



HAL
open science

**Réponses hydrogéochimiques de la nappe phréatique du
Val d'Orléans aux sollicitations de son environnement.
Développement du site expérimental de la carrière
Morillon-Corvol de Sandillon (Loiret)**

François Le Borgne

► **To cite this version:**

François Le Borgne. Réponses hydrogéochimiques de la nappe phréatique du Val d'Orléans aux sollicitations de son environnement. Développement du site expérimental de la carrière Morillon-Corvol de Sandillon (Loiret). Planète et Univers [physics]. Université Paris7 - Denis Diderot, 2001. Français. NNT: . tel-01134924

HAL Id: tel-01134924

<https://theses.hal.science/tel-01134924>

Submitted on 24 Mar 2015

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

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

UNIVERSITE PARIS 7 – DENIS DIDEROT
UFR Sciences de la Terre

Année 2001

THESE

Pour l'obtention du Diplôme de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS 7
SPECIALITE : Géochimie Fondamentale et Appliquée

Présentée et soutenue publiquement

par

François LE BORGNE

le 25 juin 2001

Titre :

**Réponses hydrogéochimiques de la nappe phréatique du Val
d'Orléans aux sollicitations de son environnement.
Développement du site expérimental de la carrière Morillon-
Corvol de Sandillon (45)**

Directeur de thèse: Michel TREUIL
Co-directeur : Ghislain DE MARSILY

JURY

C. ALLEGRE	Président
M. TREUIL	Directeur
G. DE MARSILY	Co-directeur
E. LEDOUX	Rapporteur
P. TOULHOAT	Rapporteur
M. LEPILLER	Examineur
J. GAILLARDET	Examineur
C. LECHENAULT	Membre invité

UNIVERSITE PARIS 7 – DENIS DIDEROT
UFR Sciences de la Terre

Année 2001

THESE

Pour l'obtention du Diplôme de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS 7
SPECIALITE: Géochimie Fondamentale et Appliquée

Présentée et soutenue publiquement
par

François LE BORGNE

le 25 juin 2001

Titre:

**Réponses hydrogéochimiques de la nappe phréatique du Val
d'Orléans aux sollicitations de son environnement.
Développement du site expérimental de la carrière Morillon-
Corvol de Sandillon (45)**

Directeur de thèse: Michel TREUIL
Co-directeur: Ghislain DE MARSILY

JURY

C. ALLEGRE	Président
M. TREUIL	Directeur
G. DE MARSILY	Co-directeur
E. LEDOUX	Rapporteur
P. TOULHOAT	Rapporteur
M. LEPILLER	Examineur
J. GAILLARDET	Examineur
C. LECHENAULT	Membre invité

Remerciements

"Les projets échouent faute de délibération mais ils réussissent quand il y a de nombreux conseillers."

Proverbe 15:22

En effet, ce travail de longue haleine n'aurait certainement pas pu voir le jour sans les nombreux conseils et encouragements des uns et des autres.

Mes premières pensées vont à ma femme, Claire, qui a été un encouragement permanent tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier le professeur Michel Treuil, de l'Université Paris VI, qui a eu l'idée de cette thèse. Par ses qualités humaines et scientifiques, il a su non seulement diriger ce travail vers son aboutissement, mais également le rendre agréable grâce à son dynamisme, ses encouragements de fin de rédaction, sa bonne humeur et son hospitalité – je n'oublierai jamais la dégustation des marrons chauds à Sandillon.

Je suis également très reconnaissant au professeur Ghislain de Marsily, de l'Université Paris VI, hydrogéologue hors pair qui a co-dirigé cette thèse à partir de fin 1999 en me guidant sur de nouvelles pistes.

C'est ainsi que j'ai pu faire la connaissance de Michel Lepiller, de l'Université d'Orléans, grand maître des karsts auxquels il m'a initié. Merci pour tout le temps consacré, le matériel prêté, et les déjeuners au Flunch.

Je remercie l'entreprise Morillon-Corvol qui a financé en grande partie ce travail en partenariat avec le CNRS. Merci à Christian Béranger et Christian Vallier grâce à qui cette collaboration s'est mise en place. Je remercie Catherine Lechenault qui a repris le flambeau de C. Vallier en septembre 1997, tous les membres de l'équipe Environnement et Foncier de la région Centre (Laurent Beltoise, Joëlle Bardeau,...) ainsi que les ouvriers de la carrière de Sandillon qui n'ont cessé de me rendre de multiples services. Je n'oublierai jamais l'ambiance amicale et solidaire qui règne au sein de cette entreprise.

Toute ma reconnaissance au professeur Jérôme Gaillardet, de l'Université Paris VII, pour m'avoir initié à la technique d'échantillonnage des eaux naturelles ainsi qu'à la chromatographie

ionique avec la collaboration de Mahmed Benbakkar. Merci également pour la relecture et la critique de cette thèse.

Merci au professeur Pierre Toulhoat qui a relu et critiqué ce travail.

Pour les mêmes raisons je remercie le professeur Emmanuel Ledoux, de l'Ecole des Mines de Paris, qui a apporté temps, conseils et matériel, ainsi que l'aide précieuse d'André Raulo.

Je remercie Alain Dubreule (CNRS Garchy) pour son aide dans le montage des sondes de température.

Merci à la Lyonnaise des Eaux d'Orléans qui m'a autorisé l'accès au captage du Theuriet.

Qu'Alain Gaucher, de la DIREN d'Orléans (Service de prévision des crues) reçoive toute ma gratitude pour les cotes de la Loire communiquées régulièrement pendant quatre ans.

Je tiens à remercier Jean-Paul Duraud et Stéphane Lequien, directeurs successifs du Laboratoire Pierre Süe, pour m'avoir accueilli et aidé au sein du laboratoire. Enfin, je remercie l'ensemble du Laboratoire Pierre Süe et plus particulièrement Jean-Louis Joron, homme au cœur serviable et généreux, dont les compétences reconnues en activation neutronique m'ont été très utiles. Merci à Agnès Michel et Georges Meyer dont l'aide m'a été très précieuse dans mes débuts à l'ICP-MS. Je remercie Jim Hoarau pour la conception de l'appareil d'injection de traceur par perforation de piézomètre. Merci également à l'équipe de l'atelier et plus particulièrement à Stéphane Doublet pour la fabrication de cet appareil.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	12
-------------------	----

PREMIERE PARTIE

DESCRIPTION DU SITE DE SANDILLON

CHAPITRE 1 : CADRE REGIONAL DU SITE ETUDIE

1.1. Situation géographique.....	19
1.2. Contexte géologique.....	19
1.2.1. Géologie générale de la formation de Beauce (tertiaire).....	21
1.2.1.1. Conditions de formation et localisation des différentes couches.....	21
1.2.1.2. Lithologie des différents étages de la formation de Beauce	24
1.2.1.3. Formations aquifères de la formation de Beauce	26
1.2.2. Géologie du Val d'Orléans.....	27
1.2.2.1. Le calcaire de Beauce (tertiaire)	30
1.2.2.2. Le Burdigalien (tertiaire)	32
1.2.2.3. Les alluvions (quaternaire)	35
1.2.3. Géologie du site de Sandillon	37
1.2.3.1. Localisation et épaisseur des argiles burdigaliennes	37
1.2.3.2. Epaisseur et karstification du calcaire de Pithiviers	40
1.3. Contexte hydrogéologique	43
1.3.1. La Loire	43
1.3.2. Généralités sur les aquifères du Val d'Orléans	45
1.3.2.1. La nappe du calcaire de Pithiviers	45
1.3.2.2. La nappe alluviale	48
1.3.2.3. Paramètres structuraux.....	50
1.3.3. Etudes hydrogéologiques réalisées dans le Val d'Orléans.....	51
1.3.3.1. Etudes des circulations karstiques	51
1.3.3.1.1. Les débits perdus de la Loire.....	51
1.3.3.1.2. Les traçages artificiels.....	54
1.3.3.1.3. Les études physico-chimiques.....	58
1.3.3.2. Définition d'un pôle géochimique "Loire-système karstique"	63
1.3.3.3. Etudes de la nappe alluviale	65
1.3.4. Hydrogéologie à l'échelle de la carrière de Sandillon	67
1.3.4.1. Localisation des axes karstiques	67
1.3.4.2. Localisation des argiles burdigaliennes	69
1.3.4.3. Position de la Loire et gradient hydraulique.....	69
1.4. Bilan sur le cadre hydrogéologique de la carrière	69

CHAPITRE 2 : LA CARRIERE DE GRANULATS ET SES ENVIRONS : L'EAU ET LES ALLUVIONS

2.1. Historique de la présence de l'entreprise Morillon Corvol dans le méandre de Bou.....	73
2.2. L'exploitation de granulats du site de Bagneaux.....	74
2.2.1. L'extraction des alluvions.....	74
2.2.2. Le système de lavage du tout-venant	76
2.2.3. La remise en état des terrains après l'extraction.....	78
2.2.4. Quelques chiffres sur l'activité de la carrière.....	78
2.3. Les exploitations agricoles avoisinantes	79
2.3.1. Les épandages	79
2.3.1.1. Les engrais azotés	79
2.3.1.2. Les engrais potassiques.....	80
2.3.1.3. Les engrais phosphatés	80
2.3.1.4. Autres types d'engrais	81
2.3.1.5. Herbicides, insecticides, fongicides.....	81
2.3.1.6. Quantités d'engrais NPK déversés sur la ferme de Bagneaux	82
2.3.1.7. Impact des engrais sur les nappes alluviale et calcaire.....	82
2.3.2. L'irrigation	93
2.3.3. Le drainage des eaux de ruissellement.....	93
2.4. Impact de la carrière de Sandillon sur la nappe alluviale	95
2.4.1. Impacts hydrodynamiques.....	95
2.4.1.1. Généralités	95
2.4.1.2. L'étude d'impact piézométrique de la carrière de Sandillon	97
2.4.2. Impacts physico-chimiques.....	102
2.4.2.1. Généralités sur les modifications physico-chimiques.....	102
2.4.2.2. Cas de la carrière de Sandillon	106
2.5. Approfondissement de la lithologie au niveau de la carrière.....	111
2.5.1. Les sondages de reconnaissance du gisement.....	111
2.5.1.1. Des alluvions très hétérogènes.....	112
2.5.1.2. Les argiles sous-alluviales	117
2.5.1.3. L'irrégularité du toit calcaire	118
2.5.2. Les analyses granulométriques.....	120
2.5.2.1. Les analyses des sondages d'Août 1991	120
2.5.2.2. L'analyse du tout-venant récolté sur le front d'exploitation	123
2.5.3. Analyse des argiles par diffraction de rayons X	124
2.5.3.1. Nature des échantillons analysés	124
2.5.3.2. Analyse des argiles de chaque échantillon	124

2.5.4. Composition géochimique des sédiments	126
2.5.4.1. Le thorium choisi comme indice des quantités de fines	126
2.5.4.2. Composition en éléments traces dans l'ensemble des sédiments	128
2.6. Bilan sur les observations réalisées à l'échelle de la carrière	134

DEUXIEME PARTIE

STRATEGIE D'APPROCHE ET METHODES EXPERIMENTALES

CHAPITRE 3 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL D'OBSERVATION DES AQUIFERES

3.1. Stratégie d'implantation du réseau piézométrique alluvionnaire	137
3.1.1. Les points d'observation de la nappe alluviale présents initialement sur le site de la carrière.....	138
3.1.2. Installation du réseau d'observation de la nappe alluviale.....	140
3.1.2.1. Justification de l'emplacement du réseau piézométrique alluvionnaire	140
3.1.2.2. Forme du réseau.....	142
3.1.2.3. Taille et maillage du réseau	142
3.1.3. Extension du réseau alluvionnaire au Nord.....	143
3.1.3.1. Densification du réseau implanté en février 97	143
3.1.3.2. Expérimentation du piézomètre à double crépine	145
3.1.4. La fin tragique des piézomètres alluvionnaires.....	147
3.1.5. Installation du réseau d'observation de la nappe du calcaire de Pithiviers... ..	148
3.1.5.1. Sur la carrière.....	148
3.1.5.2. Points d'observation à longue distance.....	150
3.1.5.3. Autres points d'observation.....	151
3.1.6. Adaptation du réseau à l'étude des échanges nappe calcaire-nappe alluviale.....	153
3.1.6.1. Des alluvions aux calcaires.....	153
3.1.6.2. Des calcaires aux alluvions.....	154
3.2. Mesure des paramètres physiques utiles	158
3.2.1. Perméabilités	158
3.2.2. Température	160
3.2.3. Profils de débits verticaux	163
3.2.4. Piézométrie.....	164
3.2.5. Calcul des cotes de la Loire à Sandillon	166
3.2.5.1. Estimation de la cote de la Loire à Sandillon en considérant fixe la pente de la Loire entre Sandillon et Orléans	166

3.2.5.2. Modèle de variation linéaire de la cote de la Loire à Orléans en fonction de la cote à Gien	167
3.2.5.3. Modèle de variation polynomiale de la cote de la Loire à Orléans en fonction de la cote à Gien	169
3.2.5.4. Application du modèle au calcul de la cote de la Loire à Sandillon.....	172
3.2.6. L'analyse corrélatoire appliquée aux cotes de Loire et de la nappe.....	176
3.2.6.1. Théorie.....	176
3.2.6.2. Application aux cotes de la Loire et de la nappe	177
3.2.7. Données météorologiques	179
3.3. Méthodes d'analyses géochimiques.....	180
3.3.1. Les échantillons d'eau.....	180
3.3.1.1. Méthodes de prélèvement et conditionnement	180
3.3.1.2. Analyse des éléments majeurs	182
3.3.1.2.1. La chromatographie ionique.....	182
3.3.1.2.2. Le pH.....	184
3.3.1.2.3. L'alcalinité	184
3.3.1.2.4. Interprétation des teneurs en éléments majeurs mesurées dans les piézomètres	186
3.3.1.3. Analyse des lanthanides en solution	
3.3.1.3.1. L'analyse par activation neutronique	187
3.3.1.3.2. L'analyse par ICP-MS.....	188
3.3.1.3.3. Calcul de l'erreur sur une analyse par ICP-MS.....	194
3.3.2. Les sédiments	195
3.3.2.1. Nature des échantillons et modes de prélèvement.....	197
3.3.2.2. Préparation des échantillons	197
3.3.2.3. Analyse des sédiments par activation neutronique.....	198

CHAPITRE 4 : LES METHODES DE TRACAGE

4.1. Les traceurs classiques	203
4.2. Analyse des traceurs fluorescents	209
4.2.1. Le principe de fluorescence.....	209
4.2.2. Appareillage de mesure de fluorescence.....	210
4.3. L'apport des complexes EDTA de lanthanides	211
4.3.1. Les lanthanides dans les eaux naturelles.....	211
4.3.2. Les lanthanides utilisés comme traceurs artificiels.....	212
4.3.3. Rappels sur la chimie des complexes de lanthanides en solution	215
4.3.4. Préparation des traceurs au laboratoire	220
4.3.5. Interférence des lanthanides avec les traceurs fluorescents	221

4.4. Interprétation des expériences de traçage en milieu karstique	223
4.4.1. La courbe de restitution C(t)	225
4.4.2. Les flux de traceur	225
4.4.3. La distribution des temps de séjour (DTS).....	226

CHAPITRE 5 : EXPERIENCES D'ADSORPTION ET DE DESORPTION DES TRACEURS EN BATCH

5.1. Cinétique d'adsorption	231
5.1.1. Solutions en équilibre avec les sédiments.....	233
5.1.2. Préparation des traceurs	234
5.1.3. Déroulement des expériences d'adsorption.....	235
5.1.4. Les solutions témoins	238
5.1.5. Le pH.....	240
5.1.6. Variations des teneurs en lanthanides dans les solutions en équilibre avec les sédiments	242
5.1.7. Bilan des expériences de cinétique d'adsorption	245
5.2. Réversibilité de l'adsorption.....	247
5.3. Désorption des lanthanides naturels.....	254
5.3.1. Lavage des sédiments à l'EDTA	254
5.3.2. Lavage des sédiments au CaCl ₂ 0,5 mol/L.....	255

TROISIEME PARTIE

COMPREHENSION DES MECANISMES DE TRANSFERT DES ESPECES CHIMIQUES DANS LE SYSTEME LOIRE/NAPPE ALLUVIALE/NAPPE CALCAIRE A PARTIR DE L'OBSERVATOIRE DE SANDILLON

CHAPITRE 6 : SUIVIS PIEZOMETRIQUES ET ETUDE HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE DE SANDILLON

6.1. Caractéristiques générales des variations piézométriques de la nappe....	261
6.1.1. Une piézométrie contrôlée par la Loire.....	261
6.1.2. Différences de cotes entre la nappe alluviale et la nappe calcaire	265
6.2. Les influences mineures sur la piézométrie	268
6.2.1. Les pompages de la carrière.....	268
6.2.2. Les précipitations	271
6.2.3. La pression atmosphérique.....	276
6.2.4. Le lac d'exploitation	278

6.3. Réponses différentielles de la nappe aux fluctuations de la Loire.....	282
6.3.1. Etude des réponses différentielles à l'échelle du kilomètre	282
6.3.1.1. Analyses des corrélations croisées Loire-nappe	282
6.3.1.2. Comparaison des chroniques des cotes de la Loire et de la nappe ...	287
6.3.1.3. Cartes piézométriques à l'échelle de la carrière	290
6.3.2. Etude des réponses différentielles à l'échelle de la centaine de mètres	293
6.4. Bilan sur l'étude hydrodynamique de la nappe.....	298

CHAPITRE 7 : MIGRATIONS DIFFERENTIELLES D'ESPECES CHIMIQUES DANS LA NAPPE ALLUVIALE

7.1. Un milieu à forte variabilité spatiale et temporelle.....	301
7.1.1. Observations géochimiques	301
7.1.1.1. Hétérogénéités spatiales des teneurs naturelles	302
7.1.1.2. Evolution des teneurs naturelles en fonction du régime hydrologique.....	308
7.1.1.3. Etude des mélanges avec les eaux du système « Loire-axes karstiques » au niveau du piézomètre I	311
7.1.2. Observation des profils de température.....	314
7.2. Sondage géochimique de la nappe alluviale à l'aide des complexes EDTA de lanthanides	319
7.2.1. Déroulement du traçage du 17/3/97	319
7.2.2. Interrogations sur le(s) chemin(s) emprunté(s) par les traceurs.....	320
7.2.2.1. Existence de chenaux à forte perméabilité	329
7.2.2.2. Existence de gradients hydrauliques importants et momentanés	330
7.2.2.3. Passage des traceurs par le calcaire	332
7.2.3. Adsorption d'une partie des traceurs dans le puits d'injection	335
7.2.4. Evolution du rapport Dy/Sm	341
7.2.5. Confirmation expérimentale du passage des traceurs des alluvions vers le calcaire	346
7.2.5.1. Traçage à l'uranine	346
7.2.5.2. Traçage aux complexes EDTA de lanthanides	349
7.2.5.2.1. Déroulement du traçage	349
7.2.5.2.2. Comparaison des traçages à l'uranine et aux lanthanides	353
7.2.5.2.3. Recherche des traceurs en CB4 et CB5.....	355
7.2.5.2.4. Etude des rapports Yb/Tb, Yb/Sm et Tb/Sm.....	357
7.2.5.3. Bilan des traçages en Pf1-Pf2	358
7.2.6. Remobilisation des terres rares naturelles.....	358

7.3. Interprétation des observations in situ par les expériences en batch	363
7.3.1. Adsorption sur les alluvions.....	363
7.3.1.1. Résultats.....	363
7.3.1.2. Interprétation de la chute des teneurs en lanthane dans la solution témoin TEN.....	365
7.3.1.3. Interprétation de la cinétique d'adsorption des traceurs sur les alluvions.....	367
7.3.1.4. Evolution du rapport Dy/Sm.....	368
7.3.1.5. Interprétation des observations de terrain.....	368
7.3.2. Fixation sur le calcaire	370
7.3.2.1. Résultats.....	370
7.3.2.2. Interprétation.....	370
7.3.2.3. Evolution du rapport Dy/Sm.....	374
7.3.2.4. Calcul du produit de solubilité des carbonates dans le piézomètre Pfl	374
7.3.3. Bilan sur les expériences d'adsorption.....	375
7.3.4. Désorption des lanthanides naturels.....	375
7.3.4.1. Désorption au CaCl ₂	375
7.3.4.2. Désorption à l'EDTA et par acidification	377
7.3.5. Etude de la réversibilité de l'adsorption des complexes EDTA de lanthanides	382
7.4. Implication des colloïdes dans le transport des lanthanides naturels et des lanthanides injectés sous forme de complexes EDTA.....	384
7.4.1. Distribution des lanthanides dans la nappe en l'absence de ligand complexant fort.....	385
7.4.2. Fractionnement des lanthanides dans la nappe en présence d'un ligand complexant fort.....	391
7.5. Bilan sur les migrations différentielles des éléments chimiques dans la nappe des alluvions	392

**CHAPITRE 8 : ETUDE DES MIGRATIONS DIFFERENTIELLES
D'ESPECES CHIMIQUES DANS LA NAPPE DU
CALCAIRE DE PITHIVIERS**

8.1. Recherche des axes de circulation karstique.....	395
8.1.1. Répartition des éléments majeurs dans la nappe du calcaire	395
8.1.2. Diagraphies.....	400
8.1.2.1. Les profils de débits verticaux.....	400
8.1.2.2. Les logs de température	402
8.1.2.3. Les logs de pH	409

8.1.2.4. Les logs d'oxygène dissous	411
8.1.2.5. Les logs d'éléments majeurs dans le piézomètre CA1	413
8.2. Traçages des circulations dans la nappe du calcaire	414
8.2.1. Traçages aux colorants.....	414
8.2.1.1. Déroulement des traçages	414
8.2.1.2. Résultats et interprétation	418
8.2.1.3. Bilan.....	424
8.2.2. Traçages aux lanthanides complexés à l'EDTA	427
8.2.2.1. Restitution des traceurs au Bouillon et au captage AEP du Theuriet	429
8.2.2.2. Restitution des traceurs au niveau du site de la carrière.....	432
8.2.3. Traçage du lac	436
8.2.3.1. Déroulement du traçage	436
8.2.3.2. Interprétation du traçage du lac Nord	440
8.3. Discussion et interprétation des résultats de traçage dans les chenaux karstiques.....	446
8.3.1. Comparaison avec les traçages réalisés dans le Val d'Orléans et dans d'autres réseaux karstiques de France	446
8.3.2. Comparaison des restitutions obtenues pour les complexes EDTA de lanthanides dans le karst	448
8.3.3. Interprétation des différences de restitution entre les complexes EDTA de lanthanides.....	450
8.3.4. Traçage naturel par les lanthanides de la Loire.....	455
8.3.5. Bilan sur les expériences de traçage aux complexes EDTA de lanthanides.	466

QUATRIEME PARTIE

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

CHAPITRE 9 : BILAN DES PROCESSUS DE MIGRATION D'ELEMENTS DANS LE SYSTEME AQUIFERE DU VAL D'ORLEANS

9.1. Les processus hydrogéologiques.....	471
9.1.1. Discussion du modèle initial	471
a. Les intercommunications de nappes	472
b. La variabilité spatiale des aquifères.....	473
c. La variabilité temporelle	474
9.1.2. Le choix de l'observation sur la modélisation	475
9.1.3. Proposition d'un schéma de fonctionnement hydrodynamique du système aquifère du Val d'Orléans au niveau de Sandillon.....	476

9.2. Les mécanismes chimiques	482
9.3. Les conséquences concernant les impacts à court et à long terme de l'exploitation de la carrière de Sandillon	487
9.3.1. Plan de conduite de l'exploitation et de remblaiement de la carrière prévu initialement par l'entreprise	487
9.3.2. Les conclusions de la thèse sur la conduite de l'exploitation et du remblaiement	488

Liste des annexes (Tome II)

- Annexe 1 : Lithologie au niveau de la carrière de Sandillon. Coupes réalisées à partir des sondages de reconnaissance d'août 1991 et de septembre 1997.
- Annexe 2 : Pertes de la Loire entre Gien et Orléans. Courbes de tarage hauteur-débit.
- Annexe 3 : Eléments majeurs mesurés dans la Loire, aux sources du Bouillon et de la pie par J.L. Chéry sur le cycle hydrologique 1979-1980 et dans la Loire par C. Grosbois de mai 1994 à avril 1996.
- Annexe 4 : Analyses granulométriques des échantillons de tout-venant collectés lors des sondages de reconnaissance d'août 1991.
- Annexe 5 : Caractéristiques des piézomètres installés sur la carrière de Sandillon.
- Annexe 6 : Dates, heures et débits de pompage du captage AEP du Theuriet pendant les expériences de traçage de la nappe calcaire d'avril à juin 2000.
- Annexe 7 : L'appareil d'injection de traceur par perforation de piézomètre.
- Annexe 8 : Mesure des perméabilités par slug test ou essai de débit.
- Annexe 9 : Appareillage de mesure automatique de température dans le piézomètre CA1.
- Annexe 10 : Installation et fonctionnement de l'enregistreur piézométrique Orphimèdes®.
- Annexe 11 : Cotes de la Loire à Gien et Orléans pour les années 1997 à 2000. Calcul de la cote à Sandillon, au niveau de la carrière.
- Annexe 12 : Analyses corrélatoires croisées entre les cotes de la nappe au niveau du site de la carrière de Sandillon et les cotes de la Loire à Gien et Orléans.
- Annexe 13 : Données météorologiques à Orléans.
- Annexe 14 : Préleveurs d'échantillons d'eau utilisés dans les piézomètres de Sandillon.
- Annexe 15 : Calcul de l'erreur sur une analyse par ICP-MS.
- Annexe 16 : Protocole de mise en solution des sédiments de la Loire.
- Annexe 17 : Teneurs en éléments traces dans les sédiments de la Loire analysés par activation neutronique.
- Annexe 18 : Eléments majeurs mesurés dans les eaux de Sandillon de 1996 à 2000.
- Annexe 19 : Relevés et cartes piézométriques réalisés sur le réseau piézométrique calcaire.
- Annexe 20 : Relevés et cartes piézométriques réalisés sur le réseau piézométrique alluvionnaire.
- Annexe 21 : Différences de cote entre les nappes alluviale et calcaire.
- Annexe 22 : Résultats du traçage dans les alluvions (17/3/97).
- Annexe 23 : Résultats des traçages inter nappes en Pf1-Pf2.
- Annexe 24 : Diagraphies réalisées dans les piézomètres calcaires.
- Annexe 25 : Teneurs en lanthanides naturels dans les eaux du Val d'Orléans.
- Annexe 26 : Résultats des traçages dans la nappe du calcaire.
- Annexe 27 : Carte du site expérimental de Sandillon.

INTRODUCTION

En mai 1971, Michel Treuil, alors Maître-Assistant à l'Université d'Orléans, proposait au département d'hydrogéologie du BRGM, dirigé par M. Monition, de mettre au point une méthode de sondage géochimique des nappes aquifères fondée sur le comportement hydrodispersif des lanthanides. Les gradients réguliers des propriétés de cette famille d'éléments fondaient l'espoir d'une résolution des fonctions de transfert et donc de la possibilité d'accéder ainsi aux grandeurs caractéristiques des propriétés du milieu et du couplage entre les lois d'échanges chimiques et de l'hydrodynamique (rapports 74-SGN-345 AME et 75-SGN-418 AME de Septembre 1974). Ce projet fit l'objet d'un contrat accordé par la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique (DGRST) et de la thèse de troisième cycle de Serge Bigot (1977). L'idée fut reprise dans la thèse de Pierre Toulhoat (1987) puis de Joël Chupeau (1991) et exploitée dans les travaux entrepris au Mayet de Montagne sous la responsabilité de François Cornet et en coopération avec Emmanuel Ledoux.

Le premier support expérimental de la thèse de Serge Bigot (1977) était constitué d'un réseau hectométrique de 17 piézomètres implantés dans les alluvions du lit majeur de la Loire sur la commune de Darvoy, à 6 km du site actuel de Sandillon et à 14 km en amont d'Orléans sur la rive gauche du fleuve. Il était complété par les puits de particuliers de la commune de Darvoy, sélectionnés dans une région de 3 km autour du réseau. Les analyses des lanthanides injectés (La, Sm, Eu, Dy) étaient effectuées par activation neutronique suivant un protocole mis au point au Laboratoire Pierre Süe (CEA – Saclay , 91 191 Gif-sur-Yvette). Les conclusions essentielles de ce travail furent les suivantes :

-L'excellente efficacité du protocole expérimental, puisque les courbes de distribution des lanthanides furent obtenues à l'échelle du réseau piézométrique alluvionnaire et les traceurs furent également détectés à longue distance, à 15 mètres de profondeur, dans certains puits des particuliers atteignant la nappe du calcaire de Pithiviers.

-La traduction concrète des gradients de propriétés chimiques des lanthanides par les courbes de distribution obtenues et les taux de restitution contrôlés par les constantes de stabilité des complexes à l'EDTA qui avaient été choisis pour l'injection des traceurs lors de ces expériences.

-L'impossibilité à rendre compte des circulations dans la nappe alluviale en considérant un système homogène. Les restitutions des traceurs, tant à l'échelle du réseau piézométrique qu'à l'échelle des puits de particuliers, s'effectuaient dans la nappe suivant des directions précises soulignant l'existence de chenaux privilégiés de circulation et les communications entre la nappe alluviale et la nappe du calcaire. Dans la nappe des alluvions, les transferts étaient observés à courte distance avec des vitesses relativement faibles (de l'ordre du mètre par heure) alors que dans la nappe du calcaire, le dysprosium dont le complexe EDTA est le plus stable, était transféré à des distances kilométriques impliquant des vitesses de circulation supérieures à 100 m/h.

-Mais aussi notre incapacité à résoudre quantitativement le système d'équations constituées par les courbes de restitution des quatre lanthanides injectés.

Cet échec fut surmonté par Pierre Toulhoat (1987) dans le système plus simple de la fracture artificielle du Mayet de Montagne réalisée par François Cornet. La nécessité d'une détermination des coefficients d'échanges entre solution et phases minérales de l'aquifère suscita la thèse de Joël Chupeau.

Sur le plan international, des travaux semblables à ceux du Mayet de Montagne, ont été effectués récemment dans des fractures granitiques en Suède (Byegard et Al, 1999). La modélisation des transferts des complexes EDTA de lanthanides a pu être réalisée grâce à l'étude de l'adsorption, en laboratoire, des traceurs sur les matériaux solides naturels. L'ensemble de ces travaux montrent que la modélisation et la prévision des transferts d'éléments peut être réalisée dans des systèmes relativement simples, comme des fractures. Cependant, il est évident que toute modélisation de ce type se heurte très souvent à la complexité et l'hétérogénéité des systèmes naturels ainsi qu'aux moyens expérimentaux importants qu'il convient de mettre en œuvre sur le terrain pour atteindre cet objectif. Les nappes alluviales font partie de ces milieux très hétérogènes sur le plan des perméabilités, des phases minérales et de la granulométrie. Chaque système naturel étant différent, les concepteurs de modèles se trouvent souvent dans l'impossibilité de représenter correctement les écoulements naturels sans le concours de mesures très denses sur le terrain. Parmi les études les plus impressionnantes réalisées sur les nappes alluviales, il faut citer le cas de Borden Site, en Ontario, où des traceurs conservatifs ont été suivis pendant trois ans sur un réseau de 337 piézomètres distants de 1 à 4 mètres avec des prélèvements effectués sur la verticale tous les 20 à 30 cm (Mackay et Al., 1986).

L'ouverture de la carrière alluvionnaire de Sandillon, en Avril 1996, allait nous donner l'occasion, avec l'expérience des traçages aux complexes EDTA de lanthanides acquise par le groupe des sciences de la terre du Laboratoire Pierre Süe, d'explorer l'hydrogéochimie d'un tel milieu : la nappe alluviale de la Loire. L'origine de cette étude remonte à 1995 quand la société Morillon Corvol dépose à la mairie de Sandillon (45) le dossier de présentation de l'enquête d'utilité publique pour le développement d'une importante exploitation de sables et graviers dans le lit majeur de la Loire au niveau du méandre de Bou-Sandillon, à 8 km en

amont d'Orléans, sur la rive gauche (figure 1.1). Ce dossier fait apparaître que l'étude d'impact d'une telle exploitation conduite par le BRGM (Chigot et Al., 1994) repose sur un modèle de circulation considérant un milieu alluvial homogène et l'existence d'une séparation imperméable entre nappe alluviale, au sein de laquelle les extractions doivent intervenir, et nappe du calcaire de Beauce sous-jacente. Les expériences antérieures, rappelées ci-dessus, ont clairement établi les limites d'un tel modèle et fondent les objections qui peuvent alors être formulées sans qu'il soit possible de proposer un modèle alternatif crédible. Le principe de précaution, parfaitement compris par la société Morillon-Corvol, s'est traduit par la mise en place d'un programme de recherche à l'initiative de Christian Vallier (Ingénieur Environnement et Foncier) et de Christian Béranger (Directeur du Service Environnement et Foncier de cette société) en accompagnement de l'exploitation. Ce programme permet d'assurer à la fois un contrôle permanent et l'amélioration de nos connaissances des réactions hydrogéochimiques de la nappe phréatique aux sollicitations de son environnement. C'est ce programme de recherche qui fait l'objet de la présente thèse, bénéficiant ainsi des moyens d'observation et d'expérimentation que nous n'aurions pas réussi à mobiliser sans l'excellente coopération ainsi établie entre la société Morillon-Corvol, le CEA, le CNRS, l'IPG et les universités Paris 6 et Paris 7. Il est bon également de souligner que le Laboratoire Pierre Süe disposait alors d'un appareil ICP-MS (Inductively Coupled Plasma with a Mass Spectrometer) qui, associé à l'analyse par activation neutronique, constitue une base analytique unique et indispensable au développement de ce programme reprenant la stratégie de recherche qui a été ici brièvement rappelée.

Nous disposons donc au départ de notre travail, du support théorique fourni par le BRGM, des études hydrogéologiques effectuées à grande échelle par ce même organisme, et des investigations de Darvoy réalisées par Serge Bigot (1977). L'exploitation devant se

développer sur une centaine d'hectares imposait une stratégie d'approche du système conciliant deux échelles d'observation, l'une concernant le Val d'Orléans dans son ensemble (quelques centaines de km²), l'autre concernant l'étendue de circulations a priori rigoureusement observables dans les alluvions (quelques centaines de m²). Le parti fut pris d'étendre progressivement les observations à partir d'un réseau initial de 17 piézomètres localisé en aval du lieu de démarrage de l'exploitation dans la direction supposée des écoulements de la nappe alluviale. Ce premier réseau de piézomètres forés jusqu'au toit du calcaire de Pithiviers avait pour but de vérifier les résultats de Darvoy, à savoir le degré d'hétérogénéité du système, les relations entre nappe alluviale et nappe du calcaire de Pithiviers, les directions d'écoulement, ainsi que les relations entre la Loire et la nappe alluviale. L'observatoire fut ensuite étendu à l'ensemble de l'exploitation afin de rendre compte du comportement hydrodispersif des lanthanides observé à cette échelle dans un modèle capable de prendre en compte les impacts de l'exploitation. Le travail présenté souligne les avancées effectuées dans ce sens mais aussi les difficultés rencontrées pour atteindre un tel objectif, tant il est apparu très vite que le degré d'hétérogénéité et de complexité du système dépassait nos prévisions. Le concours des modèles théoriques était inopérant en l'absence d'une densité et d'une durée d'observation suffisantes ainsi que de mesures particulièrement exigeantes.

Ce document contient quatre parties.

La première partie est consacrée à la description du site. Dans le premier chapitre, une synthèse bibliographique permet de décrire le cadre géologique et hydrogéologique général de la carrière de Sandillon tout en mettant en évidence le manque de connaissances en matière de transfert des éléments en solution dans la nappe alluviale du Val d'Orléans. Le deuxième chapitre présente la carrière et son environnement ainsi que leurs différents impacts sur la

nappe alluviale. Les caractéristiques du gisement alluvionnaire sont précisées dans ce chapitre.

La deuxième partie de cette thèse présente la stratégie d'implantation et d'équipement de l'observatoire piézométrique sur la carrière et les moyens analytiques mis en œuvre au laboratoire (chapitre 3). Cette deuxième partie décrit également les méthodes de traçage employées (chapitre 4), ainsi que la caractérisation en batch, de l'adsorption des complexes EDTA de lanthanides sur les sédiments du site (chapitre 5).

La troisième partie concerne les résultats obtenus sur le terrain pendant ce travail. Le chapitre 6 est dédié à la caractérisation de la piézométrie et de l'hydrodynamique de la nappe. Le chapitre 7 contient une description des hétérogénéités hydrogéochimiques de la nappe alluviale par l'analyse des distributions d'éléments majeurs et la réalisation d'un traçage aux complexes EDTA de lanthanides. Le chapitre 8 contient l'ensemble des expériences réalisées dans la nappe du calcaire de Pithiviers, en particulier les traçages à longue distance.

La quatrième partie de ce mémoire est un chapitre de synthèse et de discussion des résultats obtenus au cours de ce travail. Cette dernière partie contient les conclusions générales de la thèse.

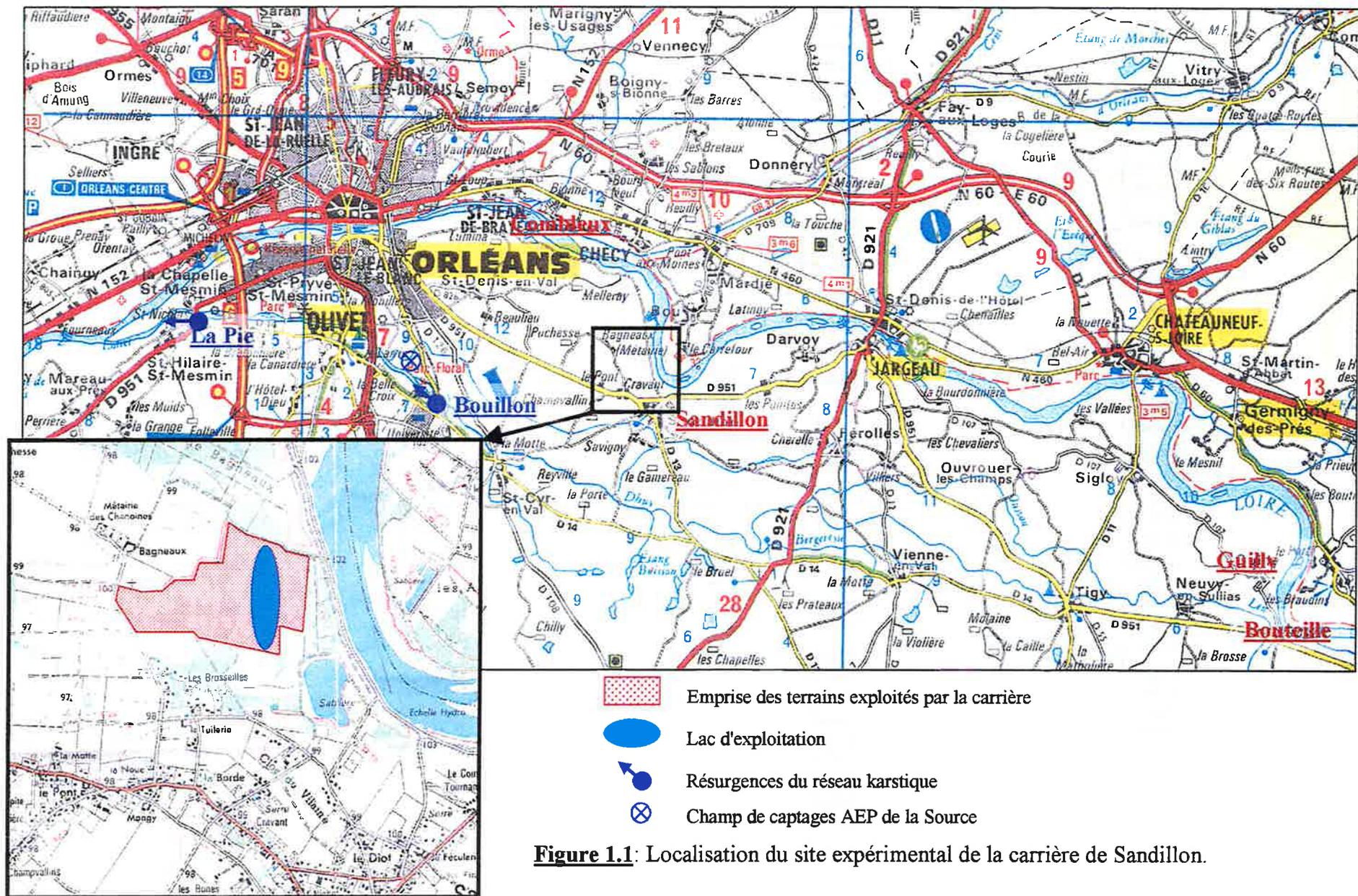
Pour faciliter sa lecture, le lecteur pourra déplier la carte de la carrière de Sandillon, localisant les différents piézomètres du dispositif d'observation, et située à la fin des annexes (annexe 27).

PREMIERE PARTIE

DESCRIPTION DU SITE DE SANDILLON

« L'Eternel ton Dieu va te faire entrer dans un bon pays, pays de cours d'eau, de sources et de nappes souterraines qui jaillissent dans les vallées... »

(Deutéronome 8 :7)



CHAPITRE 1

CADRE REGIONAL DU SITE ETUDIE

1.1. Situation géographique

La carrière est située dans la commune de Sandillon à une dizaine de kilomètres à l'Est et en amont d'Orléans, sur la rive gauche de la Loire, dans le département du Loiret (45). Le domaine d'exploitation de la carrière s'étend sur une superficie de 36 hectares, entre les lieux-dits les Brosseilles et Bagneaux au Nord-Ouest du bourg de Sandillon (fig.1.1). Cette partie du Val de Loire est appelée Val d'Orléans en amont de cette ville.

1.2. Contexte géologique

Les rappels sur la géologie générale de la formation de Beauce sont principalement extraits de l'étude hydrogéologique de Desprez sur le calcaire de Beauce (déc.1967) et d'une étude récente du BRGM intitulée « Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce - Géométrie du réservoir et limites de la nappe de Beauce » (Martin et Al., 1999). Les données géologiques spécifiques au Val d'Orléans et à la région de Sandillon sont extraites de la notice explicative de la carte géologique au 1/50 000 « La Ferté St-Aubin » (Gigout, 1971), de la thèse de J.L.Chéry (1983) et des études hydrogéologiques de Desprez sur le Val d'Orléans (Avril 1967, 1976). Ces données sont complétées par l'interprétation de 78 sondages réalisés dans le Val d'Orléans de 1901 à 1996 et disponibles à la banque du sous-sol du BRGM.

Tableau 1.1: Echelle Stratigraphique Quaternaire - Tertiaire - Secondaire

D'après le "Dictionnaire de Géologie", par A. Foucault et J.F. Raoult, éd. MASSON

Ere Quaternaire

Eres Tertiaire et Secondaire

Âges (années)	CHRONOLOGIE		Glaciations
	Continentale	Marine	
1 000	VERSIILIEN	HOLOCENE	GLACIAIRE POSTAIRE
10 000			WÜRM
50 000	TYRRHENIEN	PLEISTOCENE SUPÉRIEUR	
80 000			SICILIEN
120 000	CALABRIEN	PLEISTOCENE INF	
200 000			GUNZ
300 000	DONNANGUNZ	TERTIAIRE	
350 000			
500 000			
700 000			
1 200 000			
1 800 000			

Âge en m.a.	Ere	Syst. Per.	Sous Syst. Epoque	Étages	Sous-étages et autres dénominations			
1.8	QUATÉNAIRE (Voir Tableau)							
8	CENOZOÏQUE	NEOGENE	PLIOCENE	Plaisancien/Astien	Vilfranchien Inférieur			
10				MIOCENE	SUP	Tablanien=Zancléen	Ruscien	
15					MOY	Messinien	Pontien	Turolien
25			INF	Tortonien	Tortonien	Vindobonien		
37			PALEOGENE	OLIGOCENE	Serravallien		Helvétien	
43					Stampien	Stampien s. str.		Rupélien
49				EOCENE	SUP	Langhien	Ludien	Lattorien
55					MOY	Burdigalien	Marinésien	Biarritzien
65				INF	Yprésien	Auversien	Cuisien	
85			SECONDAIRE = MESOZOÏQUE	CRETACE	PALEOCENE	Thanétien	Sparnacien-Iterdien	Landénien
88	SUP.	SENOBIEN				Montien	Vitrollien	Garrumien
100						Danien		
106	INF.	NEOCOMIEN			Maestrichtien	Rognacien	Gault	
118					Campanien	Béguvien		Urgonien
141					Santonien	Fuvélien		
160					Coniacien	Valdonnien		Purbeckien
176					Turonien	Emschérien		
200		SUP.			MALM	Cénomanien	Angoumien	Lusitanien
215						Albien	Ligérien	
225		TRIASS	JURASSIQUE	MOY.	Aptien	Vraconien	Lusitanien	
230					INF.	LIAS		Barrémien
215				SUP.			TRIAS ALPIN	Hauterivien
225	MOY.				TRIAS GERMANIQUE	Valanginien		Bédoulien
230				INF.		TRIAS ALPIN	Berriasien	
215	SUP.				TRIAS ALPIN		Portlandien	Tithonique/Volgien
225				MOY.		TRIAS ALPIN	Kimméridgien	Virgulien
230	INF.				TRIAS ALPIN		Oxfordien	Ptérocérien
215				SUP.		TRIAS ALPIN	Callovien	Séquanien
225	MOY.				TRIAS ALPIN		Bathonien	Rauracien
230		INF.	TRIAS ALPIN	Bajocien		Argovien		
215	SUP.			TRIAS ALPIN	Aalénien	Oxfordien s.str.		
225		MOY.	TRIAS ALPIN		Toarcien			
230	INF.			TRIAS ALPIN	Domérien	Pliensbachien		
215		SUP.	TRIAS ALPIN		Carixien	Charmouthien		
225	MOY.			TRIAS ALPIN	Sinemurien	Lotharingien		
230		INF.	TRIAS ALPIN		Hattangien	Sinemurien		
215	SUP.			TRIAS ALPIN	Rhétien			
225		MOY.	TRIAS ALPIN		Norien	Rhétien		
230	INF.			TRIAS ALPIN	Carnien			
215		SUP.	TRIAS ALPIN		Ladinien	Keuper		
225	MOY.			TRIAS ALPIN	Anisien=Virglorien	Lettenkohie		
230		INF.	TRIAS ALPIN		Werlénién=Scythien	Muscheikalk		
215	SUP.			TRIAS ALPIN		Buntsandstein		
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				
225		MOY.	TRIAS ALPIN					
230	INF.			TRIAS ALPIN				
215		SUP.	TRIAS ALPIN					
225	MOY.			TRIAS ALPIN				
230		INF.	TRIAS ALPIN					
215	SUP.			TRIAS ALPIN				

Les âges des formations géologiques citées sont présentés sur les échelles stratigraphiques tableaux 1.1 et 1.2.

1.2.1. Géologie générale de la formation de Beauce (tertiaire)

Sur le plan géologique, la plaine alluviale du Val d'Orléans s'insère dans la formation tertiaire de Beauce qui est un ensemble sédimentaire compris entre la base des alluvions et le toit de la craie (dépôt marin du Crétacé).

1.2.1.1. Conditions de formation et localisation des différentes couches

A la fin du Crétacé et au Paléocène, le bassin de Paris est totalement émergé. La craie est alors partiellement érodée et recouverte d'un dépôt d'argiles à silex (éocène détritique). Un bassin subsident se crée sur la basse Normandie, en Ile de France et sur l'ensemble Beauce-Sologne. En Beauce, le dépôt reçoit 230 m de sédiments en son centre, la fosse de Pithiviers.

Le bassin de Beauce est essentiellement lacustre, à sédimentation sporadiquement marquée par trois influences marines sur le nord, au Lutétien, au Ludien-Sannoisien et au Stampien inférieur. Ces influences marines n'atteignent pas le sud du bassin où se situe notre étude.

L'historique du développement de la partie Sud du bassin de Beauce, résumé dans le tableau 1.2, fait apparaître des discontinuités qui correspondent à des épisodes d'émersion sans dépôt mais avec altération probable. Ces discontinuités délimitent trois ensembles sédimentaires successifs classés du plus ancien au plus récent:

- un ensemble éocène (éocène détritique, éocène calcaire)
- un ensemble oligocène (calcaire d'Etampes)
- un ensemble miocène (molasse du Gâtinais, calcaire de Pithiviers, marnes de Blamont, marnes et sables de l'Orléanais, sables et argiles de Sologne).

Formations	Milieu de dépôt	Etages locaux	Age
Sables et argiles de Sologne	Fluvatile	Miocène, <i>Burdigalien</i>	-16 MA
Marnes et sables de l'Orléanais	Fluvio-lacustre	Miocène, <i>Burdigalien</i>	-20 MA ?
Discontinuité	Lacune, formation du réseau fluvial préligérien, surrection du massif central		?
Marnes de Blamont	Lacustre restreint	Miocène, <i>Aquitaniien</i>	
Discontinuité			?
Calcaire de Pithiviers	Lacustre généralisé	Miocène, <i>Aquitaniien</i>	
Molasse du Gâtinais	Lacustre généralisé, apports fluviaux du Sud-Est en Gâtinais	Miocène, <i>Aquitaniien</i>	-23,5 MA
Discontinuité	Lacune	Oligocène, <i>Chattien</i>	-23,5 à -28 MA
Calcaire d'Etampe	Lacustre généralisé	Oligocène, Rupélien, <i>Stampien Supérieur</i>	-28 MA
Discontinuité	Episodes de transgressions marines et de dépôts laguno-marins affectant la partie nord de la formation de Beauce	Oligocène, Rupélien, <i>Stampien Supérieur</i>	-32 ? à -34 MA
Calcaire éocène	Fosse de Pithiviers en liaison avec la mer lutétienne puis lacustre généralisé.	Eocène, Bartonien (<i>Ludien moyen</i>) à Lutétien	-37 MA
Discontinuité	Transgression marine au nord, formation du bassin lacustre au sud	Lutétien	-46 MA
Formation détritique éocène	Fluvatile, paléosol	Paléocène, <i>faciès Sparnacien</i>	-46 à -53 MA
Argile à silex	Paléosol, altérite	Paléocène	
Discontinuité	Continentalisation, érosion, altération	Crétacé terminal à paléocène	-60 à -70 MA
Craie	Marin	Crétacé supérieur, Turonien à Sénonien	

Tableau 1.2 : Chronologie stratigraphique des dépôts sédimentaires de la partie sud de la formation de Beauce (extrait du rapport BRGM R 40571, Martin et Al., 1999)

Dans notre travail, nous nous intéressons plus particulièrement aux deux derniers ensembles de la formation de Beauce, c'est-à-dire l'oligocène et le miocène.

Le terme "calcaire de Beauce" regroupe le calcaire d'Etampe, la molasse du Gâtinais, le calcaire de Pithiviers et les marnes de Blamont.

La formation burdigalienne (Orléanais-Sologne) correspond à des dépôts détritiques grossiers issus probablement de coulées de boues venant du massif central (Desprez, Avril 1967). Elle réunit les marnes et sables de l'Orléanais avec les sables et argiles de Sologne.

-les marnes et sables de l'Orléanais se sont mis en place après une phase d'érosion de l'Aquitainien. Ces dépôts ont comblé les inégalités du relief avant de subir une phase d'érosion fluviale au quaternaire.

