borosilicaté (ou des récipients en platine, si l'on s'attend à trouver du fluor ou tout autre produit corrosif).

- e) S'il est nécessaire de déterminer ensemble les particules solubles et non solubles, utiliser la procédure indiquée en b), sous réserve d'évaporer par calcination tout l'échantillon liquide au lieu d'une partie aliquote de celui-ci.

## **5. EXPRESSION DES RESULTATS**

Les résultats sont rapportés à un temps de référence à 30 jours et exprimés en grammes par mètre carré et par mois.

## **6. PROCES-VERBAL D'ESSAI**

Le procès-verbal d'essai doit indiquer les résultats obtenus exprimés en grammes par mètre carré et par mois conformément à la présente norme et mentionner toutes les conditions de l'essai ainsi que tous les détails opératoires prévus dans la présente norme et les incidents éventuels susceptibles d'avoir agi sur les résultats.

### ANNEXE 3

Parmi les méthodes géophysiques utilisées sur le site 2 figurait la technique du géoradar, utilisée dans le but de déterminer la structure interne du terril. Cette technique a dû être abandonnée faute d'avoir donné des résultats probants. Sont reportés dans cette annexe deux exemples de profils géoradar réalisés au sommet et dans la pente du terril du site 2.