-la formation des sables et argiles de Sologne atteint son épaisseur maximale au sud du Val d'Orléans, vers la Ferté Saint-Aubin (fig.1.2), soit 45 à 55 mètres de puissance. Cette formation va en se biseautant vers le Nord. Ces terrains constituent le sous-sol de la Sologne et de la forêt d'Orléans.

Une coupe géologique NO-SE extraite du rapport BRGM intitulé « Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce - Géométrie du réservoir et limites de la nappe de Beauce » (Martin et Al., 1999), est reproduite figure 1.3. Elle concerne la partie Sud du plateau de Beauce située au Nord de la Loire. Cette coupe met particulièrement en évidence la cassure subie par la formation de Beauce au passage de la faille de Sennely située légèrement à l'Ouest de Châteauneuf (fig.1.2). Les glissements le long de cette faille, qui existait avant la formation du bassin de Beauce, ont continué pendant la sédimentation, laissant une marche bien visible sur la coupe géologique. A l'Est de la faille et en amont de Châteauneuf, la puissance du calcaire de Pithiviers diminue parallèlement à l'épaississement de la molasse du Gâtinais dont la puissance est maximale (30-40 mètres) au

Nord-Est d'Ouzouer-sur-Loire (fig.1.3). A l'Ouest de la faille, la molasse se réduit à quelques mètres au point que les cartes n'en font généralement pas état. Dans ce cas, les calcaires de Beauce sont souvent traités de façon indivise (calcaire d'Etampe+calcaire de Pithiviers).

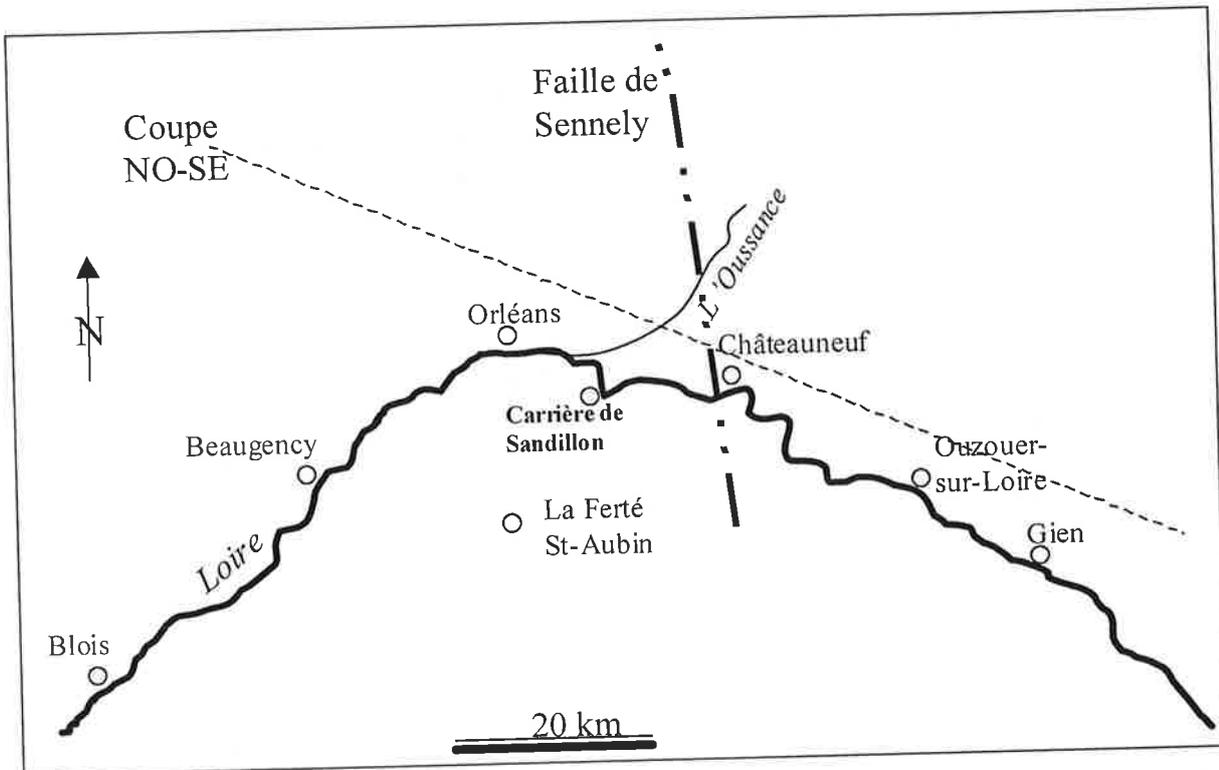


Figure 1.2 : Localisation de la coupe géologique Nord-Est – Sud-Est de la formation de Beauce sur la rive droite de la Loire (fig.1.3).

1.2.1.2. Lithologie des différents étages de la formation de Beauce

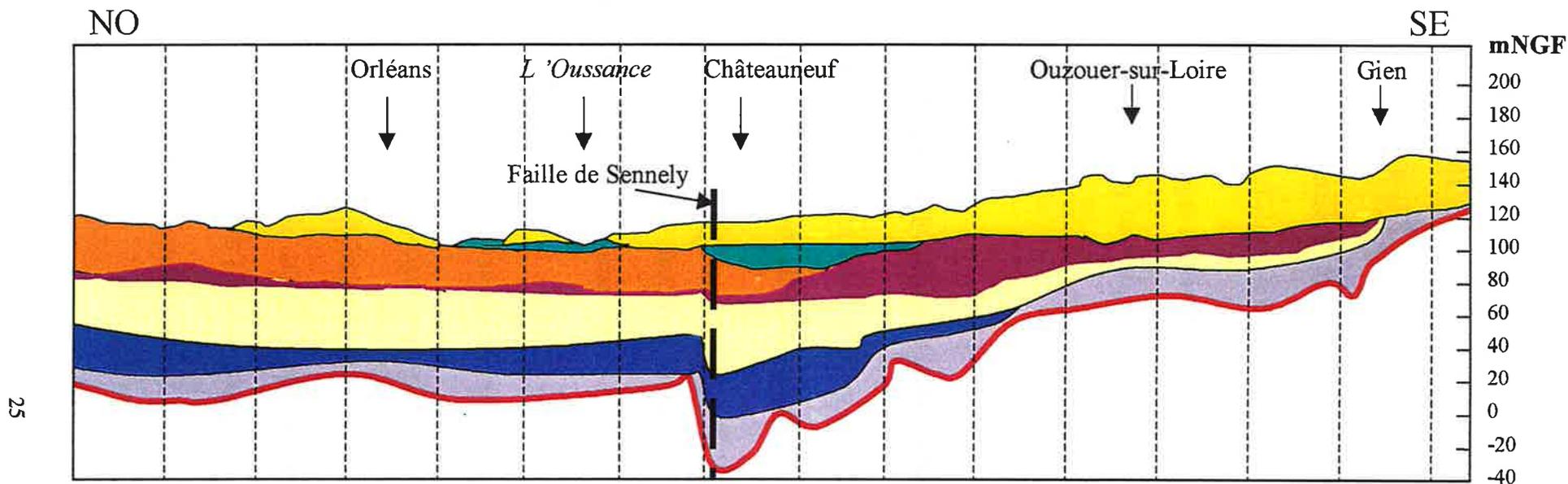
Eocène détritique : faciès d'altérites et de dépôts fluviatiles à dominante argileuse, sableuse par endroit.

Calcaire éocène : calcaire dominant comprenant quelques niveaux marneux.

Calcaire d'Etampes : La base de cette formation montre très souvent un niveau argilo-marneux de 1 à 2 mètres d'épaisseur. Ce niveau imperméable, peu épais, peut être considéré comme une barrière semi-imperméable. Au-dessus se développent différents faciès calcaires : calcaires durs, calcaires crayeux, calcaires argileux, calcaires meulièrement et marnes.

Figure 1.3 : Coupe géologique Nord-Ouest - Sud-Est de la Beauce (NO-SE sur figure 1.2)

La coupe est extraite du rapport BRGM R40571 « Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce » (Martin, Giot et Le Nindre, 1999)



Légende

- | | | | |
|---|---|---|--------------------|
|  | Marnes et sables de l'Orléanais-Sologne |  | Calcaire d'Etampes |
|  | Marnes de Blamont |  | Calcaire éocène |
|  | Calcaire de Pithiviers |  | Eocène détritique |
|  | Molasse du Gâtinais |  | Toit de la craie |

Molasse du Gâtinais : faciès d'argile et de marne verte relativement constant sur la formation de Beauce.

Calcaire de Pithiviers : Formation constituée de calcaires francs plus ou moins meulés, subissant une importante dissolution et fracturation.

Marnes de Blamont : Ce niveau est décrit comme une alternance d'argile et de calcaire marneux. Son enrichissement en calcaire rend sa détection très délicate.

Formation détritique de l'Orléanais-Sologne : dépôts fluviatiles argilo-sableux. Les marnes de l'Orléanais correspondent à des argiles vertes, compactes, parfois graveleuses et généralement accompagnées de marnes blanches (Desprez, Avril 1967).

1.2.1.3. Formations aquifères de la formation de Beauce

Dans la région de l'Oussance (fig.1.2) qui correspond à la partie du bassin de Beauce située au Nord de Sandillon, l'épaisseur de la formation de Beauce est d'environ 90 mètres.

Les niveaux imperméables sont constitués par:

- l'éocène détritique à la base (environ 15 mètres d'épaisseur),
- la molasse du Gâtinais dont la puissance est assez faible en aval de Châteauneuf (quelques mètres),
- les argiles et sables de l'Orléanais-Sologne au toit.

Etant données les faibles teneurs en matériaux argileux des marnes de Blamont, il semble bien que ce niveau soit seulement "semi-perméable" mais ne constitue pas une barrière étanche rendant la nappe du calcaire de Pithiviers captive. De plus, sauf dans la région de Guilly-Châteauneuf où sa puissance peut atteindre 9 mètres (tableau 1.2 et fig.1.3), ce niveau est généralement peu épais au point qu'il est souvent confondu avec les couches supérieures du calcaire de Pithiviers.

La formation aquifère de la partie superficielle du calcaire de Beauce est donc le calcaire de Pithiviers reposant sur la molasse imperméable du Gâtinais. La présence d'un niveau imperméable (formation burdigalienne) à son toit rend la nappe du calcaire de Pithiviers localement captive. Les calcaires d'Etampes et les calcaires Eocènes constituent les deux autres aquifères de la formation de Beauce.

1.2.2. Géologie du Val d'Orléans

Le terme « Val d'Orléans » désigne la plaine alluviale de la Loire, dans la partie septentrionale de son cours. Cet élargissement du lit majeur de la Loire s'étend sur une longueur de 37 km, depuis le hameau de Bouteille à l'Est, jusqu'à la confluence de la Loire et du Loiret à l'Ouest. D'une largeur de 2 à 8km, le Val d'Orléans est limité au Nord par la bordure du plateau beauceron et au Sud par le coteau solognot. La boucle de Guilly sépare le Val d'Orléans du Val de Sully à l'Est.

Il est très probable que le Val d'Orléans se soit formé lors de la dernière glaciation (Würm) par l'enfoncement de la Loire lié à l'abaissement du niveau de la mer. Cet enfoncement aurait entraîné l'érosion de la formation burdigalienne (fig.1.4) et d'une partie du calcaire de Pithiviers qui affleure à l'Ouest de Châteauneuf, au passage de la faille de Sennely.

L'objet de ce paragraphe est de préciser la localisation, à l'échelle du Val d'Orléans, des couches supérieures de la formation de Beauce sur lesquelles reposent les alluvions de la Loire. En effet, cette information est précieuse puisqu'elle permet de délimiter les différents aquifères et les éventuelles communications entre aquifères.

Tableau 1.3: Profondeurs des différents étages de la formation de Beauce dans le Val d'Orléans.

La majorité des forages répertoriés dans la Banque du Sous-Sol n'atteignent pas la molasse du Gâtinais. Seuls les sondages atteignant ce substratum sont reportés dans ce tableau. Ils correspondent en général aux captages d'alimentation en eau potable (AEP). Pour chaque forage, la première ligne se lit en profondeur (m) et la deuxième, en italique, se lit en altitude (mNGF). La limite inférieure de la dernière formation traversée ne donne pas nécessairement l'épaisseur de cette formation sauf lorsque la profondeur du forage est supérieure à la limite indiquée dans le tableau.

Commune	Numéro National	Fin de travaux	X (m) Lambert	Y(m) Lambert	Z (mNGF)	All.	Burd.	Marne Blamont	Calcaire Pithiv.	Molasse Gâtinais	Calcaire Etampe	Calcaire Eocène	Eocène détr.	Fond (m)
St-Cyr-en-Val	03982X0440/ F4AEP	22/05/90	572650	2313270	106	0-17 <i>106-89</i>	17-23 <i>89-83</i>	23-29 <i>83-77</i>	29-42 <i>77-64</i>	42-55 <i>64-51</i>	55-82 <i>51-24</i>	82-85 <i>24-21</i>		85
	03982X0442/ F1AEP	05/10/90	572700	2312690	112	0-17 <i>112-95</i>	17-25 <i>95-87</i>	25-31 <i>87-81</i>	31-52 <i>81-60</i>	52-54 <i>60-58</i>	54-93 <i>58-19</i>	93-95 <i>19-17</i>		95
	03983X0267/ PZ3	24/10/89	573270	2311660	113	0-11 <i>113-102</i>	11-24 <i>102-89</i>	24-28 <i>89-85</i>	28-51 <i>85-62</i>	51-57 <i>62-56</i>	57-72 <i>56-41</i>			72
Bou	03983X0001/ FAEP	01/06/47	578320	2319180	99	0-9 <i>99-90</i>			9-35 <i>90-64</i>	35-39 <i>64-60</i>	39-54 <i>60-44</i>			54
Sandillon	03983X0004/ FAEP	01/09/47	577720	2315800	98	0-4 <i>98-94</i>	4,5-5 <i>93,5-93</i>		5-30? <i>93-68?</i>	30?-32? <i>68?-66?</i>	32?-83 <i>66?-15</i>			83
Férolles	03984X0004/ FAEP	01/02/60	583970	2315170	102	0-10 <i>102-92</i>			10-27 <i>92-75</i>	27-30 <i>75-72</i>	30-59 <i>72-43</i>			59
	03984X0281/ F	01/04/72	582220	2312890	102	0-7 <i>102-95</i>	7-17 <i>95-85</i>		17-42 <i>85-60</i>	42-50 <i>60-52</i>				50
Darvoy	03984X0003/ FAEP	05/06/48	582220	2317800	105	0-8 <i>105-97</i>			8-27 <i>97-78</i>	27-33 <i>78-72</i>	33-78 <i>72-27</i>			78
Jargeau	03984X0007/ FAEP	01/05/37	584110	2318100	103	0-10 <i>103-93</i>			10-25 <i>93-78</i>	25-30 <i>78-73</i>	30-70 <i>73-33</i>			70
	03984X0400/ F	04/11/94	583330	2318350	102	0-8 <i>102-94</i>		8-9 <i>94-93</i>	9-25 <i>93-77</i>	25-26 <i>77-75</i>				26
St-Denis-de-l'Hôtel	03638X0203/ F	11/02/92	584675	2320480	117	0-11 <i>117-106</i>		11-15 <i>106-102</i>	15-36 <i>102-81</i>	36-42 <i>81-75</i>	42-68 <i>75-49</i>	68-75 <i>49-42</i>		75
	03645X0079/ F	30/05/70	586700	2322725	118		0-13 <i>118-105</i>		13-41 <i>105-77</i>	41-45 <i>77-73</i>				45
	03984X0285/ F	01/02/72	584110	2319200	115	0-7 <i>115-108</i>	7-9 <i>108-106</i>		9-41 <i>106-74</i>	41-42 <i>74-73</i>				42
Guilly	03992X0015/ SY101	27/05/63	595350	2312650	111	0-14 <i>111-97</i>	14-36 <i>97-75</i>		36-? <i>75-?</i>	? <i>?</i>	?-66 <i>?-45</i>	66-? <i>45-?</i>		560
	03992X0201/ FAEP	01/09/68	593970	2311260	109	0-8 <i>109-101</i>	8-13 <i>101-96</i>		13-32 <i>96-77</i>	32-36 <i>77-73</i>	36-68 <i>73-41</i>	68-76 <i>41-33</i>	76-79 <i>33-30</i>	80
	03996X0045/ F	04/11/90	595400	2309500	115	0-9 <i>106</i>	9-34 <i>106-81</i>	34-43 <i>81-72</i>	43-58 <i>72-57</i>	58-60 <i>57-55</i>				60

All.: Alluvions - Burd.: Burdigalien - détr.: détritique

Les références bibliographiques n'étant pas assez précises sur le sujet, 78 sondages de la Banque du Sous-Sol (BSS) rattachés aux communes de Saint-Cyr-en-Val, Sandillon, Bou, Férolles, Darvoy, Jargeau, Saint-Denis-de-l'hôtel et Guilly (dont 64 pour les communes de Sandillon et de Bou) ont été dépouillés dans le cadre de ce travail.

Rares sont les sondages qui atteignent et dépassent le niveau de la molasse du Gâtinais. Il s'agit généralement de forages d'alimentation en eau potable (AEP).

Par ailleurs, il est curieux de constater que la terminologie et la précision adoptées dans la description des faciès rencontrés par sondage dans le Val d'Orléans change à partir de 1983. Ces subtilités sont précisées le cas échéant pour chaque étage.

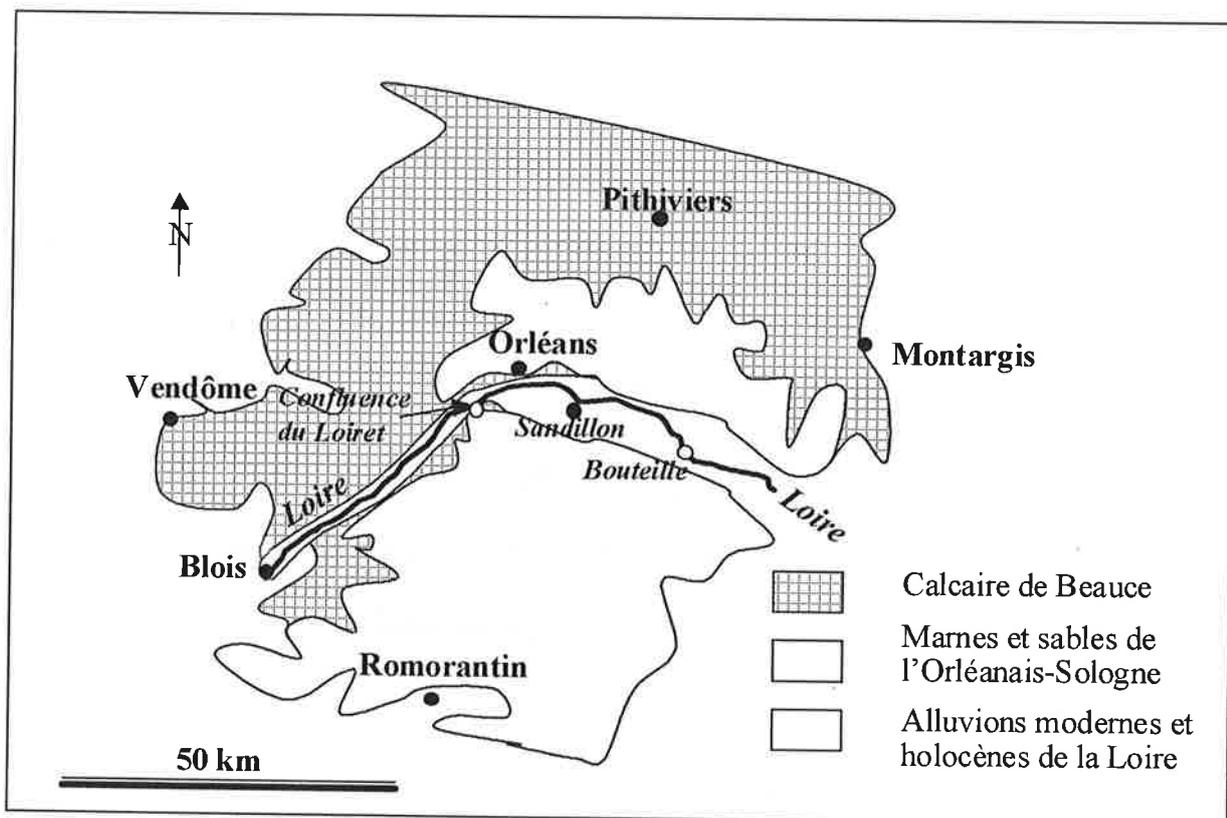


Figure 1.4: Zones d'affleurement des formations géologiques dominantes du bassin de la Loire en région centre (*Extrait de la Carte Géologique de la France à 1/1 000 000 - 6ème édition, BRGM*).

1.2.2.1. Le calcaire de Beauce (tertiaire)

Dans l'étude du BRGM, « Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce» (Martin et Al., 1999), le terme "calcaire de Beauce" englobe le Stampien Supérieur (Calcaire d'Etampes) et l'Aquitaniens (molasse du Gâtinais, Calcaire de Pithiviers et Marnes de Blamont).

Avant 1983, les marnes de Blamont ne sont pas identifiées dans les sondages (tableau 1.3). Cependant, un niveau argilo-marneux gris ou couleur crème est souvent présent sous les alluvions ou sous les argiles burdigaliennes. Ce niveau parfois appelé "calcaire de Beauce sous-burdigalien" ou "Aquitaniens Supérieur" correspond très certainement aux marnes de Blamont. A partir de 1983, le terme "marnes de Blamont" apparaît pour décrire un niveau de marne grise présent par endroit au toit du calcaire de Pithiviers. L'épaisseur de ce niveau atteint parfois 10 mètres dans le Val (données de la BSS). Cependant, une telle épaisseur est étonnante par rapport aux 0,6-2 mètres d'épaisseurs rencontrées sur la rive droite de la Loire au nord d'Orléans (Martin et Al.,1999). Il est donc préférable de se référer aux sondages antérieurs à 1983.

Les zones d'affleurement du calcaire de Pithiviers dans le Val d'Orléans sont peu nombreuses. On le trouve en bordure sud du Val, depuis St-Cyr-en-Val vers St-Hilaire St-Mesmin (fig.1.5) ainsi que sur la rive droite de la Loire où il constitue le plateau de Beauce. Son épaisseur dans le Val varie entre 15 et 26 mètres (probablement 25 mètres au forage AEP Sandillon).

Comme les marnes de Blamont, la molasse du Gâtinais n'est pas non plus clairement identifiée dans tous les sondages qui atteignent sa profondeur théorique. Son toit est situé à une altitude plus élevée dans la région de Châteauneuf (entre 77 et 81 mNGF).

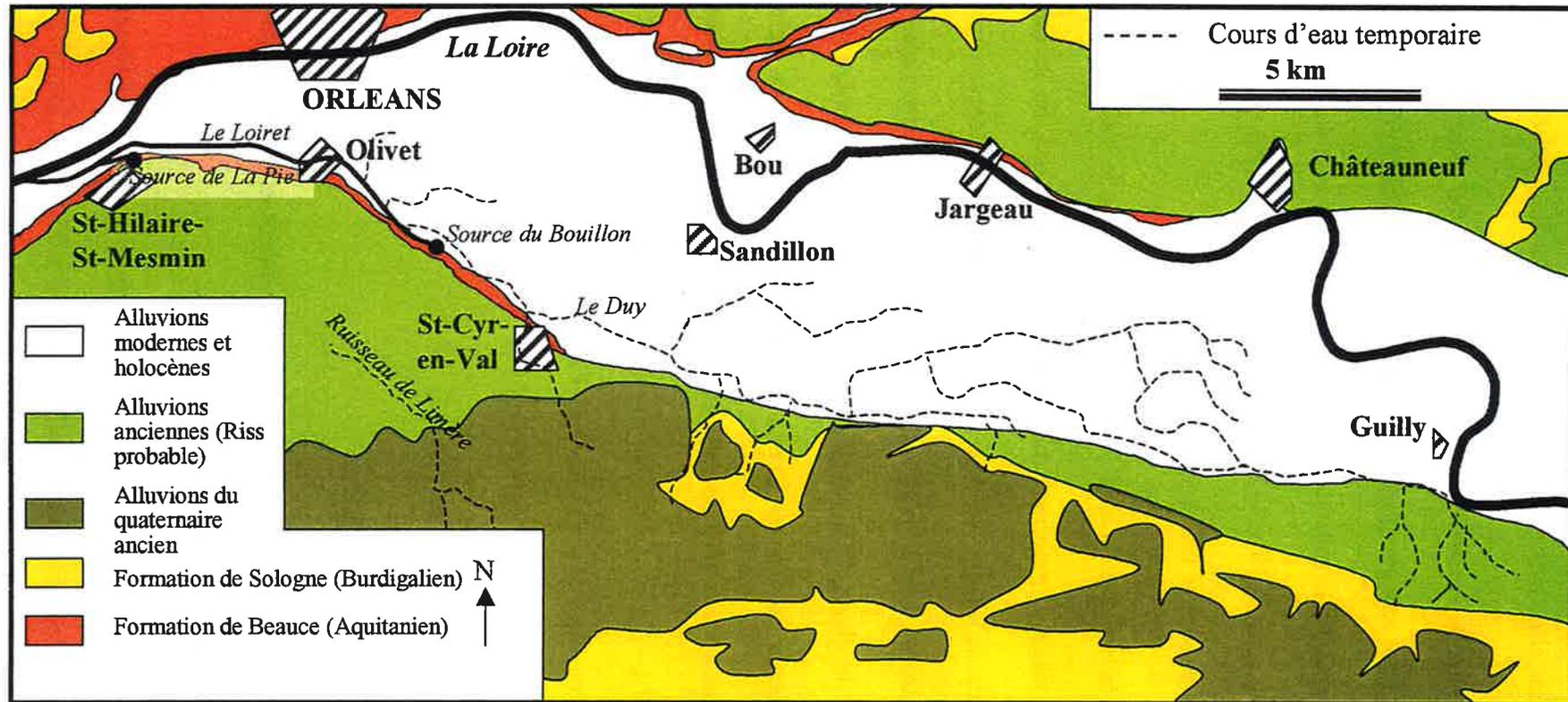


Figure 1.5: Carte géologique du Val d'Orléans (extraite des cartes géologiques au 1/50 000 d'Orléans, la Ferté Saint-Aubin et Châteauneuf-sur-Loire)

Son toit atteint 75 m à Férolles, et entre 60 et 64 mNGF à Bou et St Cyr –en-Val. Au niveau du forage AEP de Sandillon, la molasse n'est pas identifiée mais elle pourrait correspondre au niveau de marne situé entre 30 et 32 mètres de profondeur (66-68 mNGF).

On dispose de relativement peu de données sur l'épaisseur du calcaire d'Etampes puisque rares sont les sondages qui atteignent sa limite inférieure : le calcaire éocène. D'après les sondages de la BSS (tableau 1.3), le toit du calcaire éocène est situé aux environs de 41-45mNGF à Guilly et il descend jusqu'à 19 mNGF à St-Cyr-en-Val. C'est dans ce secteur que le calcaire de Beauce atteint sa puissance maximale, environ 70 mètres.

Comme en bordure de la Sologne ou sous la forêt d'Orléans, dans le Val, la formation du calcaire de Beauce est le siège d'importants phénomènes karstiques qui, en surface, se manifestent par des dépressions telles que dolines, gouffres ou avens. Ces dépressions sont fréquentes dans le Val, notamment dans la région de Sandillon-Jargeau. On rencontre aussi des pertes de cours d'eau sur le glacis d'Olivet (disparition du ruisseau de Limère, fig.1.5) ainsi que sur le plateau beauceron (ravins des Grands Gouffres en forêt d'Orléans, pertes de l'Anche), autres manifestations de ces phénomènes karstiques. Par ailleurs, les sources du Loiret (la Pie, le Bouillon, fig.1.5) sont l'expression de circulations d'eau à travers des galeries karstiques développées dans le calcaire dont certaines, comme au Bouillon, sont pénétrables en plongée.

1.2.2.2. Le Burdigalien (tertiaire)

La formation détritique du Burdigalien se compose des sables et argiles de Sologne qui reposent sur les sables et marnes de l'Orléanais.

La formation de Sologne correspond à un niveau imperméable dont la puissance est maximale au sud du Val, vers la Ferté St-Aubin où elle atteint 45 à 55 mètres. On la retrouve

sur la rive droite de la Loire avec une épaisseur pouvant atteindre 12 mètres. Selon Chéry (1983), la formation de Sologne disparaît dans le Val sauf à l'Est de Férolles. Le dépouillement des 64 sondages de la Banque du Sous-Sol, réalisés dans les communes de Bou et Sandillon, montrent que l'on trouve également la "Formation de Sologne" sous les alluvions modernes et holocènes en bordure sud du Val, vers le lieu-dit "les Marais" (figs.1.7 et 1.8).

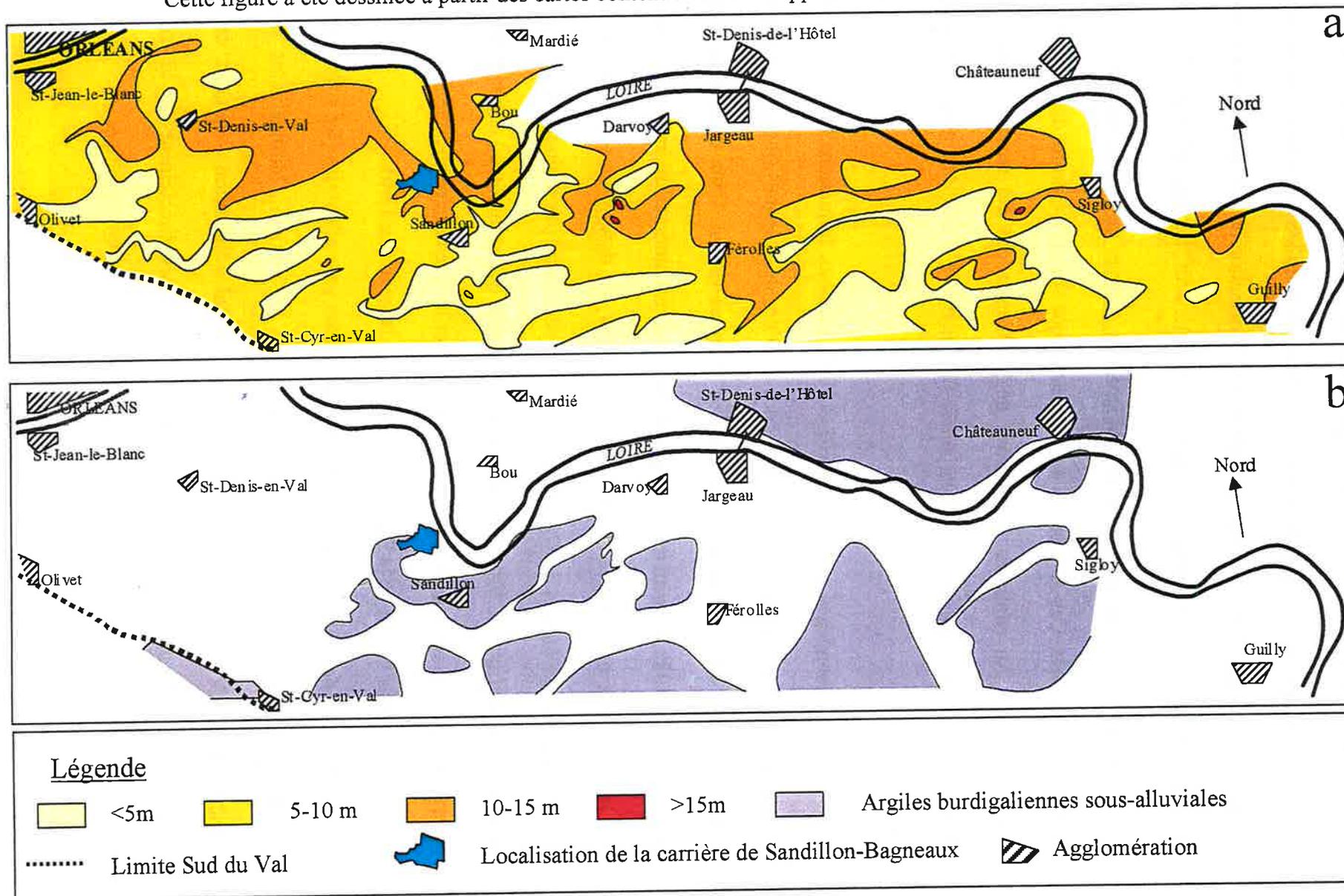
Présentes sous la formation de Sologne, les marnes de l'Orléanais recouvrent les sables de l'Orléanais. Ces derniers ne se rencontrent que sur la rive droite de la Loire, sous la forêt d'Orléans. Au contraire, les marnes de l'Orléanais ont été reconnues dans le Val d'Orléans avec des épaisseurs très variables: 0-7 mètres à Sandillon; jusqu'à 22 mètres à Guilly.

Dans les sondages réalisés de 1901 à 1983, les deux formations burdigaliennes sont distinguées dans le Val d'Orléans entre "argiles et sables de Sologne" (mélange d'argile et de sable type gros sel) et "Marnes de l'Orléanais" (argiles vertes). Cette distinction n'apparaît plus au-delà de 1983. Le seul terme "argile de Sologne" est alors utilisé, même dans des zones où la formation de Sologne n'apparaissait pas dans les descriptions plus anciennes. La distinction entre formation de Sologne et de l'Orléanais n'étant pas toujours très claire dans la littérature scientifique du Val d'Orléans, le terme général de formation ou argile burdigalienne sera utilisé dans la suite de ce travail, pour caractériser le niveau imperméable souvent présent sous les alluvions à l'Est de la ligne St-Cyr-en-Val – Jargeau (fig.1.6b).

La carte de répartition des argiles burdigaliennes sous alluviales (fig.1.6b) dans le Val d'Orléans dessinée par Desprez (1976) montre que la formation burdigalienne a été très érodée dans le Val. A l'Ouest de la ligne St-Cyr-en-Val – Sandillon – Jargeau, ces argiles disparaissent complètement et les alluvions reposent alors directement sur le calcaire de Pithiviers ou sur les marnes de Blamont quand ces dernières sont identifiées.

Figure 1.6 : Epaisseur des alluvions dans le Val d'Orléans (1.6a) et localisation des argiles burdigaliennes sous-alluviales (1.6b)

Cette figure a été dessinée à partir des cartes contenues dans le rapport BRGM 76-SGN-109BDP (Desprez, 1976)



La direction générale du pendage de la formation de Beauce (fig.1.3) peut expliquer la position de la limite des argiles burdigaliennes dans le lit majeur de la Loire. A l'Ouest de cette limite, on assiste à une nette augmentation du nombre de gouffres et dollines liés à la disparition de la couche imperméable protectrice du toit calcaire que constituent les argiles burdigaliennes.

Ces observations sont visibles sur la carte piézométrique de la nappe alluviale du Val d'Orléans réalisée par Desprez (1976).

1.2.2.3. Les alluvions (quaternaire)

Localisation et distribution

Dans le Val, l'épaisseur de l'ensemble alluvial (Desprez, 1976) est le plus souvent comprise entre 5 et 10 mètres (fig.1.6a). Les alluvions peuvent atteindre une épaisseur de 15 mètres dans des bandes sinueuses d'axe parallèle au Val (zones orange sur la fig.1.6a). Ces surépaisseurs ne peuvent s'expliquer par un relief localement plus élevé mais plutôt par le comblement d'anciens chenaux creusés par les bras du fleuve lorsqu'il coulait directement sur le calcaire de Beauce. Certains de ces chenaux s'interrompent brutalement vers l'aval au niveau de dépressions fermées (en rouge sur la figure 1.6a), ce qui conduit à penser que ces chenaux débouchaient sur des pertes absorbant l'écoulement. Cette interprétation (Lepiller, 2001a) est soutenue par la localisation de ces dépressions à l'amont des talwegs piézométriques caractérisant les axes de drainage karstiques.

Les alluvions modernes (Fz) occupent le lit mineur de la Loire et les anciens bras inondables dans le lit majeur. Les alluvions récentes ou holocènes (Fy) composent l'essentiel du lit majeur sous les limons de crue. Elles forment des buttes insubmersibles appelées « montilles ». Certaines couches des alluvions holocènes ont été datées d'environ 2000 ans

grâce à la découverte de débris roulés d'amphores romaines et de tuiles gallo-romaines, en place à 2 ou 3 m de profondeur dans les cailloutis de certaines montilles. Les alluvions anciennes constituent les terrasses recouvrant les sables de Sologne en bordure du Val. Il est fort vraisemblable que la base des alluvions holocènes et modernes soit würmienne. Des niveaux sombres composés de limons et de matière organique réduisant la perméabilité sont présents par endroits dans le lit majeur. Ces zones sont tantôt d'anciennes rivières ou d'anciens bras morts, tantôt des amas de terre végétale entraînée par un effondrement du toit calcaire.

Lithologie des alluvions:

Les alluvions modernes et holocènes possèdent une granulométrie très variable qui va du sable fin aux galets. Les couches superficielles sont souvent composées de limons de débordement qui marquent les anciens bras, fonctionnels avant la mise en place des levées de la Loire. Desprez (1976) décrit les alluvions holocènes (Fz) comme formant un tricouche composé de haut en bas, de limons, de sables graveleux plus ou moins argileux et de graviers et galets à la base. Dans la notice explicative de la carte géologique 1/50 000ème, « La Ferté St-Aubin » (1971), Gigout remarque que « toutes ces alluvions ont une granulométrie hétérogène et peuvent comporter des lentilles de galets ou au contraire d'argile, avec une disposition imprévisible ». Quant à la minéralogie de ces alluvions, Gigout propose les valeurs moyennes suivantes pour la région qui s'étend de Jargeau à Chécy : les sables et graviers sont principalement constitués de quartz (90%) et de feldspath (10%) provenant de la désagrégation des roches granitiques et métamorphiques du Massif Central. Les galets sont essentiellement composés de silex (75%), quartz, grès et autres roches siliceuses (20%), le reste étant partagé entre roches éruptives et calcaires. Une étude granulométrique détaillée de ces alluvions au niveau de la carrière de Sandillon est présentée dans le chapitre 2.

Les alluvions plus anciennes présentes sur les terrasses et en bordure du Val (fig.1.5) sont caractérisées par la présence d'argile rouge (Gigout, 1971), ce qui leur confère l'appellation « sables rouges ». La quantité d'argile est d'autant plus importante que ces alluvions sont anciennes.

1.2.3. Géologie du site de Sandillon

Sandillon est localisé dans le méandre de Bou, là où le Val d'Orléans atteint sa largeur maximale: 8 km. Le site expérimental de la carrière de Sandillon se situe à la limite de disparition des argiles burdigaliennes sous-alluviales. Il est évident que sur le plan hydrologique, ces argiles jouent un rôle majeur puisqu'elles constituent un niveau imperméable empêchant les communications d'eau des alluvions vers les calcaires. Avant l'ouverture de la carrière, en avril 1996, les informations disponibles sur la géologie du site sont géographiquement dispersées (un seul sondage de la BSS sur l'emplacement de la carrière de Sandillon). Ce paragraphe reprend ces données pour les communes de Sandillon et Bou afin de préciser le contexte géologique local dans lequel s'inscrit la carrière de Sandillon. Les informations récoltées sur la carrière, lors des travaux d'exploration puis d'exploitation du gisement de granulats (chapitre 2), pourront ainsi être interprétées et comparées par rapport aux connaissances présentées ci-dessous.

1.2.3.1. Localisation et épaisseur des argiles burdigaliennes

La carte de répartition des argiles burdigaliennes dans le Val d'Orléans dessinée par Desprez en 1976 (fig.1.6b) a été complétée, dans le cadre de ce travail, par les données de la Banque du Sous-Sol (BSS) où figurent en particulier les sondages réalisés après 1976. Ce travail a permis d'affiner la localisation de ces argiles autour de la carrière et de dessiner la figure 1.7.

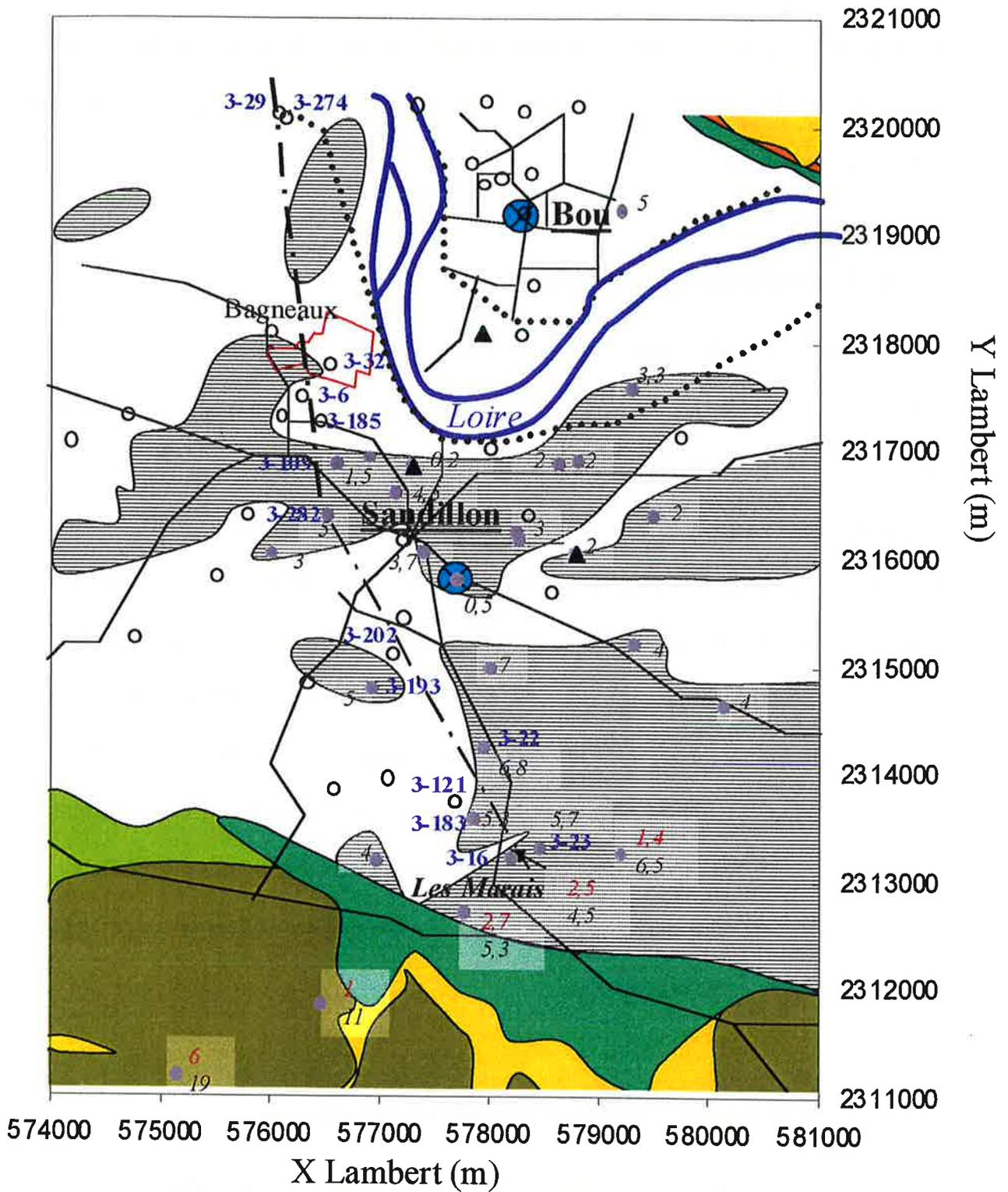


Figure 1.7. : Géologie de la région de Sandillon - Localisation et épaisseur des argiles burdigaliennes sous alluviales.

Légende de la figure 1.7

Géologie

	Alluvions modernes et holocènes
	Alluvions anciennes (Würm probable)
	Alluvions anciennes (Riss probable)
	Alluvions du quaternaire ancien
	Formation de Sologne (Burdigalien)
	Calcaire de Beauce (Aquitanien)
	Argiles burdigaliennes sous-alluviales

Sondages

	Absence d'argiles burdigaliennes
	Présence d'argiles burdigaliennes sous-alluviales
	Cavités karstiques sur plus d'un mètre mises en évidence à plus de 20 mètres de profondeur
<i>1</i>	Épaisseur (mètres) des argiles de Sologne (en rouge) et des marnes de l'Orléanais (en noir)
<i>11</i>	
	Captages AEP
<i>3-285</i>	Numéros des sondages utilisés pour le profil géologique de l'étude d'impact
	Position du profil géologique

Repères géographiques

	Routes principales
	Levéé de la Loire
	Rives de la Loire
	Limites des terrains exploités par la carrière Sandillon-Bagneaux

La carte ci-contre est construite à partir de la carte géologique 1/50 000 « la Ferté St Aubin », et de la carte de distribution des argiles vertes burdigaliennes sous-alluviales (Desprez, 1976). La localisation et la caractérisation des sondages provient des informations disponibles à la Banque du Sous-Sol (service du BRGM) sur les sondages réalisés de 1901 à 1996 dans les communes de Sandillon et de Bou.

Les points ronds représentent les sondages où l'on dispose d'informations sur la nature des couches géologiques en particulier sur la présence ou l'absence des argiles sous-alluviales. D'après la carte de Desprez (1976) et les données de la BSS, ces argiles sous-alluviales ne sont présentes que dans la partie Ouest de la carrière. Le seul sondage réalisé sur la carrière avant son ouverture et où l'on dispose de données géologiques (sondage 03983X0032/F1) indique l'absence de ces argiles.

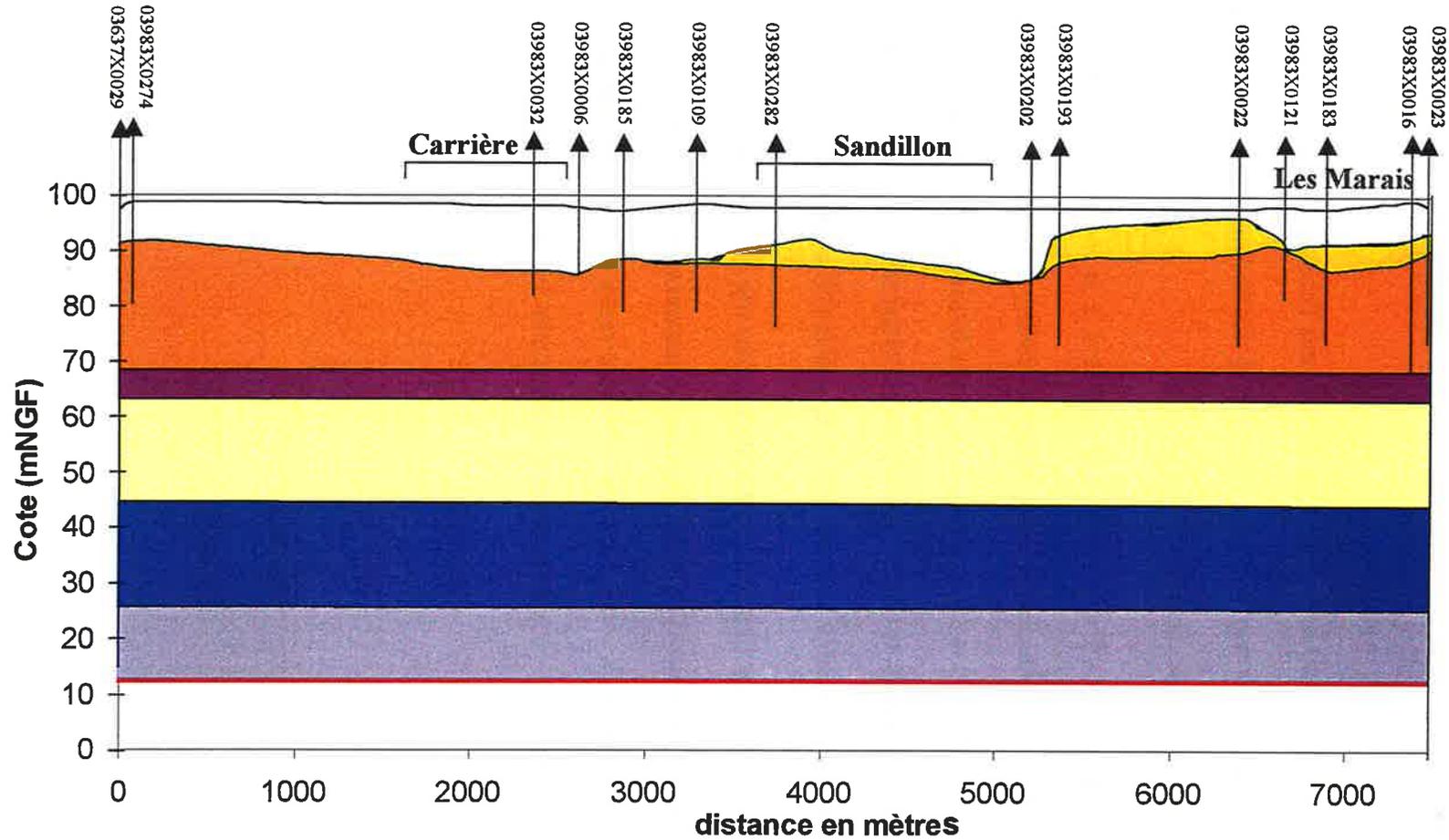
Au niveau des communes de Bou et de Sandillon, l'épaisseur de la formation burdigalienne (Orléanais+Sologne), quand elle est signalée, varie de 20 cm à 8 mètres d'épaisseur. Elle est de 50 cm au niveau du captage AEP de Sandillon. L'épaisseur la plus importante est rencontrée en bordure sud du Val au lieu-dit "Les Marais". Dans cette zone, la formation burdigalienne a été moins érodée et jusqu'à 2,70 mètres d'argiles de Sologne subsistent en recouvrement de 4,50 à 6,50 mètres de marnes de l'Orléanais (fig.1.7).

Une coupe traversant la carrière et Sandillon du Nord au Sud-Est a été tracée en figure 1.8 à partir des sondages disponibles à la BSS. Cette coupe fait apparaître la discontinuité des argiles sous-alluviales et l'irrégularité du toit du calcaire de Pithiviers dans la commune de Sandillon. Les sondages ayant servi à la réalisation de cette coupe s'arrêtant au calcaire de Pithiviers, les limites des couches inférieures de la formation de Beauce sont fondées sur les observations régionales (tableau 1.3).

1.2.3.2. Epaisseur et karstification du calcaire de Pithiviers

D'après les sondages ayant atteint le niveau de la molasse, l'épaisseur du calcaire de Pithiviers serait d'environ 25 mètres à Sandillon, à Bou et à Férolles. Le niveau imperméable de molasse se situerait entre 30 et 32 mètres de profondeur au niveau du captage AEP de Sandillon.

Figure 1.8 : Coupe géologique Nord- Sud-Est du Val d'Orléans au niveau du site expérimental de Sandillon. (Données de la Banque du Sous-Sol et du rapport BRGM R40571; Martin, Giot et Le Nindre, 1999)



Légende

- | | | | | | |
|---|---------------------------------|---|---------------------|---|---|
|  | Alluvions modernes et holocènes |  | Molasse du Gâtinais |  | Eocène détritique |
|  | Argiles Burdigaliennes |  | Calcaire d'Etampes |  | Toit de la Craie |
|  | Calcaire de Pithiviers |  | Calcaire éocène |  | Référence des sondages dans la Banque du Sous-Sol |

La carte piézométrique de la nappe calcaire dessinée par Desprez en 1976 indique la présence de 4 effondrements du toit calcaire sur la zone de la carrière (fig.1.18). Ils sont situés:

- à une vingtaine de mètres au nord de la levée de Bagneaux, l'actuelle route d'acheminement des matériaux de la carrière,
- sur la carrière à environ 150 mètres au nord du bois des Brosseilles,
- deux autres effondrements sont localisés dans le bois des Brosseilles de part et d'autre du chemin forestier conduisant à la carrière.

Ce sont certainement ces effondrements qui ont servi à la localisation, sur la carte piézométrique de la nappe alluviale dessinée par Desprez (1976), d'un axe karstique passant par ces effondrements et traversant la carrière puis le bois des Brosseilles du Nord-Est au Sud-Ouest (fig.1.18). Cet axe n'apparaît pas sur la carte piézométrique plus récente de juillet 1992 utilisée dans l'étude d'impact préalable à l'ouverture de la carrière (Chigot et Al., 1994).

Trois cavités karstiques de plus d'un mètre de hauteur ont été relevées à plus de 20 mètres de profondeur lors des sondages réalisés dans les communes de Bou et Sandillon. Ces cavités ont été localisées sur la figure 1.7 par des triangles noirs. La présence de ces trois cavités ne fait que confirmer l'existence d'un réseau de karsts très développé dans la région.

1.3. Contexte hydrogéologique

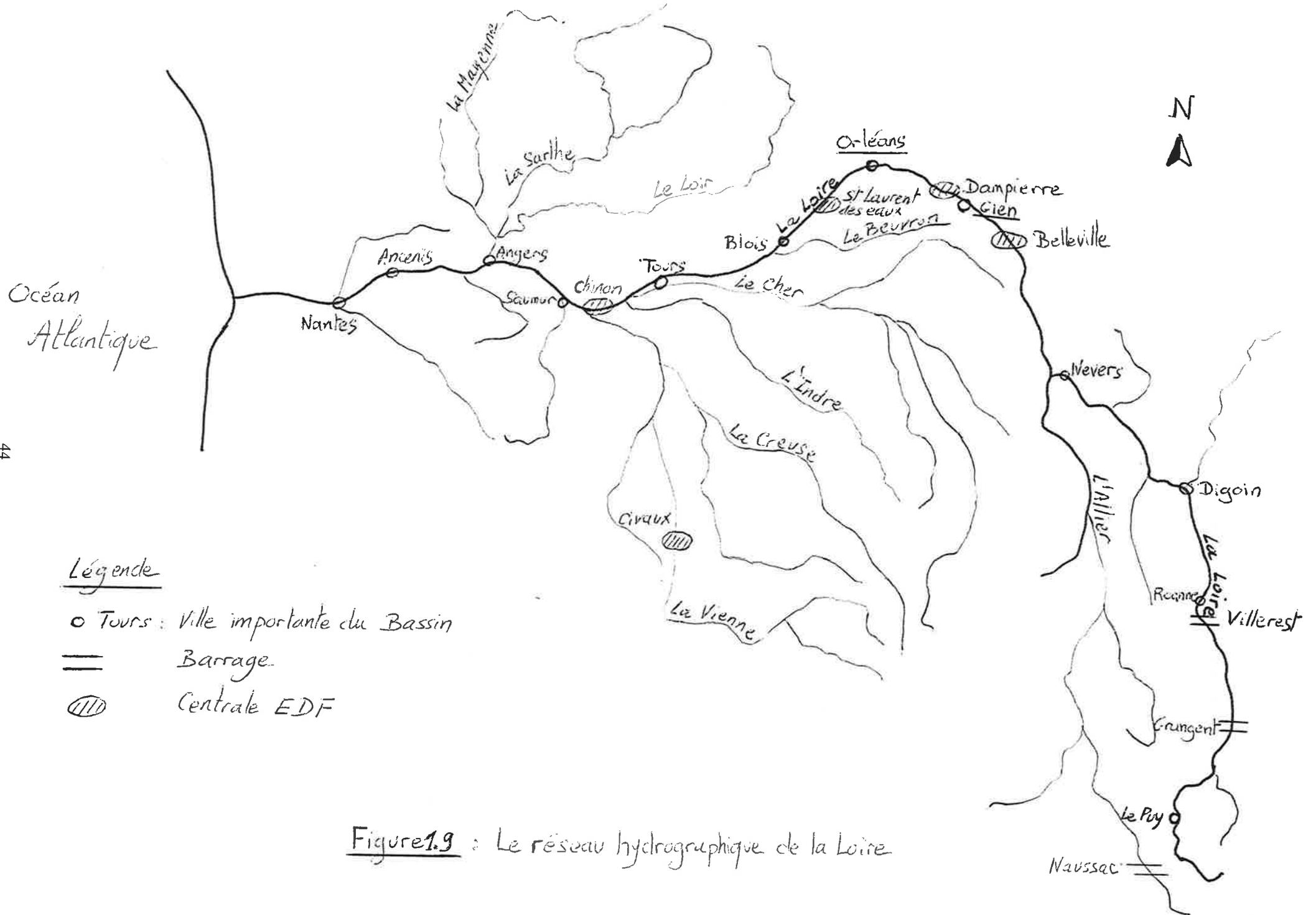
Cette partie présente les caractéristiques des différents aquifères présents dans le Val d'Orléans ainsi que leurs relations avec la Loire avant d'exposer plus précisément le contexte hydrogéologique connu au niveau de la carrière. Les eaux souterraines présentes dans le Val d'Orléans appartiennent à deux réservoirs aquifères qui correspondent directement aux formations géologiques qu'elles traversent :

- la nappe des alluvions modernes et holocènes de la Loire,
- la nappe du calcaire de Beauce.

Ces deux nappes sont en relation avec la Loire.

1.3.1. La Loire

Avec son bassin versant de 117 000 km², la Loire draine 1/5ème du territoire français (fig.1.9). Le régime de la Loire est très contrasté. D'une part le débit moyen du fleuve est relativement médiocre avec des basses eaux estivales entraînant des risques de pénurie, d'autre part, les crues historiques de la Loire ont marqué la mémoire des hommes par leurs conséquences ravageuses (noyades, pertes de récoltes et de terres, destruction de ponts, rupture de levées). Les levées qui bordent presque continûment le lit mineur, sur plus de 500km des plaines bourbonnaises jusqu'à Nantes, sont l'aboutissement des travaux collectifs millénaires par lesquels les riverains ont cherché à se mettre à l'abri des crues. En 1847, après le débordement extraordinaire d'Octobre 1846, un service régulier d'annonce des crues est créé. Aujourd'hui, les prévisions sur 3 jours (le jour même à midi, le lendemain et le surlendemain) sont mises à disposition du public sur un répondeur téléphonique de la Direction Départementale de l'Équipement (DDE). Pour la partie de la Loire concernant ce travail, les niveaux de la Loire sont relevés quotidiennement par la DDE à Orléans et Gien, Orléans étant la ville la plus proche de Sandillon.



Légende

- Tours : Ville importante du Bassin
- == Barrage
- ⊞ Centrale EDF

Figure 1.9 : Le réseau hydrographique de la Loire

Les stratégies d'écroulement des crues ont permis la mise en place de 3 grands barrages (Grangent et Villerest sur la Loire, Naussac sur l'Allier) dans le massif central. Ils servent aussi à maintenir un débit minimal d'étiage pour les 4 centrales nucléaires échelonnées sur le cours moyen. Malgré la présence de nombreux aménagements du cours de la Loire, l'éventualité d'une crue d'ampleur historique n'est pas à écarter (Dacharry, 1996).

1.3.2. Généralités sur les aquifères du Val d'Orléans

Les documents servant aux rappels ci-dessous sont les études hydrogéologiques de la Beauce et du Val d'Orléans de Desprez (1967, 1976) accompagnées des cartes piézométriques de la nappe du calcaire de Pithiviers et de la nappe alluviale.

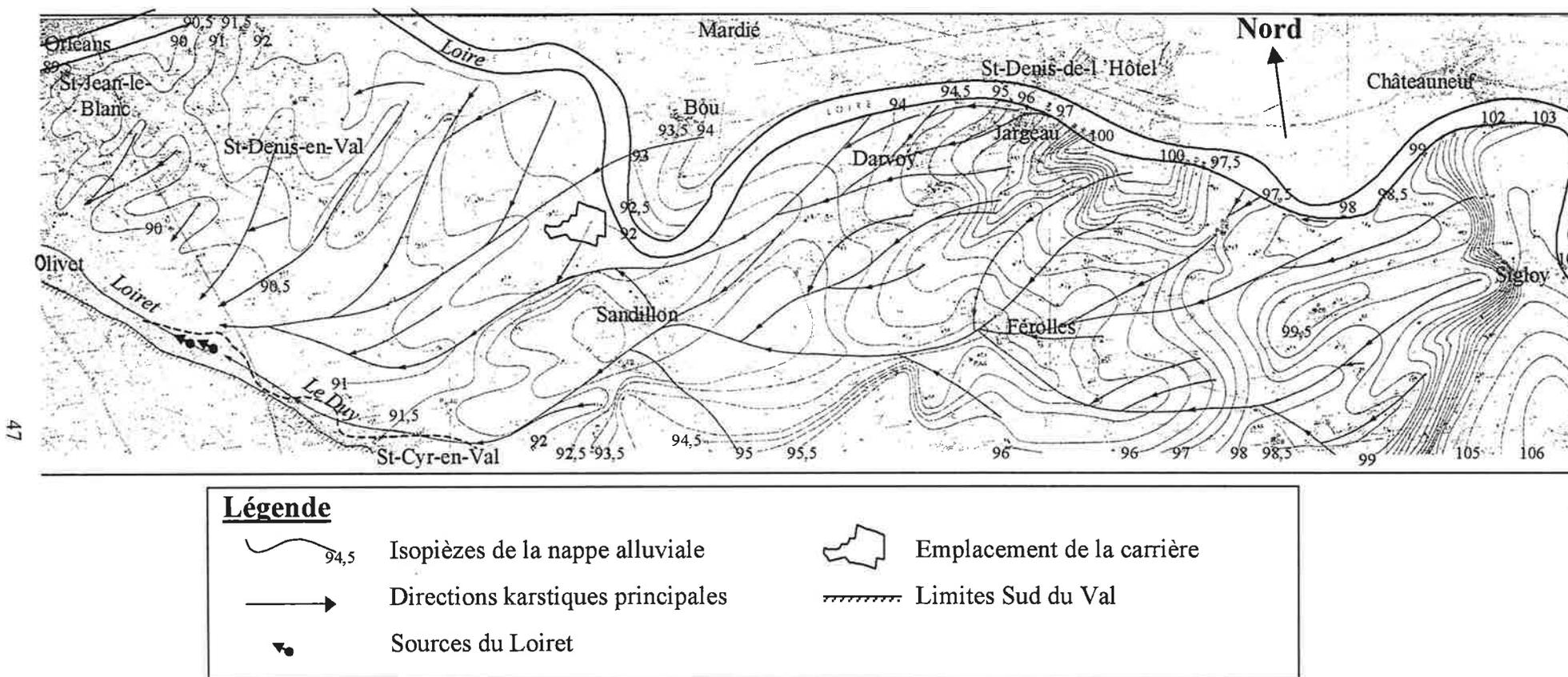
1.3.2.1. La nappe du calcaire de Pithiviers

Contrairement à la nappe alluviale qui est, par définition, limitée aux alluvions de la Loire, c'est-à-dire au Val d'Orléans, la nappe du calcaire s'étend au delà des limites du Val. En rive droite de la Loire, elle s'écoule globalement vers le Sud (Desprez, déc.1967). Captive sous la formation burdigalienne présente au nord du Val d'Orléans (fig.1.4), la nappe du calcaire de Pithiviers se retrouve libre au niveau du Val, sauf à l'Est de la ligne St-Cyr-en-Val – Sandillon – Jargeau limitant l'extension des argiles burdigaliennes (fig.1.6b). Au Sud du Val, la nappe du calcaire de Pithiviers s'écoule des coteaux de Sologne vers la Loire. La vallée de la Loire constitue donc bien un talweg piézométrique à l'échelle du bassin versant. Cependant, à l'échelle du Val d'Orléans, cela n'est pas tout à fait vrai. En effet, la carte piézométrique de la nappe calcaire, établie à l'étiage d'Octobre-Novembre 1966 (Desprez, 1976), montre que les lignes de courant de la nappe du calcaire de Pithiviers convergent vers un axe d'écoulement Est-Ouest situé non pas au niveau de la Loire mais au centre du Val, parallèlement à la Loire. De plus ces directions d'écoulement coïncident avec les axes de

drainage karstiques (fig.1.10) matérialisés par des talwegs piézométriques pendant les périodes d'étiage. On peut expliquer l'origine de ces axes karstiques par l'enfoncement de la Loire au cours du Pléistocène Supérieur entraînant, dans le Val d'Orléans, l'érosion de la formation peu perméable de Sologne et la création par dissolution, jusqu'à 35 mètres de profondeur, d'un réseau de drainage karstique. Ces drains sont parfois colmatés par des entraînements d'alluvions. L'ouverture d'avens dans le lit même de la Loire permet l'engouffrement des eaux du fleuve dans le réseau karstique qui les restitue à ses exutoires situés aux sources du Loiret et dans le lit de la Loire en aval d'Orléans. Le système karstique du Val d'Orléans est, par le débit, le plus important de France (Alberic et Lepiller, 1998).

A l'Est de Châteauneuf, la Loire se situe au Nord du talweg principal (fig.1.10), ce qui la place en position d'alimentation. Il semble donc que dans le Val d'Orléans, le drainage du bassin versant s'effectue non plus par la Loire mais par les axes karstiques. La remontée brutale de la cote de la nappe à l'Est de Jargeau (fig.1.10) coïncide avec une zone importante de pertes de la Loire mises en évidence par de nombreux traçages (Marboutin, 1901; Albinet et Brossier, 1973; Lepiller et Mondain, 1986). La cause de ces pertes est la position du plan d'eau de la Loire au-dessus du plan d'eau de la nappe quelle que soit la saison, entre Bouteille et Orléans (Desprez, 1976). A ce propos, Desprez signale dans la notice explicative de la carte géologique La Ferté-Saint-Aubin (Gigout, 1971), qu'au niveau de Sandillon, le plan d'eau de la Loire se trouve effectivement trois mètres au-dessus de la surface piézométrique. Les pertes de la Loire sont en relation directe avec l'érosion des argiles burdigaliennes.

Figure 1.10: Carte piézométrique de la nappe alluviale du Val d'Orléans à l'étiage (21-24/11/1966)
 Extrait du rapport BRGM 76-SGN-109-BDP (Desprez, 1976)



Les drains karstiques, localisés par les talwegs piézométriques ainsi que les diverses expériences de traçage réalisées depuis 1901, imposent le sens général d'écoulement à l'ensemble nappe calcaire - nappe alluviale. L'écoulement s'effectue globalement d'Est en Ouest dans le talweg piézométrique central du Val. La Loire, située au dessus de la nappe alluviale de Châteauneuf à Orléans, alimente celle-ci ainsi que la nappe du calcaire de Pithiviers par les pertes qui s'ouvrent directement dans son lit. A l'Est de la ligne Châteauneuf-Sigloy, la nappe est soutenue par les argiles burdigaliennes qui la séparent de la nappe calcaire. A l'Ouest de cette ligne, ces argiles sont moins fréquentes et disparaissent complètement à l'Ouest de la ligne St-Cyr-en-Val - Sandillon - Jargeau, ce qui autorise les intercommunications entre les aquifères calcaire et alluvial.

1.3.2.2. La nappe alluviale

Localisation dans les alluvions

Dans la notice explicative de la carte géologique 1/50 000 « La Ferté-Saint-Aubin » rédigée en 1971 par Gigout, et par Desprez pour la partie hydrogéologie, la nappe alluviale est décrite comme étant semi-captive et circulant dans le niveau de graviers et de sables grossiers situé à la base du massif alluvial et recouvert par les sables argileux qui la mettent sous pression. La grande diversité des couches profondes des alluvions mise en évidence par les sondages de reconnaissance sur la carrière de Sandillon (annexe 1) ne permet pas a priori d'accepter totalement cette description. En effet, le niveau de la nappe est le plus souvent situé en dessous de la zone la plus argileuse. La nappe tantôt libre, tantôt semi-captive s'écoule par les chenaux sablonneux localisés de manière assez hétérogène.

Piézométrie

La carte piézométrique de la nappe alluviale à l'étiage (21-24 Novembre 1966) tracée par Desprez (1976) et représentée figure 1.10 ressemble fortement à la carte piézométrique de la nappe calcaire réalisée sur la même période. Les directions d'écoulement sont identiques. Les cotes piézométriques sont très voisines, sauf à l'Est de la ligne Châteauneuf-Sigloy-Tigy où la nappe alluviale se trouve en charge par rapport à la nappe du calcaire de Pithiviers. A Sigloy, pendant la période des relevés piézométriques (21-24/11/1966), la différence de cote entre les deux nappes est de 3,5 mètres (nappe alluviale=104 mNGF, nappe du calcaire=100,5 mNGF). Ce talus piézométrique se traduit par le resserrement des isopièzes sur la carte piézométrique de la nappe alluviale (fig.1.10). Le talus est situé à la frontière de la zone d'effritement de la formation burdigalienne qui recouvre totalement le calcaire de Pithiviers à l'Est de la ligne Châteauneuf – Sigloy - Tigy. Cette zone coïncide également avec l'épaississement des marnes de Blamont (fig.1.3). Nappe alluviale et nappe calcaire ne

forment donc qu'un seul aquifère à l'Ouest de la ligne Châteauneuf – Sigloy - Tigy sauf localement au niveau des lentilles burdigaliennes qui subsistent jusqu'à la limite St-Cyr-en-Val – Sandillon - Jargeau (fig.1.6). Les deux parties de l'aquifère ne se distinguent alors plus que par leurs propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques.

Entre Guilly et Châteauneuf, la nappe alluviale est drainée par la Loire (isopièzes parallèles à l'axe d'écoulement de la Loire). De Châteauneuf à l'aval d'Orléans, la nappe alluviale est alimentée par la Loire qui se situe au dessus de la nappe. En aval d'Orléans, la nappe alluviale est à nouveau drainée par la Loire. Desprez (1976) fournit les valeurs des gradients hydrauliques pour plusieurs tronçons de la nappe :

Jargeau-Sandillon : 7.10^{-3} ; Sandillon-Olivet : $0,2.10^{-3}$; Olivet-Loire : $0,7.10^{-3}$.

Desprez (1976) fournit également les différences d'altitude entre le plan d'eau de la Loire et la nappe alluviale : 0,5 m à Châteauneuf ; 2,0 m à Jargeau ; 3,0 m à Sandillon ; 1,0 m à Orléans. Ces valeurs, reportées figure 1.11, démontrent que la Loire perd une partie de son débit au profit de la nappe entre Châteauneuf et Orléans.

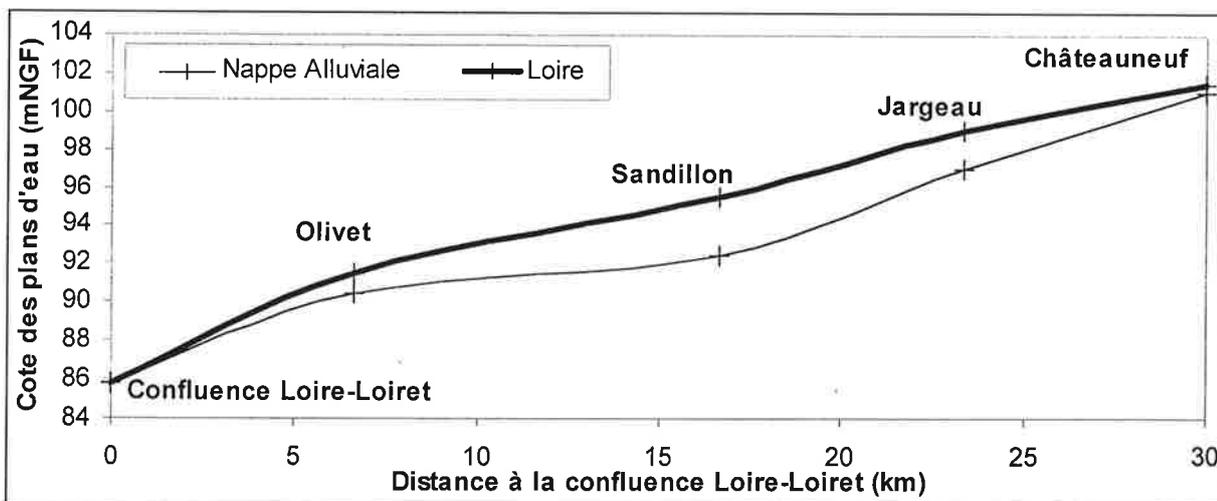


Figure 1.11 : Niveaux respectifs de la Loire et de la nappe alluviale entre Châteauneuf et la confluence de la Loire et du Loiret (Etiage du 21-24/11/1966 ; Desprez, 1976).

1.3.2.3. Paramètres structuraux

Les valeurs des transmissivités et coefficients d'emménagement pour les nappes alluviale et calcaire proviennent des données de Desprez (1976) et Zunino (1979). Les valeurs de transmissivité proposées pour la nappe du calcaire de Pithiviers sont confirmées par l'étude récente du BRGM sur la nappe du calcaire de Beauce (Martin et Al., 1999). Les valeurs de diffusivité proviennent d'une étude de Peaudecerf (1970).

	<u>Alluvions</u>	<u>Calcaire</u>
T (m ² /s)	10 ⁻⁵ -3.10 ⁻²	10 ⁻³ -7.10 ⁻²
S	5-15%	3-7%
Diffusivité (m ² /s)	6.10 ⁻² -7.10 ⁻²	0,86-1,3

1.3.3. Etudes hydrogéologiques réalisées dans le Val d'Orléans

1.3.3.1. Etudes des circulations karstiques

Différentes observations physico-chimiques et expériences de traçage ont permis d'étudier les relations karstiques entre la surface du Val, en particulier la Loire et ses affluents, avec la nappe calcaire.

1.3.3.1.1. Les débits perdus de la Loire

Les jaugeages réalisés à l'étiage, de 1859 à 1865 par Sainjon (1859, 1888) montrent une diminution des débits de la Loire entre Bouteille (fig.1.1) et Orléans (en amont de la confluence Loire-Loiret). La Loire retrouve son débit perdu entre Orléans et Blois. Les jaugeages effectués par Legay et Clavenad entre Bouteille et Orléans en 1869 (Janet, 1901) puis par la 4^{ème} circonscription électrique entre Gien et Orléans de 1962 à 1964 (Barrière, 1965) ne font que confirmer les premières mesures de Sainjon. 3/5^{èmes} des pertes observées entre Bouteille et Orléans ont lieu entre Bouteille et Jargeau, et 2/5^{èmes} entre Jargeau et Orléans. Ces pertes sont de l'ordre de 10 à 20 m³/s en période d'étiage.

Différents auteurs ont obtenu une relation linéaire entre les débits de la Loire et ses pertes. Par exemple, dans sa thèse (1979), C. Zunino a montré qu'il existait, pour les années 1975 à 1977, une relation linéaire grossière ($y=0,129x+78,65$) entre les moyennes décennales des débits de la Loire à Châteauneuf (x) et les débits de perte du fleuve entre Châteauneuf et Jargeau (y). Le calcul repris par Chéry (1983) à partir des données journalières et non plus décennales, de janvier et février 1978 ainsi que de février et mars 1979 conduit à la même conclusion (fig.1.12). Les débits de la Loire ne sont plus mesurés par jaugeage mais calculés à partir des courbes de tarage des deux stations. Un troisième calcul des pertes journalières de la Loire a été réalisé par J.L. Chéry (1983) pour un cycle hydrologique complet (1979-80) à

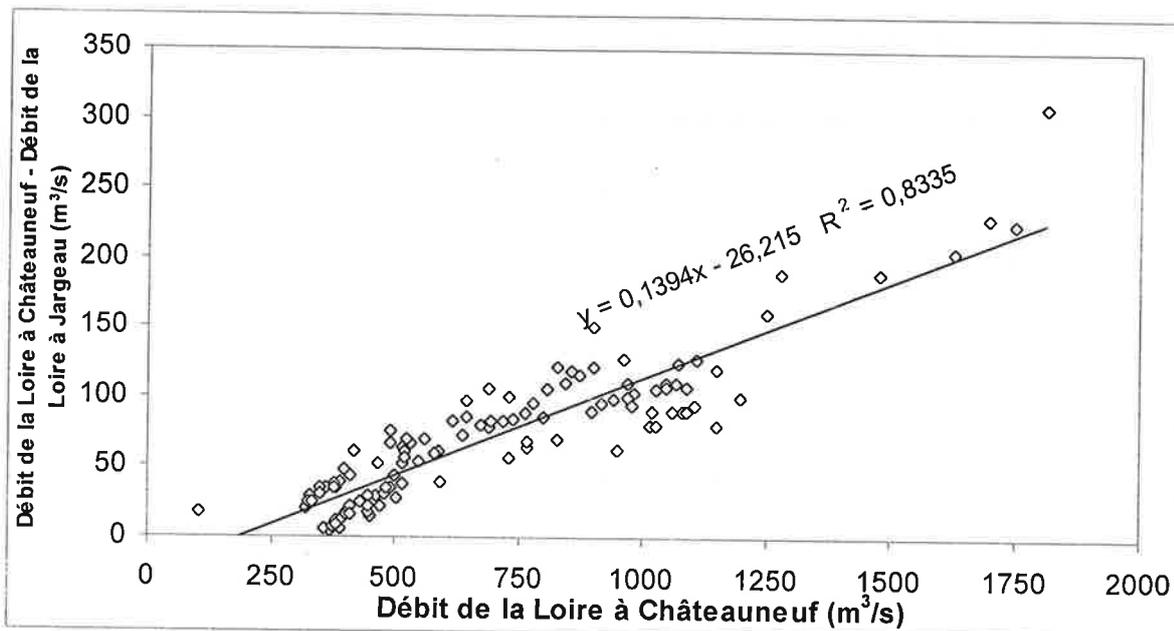


Figure 1.12 : Débit des pertes de la Loire entre Châteauneuf et Jargeau en fonction du débit de la Loire à Châteauneuf pour les mois de janvier et février 1978 ainsi que les mois de février et mars 1979 (extrait de J.L. Chéry, 1983). Les débits à Jargeau et Châteauneuf sont calculés à l'aide des courbes de tarage de ces deux stations.

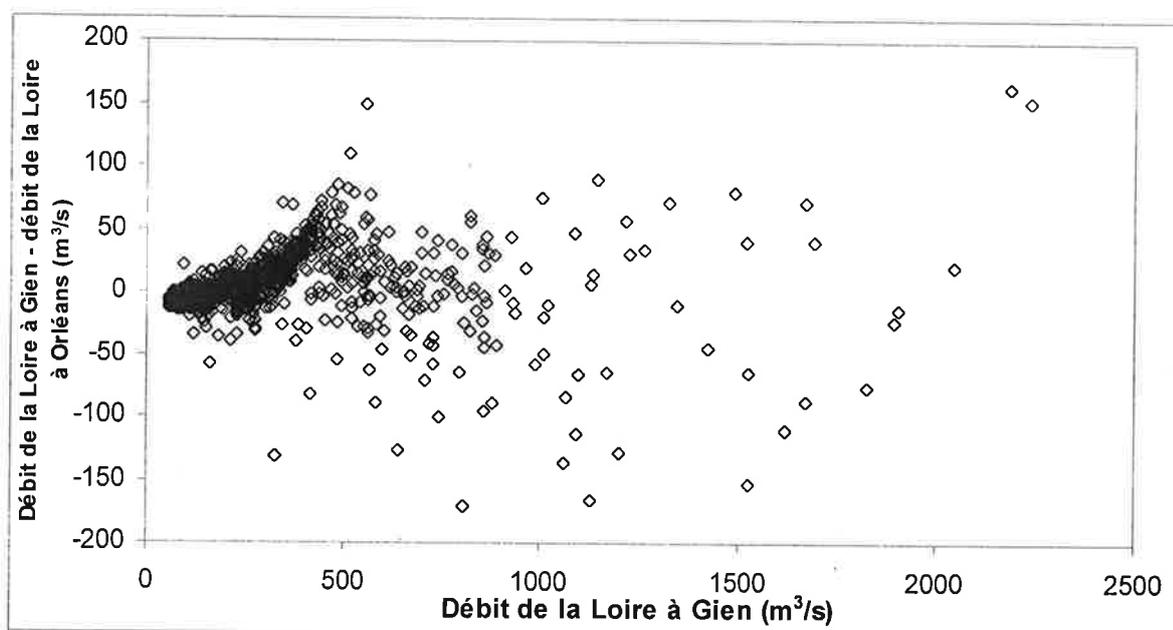


Figure 1.13 : Débit des pertes de la Loire entre Gien et Orléans en fonction du débit de la Loire à Gien pour les années 1997 à 2000.

Les débits à Gien et Orléans sont calculés à l'aide des courbes de tarage de ces deux stations.

En période d'étiage et de crue, les déphasages respectifs de 15h et 10h sont introduits par interpolation des valeurs journalières relevées à 8h.

partir des hauteurs de la Loire mesurées quotidiennement à Jargeau et Châteauneuf. Ce calcul complète les données précédentes obtenues en période de hautes eaux (fig.1.12) et montre une augmentation des débits de la Loire entre Châteauneuf et Jargeau pour des débits de la Loire à Châteauneuf inférieurs à $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Cela est en contradiction totale avec les jaugeages effectués par Sainjon, Legay puis Barrière ainsi que les expériences de traçage qui montrent qu'en période d'étiage, les pertes continuent de fonctionner (Marboutin, 1901 ; Chéry, 1983). Chéry explique l'incohérence de ce résultat par l'incertitude obtenue sur le calcul du débit à l'aide des courbes de tarage. L'erreur serait de 15% environ, c'est à dire de l'ordre de grandeur des débits perdus par la Loire.

Aujourd'hui, il n'existe plus de station de mesure ni à Jargeau ni à Châteauneuf. La station la plus proche en amont de Sandillon se trouve à Gien. L'étude des pertes entre Gien et Orléans calculées, dans le travail présent, à partir des courbes de tarage pour les années 1997 à 2000 est présentée en annexe 2 et sur la figure 1.13. Le calcul tient compte du temps de propagation des impulsions de la Loire entre Gien et Orléans (10-15h selon le régime). Cette étude renforce les conclusions de J.L.Chéry, à savoir que l'incertitude sur l'évaluation des débits entre Gien et Orléans à partir des courbes de tarage est supérieure aux débits de pertes qui ne peuvent en conséquence pas être mesurés de cette façon.

Quelle est la limite de validité des mesures par jaugeage pour l'estimation des pertes de la Loire ?

Desprez (1967) calcule des pertes de la Loire allant jusqu'à $75 \text{ m}^3/\text{s}$ en période de crue, à partir des jaugeages effectués quotidiennement par la 4^{ème} circonscription électrique entre Châteauneuf et Orléans en 1966. Cependant, le débit de la Loire devient quelquefois plus important à Orléans qu'à Châteauneuf en période de crue. Le gain à Orléans peut atteindre $90 \text{ m}^3/\text{s}$. Comme on sait, d'après les traçages réalisés, que les pertes existent toujours en

période de crue, le gain à Orléans ne peut s'expliquer que par des apports entre Châteauneuf et Orléans, supérieurs aux pertes. Or les affluents de la rive droite de la Loire (Egouttier, Bionne, Oussance, Lenche) ont des débits cumulés qui ne dépassent pas $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Il faut donc prendre en compte d'autres paramètres, qui ne sont plus négligeables en période de crue, comme les eaux de ruissellement et la réalimentation de la Loire par la nappe alluviale, à l'aval de Combleux (fig.1.1).

En conclusion, les débits des pertes de la Loire mesurés par jaugeage entre 1859 et 1966 étaient de l'ordre de 10 à $20 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'étiage. Lors des crues de Novembre 1966, ces pertes ont atteint $75 \text{ m}^3/\text{s}$. On a donc bien une augmentation des pertes en fonction du débit de la Loire. Cependant, les pertes mesurées par jaugeage peuvent quelquefois être masquées par des apports vers la Loire supérieurs aux pertes, ce qui entraîne une augmentation de débit entre Châteauneuf et Orléans. L'origine de ces apports n'a pas été clairement identifiée dans la littérature scientifique sur l'hydrogéologie du Val d'Orléans. Cela pourrait correspondre à des évènements locaux comme de fortes averses au niveau d'Orléans. Des évènements semblables sont sans doute à l'origine des inversions, accidentelles et de courte durée, du sens d'écoulement du Loiret (Alberic, 2000).

1.3.3.1.2. Les traçages artificiels

Les premiers traçages confirmant l'existence des pertes de la Loire remontent au début du 20^{ème} siècle. Marboutin (1901, 1902) avait alors coloré des gouffres à Châteauneuf-sur-Loire et à Sandillon et récupéré le colorant dans le Loiret, avec une vitesse maximale de transit de 187 m/h . Puis ce n'est qu'à partir de 1969 que de nouveaux traçages sont réalisés par le BRGM. Après un premier échec en 1969 probablement dû à l'injection d'une quantité insuffisante de traceurs, Albinet et Brossier (1973) injectent, le 5 février 1973, 15 kg d'uranine, dans un gouffre situé dans le lit de la Loire, en rive gauche, près du terrain de

camping de Jargeau. Le traceur est récupéré à la source du Bouillon (tableau 1.4). Un inventaire des traçages effectués dans la région centre a été réalisé par Lepiller (2001b). Ces traçages ont en particulier permis la découverte de nouveaux axes karstiques. Certains d'entre eux prennent naissance sur la rive droite de la Loire. L'un des plus célèbres exutoires est la source du Bouillon qui fonctionne normalement en source mais également parfois en perte quand des conditions piézométriques exceptionnelles le permettent. Cette source du Loiret a été considérée pendant longtemps comme l'embouchure du drain principal du réseau karstique. Or, les estimations de débit réalisées par des spéléologues dans des résurgences situées dans le lit du Loiret ont révélé que le drain principal passait légèrement au Sud du Bouillon (communications personnelles des spéléologues plongeurs Alberic et Boismoreau). Le tableau 1.4, extrait d'un article de Lepiller et Mondain (1986), présente les temps moyens de séjour et vitesses apparentes V_{app} des traceurs (voir définitions chapitre 4, § 4.4.3) entre les pertes situées à Jargeau et trois résurgences connues : les sources du Bouillon et de la Pie (figs.1.1 et 1.5) ainsi que le champ de captages en eau potable de la Source (fig.1.1).

Pour l'ensemble des traçages réalisés dans le système karstique du Val d'Orléans, les courbes de restitution des traceurs ne possèdent qu'un pic ce qui pousse à croire que les écoulements s'effectuent dans des chenaux simples et non par plusieurs voies distinctes qui entraîneraient des pics de restitution secondaires (fig.1.14). Par ailleurs, il y a souvent plusieurs points de restitution, signes que les axes possèdent des ramifications divergentes aux exutoires.

Les expériences de traçage réalisées dans le système karstique du Val d'Orléans confirment l'existence de pertes dans le lit et les berges de la Loire. Elles apportent des informations supplémentaires sur la structure du réseau souterrain ainsi que sur la rapidité des transferts dans le karst. Les vitesses apparentes des traceurs injectés dans le karst sont généralement comprises entre 80 et 160 m/h à l'amont des sources du Loiret. Elles

augmentent très vite à l'approche de la confluence Loire-Loiret pour atteindre parfois 1300 m/h (communication personnelle de M. Lepiller, 2001).

Tableau 1.4: Principales caractéristiques de quelques traçages réalisés dans le système karstique du Val d'Orléans entre 1970 et 1980. La définition des paramètres présentés dans ce tableau est donnée dans le chapitre 4.

Lieu de l'Injection	Date et heure de l'injection	Nature et masse de traceur	Lieu de la restitution	Début de restitution	Durée de la restitution	Gradient hydraulique	Tps moy. de séjour	Vitesse App.
Jargeau	5/2/73 10h à 13h 30	Uranine 15kg	Bouillon	8/2/73 8h	4j 16h	0,07‰	4j 2h 11'	132,4m/h
Jargeau	13/10/79 à 10h	Uranine 1,5kg	Bouillon	16/10/79 7h15	6j 9h 45'	0,065‰	4j 12h 15'	129,3m/h
			La Pie	17/10/79 7h15	7j 2h 45'	0,06‰	6j 13h 9'	133,6m/h
			AEP	15/10/79 13h	14j 16h	0,05‰	6j 19h 27'	85,6m/h
Jargeau	19/09/80 à 17h30	Uranine 3kg	Bouillon	23/9/80 8h	5j 16h	0,065‰	5j 4h 23'	112,5m/h
Jargeau	19/09/80 à 17h45	Streptocoques 7,5.10-14 germes	Bouillon	23/9/80 6h	8j 6h	0,065‰	5j 19h 54'	100,1m/h
			AEP	23/9/80 8h		0,05‰	7j 3h 8'	81,8m/h

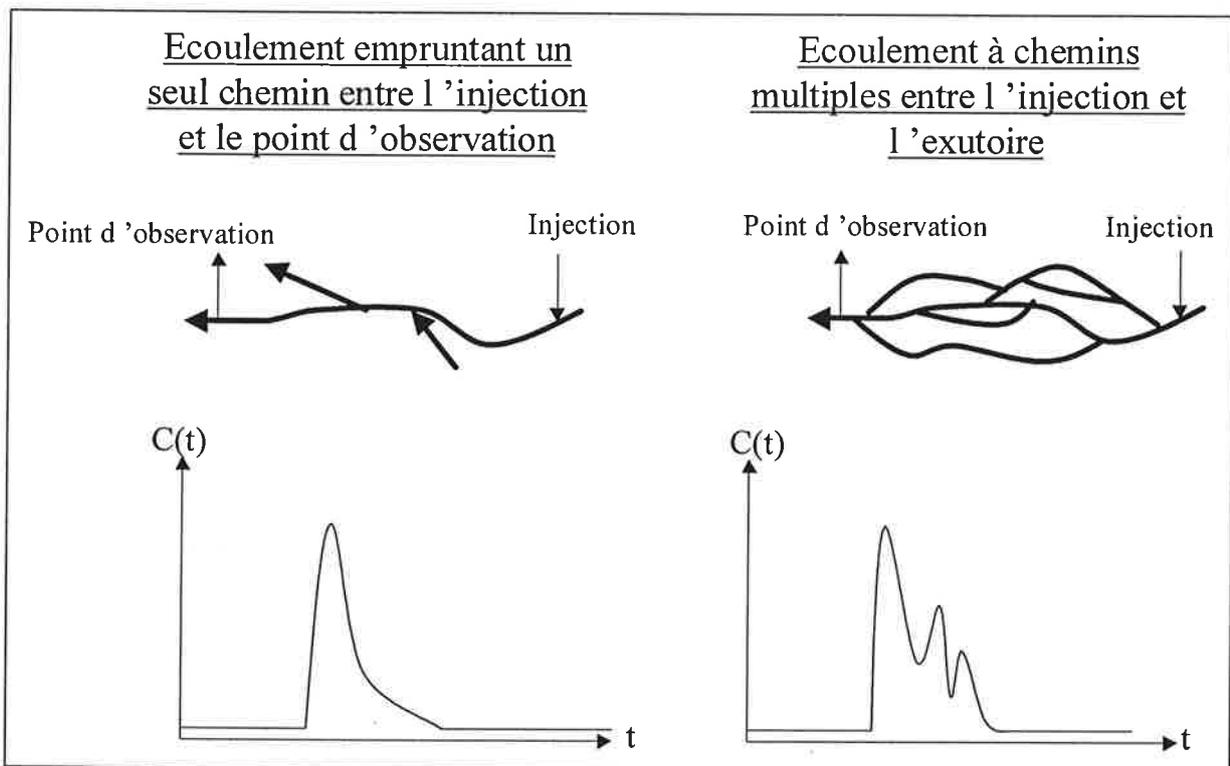


Figure 1.14 : Allures des courbes de restitution des traceurs $C(t)$ associées à deux types d'écoulement en milieu karstique.

Les courbes de restitution obtenues lors des traçages dans le Val d'Orléans militent en faveur d'un écoulement à un seul chenal possédant quelques ramifications (fig1.10).

1.3.3.1.3. Les études physico-chimiques

Des études physico-chimiques ont montré que l'eau restituée aux exutoires du système karstique provenait essentiellement de la Loire, du moins en période d'étiage, lorsque l'apport des précipitations est négligeable. Dans ce paragraphe sont réunies les principales études physico-chimiques réalisées sur le système Loire-exutoires karstiques.

Les variations piézométriques

Le suivi des variations piézométriques de la Loire au niveau de Jargeau et de la source du Bouillon réalisé par Chéry (1983) pendant le cycle hydrologique 1979-1980 montre qu'il existe une liaison entre les deux systèmes. Les variations des cotes du Bouillon sont liées à celles de la Loire avec un décalage dans le temps de quelques jours (fig.1.15). Pour calculer exactement ce décalage, il aurait fallu disposer au moins des cotes journalières de chacun des deux systèmes. Or les relevés ont été effectués hebdomadairement pour la Loire et tous les deux jours pour la source du Bouillon.

Les variations de température

Les variations de température de la Loire (Jargeau), du Bouillon et de la Pie mesurées par Chéry (1983) sur le cycle 1979-1980 sont présentées fig.1.15. Alors que les températures varient entre 0,8 et 24,5°C dans la Loire, les températures observées au Bouillon et à la Pie varient respectivement de 9 à 16°C et de 10 à 15°C. Ces chroniques montrent que le système karstique amortit considérablement les fluctuations de température de la Loire qui sont transmises selon une variation annuelle. L'amortissement est d'autant plus fort que l'on s'éloigne de la source (amplitudes plus fortes au Bouillon qu'à la Pie).

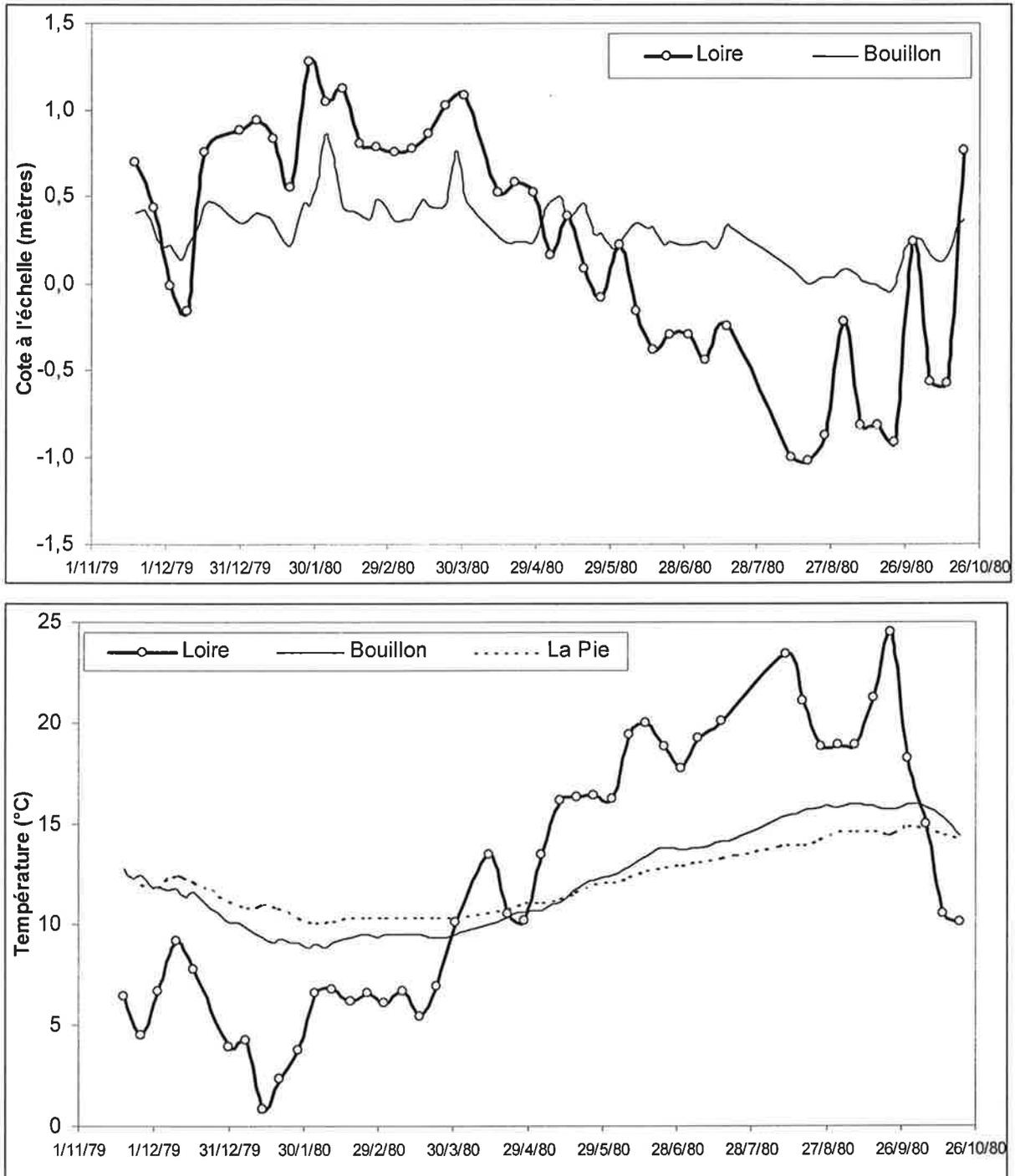


Figure 1.15: Variations synchrones des cotes (graphique du haut) et des températures (graphique du bas) de la Loire à Jargeau, et des exutoires du système karstique du Val d'Orléans, la Pie et le Bouillon, pour le cycle hydrologique 1979-1980 (graphiques construits à partir des données de J.L. Chéry, 1983).

Les variations géochimiques

Alberic et Lepiller (1998) montrent qu'en période d'étiage, les teneurs en chlorures mesurées au Bouillon, sont quasi identiques, à celles de la Loire à Jargeau trois jours plus tôt. Les chlorures sont conservatifs et leurs variations observées aux exutoires sont donc fortement corrélées à celles des eaux de la Loire.

Entre le 19/11/79 et le 20/10/80, J.L. Chéry (thèse, 1983) a mesuré les teneurs en éléments majeurs de façon hebdomadaire à Jargeau sur la rive gauche de la Loire ainsi qu'à la résurgence de la Pie, et tous les deux jours à la source du Bouillon. Dans le travail présent, nous avons repris les valeurs obtenues par Chéry pour les reporter sur des diagrammes binaires concentrations au Bouillon en fonction des concentrations en Loire à Jargeau. Ces diagrammes sont présentés dans l'annexe 3. Les temps moyens de séjour calculés à partir des traçages entre Jargeau et la source du Bouillon variant de 4 jours 2 heures en période de moyennes eaux à 5 jours 19 heures en période d'étiage, les diagrammes ont été tracés pour des valeurs mesurées le jour même à Jargeau et au Bouillon, 4 jours et enfin 7 jours plus tard au Bouillon. Pour tous les éléments reportés, les meilleurs coefficients de corrélation sont obtenus pour un intervalle de 4 jours, ce qui correspond approximativement au temps de séjour moyen des eaux de la Loire dans le système karstique entre Jargeau et la résurgence du Bouillon.

Les diagrammes tracés montrent que les eaux subissent un enrichissement global au cours de leur traversée du système karstique (fig.1.16).

Pour certains éléments, les corrélations entre les entrées (Jargeau) et les sorties (le Bouillon) du système karstique sont meilleures que pour les chlorures. Il s'agit du potassium ($R^2=0,869$), du sodium ($R^2=0,864$) et du magnésium ($R^2=0,842$). Les chlorures sont moins bien corrélés ($R^2=0,665$). On peut considérer que le magnésium est conservatif dans ce

système. En effet, du fait de l'absence de dolomite dans les calcaires de Beauce, l'essentiel du magnésium aux exutoires des drains karstiques provient de la Loire. La légère augmentation observée peut provenir d'apports anthropiques (infiltration d'eau de nappe alluviale).

Au contraire, le calcium n'est pas du tout conservatif. Ses teneurs augmentent en raison de la dissolution des carbonates de calcium par le CO₂ dissous (Bakalowitz, 1979). Comme cette dissolution est une réaction à cinétique lente, les teneurs en hydrogénocarbonates HCO₃⁻ et calcium augmentent en fonction de la distance parcourue dans les drains karstiques depuis la Loire. La figure 1.17, tracée à partir des données de J.L. Chéry (1983), illustre bien ce phénomène : les eaux de la Pie située à 21 km de Jargeau sont plus chargées en ions HCO₃⁻ et Ca²⁺ que les eaux du Bouillon localisées à 14 km de Jargeau.

Les points de la figure 1.17 s'alignent sur une droite de pente voisine de 0,5. La dissolution d'une mole d'ions Ca²⁺ produit 2 moles d'ions HCO₃⁻. Cela est conforme à l'intervention d'une mole de CO₂ pour la dissolution d'une mole de carbonate de calcium, selon la réaction suivante :



L'agent de dissolution CO₂ provient essentiellement de la dégradation bactérienne, à l'intérieur du système, des matières organiques introduites par les eaux de la Loire. Ce processus a pu être simulé par des expériences en laboratoire (Châtelain et Livrozet, 1982).

C.Grosbois (1998) a remarqué que les teneurs en calcite néoformée augmentaient, surtout en période de basses eaux, entre Orléans et Bréhémont, commune située en aval d'Orléans, entre Chinon et Tours (fig.1.9). Cette augmentation est probablement liée en partie aux apports des eaux ayant transité dans le système karstique du Val d'Orléans.

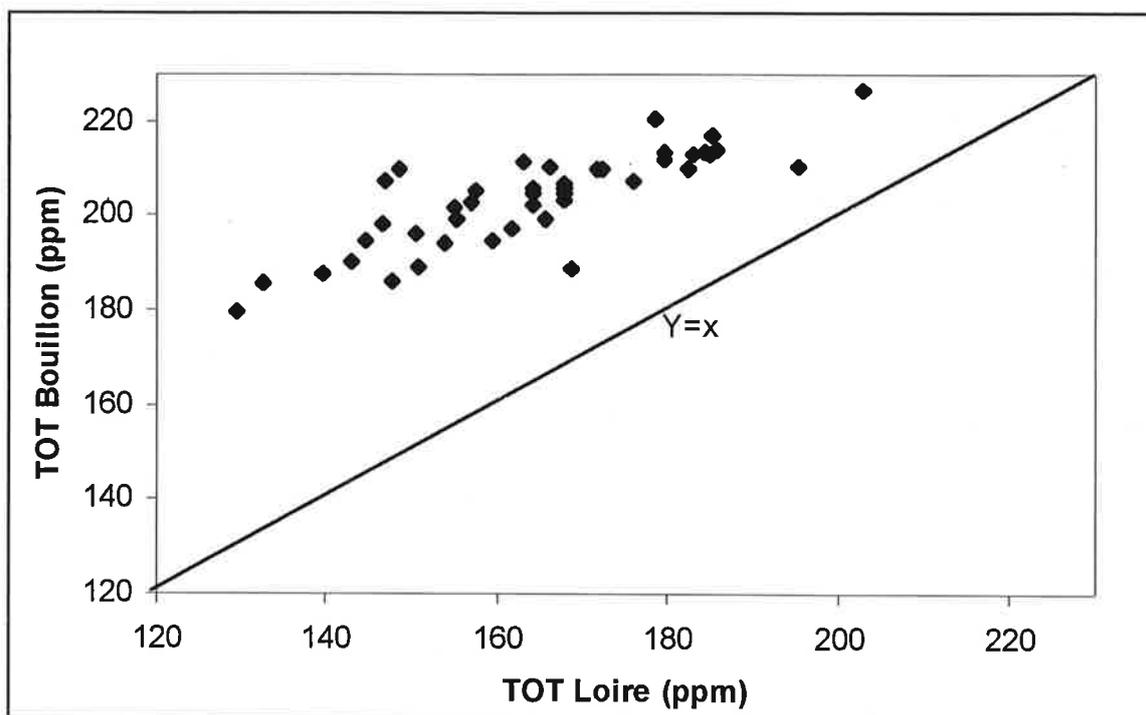


Figure 1.16: Enrichissement des eaux au cours de leur séjour dans le système karstique entre la Loire à Jargeau et l'exutoire du Bouillon. Cycle hydrologique 1979 –1980 (Données sources : Thèse J.L. Chéry, 1983).

$$\text{TOT} = \sum([\text{K}^+] + [\text{Na}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{HCO}_3^-])$$

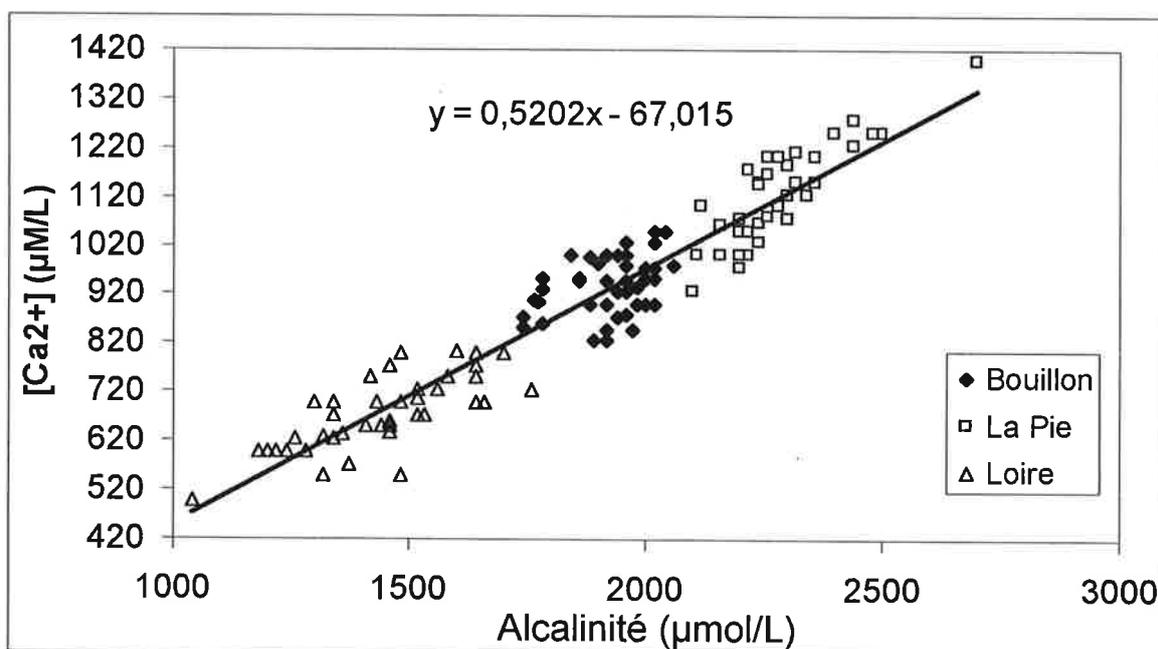


Figure 1.17 : Teneurs en calcium en fonction de l'alcalinité dans la Loire (Jargeau), à la source du Bouillon, et à la résurgence de la Pie. Cycle hydrologique 1979 –1980- (Données sources : Thèse J.L. Chéry, 1983).

1.3.3.2. Définition d'un pôle géochimique "Loire-système karstique"

Les bonnes corrélations obtenues, sur les données de J.L. Chéry (1983), pour de nombreux éléments entre la Loire et la source du Bouillon (annexe 3) nous ont conduits à rechercher, sur ces mêmes données, les rapports élémentaires invariants au cours du temps en Loire et dans le réseau karstique. Le tableau 1.5 représente les variations annuelles des rapports élémentaires $X/Y = [X]/[Y]$ dans la Loire à Jargeau, à la source du Bouillon et sur l'ensemble des deux systèmes mesurés par Chéry (1983) sur le cycle hydrologique 1979-80.

Les teneurs en éléments majeurs mesurées dans la Loire à Orléans par C.Grosbois de Mai 1994 à Avril 1996 (Grosbois et Al., 2000) ainsi que les teneurs analysées pendant cette thèse ont également été considérées, dans l'annexe 3, pour la définition des rapports invariants de la Loire.

En dehors du rapport quasi constant HCO_3/Ca lié à la dissolution de la calcite, on peut considérer comme invariants les rapports Mg/Cl , HCO_3/Mg , Na/K , Mg/K , SO_4/Cl et SO_4/Mg dont les variations annuelles dans le système (Loire-Bouillon) ne dépassent pas 15%. Grâce à ces rapports, on dispose d'un moyen d'évaluer l'influence de la Loire et les mélanges qu'elle subit dans les nappes souterraines. En effet, si X/Y et Z/Y sont deux rapports élémentaires invariants de la Loire, en reportant sur un diagramme binaire, le rapport X/Y en fonction du rapport Z/Y , pour les eaux du Val d'Orléans, en particulier celles de Sandillon, les points subissant un mélange entre les systèmes "Loire" et "nappe alluviale" doivent s'aligner sur une droite passant par ces deux pôles. La démonstration de cette loi se trouve en annexe 3.

On caractérise finalement le pôle Loire-réseau karstique par les rapports des concentrations (mg/L) en sodium, magnésium et potassium affectés de leurs écarts-types:

$$\text{Na}/\text{K} = 2,9 \pm 0,41 \quad \text{et} \quad \text{Mg}/\text{K} = 1,44 \pm 0,20$$

On dispose ainsi d'un modèle de mélange pour étudier les relations fleuve-nappes

Tableau 1.5: Rapports moyens des concentrations (ppm) en éléments majeurs dans la Loire, à la résurgence du Bouillon et sur l'ensemble (Loire, Bouillon) pendant le cycle hydrologique 1979-1980.

Les moyennes, écarts types et coefficients de variation (CV=écart type×100/moyenne) sont calculés sur les données hebdomadaires extraites de la thèse de J.L.Chéry (1983).

	X/Y	SO ₄ /Cl	HCO ₃ /Cl	K/Cl	Na/Cl	Mg/Cl	Ca/Cl	NO ₃ /Cl
<i>Loire</i>	moyenne	1,86	8,24	0,29	0,85	0,39	2,54	0,12
	Ecart-type	0,30	1,68	0,06	0,23	0,06	0,53	0,06
	CV (%)	16,0	20,3	20,8	27,0	15,8	20,9	53,9
<i>Bouillon</i>	moyenne	1,79	10,4	0,29	0,82	0,41	3,34	0,15
	Ecart-type	0,21	1,02	0,05	0,16	0,04	0,44	0,08
	CV (%)	11,8	9,8	17,6	20,2	8,8	13,2	51,4
<i>Loire et Bouillon</i>	moyenne	1,81	9,25	0,29	0,83	0,40	2,91	0,14
	Ecart-type	0,27	1,74	0,06	0,20	0,05	0,61	0,07
	CV (%)	14,9	18,8	20,1	24,6	13,3	21,0	54,4
	X/Y	SO ₄ /HCO ₃	SO ₄ /K	SO ₄ /Na	SO ₄ /Mg	SO ₄ /Ca	SO ₄ /NO ₃	HCO ₃ /Ca
<i>Loire</i>	moyenne	0,23	6,60	2,28	4,78	0,76	41,5	3,26
	Ecart-type	0,04	1,15	0,50	0,65	0,16	74,9	0,25
	CV (%)	19,4	17,4	21,8	13,7	21,6	180,7	7,7
<i>Bouillon</i>	moyenne	0,17	6,43	2,28	4,34	0,54	16,9	3,15
	Ecart-type	0,02	1,23	0,50	0,53	0,08	13,2	0,20
	CV (%)	10,8	19,2	21,7	12,3	15,1	77,8	6,4
<i>Loire et Bouillon</i>	moyenne	0,20	6,51	2,28	4,55	0,65	28,8	3,20
	Ecart-type	0,05	1,19	0,49	0,64	0,17	54,6	0,23
	CV (%)	22,6	18,3	21,6	14,1	25,7	189,3	7,2
	X/Y	HCO ₃ /K	Na/K	Mg/K	Ca/K	NO ₃ /K	HCO ₃ /Na	HCO ₃ /Mg
<i>Loire</i>	moyenne	29,4	2,96	1,38	9,12	0,44	10,2	21,1
	Ecart-type	6,8	0,47	0,19	2,32	0,25	2,9	3,1
	CV (%)	23,0	15,7	13,6	25,5	58,1	28,0	14,9
<i>Bouillon</i>	moyenne	37,5	2,85	1,48	12,1	0,57	13,3	25,2
	Ecart-type	6,7	0,34	0,19	2,7	0,34	2,8	1,8
	CV (%)	17,8	12,0	13,0	22,0	59,8	21,2	7,3
<i>Loire et Bouillon</i>	moyenne	33,5	2,90	1,44	10,6	0,51	11,8	23,1
	Ecart-type	7,9	0,41	0,20	2,9	0,31	3,3	3,3
	CV (%)	23,7	14,2	13,9	27,5	60,8	27,7	14,2
	X/Y	HCO ₃ /NO ₃	Mg/Na	Ca/Na	NO ₃ /Na	Mg/Ca	NO ₃ /Mg	NO ₃ /Ca
<i>Loire</i>	moyenne	173	0,48	3,17	0,15	0,16	0,30	0,043
	Ecart-type	314	0,08	0,99	0,09	0,03	0,17	0,022
	CV (%)	181,5	17,5	31,2	60,9	21,0	55,2	50,3
<i>Bouillon</i>	moyenne	98,1	0,52	4,29	0,21	0,13	0,37	0,05
	Ecart-type	72,6	0,08	1,08	0,13	0,02	0,20	0,02
	CV (%)	74,0	15,9	25,1	62,1	12,5	54,1	47,5
<i>Loire et Bouillon</i>	moyenne	134	0,50	3,74	0,18	0,14	0,34	0,04
	Ecart-type	229	0,09	1,18	0,12	0,03	0,19	0,02
	CV (%)	170	17,3	31,5	63,7	21,6	55,7	48,8

1.3.3.3. Etudes de la nappe alluviale

Les études de la nappe alluviale du Val d'Orléans sont rares. Citons l'étude hydrogéologique de Desprez (1967) dont les résultats ont déjà été donnés précédemment. Citons également la modélisation hydrogéologique des aquifères du Val réalisée par Zunino (1979). Ce dernier se place en régime permanent, et se base sur la piézométrie d'Octobre 1966 (basses eaux). Son modèle utilise des mailles carrées de 635 m de côté affectées d'une transmissivité moyenne. Une des conclusions de Zunino, dans son travail, est que "la connaissance des aquifères du Val mériterait d'être approfondie par des modèles de simulation plus performants et adaptés à l'échelle des problèmes posés". La taille de la maille choisie (635 mètres) est en effet certainement grande devant l'hétérogénéité des alluvions. La transmissivité affectée à chaque maille correspond à des mesures ponctuelles qui n'ont pas forcément valeur de moyenne sur l'ensemble de la maille, dans la réalité. On peut reprocher à ce modèle de ne pas être validé, dans les alluvions, par des expériences de traçage.

En effet, à la même époque, Bigot (1977, 1984) montre la complexité des circulations dans les alluvions du Val d'Orléans. Il teste des traceurs lanthanides-EDTA sur un champ de piézomètres alluvionnaires localisé à Pontvilliers, dans la commune de Darvoy, au sud de la levée de la Loire. Le réseau piézométrique est composé de 16 piézomètres disposés en éventail dans la direction générale d'écoulement, sur une superficie de 2800 m². Bigot note que la piézométrie à l'échelle du réseau varie de manière sensible d'un piézomètre à l'autre sans refléter le gradient hydraulique régional. Il mentionne l'existence de points hauts dans la piézométrie. Une première injection de sulforhodamine G dans le piézomètre le plus en amont de l'écoulement supposé ne donne aucune restitution dans le reste du réseau. Une deuxième injection de fluorescéine, puis de lanthanides complexés à l'EDTA, est réalisée dans un piézomètre situé plus en aval. Ces traçages se traduisent, en régime naturel d'écoulement, par

le passage des traceurs dans tous les piézomètres (sauf le premier piézomètre d'injection). Les vitesses maximales (7,5 m/h) sont observées pour les piézomètres situés en aval de l'écoulement théorique. Les courbes de restitution obtenues rendent compte du passage des traceurs par plusieurs chemins d'écoulement avec des vitesses différentes, ce qui traduit l'hétérogénéité du système à l'échelle observée (60m × 60m). Bigot observe également le passage des traceurs de la nappe alluviale vers la nappe du calcaire de Pithiviers puisqu'il retrouve les traceurs les plus stables (Dy-EDTA) dans des forages calcaires situés à quelques centaines de mètres de l'injection. Les vitesses d'écoulement obtenues dans les calcaires varient de 220 à 270 m/h.

Enfin, sur le plan purement hydrodynamique, citons les travaux de Peaudecerf (1970), de Gonzales et Lepiller (1984) sur le suivi piézométrique simultané des cotes de la Loire et de la nappe alluviale d'Orléans. Les deux études montrent que le niveau de la nappe alluviale suit celui de la Loire avec un décalage de 12 à 24h. Les cotes piézométriques de la nappe se déduisent de celles de la Loire par une relation linéaire simple qui traduit la transmission des impulsions de la Loire à la nappe. Par exemple, si H_t est la cote de la Loire à Orléans à l'instant t , la cote de la nappe $h(t)$ à environ deux kilomètres au Sud-Ouest d'Orléans, peut s'exprimer, en mNGF, par la relation $h(t+24) = 43,07 + 0,518H_t$ (Gonzalez et Lepiller, 1984). Le coefficient de corrélation linéaire correspondant à cette droite de régression est $R=0,978$. Gonzalez et Lepiller (1984) montrent de plus que les niveaux des nappes alluviale et calcaire se suivent avec quelques centimètres de différence seulement ce qui traduit une transmission rapide des charges entre les deux nappes. Le même type de relation sera utilisée au chapitre 6 pour étudier les corrélations piézométriques et les vitesses de transmission entre la Loire et la nappe.

1.3.4. Hydrogéologie à l'échelle de la carrière de Sandillon

Au sujet de l'hydrogéologie à l'échelle de la carrière de Sandillon, on ne dispose pas d'une précision supérieure à celle donnée dans les paragraphes précédents. L'étude d'impact préalable à l'ouverture de la carrière (Chigot et Al., 1974) utilise la carte piézométrique réalisée en juillet 1992, par le BRGM, pour la définition du champ de protection des captages AEP d'Orléans. Cette carte est d'une précision moindre (isopièzes séparées de 1 mètre) à celle construite par Desprez (1976) sur la piézométrie de Novembre 1966. Les données de Desprez ont également fait l'objet d'un traitement informatique (Desprez, Martin et Al., 1976) conduisant au tracé d'une nouvelle carte où c'est essentiellement la localisation des axes karstiques autour de la carrière qui a changé. Cette carte est reproduite, à l'échelle de la carrière, figure 1.18.

1.3.4.1. Localisation des axes karstiques

La localisation des axes karstiques est très délicate car elle s'appuie en grande partie sur la piézométrie. C'est pourquoi, la position de ces axes a évolué, au cours du temps, sur les différentes cartes que l'on possède.

L'axe karstique qui traversait la carrière du Nord-Est au Sud-Ouest (fig.1.10) sur la carte de Desprez (1976), bien qu'il n'apparaisse pas sur la nouvelle carte, a été reporté sur la figure 1.18 car il coïncide étrangement avec la position des gouffres et dolines répertoriés sur la carrière. Sur la nouvelle carte, l'axe de drainage principal reliant Jargeau à Sandillon est situé plus au nord que sur l'ancienne carte. Il est donc rapproché de la carrière. Un nouvel axe, non indiqué par Desprez longe la carrière par le sud, cet axe provient certainement de la perte du "Grand Bouge" localisé sur la rive gauche de la Loire, au Sud-Est de la carrière. Cette perte a été identifiée dès 1901 par les traçages de Marboutin.

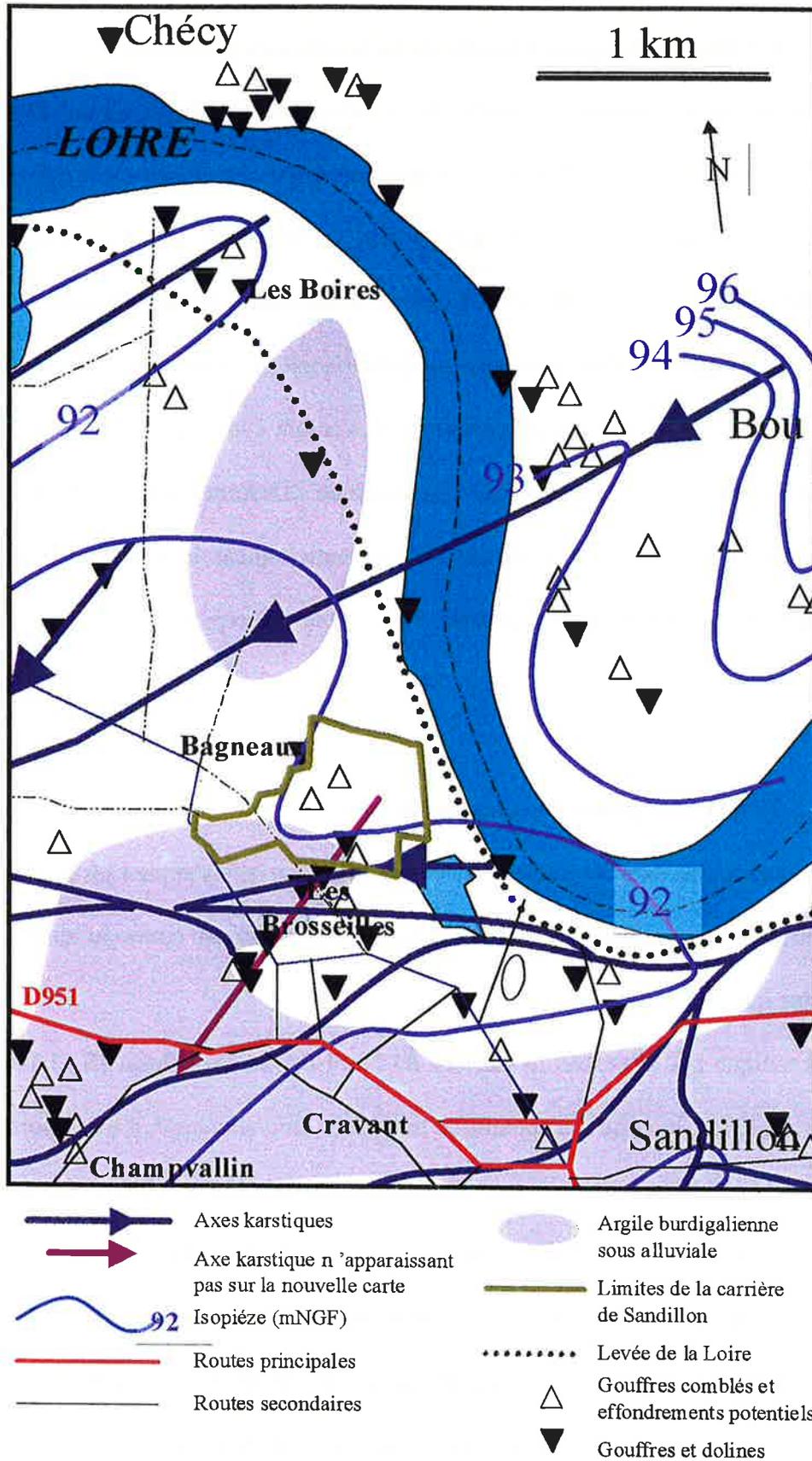


Figure 1.18: Cadre hydrogéologique de la carrière de Sandillon. (Extrait de la carte piézométrique à l'étiage de Novembre 1966 -données de Desprez, 1976- retraitée en 1995)

Ayant injecté 30 kg d'uranine le 22/5/1901, il retrouve ce traceurs 20 h après l'injection dans 4 puits de Champvallin (fig.1.18) et au pont du Bouchet, sur le Loiret, 55 heures après l'injection (Marboutin, 1901).

1.3.4.2. Localisation des argiles burdigaliennes

Les argiles burdigaliennes sous-alluviales sont situées essentiellement dans la partie Ouest de la carrière (fig.1.7 et 1.18). Cela rend possibles les échanges entre les nappes calcaire et alluviale sur les $\frac{3}{4}$ des terrains de la carrière.

1.3.4.3. Position de la Loire et gradient hydraulique

Dans la notice explicative de la carte géologique 1/50000 ème "la Ferté-St-Aubin" (Gigout, 1971), Desprez mentionne qu'à Sandillon, le plan d'eau de la Loire se situe environ 3 mètres au-dessus de la nappe en toute saison.

La carrière est située dans une des zones du Val d'Orléans où le gradient hydraulique est le plus faible. Celui-ci passe de 10^{-3} au niveau de la Loire à $1,8.10^{-4}$ à l'Ouest de la carrière.

Ce faible gradient hydraulique associé à un niveau de Loire situé 3 mètres au-dessus du niveau de la nappe traduit une forte déconnexion de la Loire par rapport à la nappe au niveau de la boucle de Sandillon.

1.4. Bilan sur le cadre hydrogéologique de la carrière

La littérature scientifique sur le Val d'Orléans fournit les grandes lignes de la géologie et de l'hydrogéologie de cette région. Cette plaine alluviale se caractérise par la disparition progressive des argiles burdigaliennes sous alluviales à partir de Sigloy et jusqu'à la limite St-Cyr-en-Val – Sandillon – Jargeau à l'Ouest de laquelle ces argiles ne sont plus du tout

présentes. La carrière se situe dans la zone de disparition de ces argiles, et le seul sondage de la Banque du Sous-sol réalisé au niveau de la carrière ne révèle pas leur présence. Sur le plan hydrogéologique, l'absence des argiles burdigaliennes résulte en une seule masse d'eau qui traverse calcaire et alluvions. Ces communications inter nappes ont déjà été mises en évidence, plus en amont, lors d'expériences de traçage à Darvoy (S. Bigot, 1977) et par des transferts de charge très rapides entre les deux nappes à Orléans (Gonzalez et Lepiller, 1984). Il semble également bien établi que, dans la majeure partie du Val d'Orléans, la Loire impose la piézométrie aux deux nappes.

La majorité des études hydrogéologiques et hydrogéochimiques, qui ont été réalisées dans le Val d'Orléans ont porté essentiellement sur la nappe du calcaire de Pithiviers et plus particulièrement sur son réseau karstique alimenté par la Loire. La localisation, dans le calcaire, des captages destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) a motivé un grand nombre de ces études. En conséquence, l'étude de la nappe alluviale et des parties non karstifiées du calcaire a été négligée, surtout sur le plan géochimique. Pourtant, ces parties de la nappe jouent un rôle important. En effet, l'enrichissement des eaux du karst, en presque tous les éléments majeurs, au cours de leur traversée du Val, en période de basses eaux (annexe 3) peut s'expliquer par le drainage de ces zones grâce aux axes de circulation karstique. Il importe donc de mieux comprendre les mécanismes de déplacement des espèces chimiques au sein de la nappe alluviale et les échanges géochimiques avec les axes de drainage.

Les circulations, au sein des alluvions, semblent d'emblée caractérisées par une très grande hétérogénéité non prise en compte dans les modèles d'écoulement du Val d'Orléans. Les vitesses mesurées par Bigot (1977) y sont beaucoup plus faibles que dans le karst.

La carrière de Sandillon se situe dans une zone à faible gradient hydraulique et fortement karstique. D'après les cartes piézométriques récentes, ces axes ne traversent pas la

carrière mais on a vu que la localisation de ces axes était très spéculative et dépendait de l'interprétation des cartes piézométriques, les lieux d'injection et la restitution de traceurs laissant beaucoup de marge à la localisation de tels chenaux d'écoulement. De plus, la présence de nombreux gouffres et dolines sur la carrière ainsi que la localisation d'axes traversant la carrière sur les cartes piézométriques anciennes prouvent la forte karstification du calcaire de Pithiviers au niveau de la carrière. On peut donc s'attendre à rencontrer, dans la nappe du calcaire, au niveau de la carrière, des vitesses de transit du même ordre de celles mesurées par les traçages des pertes de la Loire, c'est à dire des vitesses supérieures à 100 m/h. Dans la nappe alluviale, au contraire, tout porte à croire (faible perméabilité, faible gradient hydraulique) que les circulations sont lentes et hétérogènes. Le réseau piézométrique à mettre en place sur la carrière de Sandillon devra donc comporter deux échelles. Dans les alluvions, il devra être suffisamment petit (de l'ordre de quelques centaines de mètres carrés) et dense (piézomètres espacés d'une dizaine de mètres) pour prendre en compte la grande hétérogénéité de cette formation et la lenteur des écoulements. Par contre, dans la nappe calcaire, les données de la littérature nous poussent à adopter une échelle d'observation plus grande que dans les alluvions, de l'ordre de la taille de la carrière (500 –1000 m) et de considérer quelques exutoires du réseau karstique comme points d'observation à longue distance. Le régime hydrogéologique du Val d'Orléans est donc dominé a priori par de forts contrastes entre écoulements rapides dans le calcaire et lents dans les alluvions.

CHAPITRE 2

LA CARRIERE DE GRANULATS ET SES ENVIRONS: L'EAU ET LES ALLUVIONS

Le premier volet de ce chapitre est consacré à la description des activités de la carrière et de son environnement, et aux impacts de ces activités sur la nappe. Le deuxième volet décrit le gisement alluvionnaire et les matériaux extraits. Cette étude montre en particulier que la présence de l'exploitation permet d'approfondir la structure des formations géologiques superficielles et de préciser les échelles d'hétérogénéité qui n'apparaissent pas clairement dans la littérature sur la géologie du Val d'Orléans.

2.1. Historique de la présence de l'entreprise Morillon Corvol dans le méandre de Bou

Les alluvions déposées par les fleuves et leurs affluents constituent une source importante d'approvisionnement en sables et graviers (fig.2.1). Ces matériaux fossiles destinés à des usages nobles (fabrication des bétons et revêtements de chaussée) ont été

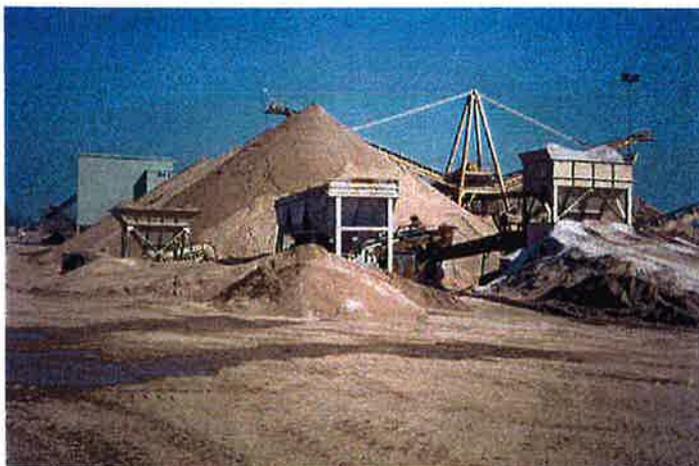


Figure 2.1: Stocks de sable extrait des alluvions de la Loire sur la carrière de Sandillon, à Bagneaux.

extraits depuis longtemps dans toutes les grandes plaines alluviales des fleuves de France dont le lit de la Loire.

La société Morillon Corvol est présente dans la boucle de Sandillon depuis 1973. C'est d'abord dans le lit mineur de la Loire, sur les Boires de la Haute Isle (fig.2.2) qu'a d'abord eu lieu l'extraction des matériaux alluvionnaires de 1973 à 1995. En 1995, l'entreprise Morillon Corvol rachète la société Pierre Montigny qui exploitait, depuis 1976, le domaine de Hautes Isles situé de l'autre côté de la levée de la Loire. Les travaux d'exploitation sur le lieu-dit Bagneaux (fig.2.2) localisé à l'ouest de la levée, ont commencé en Avril 1996. C'est actuellement la seule zone en cours d'exploitation au niveau de la boucle. Les exploitations dans le lit mineur de la Loire ne sont plus autorisées depuis l'arrêté du 22 Septembre 1994. Aujourd'hui, l'activité sur les anciennes carrières du site se résume à des travaux de réaménagement des lacs de gravières en réserves ornithologiques ou en champs cultivables grâce à l'apport de remblais.

2.2. L'exploitation de granulats du site de Bagneaux

2.2.1. L'extraction des alluvions

Sur le site de Bagneaux, les terrains non encore décapés sont en culture, même pendant l'avancée de l'extraction. Celle-ci s'effectue d'Est en Ouest, c'est à dire dans le sens présumé d'écoulement de la nappe afin de limiter les risques de colmatage des berges du lac creusé par l'exploitation (Peaudecerf, 1975). En effet, les matières en suspension argileuses qui sont transportées par le courant et qui sont responsables du colmatage des berges du lac d'extraction sont en permanence retirées du front d'extraction quand ce dernier est localisé à l'aval de l'écoulement.

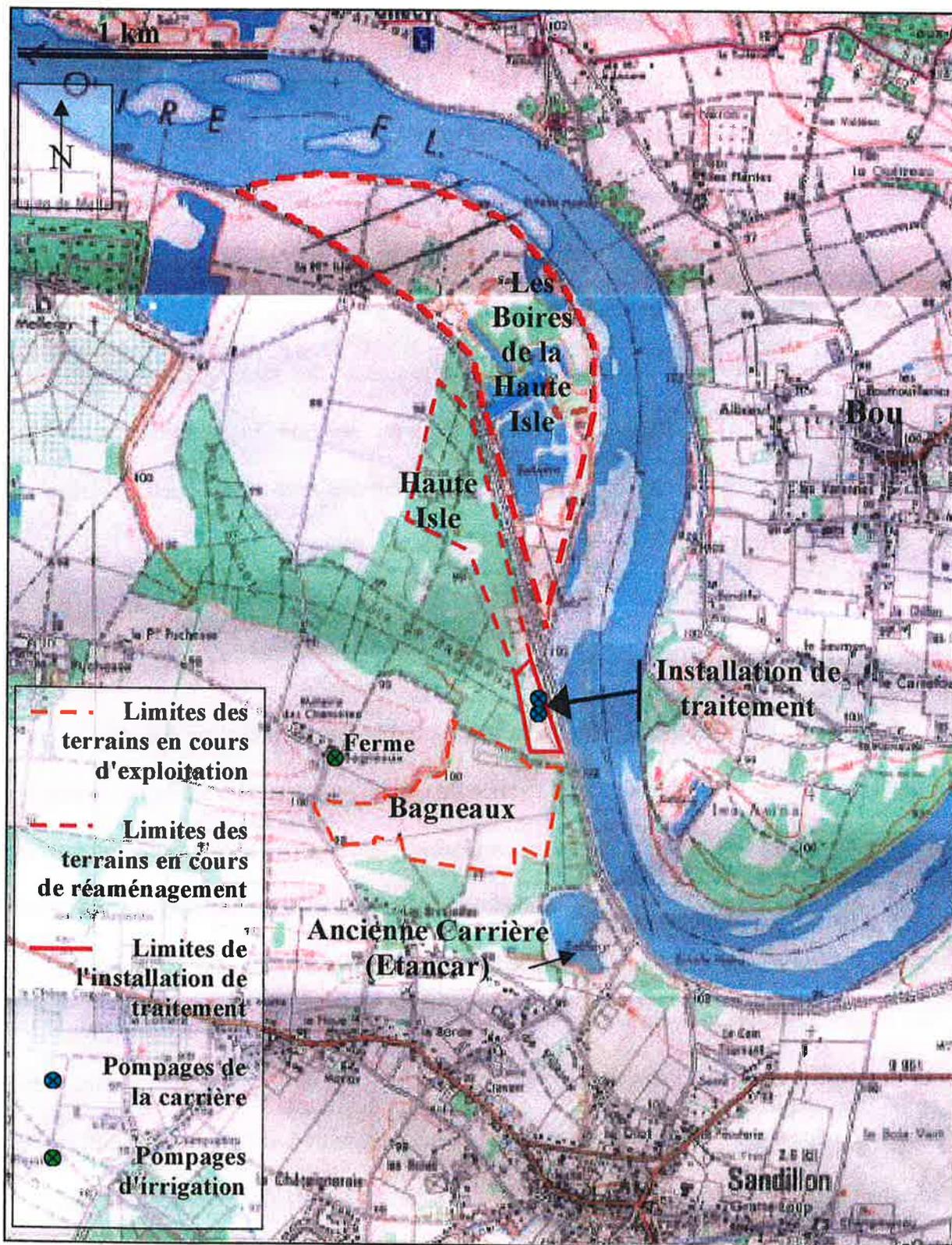


Figure 2.2: Implantation de l'entreprise Morillon-Corvol dans le méandre de Bou de 1997 à 2000

Les opérations d'extraction commencent par le décapage de la terre végétale (30 cm d'épaisseur) et des sables limoneux (figs.2.12 et 2.13) sur 2,40 m d'épaisseur. Le gisement alluvionnaire fait environ 7m d'épaisseur sous les limons, une couche protectrice d'environ un mètre devant être laissée au-dessus du toit calcaire (NB: Ces chiffres constituent des valeurs moyennes). Une description plus détaillée du gisement est présentée au paragraphe 2.5. L'extraction s'effectue à l'excavatrice à godet (fig.2.3) dans la nappe alluviale ce qui permet un premier lavage des boues argileuses lors de la remontée des alluvions brutes appelées « tout-venant », et la décantation d'une couche argileuse au fond du lac d'extraction. Les godets sont vidés sur un tapis roulant (fig.2.3) qui achemine le tout-venant vers l'installation technique où sont effectuées les opérations de lavage et de criblage.

2.2.2. Le système de lavage du tout-venant

Le lavage des sables et graviers est indispensable car la présence d'argile sur les matériaux diminue considérablement l'adhérence du ciment sur les grains de sable lors de la fabrication du béton. Les eaux de lavage très argileuses sont rejetées dans un premier bassin de décantation qui se déverse dans un second, qui lui-même se déverse dans un troisième bassin dit d'« eau claire ». Théoriquement ce système de décantation des fines argileuses permet le recyclage des eaux de lavage. En pratique, la vitesse de décantation dépend de la nature des argiles et le lac d'eau claire possède encore une grande quantité de matières en suspension. Grâce à une pompe de surface ayant un débit d'environ 400 m³/h, cette eau claire est ré-acheminée vers l'usine pour être utilisée à nouveau dans les opérations de lavage. Le circuit de décantation des eaux de lavage, tel qu'il était en Septembre 2000, est présenté figure 2.3. Deux pompes supplémentaires, situées sous l'installation technique dans les calcaires à 25 m de profondeur permettent de compléter les opérations de lavage avec un débit total de 700 m³/h. Les pompes ne tournent que lorsque l'usine fonctionne.

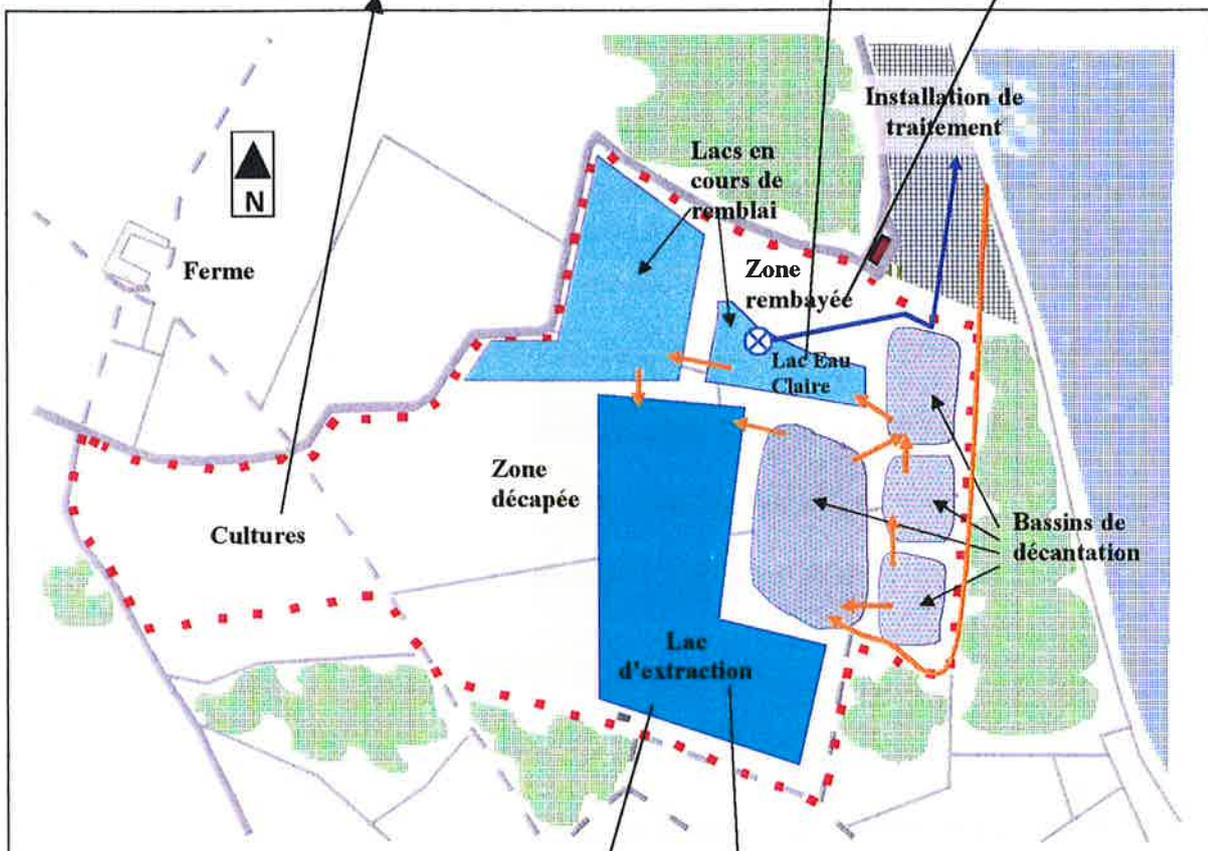
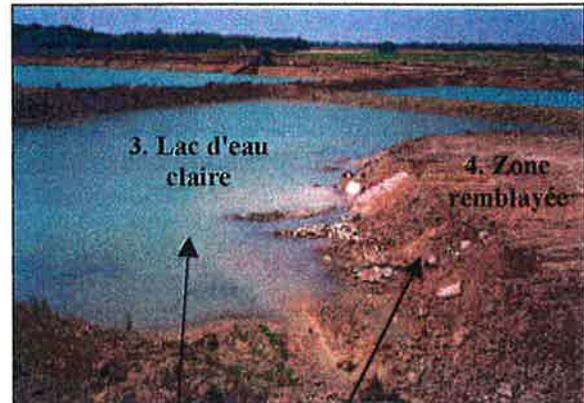


Figure 2.3: Activités liées aux travaux d'extraction sur la carrière de Sandillon. Situation en Sept.2000.
 1. Extraction des matériaux à l'excavatrice. 2. Acheminement à l'usine de traitement par tapis roulant. 3. Lavage des matériaux à partir de l'eau pompée (⊗) dans le lac d'eau claire, dernière étape du circuit de décantation des eaux de lavage (→). 4. Remblaiement des lacs creusés par l'extraction.

En général, les pompes sont mises en route à 6h00 et arrêtées à 17h00. Etant donné leur débit important, ces pompes provoquent un rabattement de la nappe d'environ 14 mètres au niveau des pompes en régime permanent. Les puits dans lesquels sont installées les pompes mesurent 39 m de profondeur. Ils interceptent certainement un ou plusieurs axes karstiques car des cavités ont été rencontrées lors de leur forage. Un dernier pompage localisé sous l'installation technique à 23 mètres, dans l'un de ces forages, fournit les eaux sanitaires avec un débit nominal de 20 m³/h.

2.2.3. Remise en état des terrains après l'extraction

Le lac creusé par l'extraction des alluvions est remblayé (fig.2.3) progressivement à l'aide des matériaux inertes suivants : terres, gravats, briques, ardoises, verres et céramiques. Tous les autres types de déchets sont interdits. La terre limoneuse décapée est soigneusement conservée pendant la durée de l'extraction pour être remise en place sur les remblais après la période d'extraction. Les terrains exploités retourneront ainsi à leur fonction initiale: la culture.

2.2.4. Quelques chiffres sur l'activité de la carrière

Quantité de Tout-Venant extrait chaque année: 510 000 tonnes soit 20 000 m³.

Répartition sables et graviers: 25% de sables ; 75 % de graviers

Proportion d'argiles : 8%

2.3. Les exploitations agricoles avoisinantes

Les terrains exploités par la carrière de Bagneaux sont encore partiellement cultivés pendant l'avancée des travaux d'extraction. De plus, les terrains qui entourent la carrière sont également cultivés. Ces cultures ont trois influences principales sur les eaux de la nappe au niveau de la carrière: les épandages d'engrais et pesticides, les pompages d'irrigation et le drainage des eaux de ruissellement.

2.3.1. Les épandages

L'influence principale des exploitations agricoles environnantes est un déversement important d'engrais, herbicides, insecticides et fongicides. L'objet de ce paragraphe est de rappeler la grande variété et la composition de toutes ces espèces chimiques introduites dans le sol par les épandages liés aux cultures. Une partie non négligeable de ces apports est lessivée par les pluies et les eaux d'arrosage pour atteindre ensuite la nappe dont ils modifient de manière importante la qualité chimique de l'eau. La composition des engrais et des pesticides utilisés sur les terrains de la carrière est donnée ci-dessous (R. Sicre, les Engrais, CRDP Nantes) après discussion avec M. Rabourdin, agriculteur de la ferme de Bagneaux (fig.2.4).

2.3.1.1. Les engrais azotés

La forme azotée utilisable par les plantes est le nitrate NO_3^- mais c'est aussi la forme la plus facilement lessivable. Par contre l'azote, sous forme d'ions ammonium (NH_4^+) qui se lie électrostatiquement aux argiles du sol, chargées négativement, est fixé dans le sol. Pour être assimilable par les plantes l'ion ammonium doit être préalablement oxydé en ion NO_3^- par des bactéries (nitrosomas, nitrobacter) contenues dans le sol, en présence de l'oxygène de l'air. En milieu anaérobie, les nitrates sont transformés en nitrites (NO_2^-) puis en diazote N_2 . En

France, c'est le nitrate d'ammonium ou "ammonitrate" (NH_4NO_3) qui est le plus utilisé. Les phosphates et sulfates d'ammonium sont également utilisés ainsi que l'urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$). Le nitrate d'ammonium sous forme solide est souvent stabilisé avec 1,6% de nitrates de magnésium. L'apport d'azote se fait également sous forme liquide comme c'est le cas pour les cultures présentes autour de la carrière de Sandillon. Cette solution est un mélange à 50% d'urée et 50% de nitrate d'ammonium (communication personnelle des agriculteurs Rabourdin).

2.3.1.2. Les engrais potassiques

Le potassium utilisé comme engrais provient à 95% de KCl et plus rarement (5%) de K_2SO_4 . KCl est parfois associé à NaCl (engrais à 40% en équivalent K_2O , c'est-à-dire 63 % de KCl et 37 % de NaCl). Avec KCl on retrouve également des traces de KBr présent dans le minerai brut, la sylvinite. C'est la forme KCl qui est utilisée autour de la carrière.

2.3.1.3. Les engrais phosphatés

Le phosphate présent dans les engrais utilisés autour de la carrière est du superphosphate normal (18% de P_2O_5) Il est constitué principalement par un mélange de phosphate monocalcique et de sulfate de sodium. Sa fabrication nécessite environ 600 kg de phosphate naturel et 370 kg de H_2SO_4 à 100% pour 1 tonne de superphosphate ($[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2, \text{H}_2\text{O}]_3, [\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}]_7$).

Les phosphates naturels contiennent souvent quelques centaines de ppm d'uranium. Ils contiennent aussi, parfois, du cadmium (de 5 à 150 ppm) qui pose des problèmes de pollution (cas de la Tunisie) car cet élément se retrouve dans les engrais.

2.3.1.4. Autres types d'engrais

Des apports de magnésie (MgO), d'oxyde de calcium (CaO), de zinc et de bore ont également lieu en particulier pour les cultures de légumes. A Bagneaux, les légumes cultivés sont principalement des pommes de terres, des petits-pois, des carottes, et des salsifis. Signalons également que les terrains situés le long du bois de Brosseilles étaient recouverts par une pépinière avant l'ouverture de la carrière, ce qui a entraîné l'épandage d'engrais spécifiques.

2.3.1.5. Herbicides, insecticides, fongicides

Les pesticides sont habituellement des molécules organiques de la famille des composés organoazotés et phosphorés (ex: alachlore, atrazine) ou bien des phénylurées (ex: isoproturon, diuron). A Bagneaux, ce sont l'alachlore (pour le maïs) et les triazines qui sont utilisés comme herbicides. Les pyréthrinés de synthèse sont apportées comme insecticides. Le soufre est utilisé comme fongicide.



Figure 2.4: Ferme de Bagneaux. Cultures de maïs au nord de la gravière.

2.3.1.6. Quantités d'engrais NPK déversées sur la ferme de Bagneaux

Au niveau de l'exploitation agricole de Bagneaux, seuls les épandages d'engrais azotés sont actuellement effectués sur la parcelle où se situe la carrière. Ces épandages ont essentiellement lieu au printemps. Les engrais phosphatés et potassiques (PK) n'ont pas été déversés sur la parcelle de la gravière depuis le début des années 90 parce que ces apports ont une action à long terme et qu'il est inutile d'enrichir un sol destiné à être bientôt décapé. Sur les autres terrains qui entourent la carrière, les engrais PK sont généralement répandus à l'automne.

Les quantités d'engrais déversées chaque année sur la ferme de Bagneaux sont données ci-dessous (données des agriculteurs, MM. Rabourdin, père et fils):

N	: 180 kg/ha/an	
K ₂ O	: 144 kg/ha/an	équivalent à 120 kg/ha/an de K élémentaire
P ₂ O ₅	: 72 kg/ha/an	équivalent à 31 kg/ha/an de P élémentaire

Si l'on considère que tout l'azote se trouve sous la forme nitrate et si l'on considère également les éléments principaux accompagnant les engrais NPK (Cl, Ca, SO₄), les quantités annuelles déversées chaque année sur les cultures environnant la carrière sont résumées ci-dessous:

Cl ⁻	: 108	kg/ha/an
PO ₄ ³⁻	: 96	kg/ha/an
NO ₃ ⁻	: 800	kg/ha/an
SO ₄ ⁻	: 113	kg/ha/an
K ⁺	: 120	kg/ha/an
Ca ⁺⁺	: 68	kg/ha/an

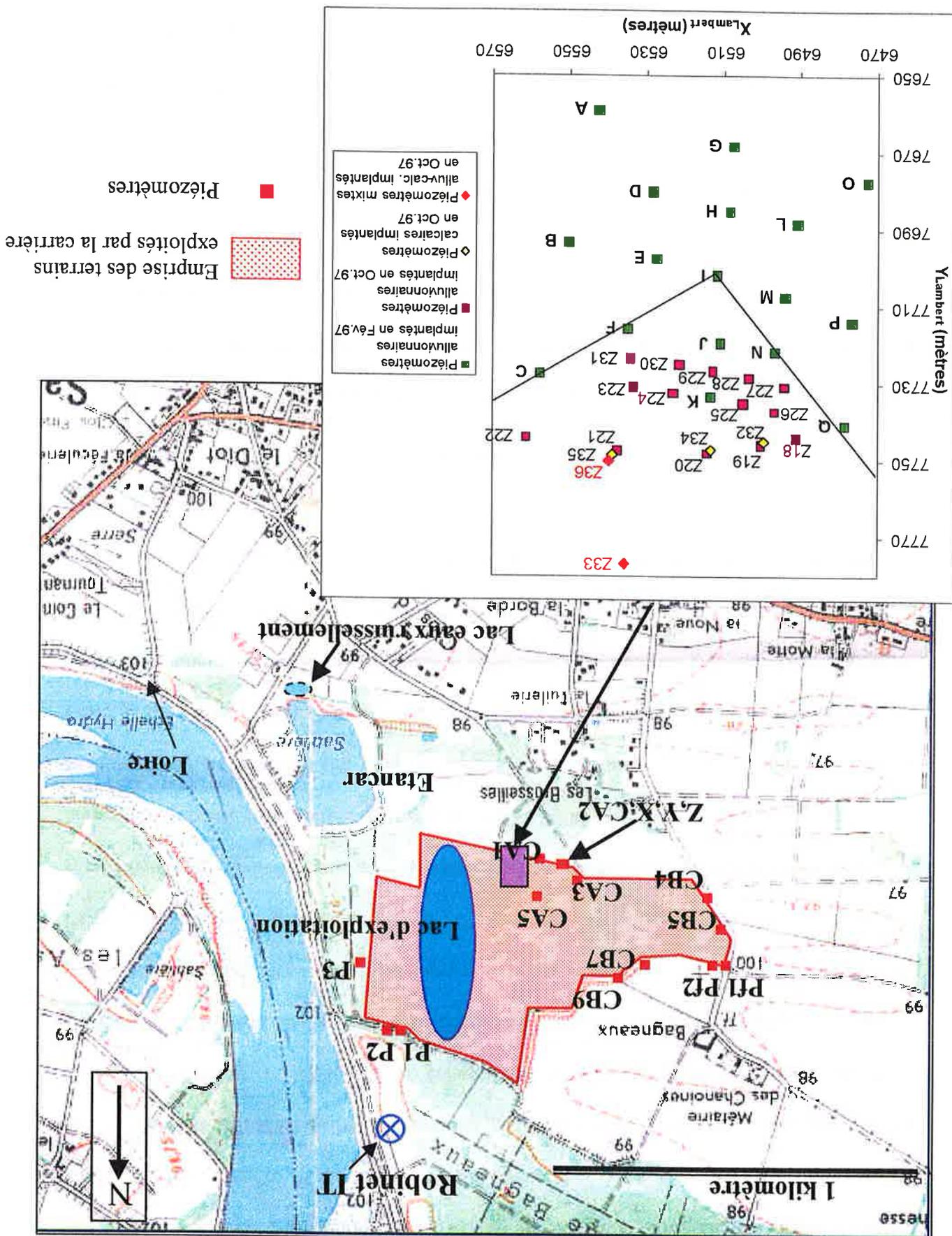
2.3.1.7. Impact des engrais sur les nappes alluviale et calcaire

Il est intéressant de rechercher l'impact des apports anthropiques (éléments majeurs

NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- et éléments en traces Br, Cd, U) sur la qualité chimique des nappes circulant au niveau de la carrière. Pour cela, il s'agit de rechercher des échantillons d'eau qui peuvent servir de référence, c'est-à-dire peu soumis aux impacts des cultures. Un grand nombre d'analyses d'éléments majeurs dans des échantillons d'eau prélevés dans les nappes calcaire et alluviale ont été réalisées au cours de ce travail. De plus, la réglementation imposant le prélèvement annuel d'eau dans les nappes alluviale et calcaire, à l'amont et à l'aval de l'exploitation, ainsi que dans le lac d'extraction, on dispose également d'analyses supplémentaires réalisées par un laboratoire privé indépendant (IANESCO Chimie). Le tableau 2.1 reprend les mesures réalisées de 1988 à 2000 dans les 4 piézomètres imposés par la réglementation en amont (P1 et P2) et en aval de la carrière (Pf1 et Pf2) ainsi que dans la Loire, le lac actuel d'extraction, le pompage des eaux sanitaires de l'installation technique (IT) et une ancienne gravière (Etancar). Dans le tableau 2.2, figurent les analyses d'eau effectuées de juillet 1998 à mai 1999 au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire implanté en février 1997 ainsi que dans quelques piézomètres calcaires implantés en janvier 1999. La localisation des points de prélèvement est donnée figure 2.5. D'autres analyses des eaux de nappes calcaire et alluviale figurent dans l'annexe 18.

L'écoulement général indiqué par la piézométrie (chapitre 1, §1.3.2) s'effectue d'Est en Ouest. Les eaux de nappe qui arrivent en amont du lac d'exploitation proviennent directement de la Loire et de la nappe située sur la rive droite de la Loire (chapitre 1, §1.3.2), majoritairement recouverte par la forêt d'Orléans et donc peu soumise aux épandages agricoles. Ces eaux sont donc peu chargées en éléments apportés par les engrais, c'est-à-dire plus précisément en nitrates, sulfates et chlorures. Les points d'eau situés à l'amont de la carrière c'est-à-dire la Loire, les piézomètres P1 (calcaire), P2 (alluvionnaire) et P3 (alluvionnaire) ainsi que le robinet d'alimentation de l'installation technique (IT) en eau sanitaire, peuvent donc servir de référence pour évaluer l'impact agricole.

Figure 2.5 : Localisation des prélèvements d'eau sur la carrière de Sandillon et dans son voisinage proche



Les chlorures: Etant conservatifs, les chlorures sont un bon indicateur de l'apport éventuel d'engrais (sous forme KCl) plus que les nitrates dont les teneurs fluctuent en fonction de l'activité microbienne et du potentiel redox de la nappe (ils sont réduits en ammonium en milieu réducteur). Les chlorures sont par ailleurs souvent utilisés comme traceurs naturels permettant de mettre en évidence le mélange de différentes masses d'eau aux teneurs caractéristiques en chlorures. Les teneurs les plus faibles en chlorures se situent en amont du lac d'exploitation. Elles passent de 10,9-18,4 mg/L dans la Loire et 8,1-16,8 mg/L en P1-P2, à 16,5-28,5 mg/L au niveau du lac d'exploitation et 11-32 mg/L au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire. Elles atteignent finalement leurs maxima à l'Ouest des terrains exploités par la carrière, en Pf1-Pf2 (32,1-87,6 mg/L). Il y a donc une forte corrélation entre les teneurs en chlorures et l'activité agricole (fig.2.6).

Les bromures: Comparées aux teneurs de la Loire (16-52 µg/L) et des piézomètres situés en amont des cultures (32-72 µg/L), les teneurs en bromures augmentent rapidement à partir du lac d'exploitation (61-112 µg/L). Elles sont comprises entre 38 et 148 µg/L au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire. Elles sont maximales au niveau de Pf1 (136-216 µg/L) et Pf2 (224-336 µg/L). Les teneurs en bromures sont bien corrélées aux teneurs en chlorures (fig.2.6), ce qui indique leur origine agricole (engrais KCl avec traces de KBr). La valeur "anormale" de 2070 µg/L obtenue au fond du piézomètre calcaire CA2 mériterait d'être confirmée, d'autant plus qu'elle n'est pas corrélée aux chlorures.

L'azote, apporté en partie sous forme ammonium dans les engrais, n'atteint pas la nappe alluviale sous cette forme-là mais sous la forme nitrate. Il apparaît de manière indiscutable que la nappe alluviale, à partir du lac d'exploitation, est enrichie de manière très hétérogène (tableau 2.2) en nitrates et autres éléments apportés par les engrais: chlorures, bromures, sulfates, magnésium et calcium.

Tableau 2.1: Analyses des éléments majeurs dans les nappes alluviale et calcaire au niveau de la carrière de Sandillon de 1988 à 2000

date	échantillon	F- (mg/L)	Cl- (mg/L)	Br- (mg/L)	NO3- (mg/L)	SO4-- (mg/L)	Na+ (mg/L)	NH4+ (mg/L)	K+ (mg/L)	Mg++ (mg/L)	Ca++ (mg/L)	pH	Alcalinité (µmol/l)	Auteur
<i>Seuil de potabilité</i>		2	200		50	250	150	0,5	12	50		6,5-9		
AMONT HYDRAULIQUE DU LAC D'EXPLOITATION														
21/11/96	Loire	0,10	11,2	0,016	10,7	13,6	8,2	0,04	3,64	3,9	22,1	7,80	1129	F. Le Borgne
02/04/97	Loire	0,21	16,5	0,052	5,6	29,8	13,2	<L.D.	3,45	5,6	37,0	9,14	1800	F. Le Borgne
22/07/98	Loire	0,18	18,4	0,041	2,3	30,2	14,9	<L.D.	3,98	5,5	23,4	9,05	1326	F. Le Borgne
24/02/99	Loire	0,11	10,9	<L.D.	9,6	10,7	6,8	0,04	3,25	2,9	23,2	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
09/04/99	Loire	0,11	13,8	<L.D.	9,1	15,5	9,2	<L.D.	2,67	3,9	30,3	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
06/05/99	Loire	0,10	13,5	<L.D.	5,9	13,8	9,6	<L.D.	2,79	3,8	27,5	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
05/12/96	P1 (calcaire)	0,09	12,6	<L.D.	12,4	14,8	9,1	<L.D.	3,10	4,3	35,8	7,76	1843	F. Le Borgne
26/03/97	P1 (calcaire)	0,16	11,1	0,061	5,1	14,5	9,3	0,07	3,02	4,1	36,7	7,73	1930	F. Le Borgne
22/07/98	P1 (calcaire)	0,16	16,8	0,049	3,8	27,2	13,2	<L.D.	3,86	5,9	41,2	7,79	2089	F. Le Borgne
12/04/00	P1 (calcaire)	N.D.	15,9	N.D.	12,1	17,6	12	<0,05	3,4	4,5	43	7,80	N.D.	IANESCO Chimie
27/12/00	P1 (calcaire)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	10,5	0,1	3,18	4,6	36,1	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
05/12/96	P2 (alluvionnaire)	0,04	10,8	0,072	10,2	42,8	11,3	0,06	2,55	13,0	137,5	7,65	6976	F. Le Borgne
02/04/97	P2 (alluvionnaire)	0,03	8,1	0,042	7,6	94,9	12,0	0,07	2,42	17,1	168,5	7,14	8200	F. Le Borgne
22/07/98	P2 (alluvionnaire)	0,55	14,1	0,046	20,5	98,8	13,2	<L.D.	2,73	16,1	158,5	6,75	7253	F. Le Borgne
27/05/99	P2 (alluvionnaire)	0,06	14,6	N.D.	14,3	54,0	13,0	<0,05	2,70	14,0	148,0	7,25	7393	IANESCO Chimie
12/04/00	P2 (alluvionnaire)	N.D.	14,9	N.D.	10,9	42,7	14	<0,05	3,2	13	136	6,80	7016	IANESCO Chimie
27/12/00	P2 (alluvionnaire)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	8,7	0,09	2,04	9,5	54,4	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
27/05/99	P3 (alluvionnaire)	0,24	15,6	N.D.	5,3	17,7	11,5	<0,05	0,8	10	46	7,05	2721	IANESCO Chimie
12/04/00	P3 (alluvionnaire)	0,20	22,5	N.D.	11,8	30,0	13,0	<0,05	0,9	11	47	6,85	2344	IANESCO Chimie
25/04/88	robinet IT (calcaire)	N.D.	13,0	N.D.	8	22	N.D.	0,03	N.D.	N.D.	N.D.	7,4	N.D.	?
14/10/92	robinet IT (calcaire)	N.D.	16,5	N.D.	8	23	N.D.	0,01	N.D.	5,5	N.D.	7,8	N.D.	?
21/11/96	robinet IT (calcaire)	0,11	13,6	0,032	8,2	17,4	11,9	<L.D.	3,48	5,1	39,9	7,91	2284	F. Le Borgne
LAC D'EXPLOITATION														
21/11/96	lac exploitation	0,38	28,5	0,112	38,6	26,9	9,0	<L.D.	0,70	9,5	40,6	7,71	1213	F. Le Borgne
06/12/96	lac exploitation	0,32	25,4	0,088	34,1	23,6	8,8	0,89	1,09	9,0	39,8	8,50	1358	F. Le Borgne
22/07/98	lac exploitation	1,04	16,5	0,061	2,4	31,0	10,8	<L.D.	0,71	8,6	31,2	8,40	1674	F. Le Borgne
27/05/99	lac exploitation	N.D.	14,9	N.D.	7	18,1	N.D.	<0,05	1,1	7,5	29	8,1	N.D.	IANESCO Chimie
12/04/00	lac exploitation	N.D.	14,5	N.D.	9	17,9	11,0	<0,05	1,5	8,5	39	8,0	N.D.	IANESCO Chimie
27/11/00	lac exploitation	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	10,0	0,29	1,07	7,3	28,2	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
27/12/00	lac exploitation	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	9,3	1,12	1,02	7,3	28,0	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
AVAL HYDRAULIQUE DU LAC D'EXPLOITATION														
15/12/95	Pf1 (calcaire)	0,19	48,0	N.D.	88	55	23	0,09	2,7	18,1	115	7,6	4623	IANESCO Chimie
06/12/96	Pf1 (calcaire)	0,13	44,2	0,136	70,2	48,4	20,3	<L.D.	2,67	17,4	108,7	7,81	4712	F. Le Borgne
25/03/97	Pf1 (calcaire)	0,14	55,6	0,216	94,7	93,8	25,0	0,12	1,76	20,3	131,5	7,68	4970	F. Le Borgne
22/07/98	Pf1 (calcaire)	0,15	43,9	0,169	78,0	76,3	22,4	<L.D.	1,61	18,8	122,7	7,36	4660	F. Le Borgne
12/04/00	Pf1 (calcaire)	N.D.	52	N.D.	130	86	35	<0,05	3,3	24	153	7,05	N.D.	IANESCO Chimie
27/12/00	Pf1 (calcaire)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	21,5	2,22	3,52	14,2	83,7	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
15/12/95	Pf2 (alluvionnaire)	0,27	87,0	N.D.	71	86	30	0,12	2,3	22,0	126	7,5	4738	IANESCO Chimie
06/12/96	Pf2 (alluvionnaire)	0,19	87,6	0,336	135,9	100,8	36,8	<L.D.	1,97	28,9	162,7	7,50	6739	F. Le Borgne
02/04/97	Pf2 (alluvionnaire)	0,19	33,2	0,271	70,0	173,3	54,4	<L.D.	1,99	24,4	92,2	6,95	4100	F. Le Borgne
22/07/98	Pf2 (alluvionnaire)	0,15	32,1	0,224	67,4	169,3	51,3	<L.D.	2,00	24,7	88,1	6,55	4033	F. Le Borgne
27/05/99	Pf2 (alluvionnaire)	N.D.	59	N.D.	119	90	N.D.	<0,05	2,1	25	150	7,40	N.D.	IANESCO Chimie
12/04/00	Pf2 (alluvionnaire)	0,17	44	N.D.	105	110	48	<0,05	4,6	24	118	6,80	5246	IANESCO Chimie
27/12/00	Pf2 (alluvionnaire)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	31,7	<L.D.	1,95	15,8	72,7	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
ANCIENNE CARRIERE														
21/11/96	Etancar	0,17	10,9	0,048	1,5	40,2	8,1	0,20	2,19	10,8	40,4	8,06	2336	F. Le Borgne
01/12/96	Etancar	0,13	11,3	<LD	1,4	34,1	7,9	0,16	2,12	10,5	39,4	7,90	2317	F. Le Borgne
05/12/96	Etancar	0,13	11,5	0,048	2,3	29,5	8,1	<LD	2,15	10,2	38,9	7,85	2320	F. Le Borgne
08/12/96	Etancar	0,13	11,7	0,056	1,2	27,7	8,2	0,26	2,17	7,9	39,6	7,90	2536	F. Le Borgne
15/12/96	Etancar	0,13	12,1	0,056	1,3	26,2	8,3	0,08	2,18	10,6	40,7	8,00	2464	F. Le Borgne
13/03/97	Etancar	0,18	11,1	0,061	1,0	19,7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
25/03/97	Etancar	0,24	11,2	0,058	<L.D.	30,8	8,2	0,06	2,23	10,4	39,6	7,60	2490	F. Le Borgne
17/09/97	Etancar	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	10,5	0,55	6,73	7,0	25,3	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
22/07/98	Etancar	0,30	11,8	0,061	1,3	27,9	8,8	<L.D.	3,13	10,4	36,0	8,47	2220	F. Le Borgne
18/11/00	Etancar	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2,4	<L.D.	0,98	3,0	25,7	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
27/11/00	Etancar	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5,3	<L.D.	2,16	6,5	29,7	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
27/12/00	Etancar	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5,2	1,57	2,17	6,8	32,3	N.D.	N.D.	F. Le Borgne
21/11/96	lac eaux ruissellement	0,04	2,7	<L.D.	1,0	4,0	2,0	0,18	2,19	1,8	24,3	7,84	1609	F. Le Borgne
05/12/96	lac eaux ruissellement	0,04	9,7	<L.D.	1,4	4,0	6,6	0,05	1,67	1,6	22,2	7,57	1300	F. Le Borgne

N.D.: Non déterminé

L.D.: Limite de détection

En gris: Valeurs supérieures au seuil de potabilité

Tableau 2.2 : Teneurs en éléments majeurs dans les nappes alluviale et calcaire de la carrière de Sandillon.

Les méthodes d'analyse et de prélèvement sont décrites dans le chapitre 3. Par rapport à la Loire (tableau 2.1) qui alimente les nappes calcaire et alluviale par le biais des axes karstiques (piézomètre CA1), la nappe alluviale est très enrichie en presque tous les éléments majeurs (nitrates, magnésium, calcium, sulfates et chlorures). Les teneurs en nitrates sont multipliées par un facteur 10 au niveau de nombreux piézomètres alluvionnaires. Globalement, les teneurs dans la nappe du calcaire sont plus faibles.

date	échantillon	F- (mg/L)	Cl- (mg/L)	Br- (mg/L)	NO3- (mg/L)	SO4-- (mg/L)	Na+ (mg/L)	NH4+ (mg/L)	K+ (mg/L)	Mg++ (mg/L)	Ca++ (mg/L)	pH	Alcalinité (µmol/l)
<i>Seuil de potabilité</i>		2	200		50	250	150	0,5	12	50		6,5-9	
Plézomètres alluvionnaires (campagne du 20-22/7/98)													
20/07/98	A	0,17	15,5	0,063	51,6	41,0	12,0	<LD	0,81	11,7	45,2	6,35	1878
21/07/98	B	0,31	22,0	0,074	74,1	54,7	11,0	<LD	0,87	13,8	86,8	6,60	2239
21/07/98	C	0,33	21,6	0,080	79,4	78,9	12,7	<LD	0,90	16,4	62,3	6,77	1744
21/07/98	E	0,42	24,7	0,066	77,8	43,6	9,7	<LD	0,95	15,7	111,5	7,17	4665
22/07/98	F	0,27	26,0	0,090	77,3	73,4	13,4	<LD	1,02	19,7	81,3	6,69	2559
20/07/98	G	0,26	14,7	0,050	39,9	38,4	8,2	<LD	0,88	10,8	57,8	6,57	2205
20/07/98	I	0,42	24,1	0,070	63,2	52,0	ND	ND	ND	ND	ND	7,11	4870
20/07/98	J	0,30	28,3	0,123	97,5	72,7	13,7	<LD	0,86	20,1	94,0	6,73	2544
21/07/98	K	0,24	21,3	0,081	88,3	47,8	12,7	<LD	1,18	18,6	98,5	7,29	4094
20/07/98	L	0,30	12,9	0,038	39,0	42,3	7,4	<LD	0,86	10,3	89,9	6,94	3322
20/07/98	M	0,52	17,4	0,072	62,1	60,9	10,8	<LD	0,87	23,1	114,8	7,21	5549
20/07/98	N	0,25	32,4	0,107	122,7	56,9	15,2	<LD	2,05	24,3	115,7	7,17	4421
20/07/98	O	0,25	20,4	0,057	62,7	35,1	9,5	<LD	0,86	13,6	85,0	6,80	3182
20/07/98	P	0,32	20,8	0,076	40,9	54,1	12,2	<LD	1,11	24,7	106,0	7,17	5076
20/07/98	Q	0,16	20,3	0,101	114,6	55,9	11,0	<LD	0,99	18,6	69,3	6,62	1320
20/07/98	Z18	0,28	16,5	0,091	6,9	62,9	11,3	<LD	1,69	16,7	48,1	7,11	2840
21/07/98	Z19	0,28	11,3	0,083	1,4	92,6	10,5	<LD	1,17	14,7	47,2	6,79	2634
21/07/98	Z20	0,40	16,1	0,089	65,8	63,9	10,1	<LD	0,89	14,2	51,7	6,58	1637
21/07/98	Z21	0,13	25,3	0,099	124,1	40,9	12,6	<LD	1,54	18,3	85,1	6,90	2494
21/07/98	Z22	0,37	21,1	0,148	3,2	38,3	12,6	<LD	1,97	25,2	98,7	7,04	6379
21/07/98	Z23	0,20	17,2	0,074	62,0	71,0	13,7	<LD	1,11	17,9	63,3	6,74	2542
21/07/98	Z24	0,24	20,9	0,063	65,5	71,3	14,1	<LD	1,07	20,5	101,2	7,12	4382
21/07/98	Z25	0,22	17,9	0,084	74,9	67,8	12,8	<LD	1,07	19,5	78,9	6,80	2619
21/07/98	Z26	0,35	15,7	0,068	47,6	64,4	10,8	<LD	0,82	15,2	61,6	6,69	2215
21/07/98	Z27	0,30	18,5	0,085	78,3	67,7	14,4	<LD	1,04	20,0	97,4	7,09	4067
21/07/98	Z28	0,22	22,8	0,081	91,9	70,1	13,3	<LD	1,12	21,4	75,4	6,67	2573
21/07/98	Z29	0,21	24,9	0,091	81,8	73,9	12,7	<LD	1,07	20,1	75,5	6,83	2617
22/07/98	Z30	0,22	20,6	0,088	66,5	59,3	12,3	<LD	1,17	17,2	75,3	6,75	2878
22/07/98	Z31	0,19	15,1	0,099	43,0	63,2	11,4	<LD	1,24	16,7	60,7	6,67	2667
Plézomètres calcaires non-karstiques													
21/07/98	Z32-121	0,22	16,2	0,079	79,1	44,9	11,0	<LD	1,02	15,8	90,6	7,35	3681
05/05/99	Z32-13m50	0,18	17,5	0,100	79,7	28,7	11,1	0,03	0,85	15,3	85,7	7,38	ND
05/05/99	Z32-15m50	0,18	17,5	0,120	78,8	28,6	11,2	0,03	0,91	15,4	87,3	7,39	ND
05/05/99	Z32-18m	0,19	17,5	0,090	79,7	29,1	11,2	<LD	0,90	15,7	89,0	7,39	ND
21/07/98	Z34-121	0,18	12,9	0,039	21,0	22,8	9,2	<LD	2,40	7,2	57,4	7,47	2632
05/05/99	Z34-13m50	0,25	19,0	0,110	66,8	32,6	11,1	0,72	1,08	15,3	87,3	7,30	ND
05/05/99	Z34-15m50	0,26	20,1	0,100	83,9	29,3	10,7	0,03	1,07	14,6	87,4	7,36	ND
05/05/99	Z34-18m	0,25	19,8	0,100	79,6	26,8	10,8	<LD	1,09	14,4	87,1	7,36	ND
21/07/98	Z35-121	0,22	21,8	0,086	29,3	30,7	12,5	<LD	1,92	15,5	96,7	7,19	4677
05/05/99	Ca2-15m	0,32	13,9	<LD	<LD	12,7	9,8	<LD	2,04	6,7	47,3	7,65	ND
05/05/99	Ca2-18m	0,23	10,3	<LD	4,3	5,0	7,6	0,02	1,28	9,7	70,9	7,55	ND
05/05/99	Ca2-21m	0,09	6,0	0,130	1,1	1,6	8,1	<LD	1,72	8,8	83,5	7,44	ND
05/05/99	Ca2-24m	0,10	5,4	2,070	0,7	1,3	9,3	0,02	2,62	10,2	136,1	7,16	ND
05/05/99	Ca3-15m50	0,18	16,7	<LD	14,4	18,8	10,5	0,66	1,83	7,1	86,5	7,38	ND
05/05/99	Ca3-18m50	0,16	16,8	<LD	15,0	18,5	10,5	0,03	1,82	7,2	87,3	7,37	ND
05/05/99	Ca3-22m50	0,15	16,6	<LD	17,3	18,9	10,6	0,03	1,80	7,4	89,0	7,34	ND
05/05/99	Ca5-19m50	0,17	11,3	<LD	<LD	12,8	8,2	0,03	1,18	7,5	87,7	7,39	ND
05/05/99	Ca5-23m	0,15	18,6	0,080	18,2	11,6	8,1	0,02	1,08	7,5	86,9	7,38	ND
Plézomètre calcaire karstique CA1 (cavité en dessous de 24m50 de profondeur)													
24/02/99	Ca1:15m	0,15	12,8	<LD	<LD	15,5	8,3	0,04	3,24	3,9	40,7	7,65	ND
24/02/99	Ca1:19m	0,15	12,7	<LD	12,2	15,1	8,2	0,03	3,21	3,8	40,8	7,95	ND
24/02/99	Ca1:21m	0,16	13,2	<LD	<LD	15,5	8,2	0,04	3,27	3,9	42,2	7,96	ND
24/02/99	Ca1:22m	0,16	13,3	<LD	1,6	15,2	8,5	0,07	3,35	3,9	42,0	7,94	ND
24/02/99	Ca1:23m	0,16	13,3	<LD	0,7	15,1	8,2	0,03	3,25	3,8	42,2	7,94	ND
24/02/99	Ca1:24m	0,15	13,2	<LD	2,4	15,1	8,3	0,19	3,27	3,9	42,3	7,94	ND
24/02/99	Ca1:25m	0,16	13,1	<LD	2,8	15,7	8,3	0,05	3,28	3,9	42,1	7,94	ND
05/05/99	Ca1-18m	0,17	12,9	<LD	30,0	11,0	7,6	0,02	1,46	9,1	71,8	7,53	ND
05/05/99	Ca1-21m	0,19	11,3	<LD	28,7	12,6	7,5	<LD	1,35	9,0	70,7	7,54	ND
05/05/99	Ca1-24m50	0,18	11,0	<LD	26,8	12,4	7,5	<LD	1,36	8,8	69,4	7,57	3323

ND: Non déterminé

LD: Limite de détection

En gris: Valeurs supérieures au seuil de potabilité

Le potassium: Cet élément apporté sous forme de KCl devrait se retrouver bien corrélé aux teneurs en chlorures. Ce n'est pas du tout le cas. Les teneurs en potassium sont même plus importantes dans la Loire (2,67-3,98 mg/L) que dans la plupart des points de prélèvement. Il est probable que cet élément, qui est un nutriment essentiel des plantes, soit peu lessivé et majoritairement absorbé par les cultures et la végétation. Cela expliquerait les teneurs très faibles au niveau du piézomètre amont P3 situé dans le bois de Baguenault.

Rappelons également que les engrais PK (phosphates-potassium) sont des engrais qui agissent à long terme, donc bien retenus par le sol. Les teneurs observées dans la nappe proviendraient alors majoritairement de l'alimentation par la Loire.

Le sodium est bien corrélé aux chlorures même si l'augmentation des teneurs en sodium, entre la Loire et l'Ouest de la carrière, est moins spectaculaire. Il provient également des engrais KCl dont le minerai d'origine, la sylvinite, contient 60% de NaCl. Contrairement au potassium, cet élément traverse facilement le sol puis la zone non-saturée pour se retrouver dans la nappe.

Le calcium provient en partie des engrais mais aussi d'un temps de séjour important de l'eau dans des alluvions chargées en carbonates de calcium. Cette explication est confortée par des teneurs importantes en carbonates dans les échantillons chargés en calcium (fig.2.6). De plus, c'est dans le piézomètre alluvionnaires P2, qui possède des teneurs relativement basses en chlorures et nitrates, que paradoxalement les teneurs en hydrogénocarbonate de calcium sont les plus élevées ($[Ca^{2+}] = 168,5 \text{ mg/L}$; $[HCO_3^-] = 500 \text{ mg/L}$). On pourrait s'attendre à des teneurs plus importantes dans le calcaire que dans les alluvions, mais la dissolution de la calcite étant un processus lent (chapitre 1, §1.3.3.1.3), les teneurs en hydrogénocarbonate de calcium peuvent être moins importantes dans les zones de la nappe calcaire à circulation rapide que dans des alluvions saturées en calcite où les temps de résidence de l'eau sont a priori plus importants.

Le magnésium provient des engrais (sous forme de magnésie). Cet élément voit sa concentration multipliée par 5 entre la Loire (2,9-5.6 mg/L) et le piézomètre alluvionnaire Pf2 (15,8-28,9 mg/L). Il faut tout de même remarquer que les teneurs en cet élément sont également importantes (9,35-17,1 mg/L) dans les piézomètres alluvionnaires P2 et P3 situés en amont des cultures. Il est donc très probable qu'il y ait également un enrichissement naturel lié à la composition des alluvions. La corrélation entre HCO_3^- et Mg^{2+} peut traduire une accumulation du magnésium dans les alluvions sous forme de carbonate (MgCO_3).

Les phosphates n'apparaissent pas dans le tableau étant données leurs teneurs très proches du bruit de fond dans la méthode utilisée dans ce travail (chromatographie ionique). Les analyses réalisées par l'IANESCO font cependant état de valeurs supérieures au bruit de fond (0,1 mg/L) au niveau du piézomètre P2 (0,36 à 0,64 mg/L) et dans le lac d'exploitation (0,21-0,36 mg/L). Cela reste encore très négligeable étant données les quantités apportées par les engrais. Les phosphates n'atteignent donc pas la nappe des alluvions sous la forme soluble mais ils sont très certainement fixés dans le sol sur les hydroxydes et oxydes métalliques (Whalen and Cornwell, 1984 ; Carignan and Flett, 1981) ainsi que sur les carbonates.

L'uranium, qui peut provenir des engrais phosphatés, a été dosé par ICP-MS dans quelques échantillons d'eau de nappe afin de voir si l'on observe, dans la nappe alluviale, un enrichissement semblable à celui observé pour les nitrates ou les chlorures. Les mesures sont données dans le tableau 2.3. Les teneurs en uranium dans les eaux de la Loire sont relativement faibles (0,65 ppb) par rapport aux eaux de nappes et de surface en général. Ces teneurs sont cohérentes avec celles mesurées par C.Grosbois dans la Loire (0,24-1,4 ppb). Cependant, il est impossible, à partir de ces quelques analyses, de se prononcer sur une origine anthropique de l'uranium. En effet, les teneurs en uranium sont particulièrement basses dans certains piézomètres alluvionnaires (ex : piézomètre X) et très élevées dans des piézomètres calcaires (ex : CB9). De plus, l'uranium présentant des degrés d'oxydation

multiples, l'établissement d'un bilan sur l'origine de cet élément nécessiterait une étude plus précise des conditions de pH et de rédox des différents compartiments de l'aquifère de Sandillon.

Tableau 2.3 : Teneurs en uranium des eaux de nappe et de surface de la carrière de Sandillon

Nappe calcaire			Nappe alluviale			Eaux de surface		
	Date préél.	[U] (ppb)		Date préél.	[U] (ppb)		Date préél.	[U] (ppb)
P1	12/03/01	0,52	P2	12/03/01	1,06	Loire	23/02/01	0,65
CA3	12/03/01	1,03	O	12/03/01	1,40	Etancar	12/03/01	3,58
CB4	12/03/01	2,21	X	12/03/01	0,06	Lac expl	12/03/01	3,64
CB5	12/03/01	3,29	Z	12/03/01	1,34			
CB7	12/03/01	5,22						
CB9	12/03/01	1,60						

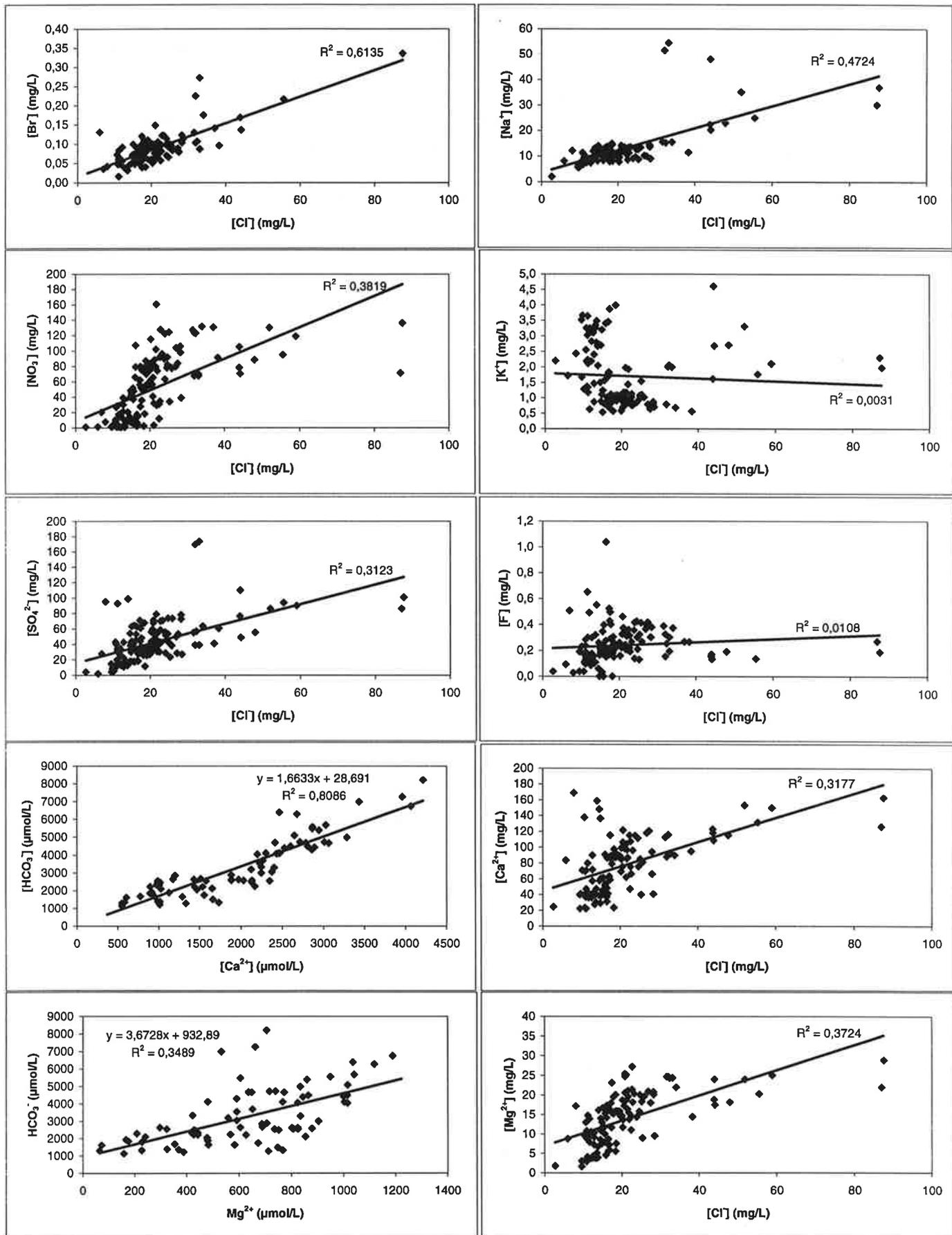
Le cadmium: Cet élément peut provenir des mines de phosphates tout comme l'uranium. Les seules mesures dont on dispose pour cet élément sont celles réalisées par la société IANESCO Chimie. Les teneurs en cadmium sont inférieures à 1 µg/L sur tous les échantillons analysés.

Pour conclure, les impacts chimiques des exploitations agricoles sur les eaux de nappe sont importants et clairement mis en évidence par les distributions des éléments majeurs, en particulier NO₃⁻ et Cl⁻. Il est cependant difficile d'apprécier les apports en éléments mineurs (Cd, U). Il y a un enrichissement hétérogène en éléments majeurs de l'Est vers l'Ouest. Cet enrichissement atteint plus particulièrement la nappe alluviale où l'on trouve les teneurs les plus élevées (ex: Pf2). La nappe calcaire présente globalement des teneurs plus faibles en éléments caractéristiques des engrais (Cl, NO₃, SO₄) bien qu'il existe certaines zones très contaminées (ex: Pf1). Cela traduit l'existence, dans les calcaires, de zones stagnantes où les éléments s'accumulent et de zones où l'eau se renouvelle plus facilement (ex: CA1). Le degré de stagnation des eaux de nappe peut être évalué par les fortes teneurs en

éléments inertes des engrais (Cl^- , Br^-) ou encore par les teneurs en hydrogéno-carbonates de calcium. Ces dernières sont globalement plus importantes dans les alluvions (ex: P2) que dans les calcaires, ce qui confirme que les mouvements rapides de l'eau s'effectuent préférentiellement dans le calcaire. Enfin, il est frappant de constater que certains éléments caractéristiques des engrais comme le potassium ou les phosphates ne laissent pas de traces dans la nappe. Ces éléments ne peuvent donc pas être utilisés comme traceurs des activités agricoles.

Figure 2.6 : Diagrammes binaires Cl-X (X=F, Br, NO₃, SO₄, Na, K, Mg, Ca) et Ca,Mg-HCO₃ des eaux (nappe alluviale, nappe calcaire, lacs, Loire) prélevées entre 1988 et 2000 au niveau de la carrière de Sandillon.

Les teneurs en chlorures sont proportionnelles à l'impact des épandages agricoles sur les eaux. Ces teneurs sont assez bien corrélées aux autres éléments majeurs sauf le potassium et les fluorures. Les bonnes corrélations obtenues traduisent un impact important des cultures avoisinant la carrière sur la composition chimique de l'eau des nappes alluviale et calcaire pour la majorité des éléments majeurs. La moins bonne corrélation obtenue pour le calcium et le magnésium traduit une double origine pour ces deux éléments. D'après le diagramme Ca-HCO₃, il semble bien que le calcium provienne également de la dissolution des carbonates de calcium issus de la nappe calcaire. Le magnésium, quant à lui, est mieux corrélé aux chlorures qu'aux carbonates.



2.3.2. L'irrigation

L'exploitation agricole de Bagneaux possède un pompage d'irrigation à 26 m de profondeur près de l'entrée de la ferme (fig.2.2). La pompe ne fonctionne que l'été, pendant la période sèche, 24h sur 24, avec un débit d'environ 100 m³/h. Contrairement aux pompages de la carrière, situés dans le calcaire (700 m³/h), qui font fluctuer quotidiennement le niveau de la nappe du calcaire de quelques centimètres, l'effet du pompage d'irrigation de l'exploitation agricole de Bagneaux n'est pas visible sur les chroniques piézométriques pour la simple raison que c'est un pompage continu et de débit relativement faible devant ceux des pompes de la carrière.

2.3.3. Le drainage des eaux de ruissellement

Enfin, il faut signaler la présence d'un système de drainage, orienté Est-Ouest, à 1m70 de profondeur, au niveau d'une cuvette imperméable situé dans la partie Nord-Ouest du champ. Le drain se déverse directement dans la nappe calcaire par l'intermédiaire d'un puisard d'une profondeur de 16m50 localisé près du piézomètre calcaire CB4 (fig.2.5). En période de fortes pluies, le déversement des eaux de ruissellement dans la nappe calcaire par l'intermédiaire de ce puisard entraîne des modifications brutales de la qualité physico-chimique des eaux de la nappe calcaire. L'augmentation des matières en suspension (MES) a été mis en évidence de manière qualitative dans le piézomètre calcaire Cb4 lors d'une expérience de traçage à la sulforhodamine G. L'expérience est décrite sur la figure 2.7.

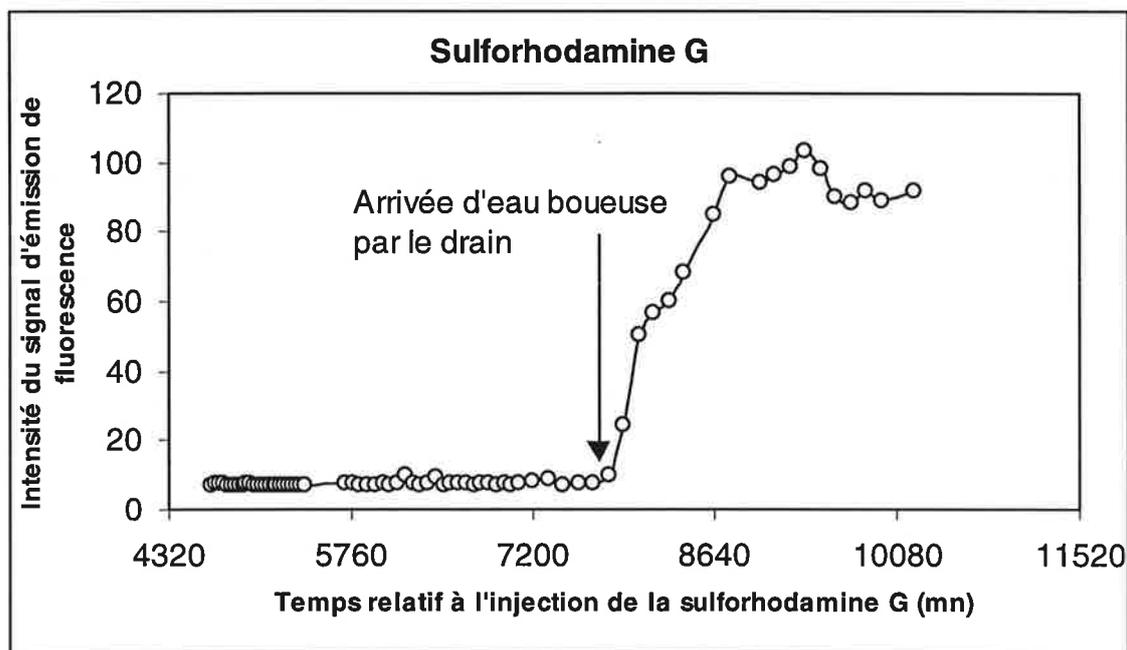


Figure 2.7 : Mise en évidence, au niveau du piézomètre CB4, d'un enrichissement en MES lié à la présence du puisard dans la nappe calcaire.

Le signal mesuré à la longueur d'onde d'émission de la sulforhodamine G ($\lambda=582\text{nm}$) est très sensible à la MES qui diffuse la lumière incidente émise par le spectrofluorimètre. Ce signal est interprété ici de manière qualitative pour montrer que la présence du drain entraîne un enrichissement important en MES dans la nappe calcaire au moment des fortes précipitations. L'eau de la nappe calcaire est prélevée au niveau du piézomètre CB4 situé à 2 mètres de distance (au sol) du puisard. Le prélèvement dans CB4 a lieu à 20 mètres de profondeur. Au début de l'expérience, les précipitations journalières à Orléans sont faibles. Le drain ne fonctionne pas et l'eau prélevée au niveau du piézomètre CB4 est limpide. La journée du 22/4/00 enregistre de fortes précipitations (38,4 mm de hauteur de précipitation à Orléans) et le premier prélèvement d'eau boueuse (avec un échantillonnage toutes les 2 heures) a lieu le même jour à 23h00. Il coïncide avec une augmentation du signal d'émission. La réalisation de spectres d'émission sur les échantillons à fort signal d'émission à la longueur d'onde de la sulforhodamine G n'a pas révélé la présence de ce traceur. Le palier observé sur le graphique ne correspond donc pas à un passage de traceur mais bien à une arrivée de MES liée aux eaux de ruissellement du champ.

2.4. Impact de la carrière de Sandillon sur la nappe alluviale

Les impacts hydrodynamiques et physico-chimiques des gravières en eau sur les nappes alluviales ont fait l'objet de nombreuses études, en particulier dans le cadre du programme PIREN (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement) du CNRS. Une vingtaine de références bibliographiques des études menées sur l'impact qualitatif des gravières sur les nappes d'eau souterraines se trouvent dans un rapport de synthèse du BRGM « impact qualitatif des carrières en eau sur les nappes souterraines » (Eberentz et Rinck, 1987). Plus récemment, citons les travaux réalisés par O. Schanen (1998) dans le secteur de la Bassée, près de Balloy (Seine et Marne). Signalons enfin que l'étude d'impact réalisée par le BRGM sur demande de l'entreprise Morillon-Corvol préalablement à l'ouverture de la carrière de Sandillon (Chigot et Al., 1994) fournit un modèle d'écoulement de la nappe alluviale de Sandillon que nous avons repris. Ce paragraphe présente les impacts généraux des gravières alluvionnaires puis la vérification de ces impacts sur la carrière de Sandillon.

2.4.1. Impacts hydrodynamiques

2.4.1.1. Généralités

L'extraction des matériaux dans lesquels s'écoule un aquifère entraîne une baisse immédiate de la surface piézométrique de la nappe au niveau de la gravière. La compensation de cette baisse n'est pas instantanée et dépend de la recharge de la nappe et de la vitesse d'extraction des matériaux.

De plus, le décapage des couches superficielles imperméables et la création d'un bassin a pour conséquence d'accroître l'infiltration des eaux de ruissellement. Ce phénomène dépend cependant de la taille des exploitations (Peaudecerf, 1975) et il est généralement compensé par l'évaporation de l'eau dans le lac. Panel (1991), en comparant, dans la région du

Perthois (Marne), l'infiltration d'eau au niveau de la nappe avec les échanges atmosphériques au niveau des lacs de carrières, calcule un déficit d'alimentation de l'aquifère égal à $8 \text{ m}^3/\text{jour}$ par hectare de gravière. Si ces pertes ne sont pas compensées par la recharge de la nappe, elles entraînent une baisse du niveau piézométrique.

Un autre effet est lié au niveau horizontal du plan d'eau de la gravière. Cela entraîne un rabattement de la nappe en amont du lac d'extraction (figs. 2.8 et 2.9) et une mise en charge à l'aval (Peaudecerf, 1975). Une gravière non colmatée accroît donc les écoulements souterrains au voisinage du lac d'extraction. Au contraire, une gravière colmatée bloque l'écoulement et les lignes de courant divergent autour du lac d'extraction. L'amplitude des perturbations piézométriques engendrées par la présence de la gravière dépendent de la taille et de l'orientation du lac par rapport au sens d'écoulement, ainsi que du gradient hydraulique et de la perméabilité de l'aquifère. Plus le gradient hydraulique sera élevé, plus les écarts à l'état normal (absence de gravière) seront importants. A taille égale, un lac orienté dans le sens de l'écoulement engendrera des écarts plus importants qu'un lac orienté perpendiculairement à l'écoulement.

L'entreprise Morillon-Corvol a tenu compte de ces aspects hydrodynamiques à Sandillon où le lac est orienté perpendiculairement au sens présumé de l'écoulement. De plus, le front d'exploitation est situé sur la berge aval du lac ce qui a pour conséquence de supprimer le colmatage de la gravière.

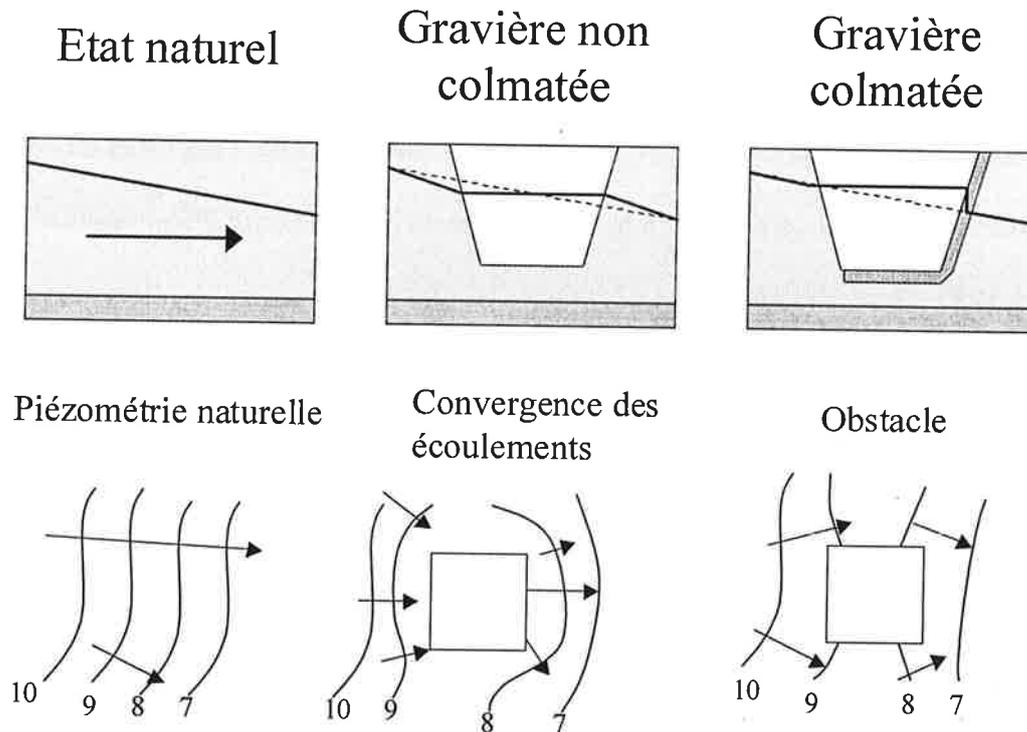


Figure 2.8: Influence d'une gravière et du colmatage sur la surface piézométrique et les écoulements (Peaudecerf, 1975).

2.4.1.2. L'étude d'impact piézométrique de la carrière de Sandillon

Description du modèle

Dans l'étude d'impact préalable à l'ouverture de la carrière (Chigot et Al., 1994), les impacts de la gravière sur les écoulements de la nappe alluviale ont été étudiés grâce à un modèle mathématique simplifié. Le logiciel utilisé est "Aquifer Simulation Model" (ASM) conçu par Kinzelbach et Rausch (1989) et téléchargeable gratuitement sur internet. Dans le cadre de ce travail, la modélisation réalisée dans l'étude d'impact a été reprise. Dans l'étude d'impact, trois cas sont étudiés: avant et après le creusement du lac d'extraction, puis après remblayage de la gravière. Nous ne nous intéressons qu'aux deux premiers cas. Dans le deuxième cas, le lac recouvre l'ensemble des terrains concernés par l'exploitation (fig.2.9). C'est un cas extrême puisqu'en réalité, la mise en remblai du lac creusé par l'exploitation

commence bien avant la fin des travaux d'exploitation. En reprenant le même modèle, nous avons fait varier la taille du lac pour suivre l'évolution de la piézométrie, au cours de l'avancée des travaux, au niveau des trois points étudiés dans l'étude d'impact (fig.2.9 et tableau 2.4) et d'un quatrième point qui correspond à la localisation de l'observatoire piézométrique implanté en février 1997. Deux situations sont examinées en plus des situations étudiées lors de l'étude d'impact: les situations intermédiaires de février 1997 (implantation de l'observatoire piézométrique) et septembre 2000 (fin du travail expérimental de cette thèse).

Le modèle de l'étude d'impact, est repris tel quel. Il est constitué de 41 mailles de 50 m de côté dans le sens de l'écoulement et de 30 mailles de 50 m de côté perpendiculairement au sens d'écoulement (fig.2.9).

Les hypothèses retenues pour cette modélisation sont les suivantes:

1/ La Loire est considérée comme limite à potentiel imposé (niveau=93 mNGF)

2/ Régime permanent

3/ La nappe alluviale est considérée comme homogène et isotrope

-transmissivité $T=3.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

-épaisseur mouillée de l'ordre de 6 m → perméabilité $K=5.10^{-4} \text{ m/s}$

-gradient hydraulique $=0,4.10^{-3}$ – l'écoulement se fait d'Est en Ouest

4/ La gravière est représentée, dans la phase finale d'extraction, par un polygone irrégulier comportant 149 mailles. La perméabilité K est fixée à 1 m/s au niveau du lac.

Les cas de l'écoulement naturel et de l'écoulement perturbé par le lac ont été traités.

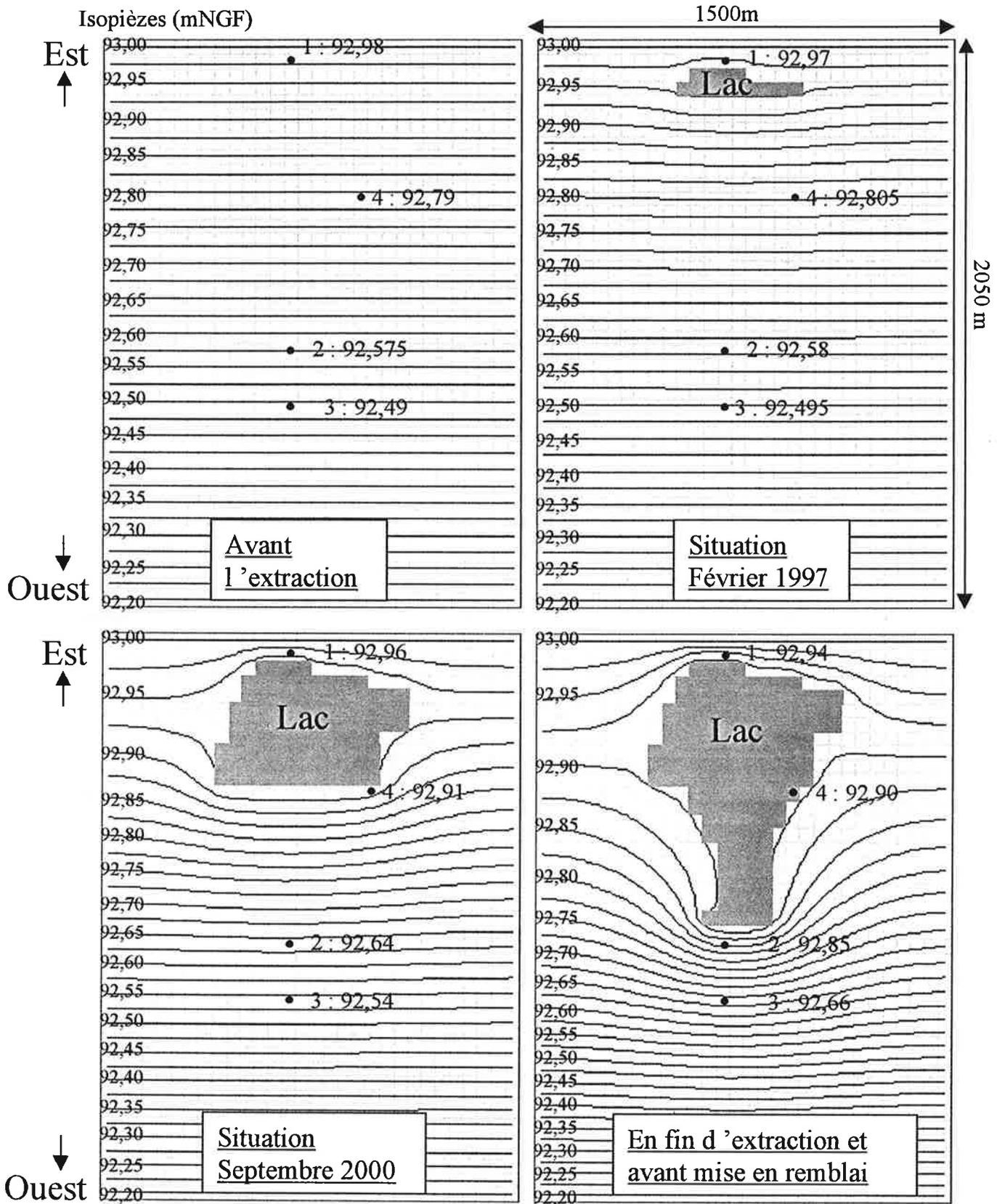


Figure 2.9: Etude de l'impact de la carrière de Sandillon sur la piézométrie à l'aide du logiciel ASM. Les cotes sont fixées à 93 mNGF et 92,2 mNGF respectivement aux limites Est (Loire) et Ouest du modèle, ce qui correspond au gradient hydraulique régional ($0,4 \cdot 10^{-3}$). L'évolution du niveau de la nappe au cours de l'avancée du lac d'extraction est représentée en 4 points: à 25 mètres en amont du lac (1), à 75 mètres (2) et 275 mètres (3) à l'aval du lac et au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire implanté en Février 1997 (4).

Critique des paramètres considérés dans le modèle

La valeur de la perméabilité considérée ($K=5.10^{-4}$ m/s) provient des valeurs moyennes mesurées dans le Val d'Orléans (Zunino, 1979). Cette valeur est en accord avec les mesures réalisées sur le terrain pendant la thèse ($K=9,1.10^{-6} - 8,8.10^{-4}$ m/s ; chapitre 3, §3.2.1).

L'épaisseur des alluvions est en moyenne de 10 mètres sur la carrière (§2.5.1.3). La profondeur du niveau de la nappe variant globalement de 7 mètres à l'étiage, à 4 mètres en période de hautes eaux, on peut affirmer que la valeur de 6 mètres pour l'épaisseur mouillée des alluvions correspond à une phase de hautes eaux.

La carte piézométrique de la nappe alluviale du Val d'Orléans réalisée à l'étiage d'Octobre-Novembre 1966 (Desprez, 1976) indique un gradient très variable dans l'espace au niveau de la carrière: de $1,8.10^{-4}$ à l'Ouest à 1.10^{-3} à l'Est. La valeur utilisée dans le modèle est une valeur intermédiaire.

Résultats de la modélisation

Les rabattements obtenus pour les 4 points d'observation considérés sont présentés dans le tableau 2.4 ci-dessous et reportés sur la figure 2.9.

Tableau 2.4: Niveaux de la nappe (mNGF) calculés avec le logiciel de modélisation des écoulement ASM, 25 m en amont (1), 75 m (2) et 225 m (3) en aval de la gravière pour les cas d'un écoulement naturel et d'un écoulement perturbé par la présence du lac d'exploitation

Point	Écoulement naturel	Février 1997	Septembre 2000	Fin d'extraction
1	92,98	92,97	92,96	92,94
2	92,575	92,58	92,64	92,85
3	92,49	92,495	92,54	92,66
4	92,79	92,805	92,91	92,90 (dans le lac)

Le modèle montre que la présence de la carrière induit:

-Un rabattement en amont du lac qui augmente avec la taille de ce dernier. Ce rabattement ne dépasse pas 4 cm à 25 mètres en amont du lac.

-Une élévation du niveau de la nappe à l'aval du lac d'exploitation. Les écarts piézométriques à l'écoulement naturel sont négligeables au moment de l'implantation des piézomètres alluvionnaires en février 1997. (0,5 cm à 75 m en aval du lac). Ces écarts augmentent avec la taille du lac. Par exemple, en septembre 2000, la nappe monte de 12 cm par rapport à l'écoulement naturel, au niveau de l'observatoire piézométrique (fig.2.9, point 4), et de 6,5 cm à 75 mètres au Sud du lac d'extraction.

-Un changement des directions d'écoulement au voisinage du lac au cours de son avancée. Au niveau de l'observatoire piézométrique alluvionnaire (fig.2.9, point 4), la direction d'écoulement s'incline progressivement vers le Sud-Ouest.

-Enfin, une augmentation légère et progressive du gradient hydraulique au voisinage du lac d'extraction ($0,5 \cdot 10^{-3}$ en septembre 2000 au niveau de l'observatoire piézométrique au lieu de $0,4 \cdot 10^{-3}$ initialement). Cette augmentation est négligeable devant la variation dans l'espace du gradient hydraulique visible sur la carte piézométrique de la nappe alluviale.

Une critique détaillée du modèle utilisé dans l'étude d'impact est réalisée à la fin de cette thèse (chapitre 9), après présentation des résultats expérimentaux. Pour l'instant, retenons de ce modèle que la présence du lac ne modifie pas de manière considérable la piézométrie de la nappe, (pas plus de 12 cm pendant la période de l'étude 1997-2000), en aval du lac d'extraction. Cela est dû en grande partie au faible gradient hydraulique régional. On peut cependant discuter de la direction d'écoulement choisie, la direction Est-Ouest, indiquée par l'allure générale de la piézométrie de la nappe alluviale. En effet, le modèle ne tient pas compte des talwegs piézométriques imposés par la présence d'axes karstiques autour de la

carrière qui modifient localement, et en particulier au niveau de la carrière le sens des écoulements.

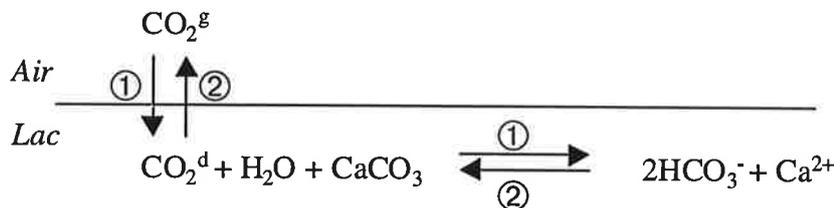
2.4.2. Impacts physico-chimiques

Les eaux de la nappe, lors de leur mise en contact avec l'atmosphère pendant l'extraction, subissent des modifications physico-chimiques importantes dont les principales sont rappelées ci-dessous.

2.4.2.1. Généralités sur les modifications physico-chimiques

-Les teneurs en oxygène dissous augmentent lors de la mise en contact de la nappe avec l'atmosphère.

-Les teneurs en bicarbonates de calcium diminuent à cause de la baisse de la pression partielle en CO_2 dissous. Ce phénomène entraîne une augmentation du pH ainsi qu'une précipitation de la calcite selon le déplacement des équilibres ci-dessous dans le sens 2:



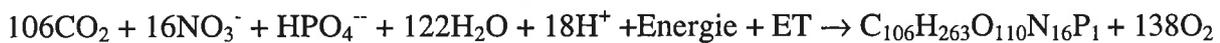
-Le fer et le manganèse :

L'augmentation de la matière en suspension (MES) argileuse provoque la mise en solution de fer et de manganèse. Cependant, l'augmentation des teneurs en O_2 induit l'oxydation du fer et du manganèse, suivie de leur précipitation sous forme d'oxydes. L'augmentation des teneurs en fer et manganèse qui pourrait résulter de la mise en suspension des fines argileuses dépend donc des conditions rédox et de pH. Sur neuf gravières de la région de la Bassée (77), O. Schanen (1998) a mesuré des pH toujours supérieurs à 7 au fond

et à la surface des lacs, quelle que soit la saison. De plus, le potentiel redox mesuré au fond de la colonne d'eau des 9 gravières est toujours supérieur à +200 mV. Ces conditions sont favorables à la précipitation des oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse d'après les diagrammes de stabilité de ces oxydes (Michard, 1989).

-La matière organique :

La mise à l'air et à la lumière des eaux de la nappe au niveau de la gravière conduit au développement de la faune et de la flore dans le lac et sur ses berges. Ce développement s'accompagne, surtout en période estivale, d'une augmentation du taux de matière organique. Stumm et Morgan (1981) résument le processus de photosynthèse dans les lacs par l'équation suivante :



(ET = Eléments traces)

Dans les gravières, la photosynthèse est réalisée par le phytoplancton et les macrophytes. Elle consomme du CO_2 , du phosphate et de l'azote (provenant soit de N_2 , NH_4^+ ou NO_3^-) et libère de l'oxygène O_2 . Etroitement liée à la photosynthèse, la réaction inverse, la respiration aérobique, consomme de l'oxygène et dégrade la matière organique produite par la photosynthèse. Dans les milieux peu profonds, comme les gravières, la lumière parvient à traverser l'ensemble de la colonne d'eau et généralement la photosynthèse prédomine légèrement sur la respiration aérobique (Berner and Berner, 1987). Il s'en suit une production de matière organique et une baisse des teneurs en nitrates et phosphates. Ces éléments ne sont pas éliminés du système mais seulement incorporés dans la matière organique.

-Les nitrates et l'ammonium :

Dans les gravières, les nitrates sont consommés par la biomasse végétale. Outre la part

apportée par la nappe, une partie des nitrates provient de l'oxydation de l'ammonium (nitrification) produit lors de la minéralisation de la matière organique présente dans les sédiments mais également en suspension dans la colonne d'eau. Dans la partie réduite des sédiments, la dégradation de la matière organique ne peut plus s'effectuer par oxydation et des processus de dégradation anaérobiques prennent le relais. Parmi ces processus, la dénitrification par les bactéries hétérotrophes transforme les nitrates en nitrites puis en gaz (N_2O , N_2). Ce processus conduit à une perte irréversible d'azote pour le milieu aquatique. L'ammonium est la forme minoritaire de l'azote en solution en milieu oxygéné. Les pics observés en été et en automne dans les lacs de gravières (Schanen, 1998) correspondent à des périodes d'intensification de la minéralisation de la matière organique. Le cycle de l'azote dans un lac de gravière est schématisé sur la figure 2.10 ci-dessous.

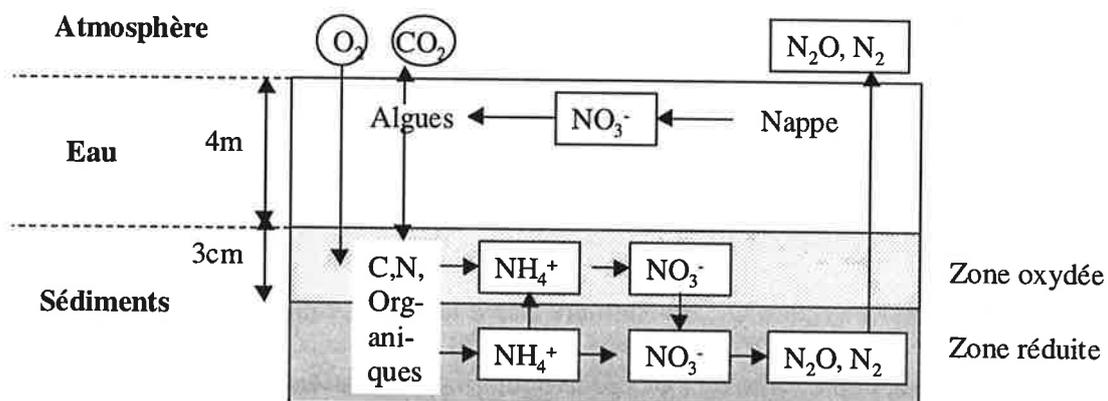


Figure 2.10 : Cycle de l'azote à l'interface eau-sédiment dans un lac de gravière (extrait de Labroue, 1988)

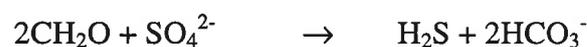
Quelques études ont montré que les pertes en nitrates par dénitrification pouvaient atteindre 1000 kg/ha/an dans des lacs eutrophes de gravières (Helmer et Labroue, 1993 ; Helmer, 1994 ; Labroue et Helmer, 1997). D'autre part, O.Schanen (1998) montre que, tous phénomènes de consommation d'azote confondus, les lacs de gravières de la Bassée (77) piègent entre 31 et 85% de l'azote de la nappe transitant par le lac, ce qui correspond à 51-70 kg N/ha/an en considérant les apports atmosphériques.

-Les phosphates :

Comme les nitrates, les phosphates sont consommés lors de la photosynthèse. En milieu alcalin, ils sont en outre épurés dans les lacs par leur adsorption sur les précipités de carbonates (McGlathery et Al., 1994). Les ions phosphates peuvent également s'adsorber sur les minéraux argileux ainsi que les oxydes et hydroxydes métalliques (Al, Fe). Ainsi, en raison de l'affinité des ions phosphates pour la matière particulaire, les lacs de gravière apparaissent comme de véritables pièges vis-à-vis du phosphore (Pettersson and Boström, 1986). Chesterikoff (1980) montre que le lac de gravière de Créteil retient 85% des apports de la nappe en phosphore. Schanen (1998) évalue à 50% la quantité de phosphore retenue par les lacs de gravière de la Bassée (77).

-Les sulfates :

Ils peuvent voir leur teneur baisser dans la gravière, au niveau de la zone anoxique des sédiments, sous l'action de bactéries sulfato-réductrices ou d'autres micro-organismes, selon la réaction ci-dessous (Berner and Berner, 1987) :



où CH_2O représente la matière organique en décomposition.

Sur le plan chimique, la mise à nu de la nappe liée à la création d'une gravière, se caractérise par une baisse de sa minéralisation et une augmentation du taux de matière organique. Les eaux de la nappe se différencient donc au niveau des lacs d'exploitations actuelles ou anciennes pour un grand nombre d'espèces en solution. Cependant, pour les éléments les plus conservatifs (Na, K, Cl), et dans le cas de gravières faiblement colmatées, les teneurs dans le lac d'exploitation peuvent représenter une bonne approximation de la moyenne des teneurs présentes dans la nappe si les effets de dilution et de concentration au

niveau du lac sont négligeables.

-Effets thermiques :

La température de la nappe phréatique contenue dans les alluvions varie peu. En effet, les variations de température enregistrées à la surface du sol sont amorties par la couche de terrain située au-dessus de l'aquifère.

Lors de l'ouverture d'une gravière, cette protection thermique est supprimée. Les variations de température qu'enregistre l'eau de la gravière peuvent se répercuter à l'aval dans la nappe. Ces répercussions peuvent être importantes. Par exemple, O. Schanen (1998) met en évidence des fluctuations de température de la nappe importantes (8-19°C) à 2 mètres de profondeur, sur des piézomètres situés à quelques dizaines de mètres à l'aval de lacs faiblement colmatés des carrières de Vimpelles (77). Sur les piézomètres situés à l'amont, ces fluctuations sont d'environ deux degrés à la même profondeur.

2.4.2.2. Cas de la carrière de Sandillon

L'analyse des éléments majeurs permet d'identifier qualitativement l'impact de la carrière sur la qualité chimique de l'eau de la nappe alluviale. Les premiers prélèvements dans le lac d'exploitation ayant eu lieu en novembre 1996, c'est-à-dire 7 mois après le début de l'extraction, on peut suivre l'évolution des teneurs dans le lac quasiment dès le début de sa création. Les points de prélèvement situés à l'amont hydraulique (à l'Est) du lac de gravière constituent les points de référence peu ou pas perturbés par l'exploitation. Il est intéressant d'étudier les points situés à l'aval du lac de gravière par rapport à l'écoulement présumé. Rappelons que ces derniers points sont directement sous l'influence des épandages agricoles. De plus, la carrière se situe sur des terrains qui étaient cultivés avant son ouverture.

Dans ce paragraphe, les analyses d'éléments majeurs qui figurent dans les tableaux 2.1

et 2.2 sont réexaminées non plus dans l'optique "impact des épandages agricoles" mais pour étudier "l'impact de la carrière" sur la qualité chimique des eaux de nappe.

Relativement à tous les points de la nappe alluviale, on observe dans le lac d'extraction, dès Novembre 1996, une baisse des concentrations en hydrogénocarbonates de calcium, et en magnésium.

Il a été vu (§2.3.1.7) que les chlorures sont des éléments inertes chimiquement qui apportent, par conséquent, des informations sur les mélanges de masses d'eau. Au niveau du lac d'exploitation, les teneurs en chlorures diminuent de novembre 1996 (28,5 mg/L) à avril 2000 (14,5 mg/L). Ceci traduit une dilution des eaux du lac d'exploitation qui possèdent initialement les teneurs élevées en chlorures de la nappe alluviale soumise aux épandages (11,3-32 mg/L au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire, 32,1-87,6 mg/L en Pf1-Pf2). Cette dilution peut provenir des eaux de pluie dont on sait que les teneurs en chlorures avoisinent 1,45 mg/L à Orléans (C.Grosbois, 1998). Il tombe 2m20 de pluie pendant cette période à Orléans. L'évapo-transpiration correspondante à cette période donnée par Météo-France est de 2m57. Le bilan des échanges atmosphériques se conclut par une perte d'eau au niveau du lac. Le phénomène de dilution n'est donc pas lié aux apports d'eau de pluie mais plutôt à des apports d'eaux de l'amont hydraulique (Loire, P1, P2) relativement pauvres en chlorures (10,9-16,8 mg/L) en comparaison avec les eaux de la nappe alluviale situées à l'aval du lac (11,3-87,6 mg/L). Cette alimentation du lac par des eaux venant de la Loire est confirmée sur l'exemple de l'ancien lac de carrière, Etancar (fig.2.5). Les teneurs en chlorures faibles (10,9-12,1 mg/L) de cette ancienne gravière et les concentrations importantes en potassium montrent que ce lac est certainement principalement alimenté par la Loire. Le lac des eaux de ruissellement de la commune de Sandillon qui déverse son surplus dans Etancar ne joue un rôle dans l'alimentation d'Etancar qu'en période de fortes précipitations. Si l'on considère que la dilution a lieu principalement en période de crue, au moment où les teneurs

en chlorures sont les plus faibles dans la Loire ($[Cl^-]=12$ mg/L pour la Loire en crue à Orléans; C.Grosbois et Al., 1998), on peut estimer à 5 le facteur de dilution des eaux du lac d'exploitation ($[Cl^-]=28,5$ mg/L) par les eaux de la Loire, sur 3 ans. Ceci correspond approximativement au remplacement du volume occupé initialement par les alluvions (80% du volume total si l'on prend une porosité égale à 20%) dans la nappe par de l'eau provenant de la Loire via la nappe calcaire et/ou alluviale. Les apports de la Loire sur le lac d'exploitation et Etancar s'observent également à partir du diagramme Mg/K-Na/K expliqué figure 2.11.

On devrait pouvoir tenir le même raisonnement avec le sodium qu'avec les chlorures. Cependant, on n'observe pas la même évolution au cours du temps des teneurs en sodium dans le lac d'exploitation. Cela est lié au fait que les teneurs en sodium varient peu entre l'amont P1-P2-P3-Loire (8,2-14,9 mg/L) et la nappe alluviale "polluée" (7,4-15,2 mg/L au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire) sauf pour les piézomètres très pollués comme Pf1 (20,3-35 mg/L) et Pf2 (30-54,4 mg/L).

Les nitrates ont des teneurs qui chutent radicalement de 38,6 mg/L en novembre 1996 à 9 mg/L en avril 2000. La valeur minimale (2,4 mg/L) est observée en juillet 1998. Les variations des teneurs en nitrates dans le lac d'exploitation de Sandillon ne sont pas dues seulement à un effet de dilution, comme pour les chlorures, mais également et surtout à une consommation par le phytoplancton ainsi que par les macrophytes, et éventuellement par les bactéries dénitrifiantes. Cependant, précisons que l'on ne dispose pas assez de mesures réalisées l'hiver dans le lac pour confirmer une baisse définitive des teneurs en nitrates.

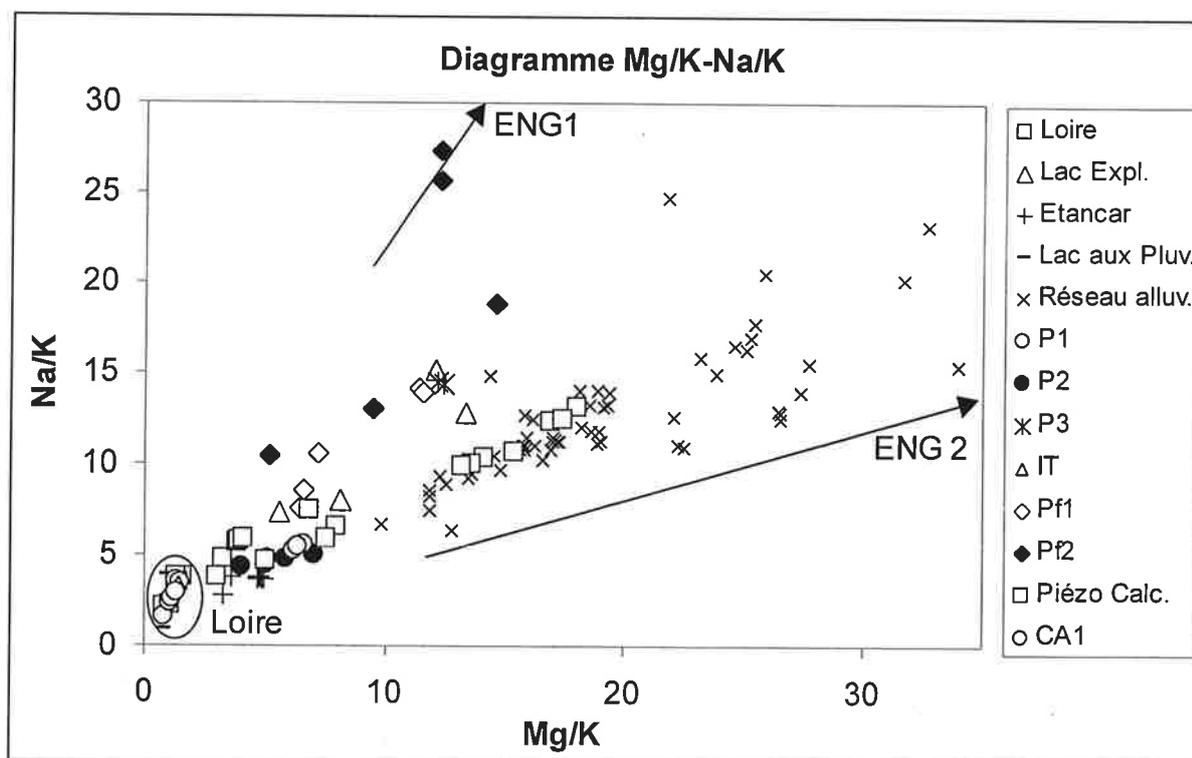


Figure 2.11: Diagramme Mg/K-Na/K mettant en évidence une loi de mélange des eaux du site de Sandillon entre un pôle Loire, et deux pôles "engrais"

Dans le chapitre 1, il a été montré que les eaux de la Loire possèdent des rapports invariants au cours du temps. Les meilleurs invariants sont obtenus avec Mg/K et Na/K dont les valeurs moyennes assorties des écarts-types calculés pour la Loire à Orléans sur les données de J.L.Chéry (1983), C.Grosbois (1998) et F. Le Borgne (le travail présent) sont: $Mg/K=1,39\pm 0,27$ et $Na/K=3,13\pm 0,6$. Au chapitre 1, il a également été montré que les éléments Mg, K et Na sont conservatifs dans le système Loire-axe karstique. On suppose que cela est également vrai dans la partie non karstique de la nappe calcaire ainsi que dans la nappe alluviale, c'est-à-dire que l'on néglige la fixation de ces éléments ou leur pompage de la nappe alluviale vers les végétaux de surface. Même si la fixation du potassium par les végétaux affecte la nappe alluviale, les rapports Mg/K et Na/K augmentent simultanément vers les pôles "engrais" caractérisant la nappe alluviale, ce qui ne modifie pas le résultat mais explique l'existence de ces pôles. On peut donc admettre qu'il existe des rapports (Mg/K, Na/K) caractérisant des compartiments de la nappe alluviale que l'on nomme ENG1 et ENG2. Ces rapports sont difficiles à définir car certainement très influencés par les épandages successifs d'engrais à composition variable en Na, Mg et K selon les années. Le pôle naturel est complètement masqué puisque les points P1, P2 et P3, situés à l'amont hydraulique des cultures, sont situés dans la zone de mélange et particulièrement proche du pôle Loire pour P1 et P2. Le pôle ENG1 est caractérisé par un rapport Na/K relativement élevé, comme dans le piézomètre Pf2. Le pôle ENG2 est quant à lui caractérisé par un rapport Na/K assez faible et un rapport Mg/K élevé. Le report, sur le diagramme Mg/K-Na/K, de l'ensemble des échantillons analysés au cours de ce travail montre qu'il existe une différenciation progressive des eaux entre la Loire et les pôles ENG1 et ENG2 caractérisant les alluvions. Dans ce diagramme, Etancar est proche de la Loire. Le lac actuel se démarque de la majorité des points "alluvionnaires" mais il montre une influence de la Loire moins marquée que pour Etancar.

En effet, sur un seul cycle hydrologique, O.Schanen (1998) obtient des variations en nitrates similaires (0-35 mg/L) sur une des carrières de la Bassée, avec des teneurs maximales en février et inférieures à 12 mg/L d'avril à décembre.

Notons que le processus d'épuration des nitrates observé au niveau du lac d'exploitation est extrêmement local et ne se répercute pas sur l'aval hydraulique situé à une centaine de mètres à l'ouest. Ceci est certainement lié à des circulations lentes dans les alluvions. Les prélèvements effectués en juillet 1998 au niveau du réseau de piézomètres alluvionnaires, présentent des teneurs en nitrates globalement très importantes et très hétérogènes (39-122,7 mg/L). Seuls trois piézomètres (Z18, Z19, Z22) possèdent des teneurs inférieures à 10 mg/L, ce qui traduit certainement une contamination par des bactéries dénitrifiantes.

L'impact du lac d'exploitation sur la qualité des eaux de la nappe alluviale est important puisque, globalement, les eaux sont moins chargées au niveau du lac que dans la nappe située à l'aval du lac. L'impact positif sur les teneurs en nitrates est indiscutable. Cependant, cet impact est très local du fait des faibles circulations dans la nappe alluviale. Les teneurs en éléments majeurs d'Etancar peuvent donner une estimation de ce que sera la qualité chimique de la nappe au niveau du lac d'exploitation après extraction complète des matériaux.

2.5. Approfondissement de la lithologie au niveau de la carrière

La présence de la carrière sur le site de Sandillon permet d'approfondir localement la lithologie de la formation alluvionnaire mise à nue lors de l'exploitation et préalablement explorée par sondage de reconnaissance.

2.5.1. Les sondages de reconnaissance du gisement

Deux séries de sondage ont été réalisées sur la carrière. 20 premiers sondages ont couvert l'ensemble du gisement de granulats en août 1991, avant l'ouverture de l'exploitation. Cette première série de sondage avait pour objectif de reconnaître le gisement et de vérifier son exploitabilité. La deuxième série comportant 25 sondages supplémentaires a été réalisée en septembre 1997, pendant la phase d'exploitation, dans une période où la quantité d'argile extraite du gisement devenait suffisamment importante pour risquer d'abaisser la qualité des matériaux extraits. Ces sondages ont été réalisés à la carrière et ils ont fait l'objet d'une analyse granulométrique (§2.5.2).

Au cours de ce travail de thèse, 8 coupes ont été réalisées à partir de ces sondages. 4 coupes Nord-Ouest – Sud-Est ont été réalisées à partir des sondages d'août 1991. 4 autres coupes Sud-Nord ont été réalisées avec le maillage plus serré (75 mètres entre deux sondages) adopté lors de la campagne de sondages de septembre 1997. Pour alléger la présentation, ces coupes ont été placées dans l'annexe 1, sauf la coupe NO-SE n°4 (fig.2.12). Les deux campagnes de sondage n'ayant pas été réalisées par la même personne les informations lithologiques reportées ne sont pas identiques. La difficulté est, bien sûr, d'homogénéiser ces informations et de les relier aux sondages de la Banque du Sous-Sol (chapitre 1).

Les sondages de 1991 rendent compte généralement, sous les alluvions, de la présence d'une couche formée de marne bleue, grise ou blanche ou de limons noirâtres. Au niveau du sondage S14, les alluvions reposent directement sur le substratum. En 1997, c'est une couche

d'argile grise, blanche ou noire qui est rencontrée à la base des alluvions. Plutôt qu'une variation de lithologie, il est plus probable que les « argiles » de 1997 se rapportent aux « marnes » de 1991 et que les argiles noires font référence aux limons noirâtres. Notons que les informations reportées sur les sondages de 1991 sont plus détaillées que celles de 1997. Elles font mention, par exemple, de veines limoneuses ou argileuses et de la présence de « blocs ». Le substratum atteint lors des forages de 1991 n'est pas décrit comme du calcaire mais comme une marne blanche qui est très certainement du calcaire altéré. Les marnes bleues-grises sont certainement des marnes de l'Orléanais, décrites dans la littérature (Desprez, Avril 1967) comme étant de couleur verte. Les marnes et argiles grises sont probablement à rattacher aux marnes de Blamont. La coupe NO-SE n°4 réunit l'ensemble des caractéristiques lithologiques reconnues sur les autres coupes. Elle est représentée figure 2.12.

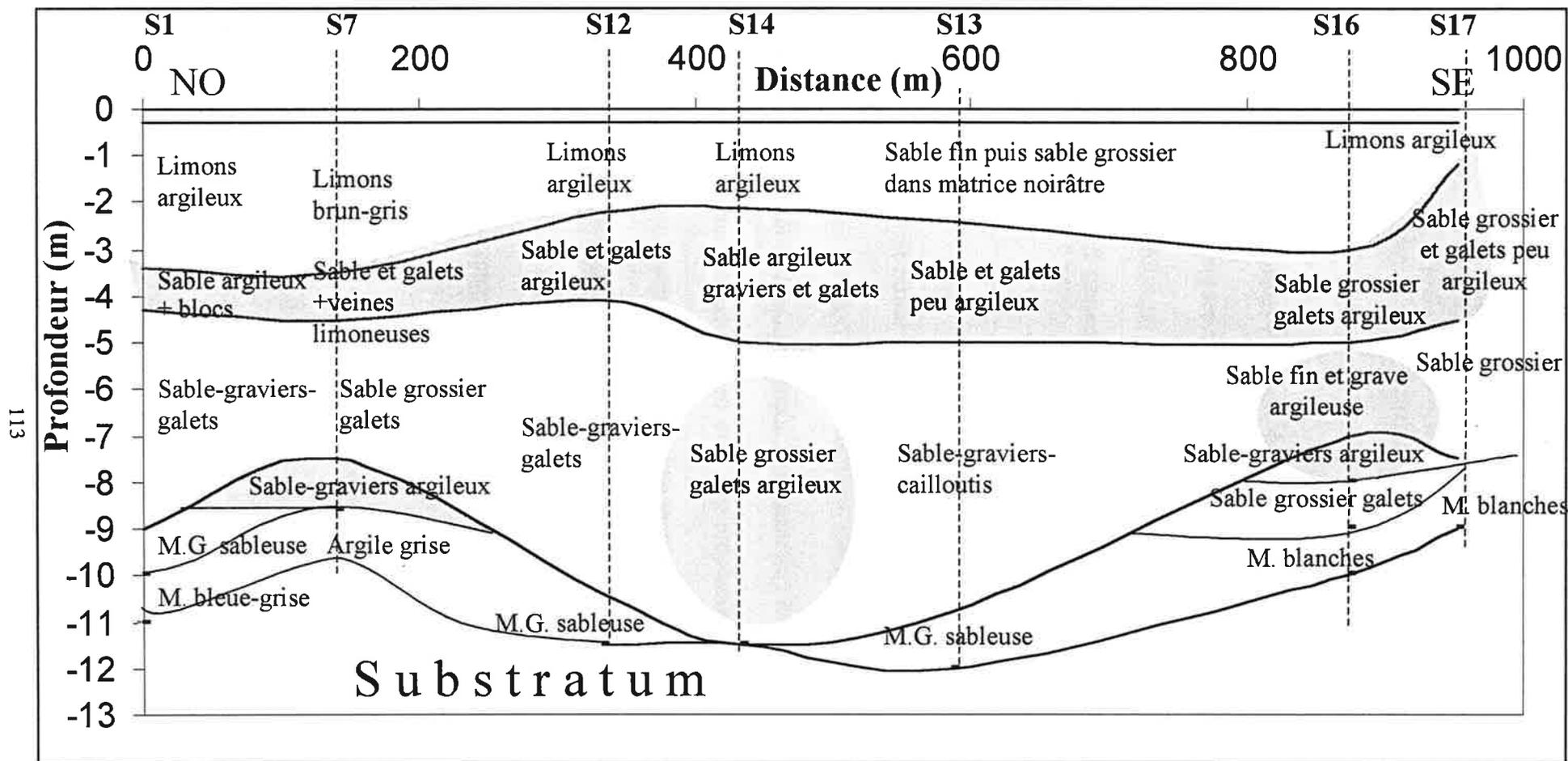
Les huit coupes soulignent :

- l'hétérogénéité des alluvions au niveau de la carrière
- la présence d'un substratum argilo-marneux discontinu à la base des alluvions
- l'irrégularité du toit du calcaire de Beauce et donc de l'épaisseur des alluvions à l'échelle de la carrière.

2.5.1.1. Des alluvions très hétérogènes

Globalement, les alluvions au niveau de la carrière sont disposées selon le tricouche proposé par Desprez (1976), c'est-à-dire qu'elles se composent, de haut en bas, de limons, de sables graveleux plus ou moins argileux ainsi que de graviers et galets à la base. De nombreuses nuances sont apportées à cette description simplifiée. Elles accentuent le caractère très hétérogène du massif alluvial. Les diverses échelles d'hétérogénéité apparaissent clairement sur les photos de la figure 2.13.

Figure 2.12: Coupe NO-SE n°4 réalisée à partir des sondages de reconnaissance d' Août 1991 (carrière de Sandillon)



M.G. : Marne Grise

M. : Marne

 Zone argileuse du gisement de granulat sous la découverte

Les limons superficiels : Ils correspondent aux alluvions modernes (Fz) qui occupent les anciens bras inondables de la Loire dans le lit majeur. Leur couleur parfois sombre (fig.2.13 –photo du milieu) est très certainement liée à la présence de cultures qui ont retourné maintes fois le sol entre chaque crue. L'épaisseur de ce niveau, sous 30 cm de terre végétale, varie entre 1 et 3 mètres.

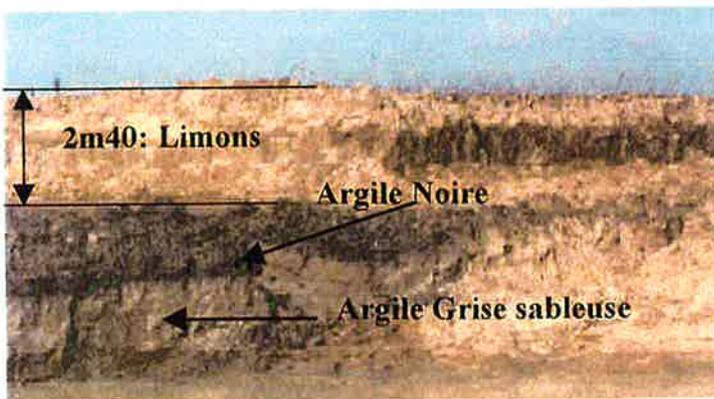
Les sables argileux : Cette couche d'alluvions récentes ou holocènes Fy varie entre 1 et 3 mètres d'épaisseur sous les limons argileux. Elle est caractérisée par la présence d'argile qui comporte des niveaux noirâtres (fig.2.13. photo du milieu). Au niveau de la carrière, le sable qui constitue cette couche est généralement grossier. Il est mélangé à du sable fin et à des galets par endroit et plus rarement à des graviers.

Les sables, graviers et galets : Etant donnée leur faible proportion d'argiles, ces alluvions Fy constituent, sous les sables argileux, la partie la plus intéressante du gisement. L'épaisseur de cette couche est très variable. Elle se confond parfois avec les sables argileux (sondage S14, fig.2.12). Son épaisseur peut atteindre plus de 6 mètres (sondage S12, fig.2.12). C'est dans cette couche perméable que l'on peut s'attendre aux circulations d'eau les plus rapides. De plus, la zone de battement de la nappe la traverse sans atteindre les sables argileux qui pourraient la rendre captive ou semi-captive. Cependant, les nombreuses poches argileuses (sondages S14 et S16, fig.2.12) présentes au sein de cette couche sablo-graveleuse peuvent constituer de véritables barrières imperméables bloquant ou détournant les mouvements horizontaux de la nappe des alluvions.

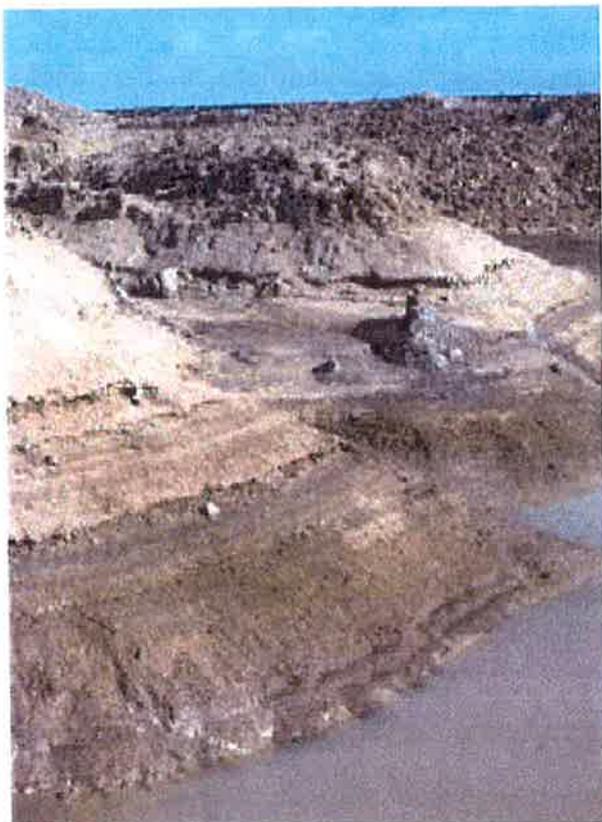
Les sondages réalisés sur la carrière, montrent une grande diversité de faciès à courte distance. Les nombreuses crues de la Loire et les effondrements du toit calcaire karstique ont, au fil du temps, déposé, enlevé et déplacé ces alluvions horizontalement ou verticalement.



Hétérogénéité horizontale des alluvions de la Loire mise en évidence sur le front d'exploitation: Cette photo montre l'alternance de faciès de couleurs différentes dans le front d'exploitation de la carrière de Sandillon. Les zones claires (1) correspondent à des zones d'argile beige. Les zones plus sombres (2) représentent des chenaux sableux.



Hétérogénéité verticale des alluvions de la Loire : Sous 30 cm de terre végétale, apparaît une couche limoneuse de 2m40 d'épaisseur. Ce faciès est souvent mêlé d'argile brune ou noirâtre (en haut à droite de la photo). Le gisement alluvionnaire, majoritairement constitué de sables faiblement argileux, comporte, par endroit, des veines d'argile noire qui correspondent probablement à de la terre végétale recouverte ensuite par des alluvions de crue.



Hétérogénéité verticale fine au sein des sables : La photo ci-contre fait apparaître, dans une zone sableuse, une alternance de niveaux clairs et sombres de quelques centimètres d'épaisseur. Ces niveaux indiquent certainement différentes phases de sédimentation des alluvions de la Loire.

Figure 2.13: Les différentes échelles d'hétérogénéité des alluvions de la Loire observées sur la carrière de Sandillon.

Au cours de sa thèse, S. Bigot (1977) avait déjà mis en évidence, par traçage, la grande hétérogénéité des alluvions du Val d'Orléans. Le site expérimental étudié se situait alors à Darvoy (fig.1.5). Les multiples études réalisées sur les milieux alluvionnaires mettent en avant la grande hétérogénéité lithologique de ces formations qui est prise en compte de manière différente selon les auteurs pour la modélisation des écoulements. Citons par exemple Dieulain (1980) qui représente les alluvions de la Marne par un modèle en couches où alternent différents faciès. Ce même type de représentation à trois dimensions est utilisé par Terry et Al. (1981) sur la plaine alluviale du fleuve Missouri. Dans sa thèse (1999), N. Courtois aborde le problème de l'hétérogénéité des alluvions du Drac par des méthodes stochastiques. D'autre part, une modélisation de la formation générale des plaines alluviales par modèle génétique de mise en place des sédiments a été entreprise par V. Teles et G. de Marsily (1998, 1999). Ce modèle montre que, bien que « désordonnées », les alluvions possèdent une structure où alternent chenaux perméables et zones imperméables. Cette structure s'explique par les lois simples de formation des plaines alluviales. Ce type de structure apparaît parfois sur le front d'extraction de la carrière de Sandillon (fig.2.13; photo du haut). La largeur des chenaux ainsi observés semble être de l'ordre de la cinquantaine de mètres. Il est cependant très difficile de redessiner, à partir des sondages, une structure alluvionnaire en chenaux. De plus, du fait des déplacements locaux verticaux de sédiments engendrés par les effondrements du toit calcaire, cette structure a certainement subi de fortes modifications dans une phase postérieure au dépôt des sédiments. Ces déplacements verticaux sont visibles sur deux des coupes de l'annexe 1. Sur la coupe N-S n°4, une poche d'argile grise apparaît à 5 mètres de profondeur, dans une zone où le toit calcaire est relativement profond (12 mètres). Le même phénomène est visible sur la coupe NO-SE n°3 où des lentilles argileuses se trouvent enfouies à 7 mètres de profondeur au-dessus d'un effondrement de 15 mètres de profondeur (sondage S2).

2.5.1.2. Les argiles sous-alluviales

Les sondages réalisés au niveau de la carrière montrent qu'il existe, entre les alluvions et le substratum calcaire, un niveau de marne peu épais (rarement supérieur à 1 mètre). Ce niveau disparaît complètement en certains endroits (ex : sondage 14). Il est difficile d'affirmer que ce niveau constitue une barrière imperméable, d'une part à cause de sa faible épaisseur, d'autre part à cause de sa composition. Entre 9 et 11 mètres de profondeur, ce niveau est gris-bleu. Cette couleur laisse penser que l'on a des argiles qui sont probablement à rattacher à la formation burdigalienne de l'Orléanais. Lorsque le substratum calcaire passe en-dessous de 11-12 mètres de profondeur, ce niveau bleu-gris laisse place à un niveau de marne blanche. Les endroits où le substratum calcaire se trouve à plus de 12 mètres de profondeur peuvent avoir subi une plus grande érosion par la Loire à une époque où le fleuve coulait directement sur le calcaire de Pithiviers. Ils peuvent également être le résultat d'effondrements locaux (gouffres) liés à la dissolution du calcaire. Dans le premier cas, on explique aisément la disparition des argiles bleue-grises par l'érosion de la Loire. Dans le deuxième cas, il doit être possible de retrouver ces argiles à la base des alluvions, même à des profondeurs élevées. On retrouve ce dernier cas dans le sondage n°35 réalisé en septembre 1997 (voir annexe 1).

L'épaisseur et la discontinuité de la couche argilo-marneuse sous-alluviale au niveau de la carrière, correspond bien à la carte de répartition des argiles burdigaliennes (fig.1.6) dessinée par Desprez (1976). La carrière se situant dans une zone d'effritement de ces argiles, il n'est pas étonnant de constater la faible épaisseur de ce niveau ou bien sa disparition et son remplacement par du calcaire altéré (« marnes blanches »).

Quant à la répartition des argiles burdigaliennes au niveau de la carrière, il semble bien qu'il faille compléter la carte fig.1.7 puisque leur présence est signalée à l'Est de la carrière par des

marnes bleues-grises (sondages S3, S5, S8, S11 et S15 – annexe 1). C'est cependant à l'Ouest de la carrière qu'elles atteignent leur épaisseur maximale, 2 mètres (sondage S1, fig.2.12).

2.5.1.3. L'irrégularité du toit calcaire

La figure 2.14 reprend les données issues des deux campagnes de sondages auxquelles ont été rajoutées les données issues du forage des piézomètres dans le cadre de ce travail. La figure a été tracée avec le logiciel Tecplot. Le calcul des profondeurs entre les sondages a été réalisé par la méthode d'interpolation « distance-inverse », qui est une variante du krigeage. Sur la figure, le toit calcaire apparaît très irrégulier à l'échelle de la carrière. Il est situé entre 7 et 16 mètres de profondeur. Cette figure met également en évidence l'importance de l'échelle d'observation. En effet, la deuxième campagne de sondages réalisée en septembre 1997, avec un maillage plus serré qu'en 1991, met en évidence des remontées du toit calcaire non visibles sur les premiers sondages. Cette deuxième campagne permet également de réduire à 35 mètres le diamètre maximal de l'effondrement (sondages S2) situé au centre de la carrière.

A partir de ces résultats, il semble assez difficile de faire apparaître des zones d'érosion du calcaire de Pithiviers correspondant à des anciens chenaux d'écoulement de la Loire. Il est cependant possible qu'un de ces chenaux traversait la carrière d'Est en Ouest en passant par les deux effondrements situés au milieu de l'exploitation.

La forte irrégularité du toit calcaire à l'échelle de la centaine de mètres, voire même de la trentaine de mètres apporte un regard nouveau sur les cartes de répartition des isobathes des alluvions dans le Val d'Orléans (Desprez, 1976 ; fig.1.6). Autrement dit, la densité des sondages était-elle suffisante pour pouvoir tracer cette carte ? Par exemple, sur la carte de Desprez (1976), la carrière est située dans une zone où les alluvions sont relativement épaisses (entre 10 et 13 mètres). Or, un seul sondage ayant servi au tracé de cette carte se situe sur la carrière.

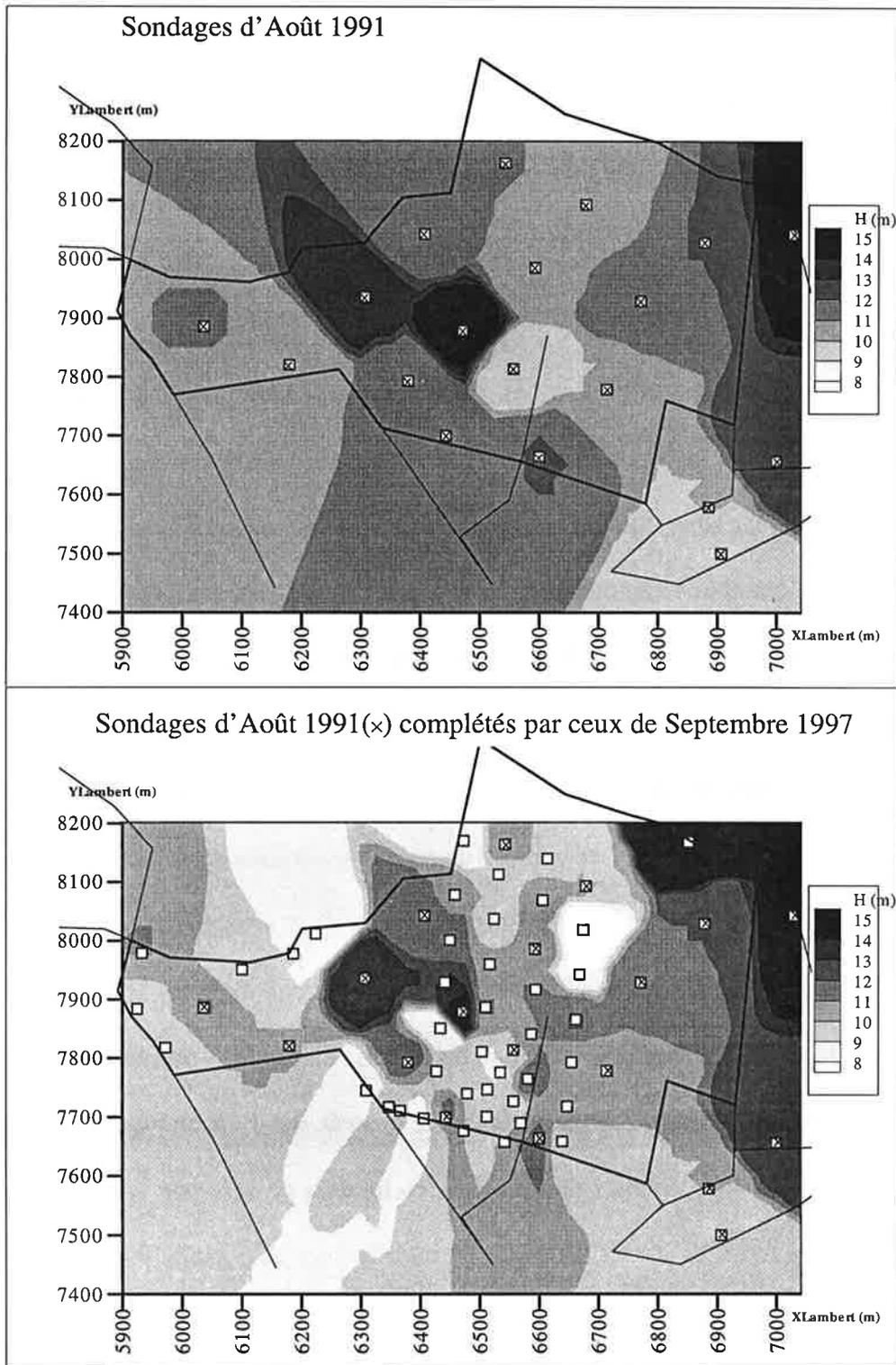


Figure 2.14 : Profondeur du toit du calcaire de Pithiviers au niveau de la carrière de Sandillon.

L'emplacement des sondages est repéré par les carrés blancs. La première série de sondages (graphique du haut) est repérée par des croix. Cette figure souligne l'importance de l'échelle d'observation puisque l'irrégularité du toit calcaire observée sur le graphique du haut est accentuée lorsque l'on change d'échelle (graphique du bas). Cette figure met en évidence deux effondrements situés au milieu de la carrière, ainsi qu'une zone profonde localisée entre le piézomètre P1 et le bois de Baguenault au Nord-Est.

Ainsi, les sondages réalisés par Morillon-Corvol apportent une très bonne idée de la variabilité spatiale de l'épaisseur alluvionnaire dans cette partie du Val d'Orléans.

2.5.2. Les analyses granulométriques

2.5.2.1. Les analyses des sondages d'Août 1991

Les analyses granulométriques réalisées par l'entreprise Morillon-Corvol sur les sondages d'août 1991 sont présentées en annexe 4. Elles constituent des moyennes sur toute la hauteur du gisement alluvionnaire puisque chaque échantillon est un mélange de prélèvements des différentes couches reconnues sur un sondage. Toutes les analyses granulométriques ont été réalisées à sec, sauf celle du sondage S18 pour lequel une analyse granulométrique supplémentaire a été effectuée sous eau. Cette dernière analyse, présentée figure 2.15 a l'avantage de donner les proportions réelles des éléments les plus fins agglutinés, à sec, dans les fractions plus grossières. Les caractéristiques granulométriques obtenues par tamisage à sec varient assez peu d'un sondage à l'autre (annexe 4) et sont assez bien représentées par le sondage n°18. La fraction la plus importante (32%) est constituée par les sables compris entre 0,63 et 2,5 mm. Le pourcentage massique de fraction fine (<80 µm) pour chaque sondage est représenté dans le tableau 2.5. Il varie de 5 à 16% sur l'ensemble du gisement. Il faut remarquer que les pourcentages donnés dans ce tableau ne sont pas toujours cohérents avec les observations fournies sur les sondages et reportées sur les coupes. Par exemple, le sondage 14 qui apparaît très argileux sur la figure 2.12 ne comporte que 6,4% de fines alors que le sondage S13, normalement moins argileux, comporte 8,1% de fines. Cela s'explique certainement par le fait que l'échantillonnage de chaque couche ne traduit pas nécessairement leurs épaisseurs relatives.

Tableau 2.5 : Pourcentages massiques des fines argileuses (< 80 µm) perdues par lavage des alluvions récoltées lors des sondages d'août 1991 sur la carrière de Sandillon

N° du sondage	Pourcentage massique de perte au lavage (< 80 µm)	N° du sondage	Pourcentage massique de perte au lavage (< 80 µm)
2	10,6	11	7,2
3	7,5	12	8,1
4	10,7	13	9,0
5	9,6	14	6,4
6	10,0	15	16,0
7	6,0	16	11,7
8	11,1	17	5,0
9	9,2	18	10,1
10	13,3	20	7,0

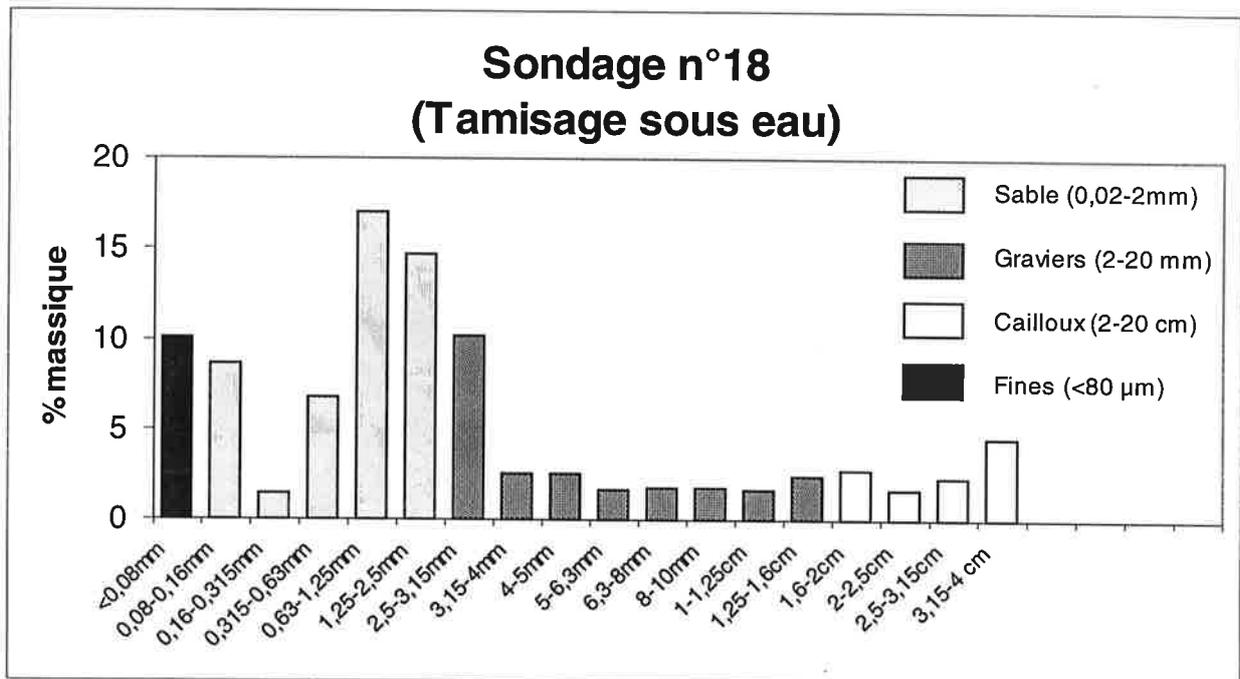
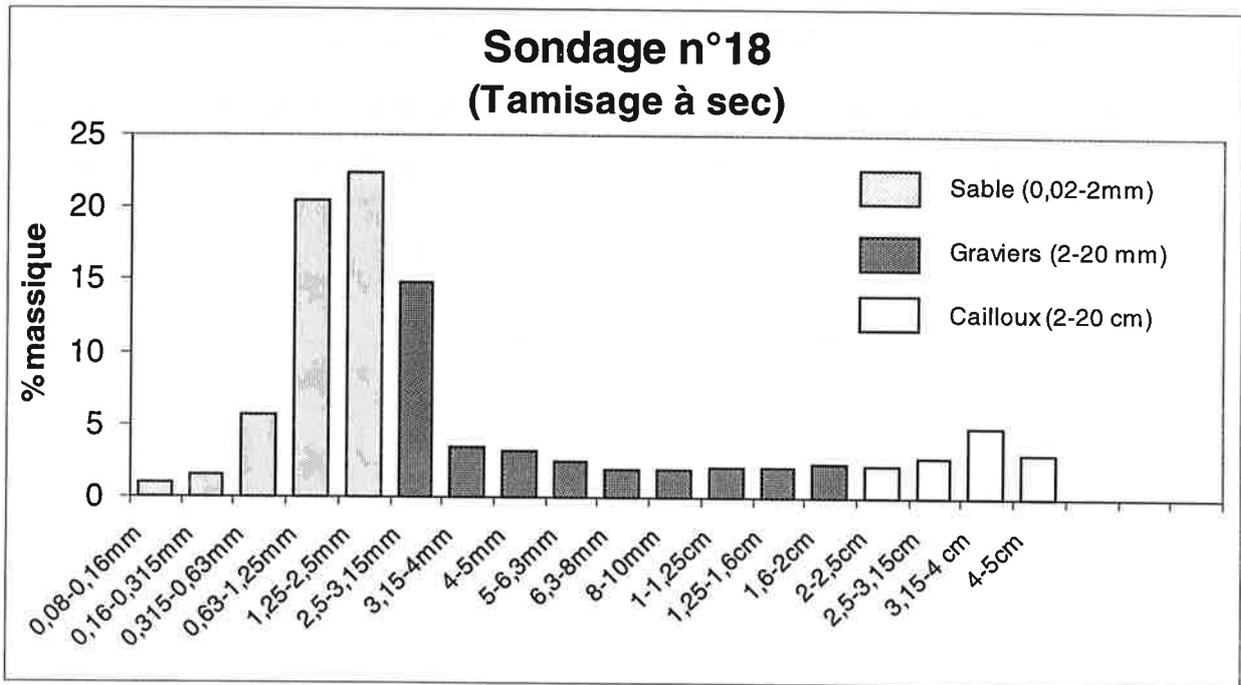


Figure 2.15 : Pourcentages massiques des fractions granulométriques obtenues par tamisage des alluvions de la Loire récoltées lors du sondage n°18 d'août 1991.

Les alluvions tamisées ont été échantillonnées entre 3 et 13,7 mètres de profondeur. L'histogramme du haut représente le tamisage à sec et l'histogramme du bas le tamisage sous eau. Ce dernier permet de récupérer une grande quantité de sables fins agglutinés à sec dans les fractions plus grossières.

2.5.2.2. L'analyse du tout venant récolté sur le front d'exploitation

Dans le cadre de ce travail, du tout-venant particulièrement sableux noté "TVB" a été récolté sur le front d'exploitation, au niveau de la couche de sable, graviers et galets non-argileuse (figure 2.17). Le prélèvement a eu lieu approximativement au point de coordonnées Lambert (576 500 m, 2 318 000 m) le 30/9/99 au niveau de la nappe, c'est-à-dire à 7 mètres de profondeur. Le tamisage a été effectué sous eau comme le sondage n°18. Les tamis qui ont servi à l'analyse granulométrique ne sont pas identiques à ceux utilisés par la Société Morillon-Corvol. Afin de pouvoir comparer notre analyse avec celle du sondage N°18 d'août 1991 réalisée par la carrière, la courbe équivalente à l'histogramme présenté fig.2.15 a été intégrée sur les intervalles correspondant aux tamis utilisés dans cette étude. La comparaison des différentes fractions apparaît sur la figure 2.16. La répartition des grains est globalement identique avec une fraction fine argileuse (<125 µm) nettement moins importante dans le tout venant récolté à 7 mètres de profondeur que dans le sondage n°18. Le tout venant récolté dans la nappe possède également une fraction 1-2 mm (sables grossiers) nettement supérieure à celle du sondage n°18. L'analyse granulométrique réalisée au cours de ce travail vient en complément des analyses des sondages d'août 1991 car elle montre que le gisement possède des niveaux à très faibles teneurs en matériaux fins argileux. Ces niveaux constituent des chemins privilégiés pour les circulations souterraines.

2.5.3. Analyse des argiles par diffraction de rayons X

Quatres échantillons d'argile ont été analysés au Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines à Fontainebleau par Nicole Forette. Pour une description des argiles mentionnées dans ce paragraphe, nous renvoyons le lecteur à la thèse de Laure Gourgeon (1994).

2.5.3.1. : Nature des échantillons analysés

AV : Argile grise Verdâtre prélevée lors des sondages de septembre 1997, présente à la frontière des formations alluviale et calcaire, et mélangée à des débris de calcaires fins.

AN1 : Argile Noire prélevée dans une couche argileuse de couleur sombre, située à un mètre en dessous de la surface, à quelques mètres à l'est du piézomètre L (fig.2.5).

AN : Argile noire encore plus sombre que l'argile précédente et prélevée au même endroit.

AG : Argile Gris-beige récoltée lors des sondages de reconnaissance de septembre 1997.

2.5.3.2. Analyse des argiles de chaque échantillon

Dans un premier temps, les teneurs en argile présentes dans les échantillons de roche totale sont évaluées par diffraction de rayons X. Puis après extraction des argiles de la roche totale, les différentes familles d'argiles sont identifiées et représentées de manière semi-quantitative dans le tableau 2.6 ci-dessous.

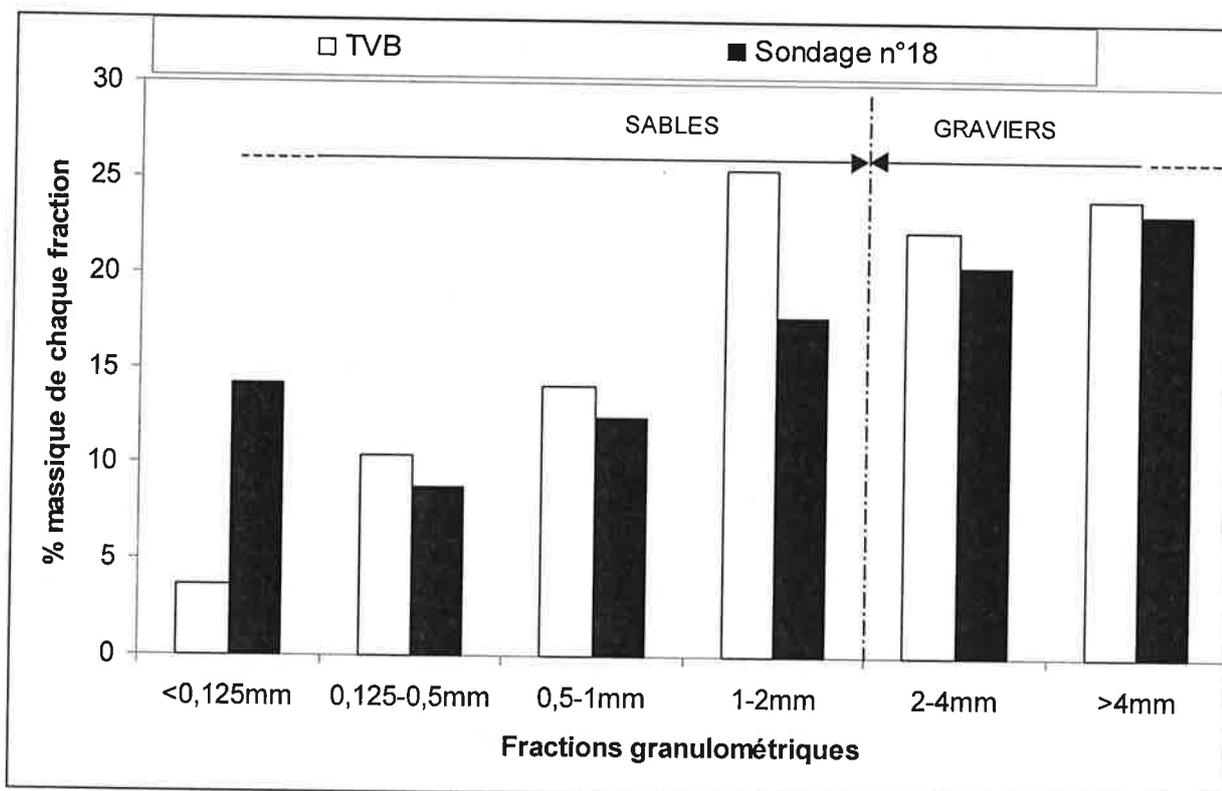


Figure 2.16: Comparaison des analyses granulométriques sous eau du tout-venant récolté au niveau de la nappe le 30/9/99 dans le cadre de cette thèse et du sondage n°18 effectué en Août 1991.

Tableau 2.6: Analyse minéralogique de la roche totale et nature des argiles des sédiments argileux prélevés sur la carrière de Sandillon

		AN1	AN	AG	AV
MINERAUX	Quartz	25%	10-15%	15%	N.R
	Plagioclase	<1%	<1%	<1%	N.R
	Felspath	<1%	0	0	N.R
	Argile	75%	85-90%	85%	N.R
FAMILLES D'ARGILE	Chlorite	<0,1/10	0,5/10	<0,1/10	<0,1/10
	Kaolinite	1,5/10	1/10	2/10	1,5/10
	Kaol/Smec	0	0	0	0
	Illite	1/10	1,5/10	1,5/10	1/10
	Ill/Smec	3/10	1/10	4/10	2,5/10
	Smectite	4,5/10	6/10	2,5/10	5/10

N.R: Analyse non réalisée

2.5.4. Composition géochimique des sédiments

2.5.4.1. Le thorium choisi comme indice des quantités de fines

Dans les alluvions, c'est essentiellement la partie fine argileuse qui va jouer le rôle le plus important dans l'adsorption, d'une part à cause de sa surface spécifique plus importante, d'autre part et surtout à cause de sa nature très adsorbante vis à vis d'un grand nombre d'éléments, en particulier les terres rares. Si l'on veut pouvoir étudier la sorption in situ des lanthanides sur les sédiments naturels, il faut disposer d'un élément caractéristique des fines, permettant de comparer des sédiments très hétérogènes du fait de leurs teneurs très variables en sables et argiles. Dans ce paragraphe, on montre qu'il suffit de normaliser les teneurs des sédiments par le thorium pour s'affranchir de la dilution par la silice.

Les échantillons de tout venant sableux ont été collectés dans le gisement puis tamisés. Les échantillons (10 kg) de tout venant sont prélevés le 30/09/99 le long de l'excavatrice (figure 2.17). L'échantillonnage est réalisé dans une zone particulièrement sableuse, en quatre endroits différents. Deux échantillons sont prélevés dans les godets : ils sont constitués d'un mélange d'alluvions récupérées sur toute la hauteur du front de taille. L'échantillon « godet du bas : GB » est certainement moins mélangé car il ne contient que les alluvions de la partie immergée. Le godet du haut (GH) contient en plus la partie à sec des alluvions. Deux autres échantillons sont prélevés non pas dans les godets mais directement dans la partie sèche du front de taille, juste au dessus de la nappe (TVB) et dans la partie superficielle du front de taille (TVH).

L'échantillon TVB est tamisé. Chaque fraction est divisée en deux. La première moitié est broyée pour être analysée par activation neutronique, la deuxième moitié est lavée (échantillon TVBL) sur un tamis de 125 μm , séchée à l'étuve puis broyée pour être également analysée par activation neutronique.

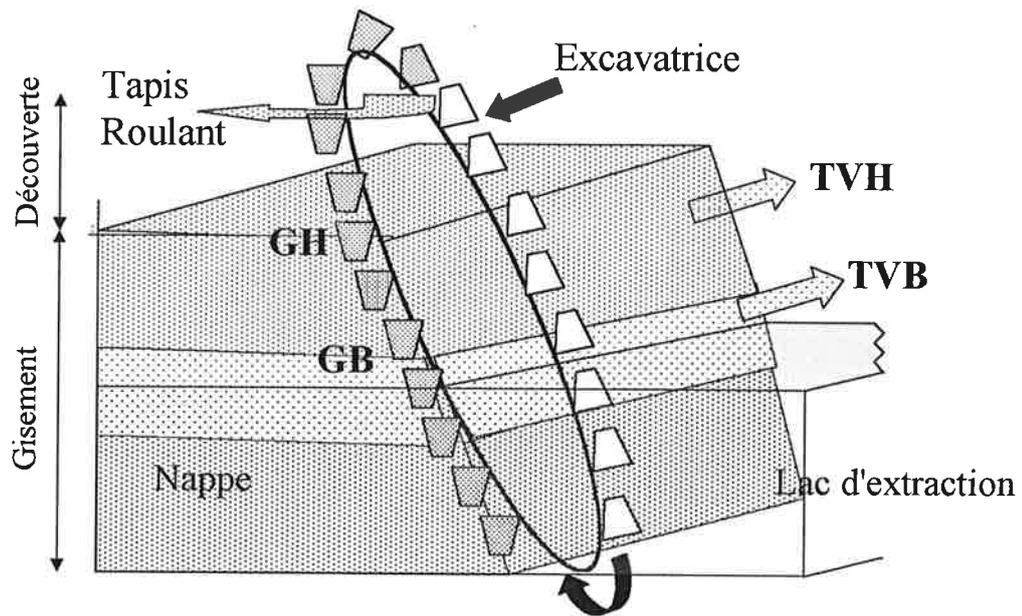


Figure 2.17 : Points de prélèvement des 4 échantillons de tout venant sur le front de taille au niveau de l'excavatrice. Deux sortes d'échantillons ont été prélevés: des échantillons de tout venant directement dans le gisement au-dessus du niveau de la nappe, et des échantillons de tout venant extrait par les godets (GB et GH) et donc plus représentatifs des couches profondes du gisement.

La comparaison des différentes fractions granulométriques lavées (TVBL) et non-lavées (TVB) permet d'obtenir une relation entre le pourcentage de fines dans chacune des fractions et les teneurs en thorium (figure 2.18 et tableau 2.7). La quantité d'argile de chaque échantillon de sédiment est reliée par une relation linéaire à sa teneur en thorium. La normalisation par le thorium permet donc de s'affranchir des effets de dilution par la silice pour chaque élément caractéristique des fines.

2.5.4.2. Composition en éléments traces dans l'ensemble des sédiments

Les compositions élémentaires des sédiments prélevés à Sandillon sont données en annexe 17 pour 33 éléments dont 8 lanthanides (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Dy, Tb, Yb).

Éléments caractérisant les alluvions fines (<125 µm)

Le phénomène de dilution par la silice se manifeste par l'existence de corrélations entre le thorium et les éléments traces caractéristiques de la partie fine des alluvions, en particulier les lanthanides (figure 2.19).

Outre les lanthanides, d'autres éléments (tableau 2.8) sont bien corrélés au thorium: Sc, Cr, Hf, Zr, Cs, Fe, Ta et U.

Les sédiments calcaires

3 types de sédiments calcaires ont été analysés :

CA1 est extrait d'un bloc de calcaire de Pithiviers prélevé dans le lit de la Loire.

CB5 est le sable calcaire éjecté en surface lors du forage du piézomètre CB5.

MB1 est un échantillon de marne blanchâtre prélevée sur la tarière lors des sondages effectués en septembre 1997.

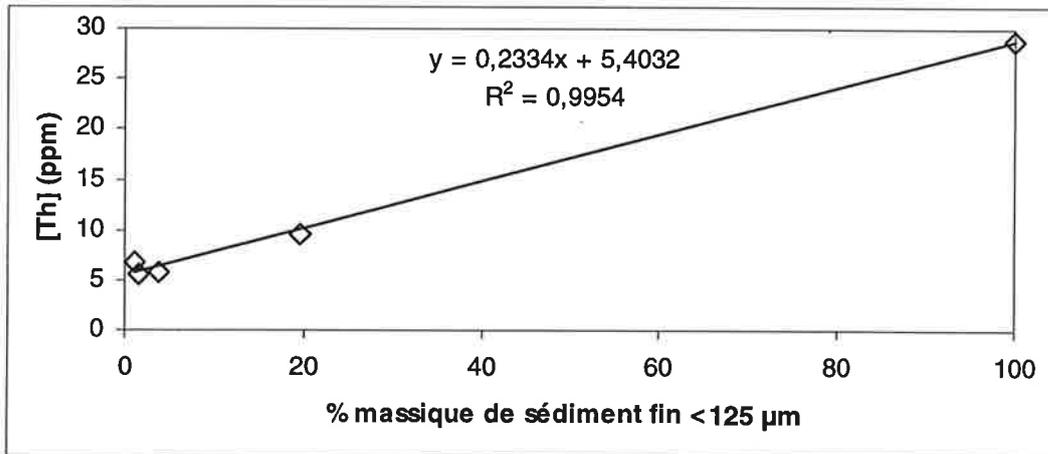


Figure 2.18 : Relation entre la teneur en thorium des alluvions du « tout venant » et leur proportion massique de fines (<125 μm).

Les teneurs en thorium sont directement reliées à la proportion de fines argileuses dans les alluvions de la Loire. Il est donc possible de s'affranchir de la variabilité des teneurs engendrée, dans les alluvions, par la dilution par la silice contenue dans les sables et graviers.

Tableau 2.7: Teneurs en thorium et pourcentages massiques de fines dans différentes fractions de l'échantillon de tout venant TVB

Fraction non lavée (TVB)	2-4mm	1-2mm	0,5-1mm	0,12-0,5mm	<0,125 mm
%massique de fines < 125 μm	1,17	1,68	3,82	19,6	100
[Th] (ppm)	6,78	5,63	5,73	9,51	28,85

Ces sédiments "calcaires" ont des compositions en éléments traces voisines des minima mesurés dans les alluvions. Les teneurs en scandium et lanthanides sont données dans le tableau 2.9. De plus, ces sédiments s'alignent avec les alluvions dans les diagrammes thorium-élément en trace de la figure 2.19. La dilution dans ces sédiments ne s'effectue pas par la silice mais par la calcite. Les teneurs en éléments traces corrélés au thorium dans les sédiments calcaires montrent que ces échantillons possèdent une infime quantité de particules fines argileuses de même composition géochimique que les fines alluvionnaires.

Profils de terres rares dans les sédiments de Sandillon

Les profils des teneurs en lanthanides normalisées aux chondrites C1 (données de Taylor et McLennan, 1985) dans les sédiments de Sandillon sont présentés sur la figure 2.20. A titre de comparaison, les teneurs obtenues au laboratoire Pierre Süe sur des alluvions de grands fleuves en Inde (Indus) et Canada (Mackenzie) ont été reportées sur la figure. Les profils obtenus à Sandillon sont caractéristiques de la croûte terrestre. Une grande homogénéité est obtenue pour les sédiments de Sandillon qui portent tous la même empreinte, des calcaires aux alluvions.

Tableau 2.8: Coefficients de détermination R² des teneurs élémentaires mesurées par activation neutronique dans les sédiments de Sandillon, en fonction des teneurs en thorium. Les éléments sont classés par ordre croissant des coefficients de détermination.

Elément	R ²	Elément	R ²	Elément	R ²
K	0,03	Ni	0,703	Dy	0,908
Na	0,082	Sb	0,719	Cr	0,91
Sr	0,139	Zn	0,74	Eu	0,919
Co	0,16	As	0,771	Nd	0,927
Au	0,218	Rb	0,779	Sc	0,94
W	0,234	U	0,788	Yb	0,964
Ag	0,265	Ta	0,847	Tb	0,976
Ba	0,296	Fe	0,851	Sm	0,981
Mn	0,352	Cs	0,864	Ce	0,988
Mo	0,413	Zr	0,882	La	0,989
Br	0,519	Hf	0,895		

Tableau 2.9 : Teneurs (ppb) des sédiments calcaires en lanthanides, Sc, Th et U comparées aux valeurs extrêmes rencontrées dans les alluvions.

	CA1	CB5	MB1	Alluvions		CA1	CB5	MB1	Alluvions
Sc	0,375±0,004	0,720±0,005	2,28±0,01	0,9-18,8	Tb	0,066±0,001	0,074±0,001	0,123±0,002	0,15-1,46
La	2,47±0,08	4,35±0,12	6,12±0,14	8,3-81,2	Dy	0,57±0,08	<LD*	0,58±0,13	0,8-6
Ce	3,83±0,08	9,35±0,13	14,43±0,18	16,8-190	Yb	0,25±0,01	0,22±0,01	0,47±0,01	0,5-4,5
Nd	1,63±0,52	2,88±0,57	7,7±1,4	2,7-74,4	Th	0,40±0,01	1,76±0,03	3,03±0,04	3,8-30,8
Sm	0,490±0,002	0,728±0,004	0,742±0,002	1,4-13	U	0,35±0,01	0,76±0,02	8,02±0,06	1,1-14,4
Eu	0,11±0,01	0,20±0,01	0,26±0,01	0,5-3,0	(*) LD : Limite de détection				

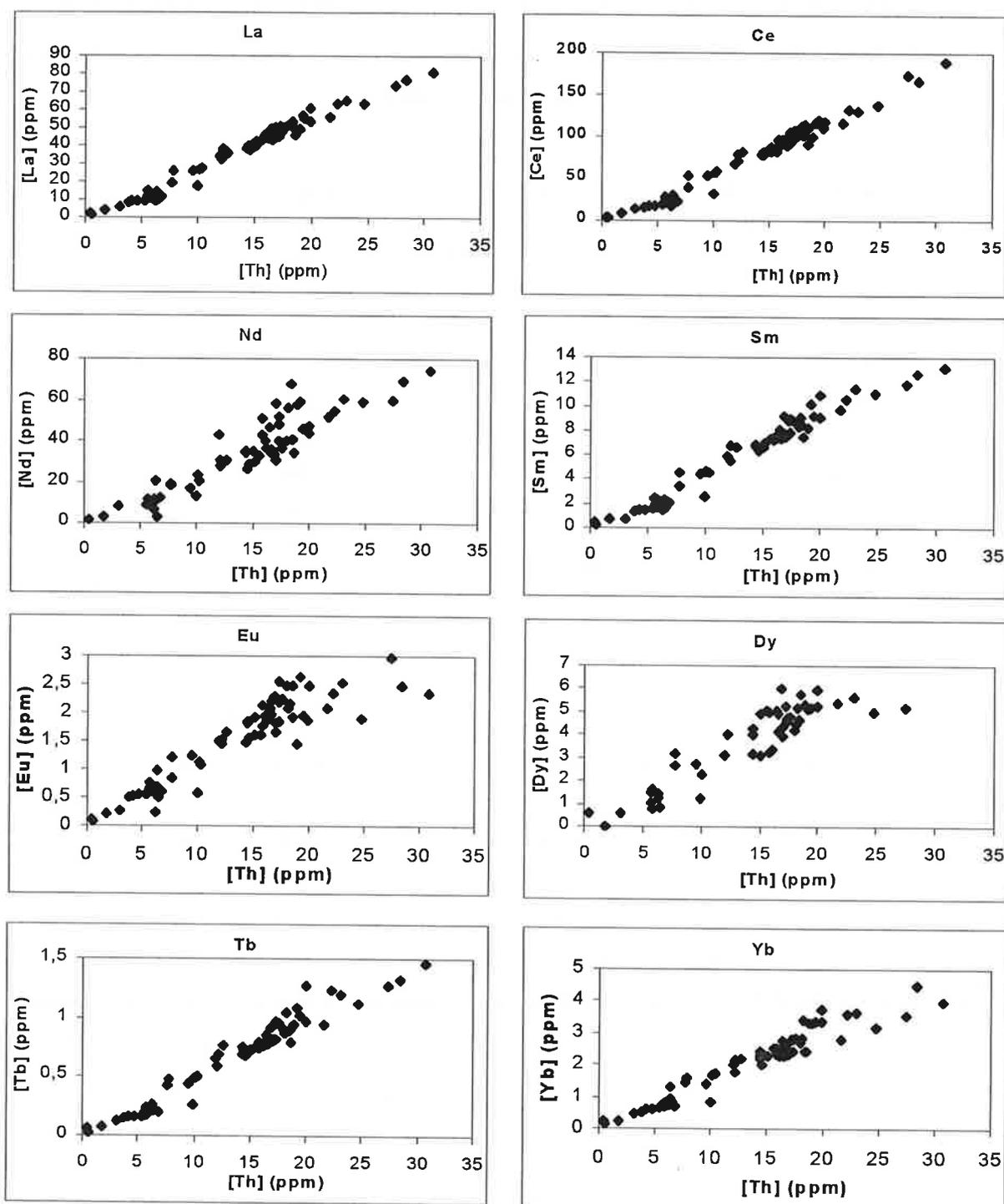


Figure 2.19 : Diagrammes binaires présentant des corrélations entre les teneurs en lanthanides et les teneurs en thorium dans les sédiments de Sandillon (56 échantillons alluvionnaires et 3 calcaires).

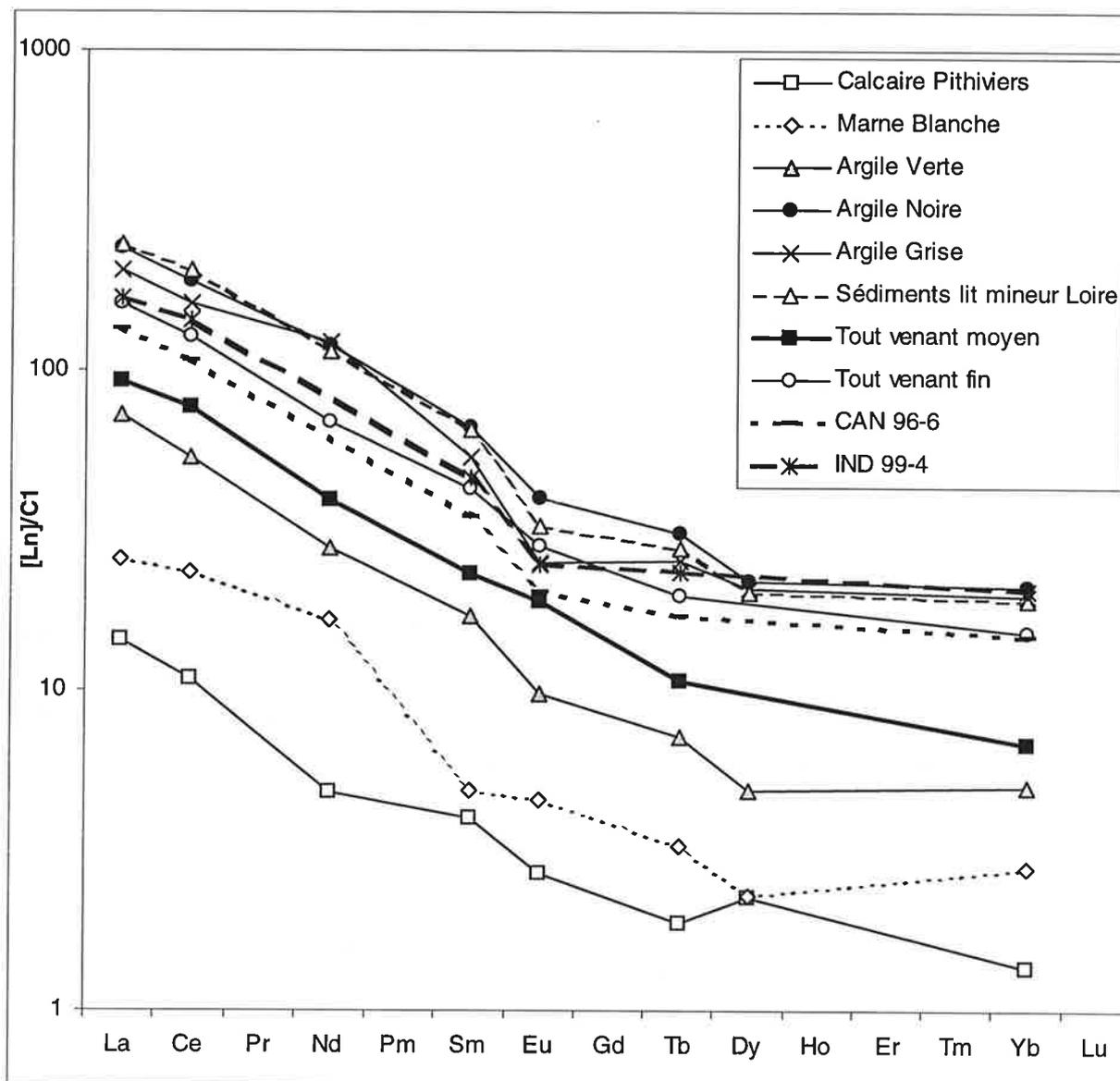


Figure 2.20: Teneurs en lanthanides des sédiments du site de Sandillon normalisées aux chondrites C1. Comparaison avec des sédiments d'autres fleuves du monde : IND 99-4 et CAN 96-6.

Les courbes de distribution des lanthanides dans les sédiments de Sandillon - alluvions de la Loire (sédiments du lit mineur, tout venant, argile grise), niveau intermédiaire alluvions-calcaire (argiles vertes, marnes blanches), et calcaire de Pithiviers - présentent une grande homogénéité. Les distributions sont celles de la croûte continentale moyenne et elles sont par conséquent identiques à celles que l'on rencontre dans les sédiments des grands fleuves de la planète (Inde et Canada).

2.6. Bilan sur les observations réalisées à l'échelle de la carrière

Les observations décrites dans ce chapitre soulignent l'hétérogénéité du système:

-Hétérogénéité lithologique: la stratification est complexe. Elle comporte des intercalations de domaines argileux et sableux. L'existence de chenaux d'extension importante n'est pas évidente. L'épaisseur des alluvions est très variable à courte distance en raison d'un substratum calcaire très irrégulier.

-Hétérogénéité minéralogique: les proportions et la nature des phases argileuses sont très diversifiées. Cela induit des capacités de rétention importantes et très contrastées.

-Hétérogénéité des compositions chimiques des différents domaines de la nappe. Cela met en cause des mélanges très contrastés entre différents pôles (Loire, alluvions, apports anthropiques) ainsi que des réactions d'échange. Mais la rémanence des empreintes des apports liés à l'agriculture démontre que ces échanges sont très variables dans le temps et l'espace, et que la tendance n'est pas à l'homogénéisation mais au contraire à une redistribution très hétérogène de ces apports. Cela souligne la complexité des migrations et donc des circulations dans les alluvions.

DEUXIEME PARTIE

STRATEGIE D'APPROCHE ET METHODES EXPERIMENTALES

CHAPITRE 3

DISPOSITIF EXPERIMENTAL D'OBSERVATION DES AQUIFERES

Ce chapitre comporte trois volets. Le premier présente la stratégie d'approche du site par l'implantation d'un réseau piézométrique d'observation. Le deuxième volet décrit l'instrumentation déployée sur ce site et les méthodes de mesure des paramètres physiques. Enfin, le troisième volet est dédié aux méthodes d'analyses géochimiques employées.

3.1. Stratégie d'implantation du réseau piézométrique alluvionnaire

Quelques points d'observation de la nappe de Loire, dont l'inventaire est présenté dans le premier paragraphe de ce chapitre, étaient présents dans les environs de la carrière de Sandillon avant que ne débute ce travail de thèse. Se révélant insuffisant, ce premier système d'observation a dû faire place à un dispositif d'observation nettement plus perfectionné et composé de deux réseaux de piézomètres emboîtés l'un dans l'autre. Le premier réseau a été implanté dans les alluvions sur une parcelle suffisamment petite pour pouvoir étudier les circulations locales dans les alluvions. Le deuxième réseau piézométrique, de taille nettement plus importante, a été foré dans les calcaires autour de la carrière de Sandillon dans le but d'observer des transferts d'éléments a priori plus rapides dans la nappe calcaire que dans la nappe alluviale sus-jacente. Ce volet présente les éléments de réflexion ainsi que les contraintes techniques sur le terrain qui ont guidé l'installation puis l'évolution de ce dispositif expérimental.

3.1.1. Les points d'observation de la nappe alluviale présents initialement sur le site de la carrière

Dans un premier temps, l'inventaire des points d'eau existant sur le site (fig.3.1) a été réalisé. Les échantillons d'eau prélevés en ces différents points ont été analysés afin de détecter d'éventuelles relations entre ces points. Ces analyses sont données dans l'annexe 18.

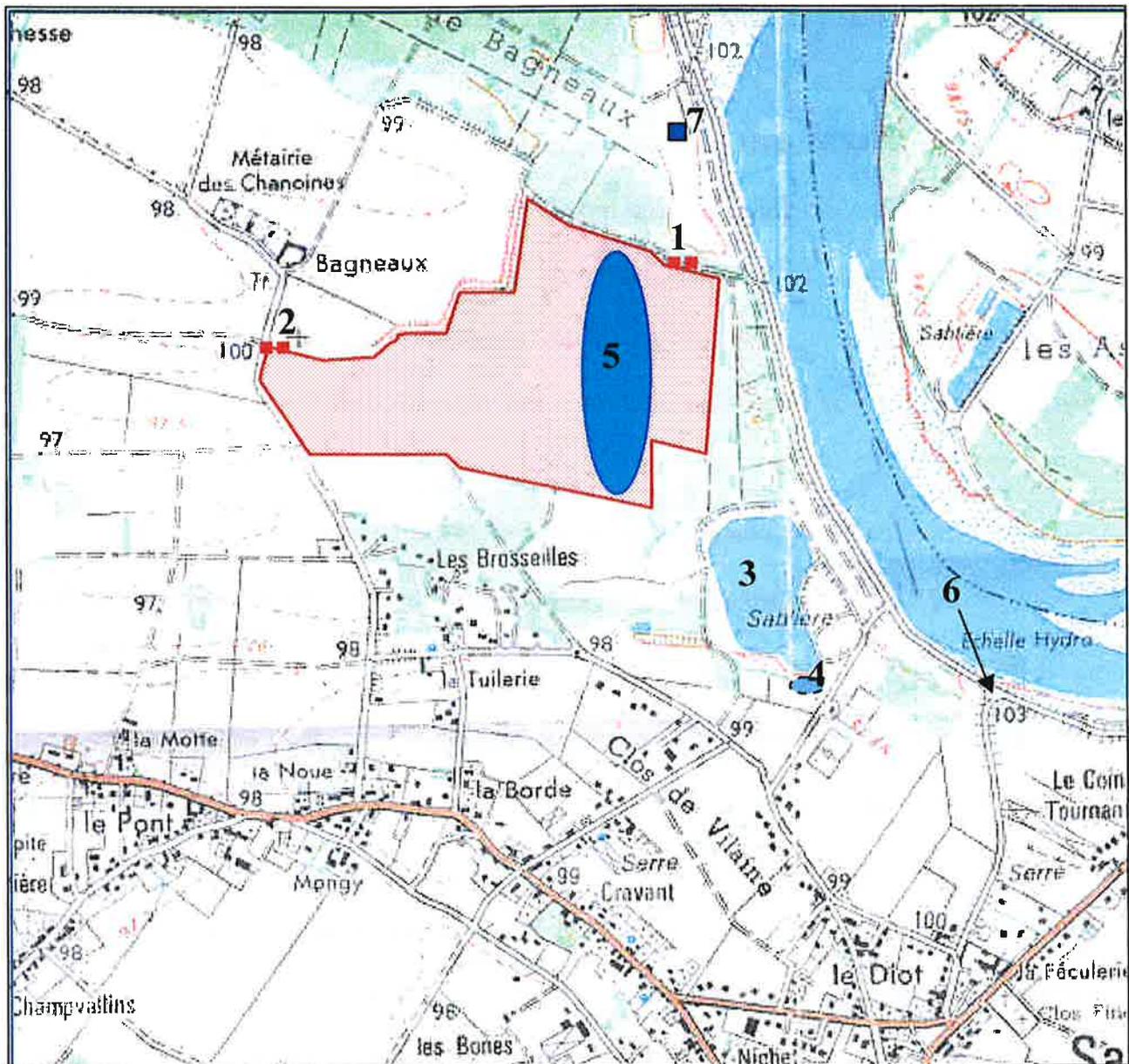
Conformément à la réglementation, la carrière disposait, à l'origine, de deux doublets de piézomètres calcaires et alluvionnaires situés en amont (respectivement P1 et P2) et en aval (respectivement Pf1 et Pf2) de l'écoulement donné par la piézométrie régionale.

Au Sud-Est des terrains en cours d'exploitation, se trouvent un ancien lac de carrière appelé "Etancar" ainsi qu'un petit lac collecteur des eaux pluviales de Sandillon. Ce dernier se déverse dans Etancar par l'intermédiaire d'une buse. Etancar est colmaté. Sa réaction aux fluctuations de la Loire et de la nappe est très amortie.

La Loire constitue un point facile d'observation. Elle est prélevée légèrement en amont de la carrière, au niveau d'une rampe permettant aux personnes, véhicules et embarcations d'accéder au fleuve.

Enfin, le lac de la carrière en cours d'exploitation est a priori un point privilégié d'observation de la nappe alluviale puisqu'il n'est pas colmaté.

Au chapitre 2, on a montré que les eaux se différencient de la nappe souterraine au niveau des lacs d'exploitations actuelles ou anciennes pour un grand nombre d'espèces en solution. Cependant, pour les éléments les plus conservatifs (Na, K, Cl) les teneurs dans le lac d'exploitation peuvent représenter une bonne approximation de la moyenne des teneurs présentes dans la nappe.



- 1 : Piézomètres P1 (calcaire) et P2 (alluvionnaire) 2 : Piézomètres Pf1 (calcaire) et Pf2 (alluvionnaire)
 3 : Lac de l'ancienne carrière (Etancar)
 4 : Lac des eaux pluviales de Sandillon 5 : Lac d'extraction 6 : Rampe d'accès à la Loire
 7 : Pompage destiné à l'alimentation de l'installation technique en eaux sanitaires (pompe située à 23 mètres de profondeur dans le calcaire)



Emprise des terrains exploités par la carrière

Figure 3.1 : Localisation des différents points d'eau existant sur la carrière de Sandillon et dans son voisinage proche l'implantation du réseau piézométrique d'observation de la nappe de Loire

Mais la meilleure façon d'avoir accès aux caractéristiques physico-chimiques d'un aquifère est d'y installer des piézomètres. Le dispositif initial (4 piézomètres) est très insuffisant si l'on veut pouvoir apprécier les impacts de l'exploitation, c'est pourquoi un réseau de piézomètres plus dense que celui imposé par la réglementation (P1, P2, Pf1 et Pf2) a été installé d'abord dans les alluvions, puis dans le calcaire de Pithiviers. Les coordonnées géographiques dans le système Lambert et les caractéristiques principales (profondeurs, niveaux des crépines, diamètres) des piézomètres sont résumées dans l'annexe 5.

3.1.2. Installation du réseau d'observation de la nappe alluviale

3.1.2.1. Justification de l'emplacement du réseau piézométrique alluvionnaire

Le premier critère à prendre en compte est la situation par rapport au lac d'extraction. Le réseau d'observation (figure 3.2) doit se trouver à l'aval hydraulique du lac. C'est en effet à l'aval du lac d'extraction que nous désirons préciser les transferts d'espèces chimiques dans la nappe alluviale, en cas d'injection accidentelle dans la nappe depuis le lac. Dès le départ, il faut faire le pari que ces directions d'écoulement s'effectuent, dans les alluvions, du Nord-Est au Sud-Est, c'est à dire selon les directions « moyennes » données par les cartes piézométriques tout en relevant sur ces dernières des variations locales de directions liées à la présence des axes de circulation karstique.

D'autres critères secondaires viennent ensuite :

- l'accessibilité donc la proximité d'une route,
- la vitesse d'avancée des travaux d'exploitation : elle impose au réseau piézométrique d'être localisé sur une zone suffisamment éloignée du lac d'extraction pour mener l'expérience suffisamment longtemps,

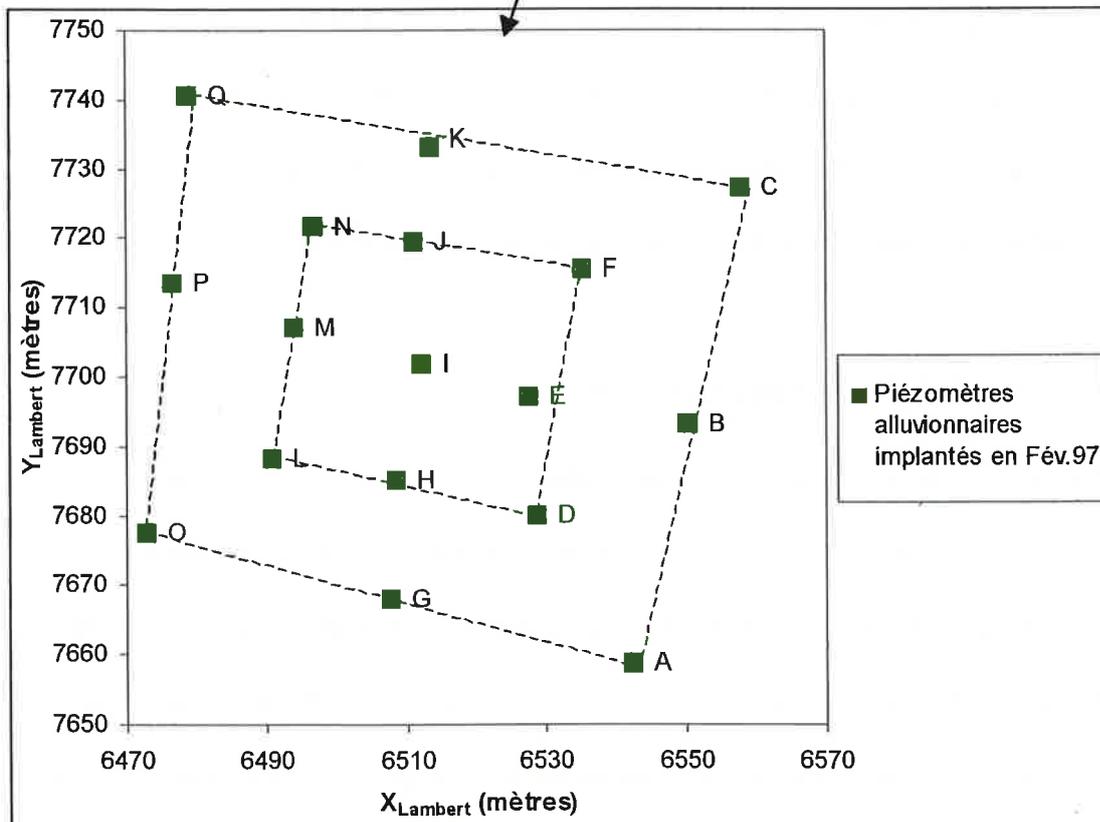
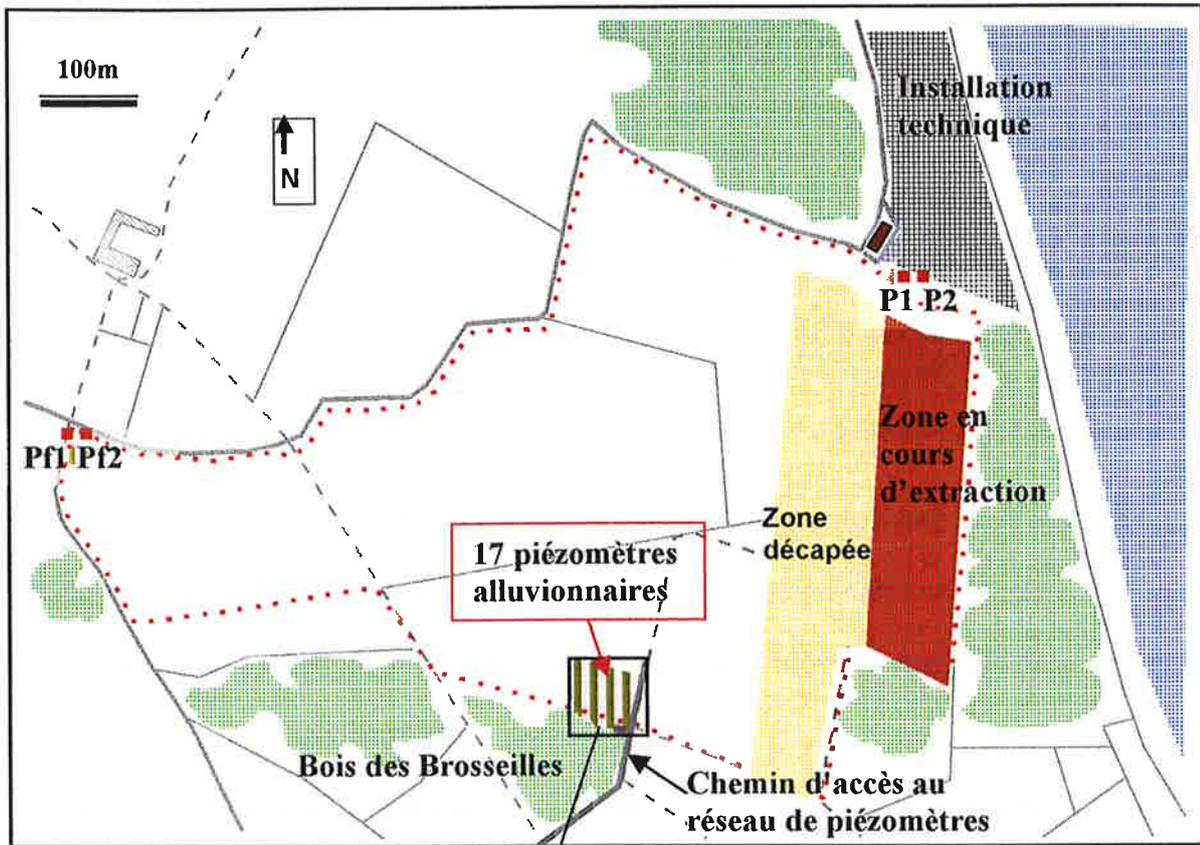


Figure 3.2 : Réseau piézométrique alluvionnaire implanté en février 1997 sur la carrière de Sandillon en complément du réseau initial (P1, P2, Pf1 et Pf2). Le réseau qui comporte 17 piézomètres est localisé à environ 240 mètres en aval du lac d'extraction (zone marron) et au nord du bois de Brosseilles.

-la limite des cultures à l'Ouest de la zone découverte,

-la situation à l'abri des regards indiscrets et des actes de vandalisme.

L'ancienne pépinière située au nord du bois de Brosseilles (figure 3.2) répond à l'ensemble des critères et a donc été choisie comme lieu d'implantation du réseau alluvionnaire.

3.1.2.2. Forme du réseau

Le choix de la forme du réseau d'observation s'est porté sur un réseau carré de 80 m de côté. Ce choix se justifie encore une fois par la méconnaissance a priori des directions locales d'écoulement dans la nappe alluviale. Les piézomètres sont disposés sur deux carrés imbriqués l'un dans l'autre (fig.3.2). Cette configuration permet une grande souplesse dans le choix du puits d'injection pour la réalisation de traçages. En effet, si le sens de circulation de la nappe n'est pas connu, les traceurs peuvent être injectés dans le piézomètre central. Au contraire, si après une période d'observation, la direction d'écoulement est précisée, l'injection des traceurs se fera dans un piézomètre du carré intérieur, ce qui laisse plus de points de prélèvement en aval de l'injection que dans le cas d'une injection centrale.

3.1.2.3. Taille et maillage du réseau

Le réseau de piézomètres ne doit être ni trop grand pour rendre compte de l'hétérogénéité des alluvions, ni trop petit pour constituer une parcelle représentative des alluvions de la zone étudiée. Le choix de la taille du maillage a été inspiré du traçage réalisé par S. Bigot (1977) dans les alluvions de la Loire à Darvoy, 6 km en amont du site étudié (fig.1.1). Le même espacement (une dizaine de mètres) est pris entre les piézomètres les plus proches. Le choix de ce maillage serré a été ensuite conforté par la grande hétérogénéité à

courte distance mise en évidence par les sondages de reconnaissance de septembre 1997 (chapitre 2, §2.5.1 et annexe 1).

En février 1997, 17 piézomètres constituant le réseau initial d'observation de la nappe alluviale sont forés près du bois de Brosseilles sur l'ancienne pépinière. Ils portent les lettres A, B, C...Q. Chaque piézomètre atteint la limite du toit calcaire située en moyenne à 10 mètres de profondeur et traverse ainsi toute la formation alluvionnaire. Seuls les 4 derniers mètres sont crépinés ce qui est en général suffisant pour échantillonner toute la hauteur d'eau sauf pour les piézomètres les plus profonds en période de crue (ex : piézomètre K).

3.1.3. Extension du réseau alluvionnaire au Nord

3.1.3.1. Densification du réseau implanté en février 97

Après une période d'observation d'un mois des fluctuations piézométriques et une série d'analyses des éléments majeurs, la première expérience de traçage est réalisée le 17 mars 1997. Cette première phase d'observation ne permet pas de connaître les directions locales d'écoulement. C'est donc le piézomètre central I qui est choisi comme puits d'injection. Ce premier traçage met en évidence le passage des traceurs dans la partie nord du réseau initial contrairement au modèle défini dans l'étude d'impact (chapitre 2, §2.4.1) et à la piézométrie à l'échelle du Val d'Orléans qui indiquait des circulations NE-SW. Ces premiers résultats conduisent, en octobre 1997, à densifier et prolonger le réseau initial au nord par l'implantation de 19 piézomètres supplémentaires répartis sur un angle solide d'axe Nord-Sud (fig.3.3). Cette extension permet de suivre les traceurs à l'aide d'un maillage plus fin.

Parmi ces nouveaux piézomètres, 14 sont réalisés selon le modèle précédent.

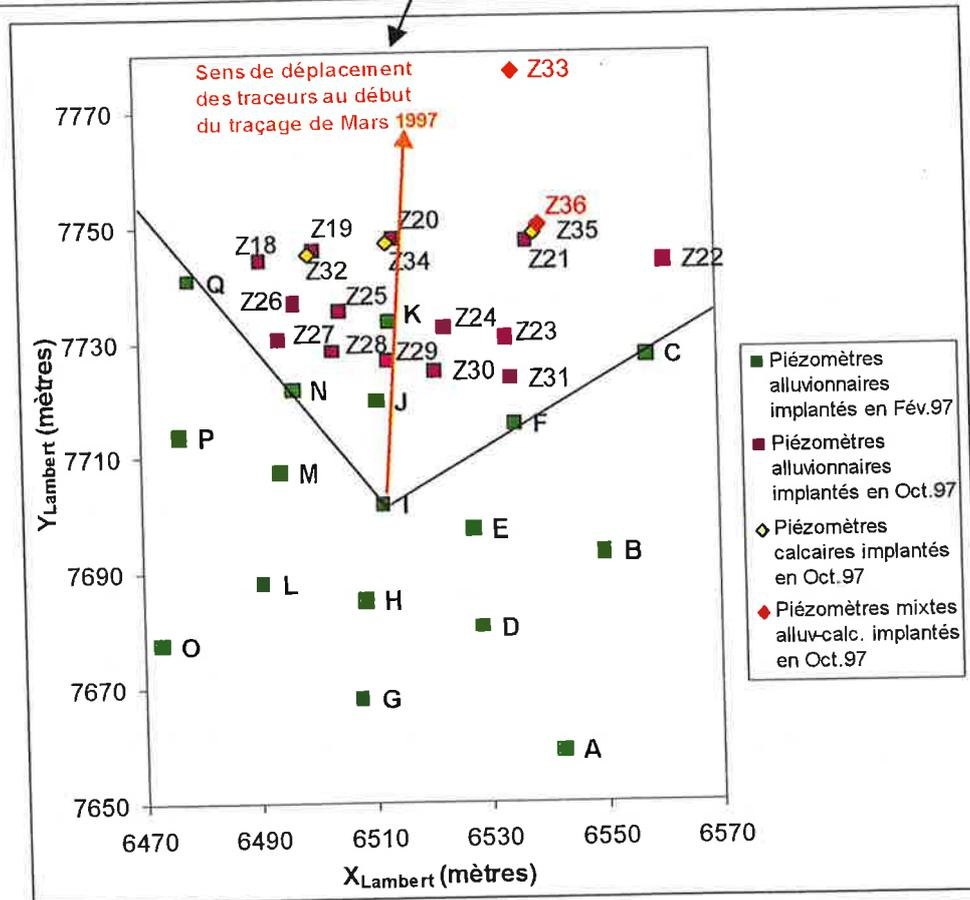
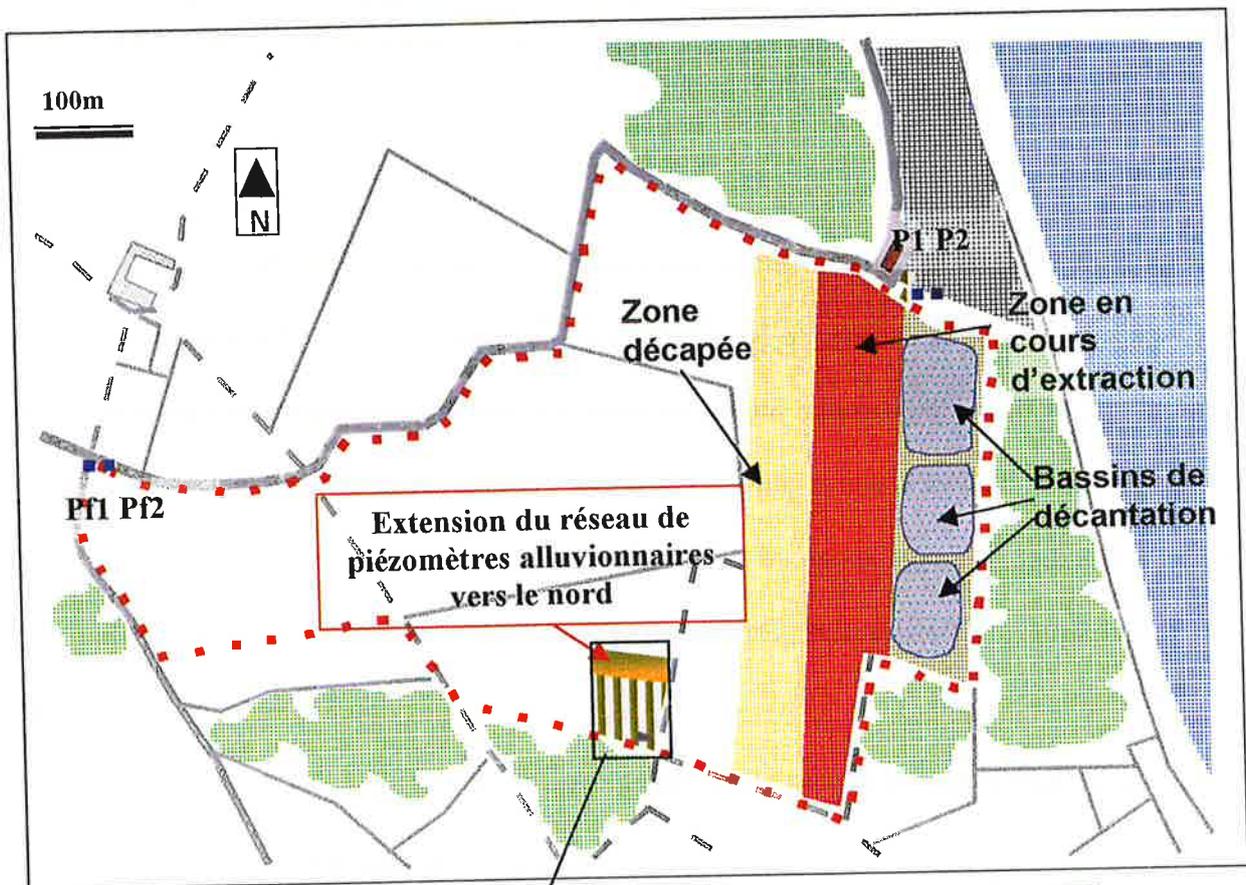


Figure 3.3 : Extension du réseau piézométrique alluvionnaire en octobre 1997 après le passage des traceurs au nord du puits d'injection I.

Le doublement des piézomètres dans le calcaire en bordure nord du réseau est destiné à surveiller le passage éventuel des traceurs des alluvions vers la nappe calcaire.

3 piézomètres localisés en bordure Nord du réseau et placés dans l'axe de déplacement des traceurs sont doublés par des piézomètres calcaires atteignant 19 mètres de profondeur et crépinés dans les 8 derniers mètres, c'est à dire à partir de 11 mètres, soit environ 1 mètre en dessous du toit calcaire. Ces 3 piézomètres sont destinés à suivre le passage éventuel des traceurs des alluvions aux calcaires.

Enfin, à titre expérimental, deux piézomètres (Z33 et Z36) sont équipés d'une double crépine. La première crépine de 4 mètres de long permet d'échantillonner la nappe alluviale. La deuxième crépine de 8 mètres, située 2 mètres en dessous de la première, permet d'échantillonner la nappe calcaire. L'expérience consiste à vérifier que les eaux calcaires ne se mélangent pas avec les eaux alluviales dans le tube piézométrique à double crépine. Afin de vérifier cette hypothèse, le piézomètre Z36 a été placé à côté du doublet de piézomètres Z21 (alluvionnaire) et Z35 (calcaire). La comparaison des teneurs en éléments majeurs et en traceurs entre les trois piézomètres doit permettre de conclure au mélange ou non des eaux dans un piézomètre à double crépine. Quant au piézomètre Z33, il est placé dans la direction d'écoulement indiquée par le traçage de mars 1997. Situé un peu plus loin du puits d'injection que les autres piézomètres, il permet de surveiller le passage des traceurs à la fois dans les alluvions et dans le calcaire en dehors des limites du réseau dense.

3.1.3.2. Expérimentation du piézomètre à double crépine

Dans les tableaux 3.1 et 3.2 sont données respectivement les teneurs en éléments majeurs mesurés pendant l'été 1998 et les teneurs en traceurs lors de leur détection dans les trois séries de prélèvements consécutives des 11, 14 et 20 novembre 1997. Dans les tableaux 3.1 et 3.2, il faut souligner que les prélèvements sont effectués à l'aide du préleveur à bille en Téflon (annexe 14) qui est descendu jusqu'au fond des piézomètres. Les analyses concernent donc l'eau située au fond des piézomètres.

Tableau 3.1: Comparaison des teneurs en éléments majeurs (ppm) mesurées dans le triplet de piézomètres [Z21 (alluvionnaire) – Z35 (calcaire) – Z36 (mixte)] le 21/7/98.

Forage	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	pH*	Na/K	Mg/K
Z21	0,13	25,3	0,1	124,1	40,9	152	12,6	<LD	1,54	18,3	85,1	6,90	8,2	11,9
Z35	0,22	21,8	0,09	29,3	30,7	285	12,5	<LD	1,92	15,5	96,7	7,19	6,5	8,0
Z36	0,21	21,8	0,1	160,1	37,0	156	13,5	<LD	1,44	19,6	85,4	6,89	9,4	13,6

(*) pH mesuré avant filtration

Tableau 3.2: Comparaison des teneurs en dysprosium (ppt) mesurées dans le triplet de piézomètres [Z21 (alluvionnaire) – Z35 (calcaire) – Z36 (mixte)] lors du traçage réalisé le 17/3/97.

Les trois séries 77, 78 et 79 sont les seules séries de prélèvements où le dysprosium a pu être observé à des teneurs supérieures à la limite de détection de l'analyse par ICP-MS.

N° de série		77	78	79
Piézomètre	Date	11/11/97	14/11/97	20/11/97
Z21 (alluvionnaire)		104	44	42
Z35 (calcaire)		<LD	<LD	<LD
Z36 (mixte)		153	65	NM

NM=non mesuré

LD=Limite de détection

Les rapports Na/K et Mg/K caractérisent l'influence de la Loire sur la composition de l'eau. Ces rapports sont d'autant plus faibles que l'eau se mélange avec les eaux du système Loire-axes karstiques (chapitre 2, fig.2.11). On constate que l'eau prélevée dans le piézomètre calcaire Z35 a des caractéristiques typiques des eaux calcaires (rapports Na/K et Mg/K plus faibles, pH>7, teneurs en nitrates plus faibles que dans les alluvions). Le piézomètre Z36 présente, quant à lui, des caractéristiques géochimiques (en particulier le pH et les teneurs [Ca⁺⁺], [HCO₃⁻], [NO₃⁻]) plus proches de celles du piézomètre alluvionnaire Z21.

L'absence de dysprosium dans le piézomètre calcaire Z35 au moment où on l'observe dans les deux piézomètres échantillonnant la nappe alluviale, Z21 et Z36, rejoint les observations précédentes: l'eau prélevée dans le piézomètre mixte Z36 représente davantage la nappe alluviale que la nappe calcaire. Cette influence est très ponctuelle puisque l'on ne retrouve pas les traceurs dans le piézomètre calcaire situé à environ 1m50 de distance. Que peut-on en conclure ?

Bien que ces observations soient conformes à un mélange des eaux alluviales et calcaires dans le piézomètre mixte elles peuvent être liées au mode de prélèvement parce que la stratification de l'aquifère apparaît tout de même clairement sur les profils verticaux de pH et de température (chapitre 8, §8.1.2). L'expérience mériterait d'être renouvelée avec des préleveurs plus adaptés aux grandes profondeurs (>10 m). Le préleveur en téflon ne permet pas, en effet, un prélèvement ponctuel et le prélèvement de traceurs colorés (chapitre 8, §8.2.1.2) a clairement montré que lors d'un prélèvement à l'aide de ce type de préleveur, les eaux de surface se mélangent aux eaux profondes lors de la descente du préleveur dans la colonne d'eau. L'utilité des piézomètres à double crépine reste donc à démontrer.

3.1.4. La fin tragique des piézomètres alluvionnaires

Dès leur implantation sur les terrains exploités par la carrière, le réseau de piézomètres alluvionnaires était destiné à disparaître du fait de l'avancée inévitable de l'extraction. La première entaille détruisant les piézomètres E et H a lieu en mai 1998. Puis, par vagues successives, la limite de la découverte avancera sur le réseau par l'Est. Les derniers piézomètres alluvionnaires les plus à l'Ouest disparaîtront en juin 1999. Du réseau initial, seul a survécu le piézomètre O situé à la lisière des bois et protégé de l'exploitation par une levée de terre.

3.1.5. Installation du réseau d'observation de la nappe du calcaire de Pithiviers

Les analyses d'éléments majeurs réalisées en Pf1 et Pf2 ainsi que le traçage réalisé dans la nappe des alluvions montrent que des échanges chimiques importants ont lieu entre la nappe des alluvions et la nappe du calcaire. C'est par cette dernière que s'effectuent les transferts de charges rapides entre la Loire et la nappe des alluvions (chapitre 6) ainsi que les circulations rapides. C'est pourquoi un deuxième réseau d'observation est installé dans la nappe du calcaire à la fin du premier traçage, début de 1999. Ce réseau doit permettre d'étudier les migrations des lanthanides à longue distance.

3.1.5.1. Sur la carrière

L'installation d'enregistreurs automatiques de niveau de la nappe sur les trois piézomètres calcaires les plus éloignés sur la carrière (P1, Pf1 et Z33) a permis de préciser la direction d'écoulement dans la nappe du calcaire : non plus NE-SW mais SE-NW. C'est sur ces observations piézométriques que s'est fondée la localisation du réseau piézométrique de la nappe du calcaire (figure 3.4). Ce dernier entoure la partie Ouest de la carrière, située en aval de l'écoulement présumé. Destiné à rester en place après ce travail, ce nouveau réseau est localisé pour l'essentiel en bordure de la carrière. Il comporte 1 piézomètre (CA5) temporaire, au milieu des champs, qui permet l'injection de traceurs au centre du réseau, et 8 piézomètres (CA1, CA2, CA3, CB4, CB5, CB7, CB8 et CB9) localisés en bordure de carrière. Le piézomètre CB8, situé dans le champ, est malheureusement détruit fin 1999 par le passage d'un tracteur. Après ce travail de thèse, les 7 piézomètres restants constitueront, avec les piézomètres initiaux P1 et Pf1, un réseau permettant la surveillance de la qualité de l'eau dans la nappe calcaire pendant toute la fin des travaux d'exploitation et de remblais.

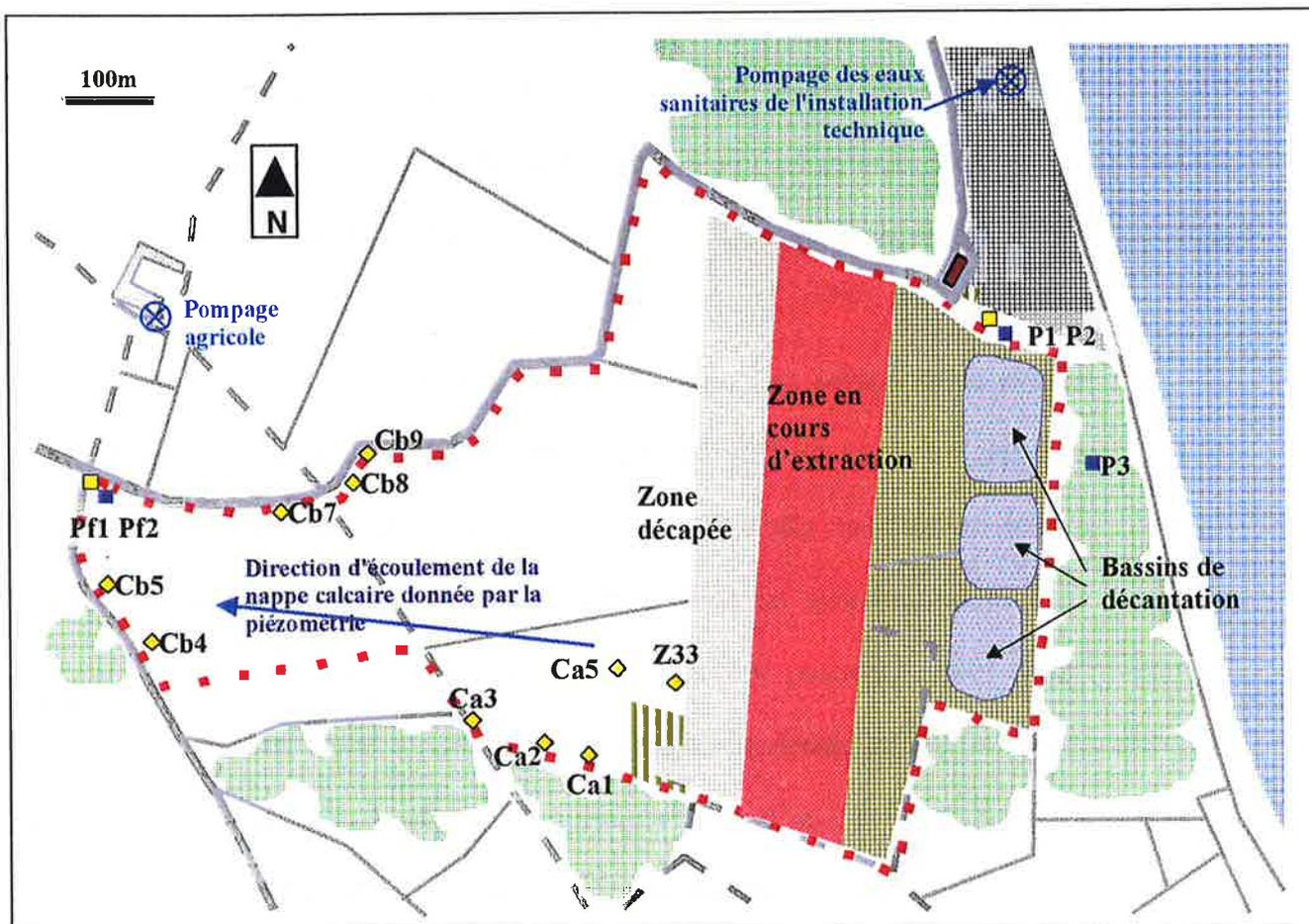


Figure 3.4 : Installation du réseau de piézomètres calcaires (◇) en janvier 1999.

L'emplacement de ce réseau de piézomètres calcaires succède à une période d'observation (1998) de la piézométrie à partir des forages les plus espacés et équipés d'appareils d'enregistrement automatique du niveau de la nappe : P1-Pf1-Z33. La direction d'écoulement indiquée par le plan passant par ces trois points est la direction Est - Nord-Est. Le nouvel ensemble de piézomètres vient en complément des piézomètres calcaires déjà existants P1 et Pf1 (□). Situé en bordure de carrière et en aval de l'écoulement présumé de la nappe calcaire, ce réseau est destiné à la réalisation d'expériences de traçages dans le calcaire et à la surveillance de la qualité des eaux pendant la fin des travaux d'exploitation puis après la mise en remblais du lac d'extraction. Le piézomètre alluvionnaire P3 foré dans le chemin forestier en même temps que les nouveaux piézomètres calcaires complète P2 pour la surveillance légale de la qualité des eaux alluviales en amont du lac d'extraction. Cette figure montre également la destruction partielle du réseau alluvionnaire entamé par l'avancée de la zone découpée.

3.1.5.2. Points d'observation à longue distance

Connaissant la nature karstique de la nappe calcaire, des écoulements à grande vitesse étaient prévisibles dans cette nappe. C'est pourquoi deux résurgences connues du réseau de drainage naturel ont été choisies comme points d'observation lors des expériences de traçage réalisées sur le réseau piézométrique calcaire de la carrière de Sandillon.

Le premier est la source du Loiret dite du « Bouillon » (fig.1.1). Cette source s'est apparemment isolée du cours du Duy (rivière alimentée par les eaux de ruissellement de l'impluvium local) au XVII^{ème} siècle (Boitel, 1965). Localisée dans le Parc Floral d'Orléans la Source, le Bouillon constitue un point d'observation privilégié des sorties du système karstique (Chéry, 1983 ; Livrozet, 1984). Il ne représente qu'une partie du flux transitant à travers le système. Selon les observations faites par J.L. Chéry (1983), les débits à la source du Bouillon varient de 0,3 à 3 m³/s et sont assez bien corrélés à ceux de la Loire avec un décalage de 3-4 jours. Pendant ce travail, une mesure de débit a été réalisée au Bouillon le 19/6/00, pendant un traçage. Le débit mesuré était alors de 0,25 m³/s ce qui est légèrement inférieur à la valeur minimale donnée par J.L. Chéry. Il semblerait, d'après les jaugeages réalisés de 1965 à 1987 et cette mesure, que le débit du Bouillon serait à la baisse (Lepiller, 2001a).

La mesure de débit a été réalisée quelques mètres en amont de l'échelle limnimétrique du Bouillon, au Parc Floral, à l'aide d'un moulinet hydrométrique. La vitesse v (en m/s) de l'eau est donnée par l'équation de l'hélice du moulinet :

$$\text{Si } n \leq 6,60 \text{ tours par seconde,} \quad v=0,0582n+0,02$$

$$\text{Si } 6,60 \leq n \leq 17,17 \text{ tours par seconde,} \quad v=0,0532n+0,053$$

Le second point de prélèvement à longue distance est le captage en eau potable du Theuriet. Ce puits fut foré en 1894 dans le fond d'une excavation de 5 mètres à une profondeur de 17 mètres. Il appartient, ainsi que deux autres puits, le Gouffre et le Bouchet, au champ captant d'Orléans situé au Nord du Parc Floral, entre le Duy et la voie ferrée Orléans-Vierzon (fig.1.1). Ces forages ont recoupé des vides karstiques en partie colmatés. Les trois pompes alimentent l'usine de la Lyonnaise des Eaux. Ils fonctionnent généralement en alternance et de façon discontinue. Le Theuriet fournit un débit de 800 m³/h environ. Les heures de fonctionnement du pompage pendant les expériences de traçage (annexe 6) sont fournies par la Lyonnaise des Eaux. La forme des courbes de restitution des traceurs ne semble pas affectée par les arrêts et mises en route successifs du pompage du Theuriet (fig.3.5). Les oscillations observées sont de l'ordre de l'incertitude de la mesure (0,01 ng/mL).

Les distances qui séparent ces 2 points d'observation lointains du piézomètre CA1 dans lequel ont été injectés des traceurs dans l'année 2000 sont:

Distance piézomètre CA1-Source du Bouillon: 6325 mètres

Distance piézomètre CA1-Captage du Theuriet: 6490 mètres

3.1.5.3. Autres points d'observation

Des prélèvements d'eau sont également réalisés très occasionnellement au robinet en eau potable de l'installation technique, au robinet en eau potable de l'Hôtel du Lion d'Or au bourg de Sandillon et au forage d'irrigation de la ferme située à l'Est de la carrière (fig.3.4) pendant les expériences de traçage. Ces quelques prélèvements n'ont jamais présenté de traces de lanthanides ou de colorants injectés.

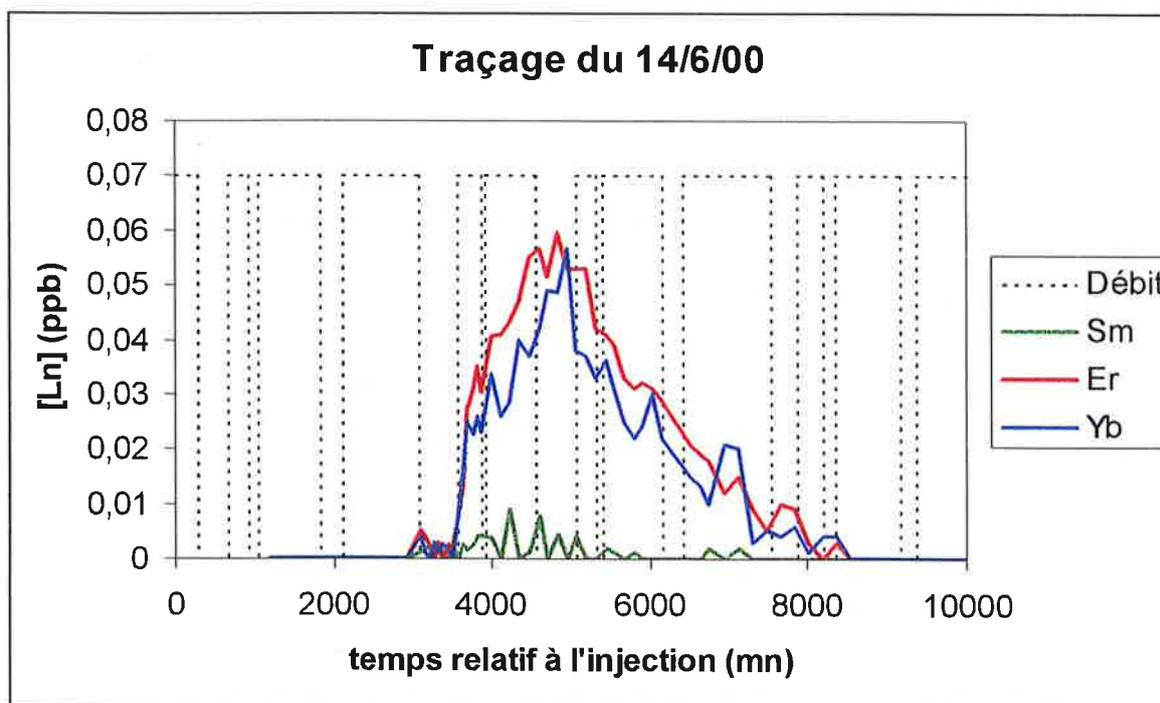
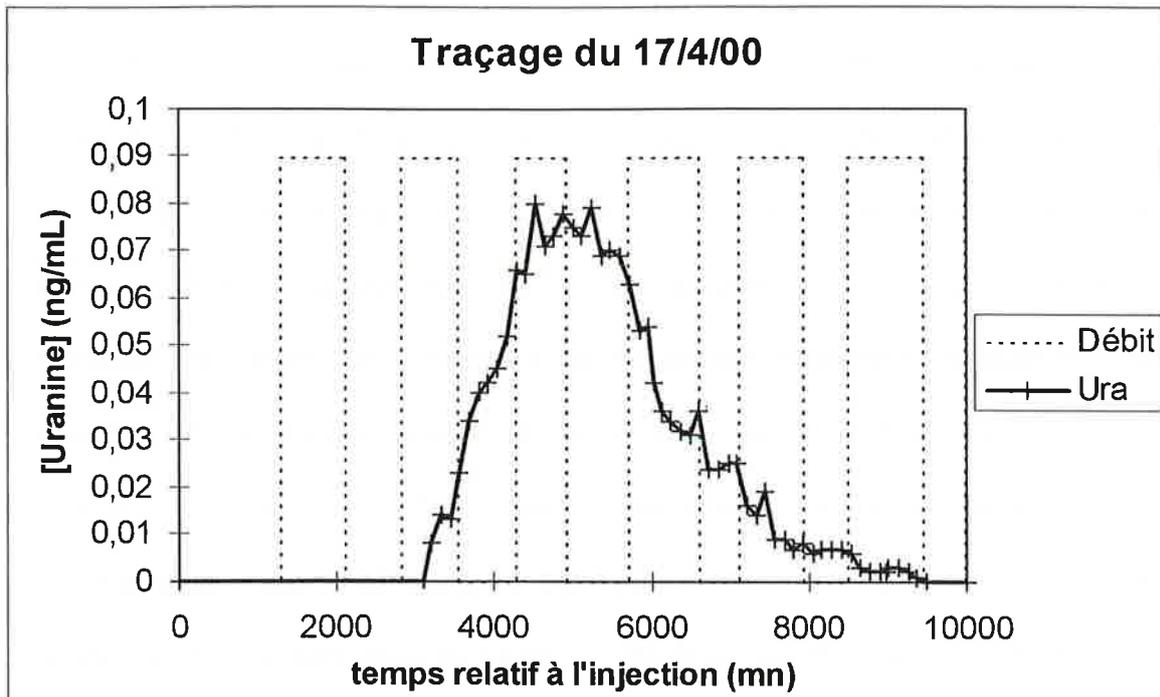


Figure 3.5: Etude de l'influence du pompage au captage AEP du Theuriet sur les courbes de restitution des traceurs obtenues au Theuriet.

Les traceurs ont été injectés dans le piézomètre CA1. Le traçage du 17/4/00 a été réalisé à l'uranine (figure du haut), celui du 14/6/00 a été réalisé à l'aide de complexes EDTA de terres rares (Sm, Er et Yb). Les teneurs sont présentées, sur les graphiques, après soustraction du bruit de fond. Le débit du captage du Theuriet est de 800 m³/h. Il est représenté, sur les graphiques, par une fonction créneau en pointillés. Les arrêts et mises en routes successifs du pompage ne semblent pas affecter l'allure générale des courbes de restitution.

3.1.6. Adaptation du réseau à l'étude des échanges nappe calcaire-nappe alluviale

Les échanges nappe calcaire – nappe alluviale mis en évidence par le traçage dans les alluvions et diverses observations physico-chimiques ont nécessité une confirmation directe par traçage. Le traçage de ces connections inter nappes nécessite la présence d'au moins deux piézomètres, l'un alluvionnaire, l'autre calcaire situés à courte distance l'un de l'autre. De tels doublets de piézomètres doivent également être situés dans le bon sens par rapport à l'écoulement. De plus, ces questions de traçages inter-nappe ont été soulevées fin 1999, alors que le réseau piézométrique alluvionnaire était détruit dans sa majorité par l'avancée des travaux d'exploitation ce qui limita le choix des piézomètres pour de telles expériences. Ayant démontré l'absence de circulations rapides dans les alluvions, le traçage du passage des alluvions au calcaire ne nécessite a priori pas plus de deux piézomètres, l'un alluvionnaire, l'autre calcaire. Par contre, le passage inverse des calcaires aux alluvions nécessite un plus grand nombre de piézomètres dans les alluvions puisque avant de remonter dans la nappe, le traceur injecté peut être entraîné assez loin dans la nappe calcaire, par des circulations plus rapides.

3.1.6.1. Des alluvions aux calcaires

Si un traceur est injecté en période de descente de la nappe dans un piézomètre alluvionnaire, il devrait en principe être détecté dans un piézomètre calcaire situé en aval de l'écoulement si les deux nappes communiquent. Pour cette expérience, le piézomètre Pf2 (alluvionnaire) peut être utilisé comme puits d'injection et le piézomètre Pf1 (calcaire) situé à 2m60 en aval de Pf2 peut servir de point de surveillance du passage éventuel des traceurs (fig.3.7). Le choix de ces deux piézomètres repose également sur la détection de teneurs importantes et voisines en éléments majeurs dans Pf1 et Pf2, supposant des échanges importants entre les deux nappes au niveau de ces deux piézomètres. Les informations

lithologiques suivantes ont été récoltées lors de la pose des piézomètres Pf1 et Pf2. L'épaisseur des alluvions est de 10 m (2 m de limon puis 6 m de graves argileuses reposant sur 5 m de graves propres). 1 m d'argile blanchâtre sépare les alluvions des calcaires durs sur le premier mètre, fissuré (perte à l'injection d'eau lors du forage) ensuite. Pf2 s'arrête 1 m au-dessus de l'argile blanchâtre. Pf1 n'est crépiné qu'à partir du calcaire fissuré. Si un traceur est injecté au fond de Pf2, il lui faut donc traverser 4 mètres de sédiments (1 m d'alluvions, 1 m d'argile blanchâtre, 1 m de calcaire dur puis 1 m de calcaire karstique) avant d'arriver au niveau de la crépine de Pf1.

3.1.6.2. Des calcaires aux alluvions

Le même dispositif de piézomètres (Pf1-Pf2) pourrait être utilisé dans l'expérience inverse mais Pf1 et Pf2 ne sont alors plus situés dans le bon sens par rapport à l'écoulement horizontal supposé. Les circulations dans les calcaires se faisant à plus longue distance que dans les alluvions, en cas d'injection dans les calcaires, il y a de fortes chances que le traceur parcoure une certaine distance avant de remonter dans les alluvions en période de remontée de la Loire. Il manque donc quelques piézomètres supplémentaires dans les alluvions à l'aval de l'écoulement au niveau de Pf1 et Pf2. Cependant, la proximité de la route ne permet pas une telle extension à cet endroit précis. Pour une telle expérience, le réseau tel qu'il est fin 1999 (fig.3.4) est donc insuffisant. C'est pourquoi trois piézomètres alluvionnaires supplémentaires sont forés au printemps 2000 en bordure du bois de Brosseilles entre les piézomètres calcaires CA2 et CA3. CA2 sert de puits d'injection, CA3, de piézomètre de contrôle dans les calcaires et X, Y, Z, de points d'observation dans les alluvions à l'aval de l'écoulement supposé (fig.3.6).

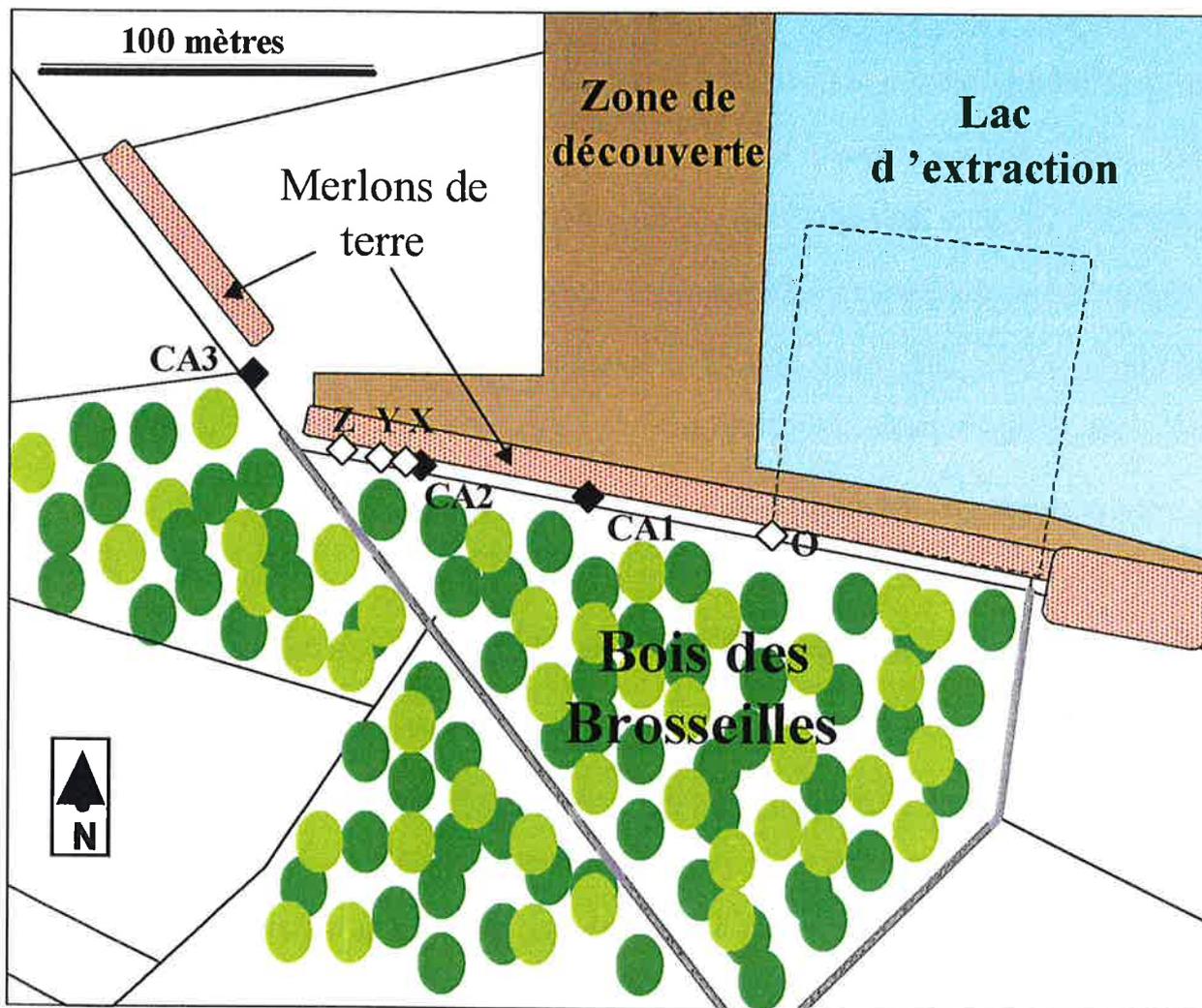


Figure 3.6: Localisation des piézomètres alluvionnaires X, Y et Z implantés au printemps 2000 le long du bois des Brosseilles entre les piézomètres calcaires CA2 et CA3.

Cette figure met en évidence l'avancée des travaux d'extraction au printemps 2000 et la position, en pointillés, du réseau piézométrique alluvionnaire implanté en février 1997 et dont seul le piézomètre O subsiste.

Pour ce traçage qui doit avoir lieu en période de remontée de la Loire, le problème est que le piézomètre calcaire CA2, comme le reste des piézomètres calcaires forés en janvier 1999, est crépiné 6 m en dessous du toit des calcaires. Il y a très peu de chance que l'on puisse observer une remontée des traceurs dans la nappe des alluvions en injectant à cette distance de la limite calcaire-alluvions. Le problème a été résolu par la conception et la fabrication, au Laboratoire Pierre Süe, d'un appareil d'injection de traceur par perforation de tube piézométrique. Son fonctionnement est décrit en annexe 7. Le traceur peut ainsi être injecté un mètre en dessous du toit calcaire (fig.3.8).

Cette deuxième expérience se solda par un échec puisque le perforateur s'est retrouvé coincé dans la zone du tube à perforer. La perforation du tube a peut-être eu lieu mais sans aucune certitude. Le problème majeur est arrivé au moment de l'injection du colorant (sulforhodamine G) : le tuyau menant au perforateur s'est détaché. Il se peut qu'une partie des traceurs soit passée dans la nappe du calcaire. Cependant, le suivi des teneurs dans les eaux des piézomètres X, Y, Z et CA2 n'a jamais présenté de traces de sulforhodamine G dans aucun de ces piézomètres. L'expérience aurait été à renouveler si l'information désirée, à savoir le passage des traceurs des calcaires aux alluvions, n'avait été fournie par le premier traçage en Pf2-Pf1 : l'uranine injectée en Pf2, après son passage dans Pf1, puis sa disparition quasi-complète de Pf2, est remontée dans Pf2 en période de remontée de la Loire.

Figure 3.7 : Dispositif mis en place pour l'étude des transferts chimiques de la nappe alluviale vers la nappe calcaire en période de descente de la nappe à l'aide des piézomètres Pf2 et Pf1.

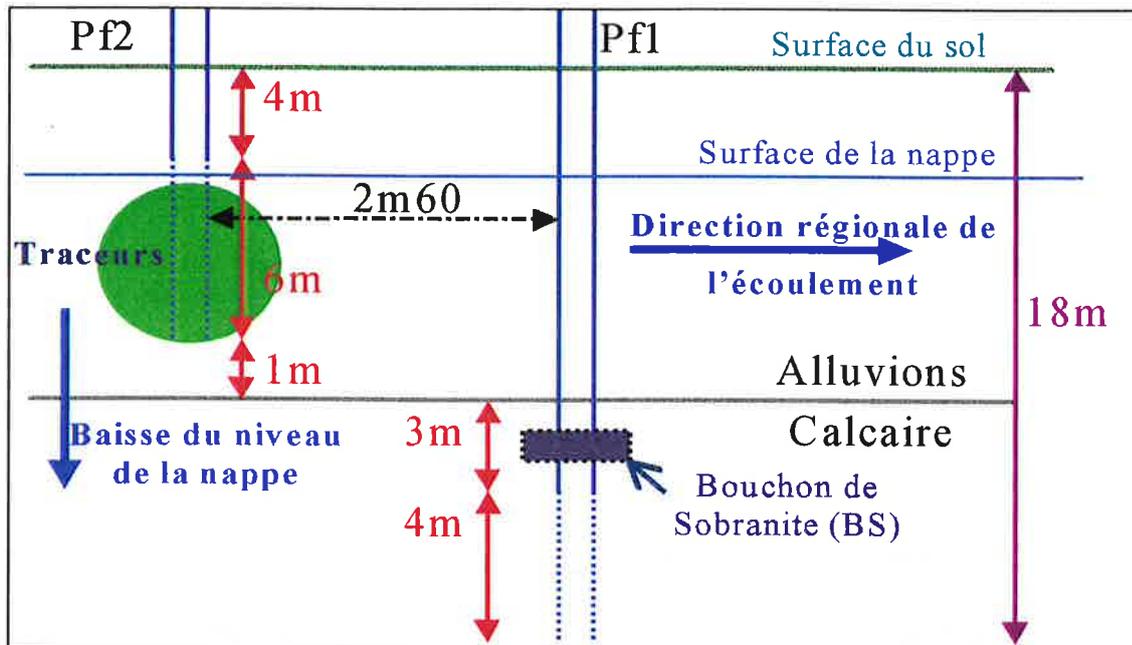
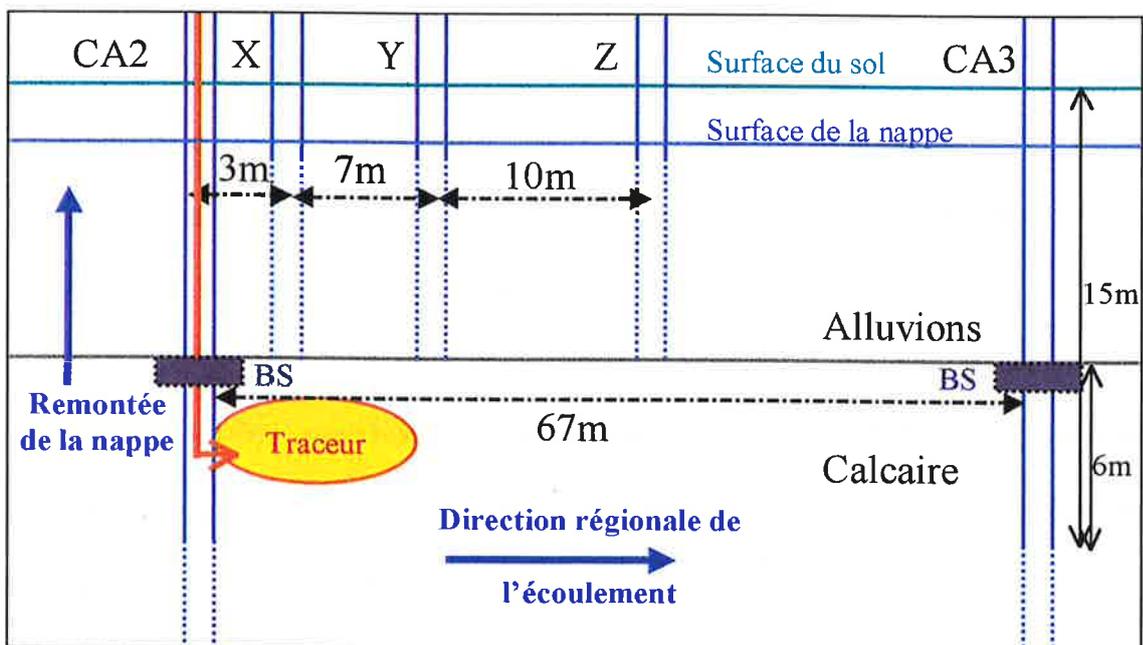


Figure 3.8 : Dispositif mis en place pour l'étude des transferts chimiques de la nappe calcaire vers la nappe alluviale en période de remontée de la nappe à l'aide des piézomètres CA2, CA3, X, Y et Z. La crépine se trouvant à trop grande profondeur, l'injection du traceur s'effectue par perforation du tube piézométrique.



La partie non crépinée des piézomètres est représentée en trait plein, la partie crépinée en trait pointillé. Le bouchon torique de sobranite (BS) permet l'étanchéité entre les alluvions et les calcaires autour du tube piézométrique.

3.2. Mesure des paramètres physiques utiles

Le réseau piézométrique mis en place a pour objectif d'accéder à des constantes (ex : perméabilités) et des variables physiques (température, piézométrie) qui permettent de décrire le système. La température et la piézométrie sont suivies manuellement de manière systématique au début de l'expérience. Puis un certain nombre de piézomètres sont équipés de systèmes de mesure automatique.

3.2.1. Perméabilités

Les mesures de perméabilité ont été réalisées dans les alluvions de février à mai 1999, dans le but d'approfondir une approche de la modélisation des écoulements mis en évidence par l'expérience de traçage de la nappe alluviale. Les mesures sont ponctuelles et donnent la transmissivité T de la nappe au niveau du piézomètre. La perméabilité globale K , sur toute la hauteur d'eau e est donnée par l'équation $K=T/e$. La mesure n'a pas pu être réalisée dans une grande partie des piézomètres du fait de l'avancée de l'exploitation au moment des mesures.

Les mesures ont été réalisées par slug tests pour les piézomètres les moins perméables et essais de pompage en collaboration avec le Centre d'Informatique Géologique (35, rue St Honoré, 77305 Fontainebleau) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. La méthode d'interprétation des courbes de rabattement de la nappe (de Marsily, 1994) est présentée en annexe 8. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.3. Les valeurs des transmissivités obtenues ($3,5 \cdot 10^{-5} - 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) sont cohérentes avec les valeurs proposées par Zunino (1979) pour la nappe alluviale du Val d'Orléans : $10^{-5} - 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Les perméabilités calculées à partir des transmissivités sont comprises entre $9,1 \cdot 10^{-6}$ et $8,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. Ces valeurs sont également cohérentes avec les grandeurs rencontrées dans la littérature pour les formations alluviales. Le calcul de la perméabilité moyenne sur les $\log K$ donne une valeur moyenne égale à $4,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ et un écart-type égal à $\sigma(\log K)=0,5$.

Tableau 3.3 : Perméabilités obtenues par essais de pompage et chocs hydrauliques (« slug test ») sur les piézomètres du réseau alluvionnaire de Sandillon implanté en 1997.

<i>Piézomètres</i>	$T (m^2/s)$	$e (m)$	$K=T/e (m/s)$	<i>Méthode de calcul</i>
I	1.10^{-4}	3,0	$3,3.10^{-5}$	essai de pompage
K	$4,2.10^{-3}$	4,8	$8,8.10^{-4}$	essai de pompage
L	3.10^{-4}	4,55	$6,6.10^{-5}$	slug test
M	1.10^{-4}	3,15	$3,2.10^{-5}$	slug test
N	$3,5.10^{-5}$	3,85	$9,1.10^{-6}$	slug test
O	7.10^{-5}	4,15	$1,7.10^{-5}$	slug test
P	$2,5.10^{-4}$	4,65	$5,4.10^{-5}$	slug test
Q	$2,1.10^{-4}$	4,15	$5,0.10^{-5}$	slug test
Z18	$3,8.10^{-5}$	3,35	$1,1.10^{-5}$	slug test
Z19	$4,2.10^{-5}$	3,75	$1,1.10^{-5}$	slug test
Z20	8.10^{-5}	3,75	$2,1.10^{-5}$	slug test
Z24	$\sim 3.10^{-4}$	4,15	$\sim 7,2.10^{-5}$	slug test
Z25	$9,9.10^{-5}$	4,15	$2,4.10^{-5}$	slug test
Z26	$7,9.10^{-5}$	3,95	$2,0.10^{-5}$	slug test
Z27	$\sim 6.10^{-4}$	4,95	$\sim 1,2.10^{-4}$	slug test
Z28	$\sim 6.10^{-4}$	4,35	$\sim 1,4.10^{-4}$	slug test
Z29	$> 7,5.10^{-4}$	4,25	$> 1,8.10^{-4}$	slug test
Z30	$> 5,4.10^{-4}$	4,55	$> 1,2.10^{-4}$	slug test

3.2.2. Température

Les profils verticaux de température dans les forages permettent théoriquement de mettre en évidence la succession des strates traversées dans les formations géologiques (Jones and Skibitzke, 1956 ; Lambiase et Al, 1979).

Le gradient géothermique terrestre implique l'existence d'un flux de chaleur qui traverse l'écorce terrestre des profondeurs vers la surface (Lee, 1963 ; Diment et Al, 1965). La loi de fourrier s'écrit $Q=K\text{grad}T$ où Q est le flux de chaleur, K la conductivité thermique et T la température. Les couches sédimentaires n'ayant pas la même conductivité thermique K , la conservation du flux impose un gradient thermique plus important pour les couches peu conductrices (ex : argiles) que pour les couches conductrices (ex : calcaire, sables).

Dans les alluvions, les couches perméables devraient montrer un faible gradient de température alors que dans les argiles, le gradient doit s'accroître.

En réalité, la présence du tube piézométrique peut perturber la forme des profils en créant un court-circuit entre les strates conductrices et, dans ce cas, l'interprétation des profils est inversée (Schnebelen et Al., 1999). En effet, un courant entre deux niveaux perméables se manifesterait par un faible gradient thermique alors que la zone traversée est peu perméable.

La présence du piézomètre peut également engendrer des courants convectifs qui modifient légèrement la forme des profils thermiques. Ces courants existent au delà d'un seuil critique qui dépend du diamètre du piézomètre et du gradient de température (E. A. Sammel, 1968). A une température donnée, plus le diamètre est petit, plus le gradient de température au-dessus duquel pourront naître des courants de convection doit être important. D'après les abaques fournies par Sammel (figure 3.9), ce seuil est rarement atteint dans les piézomètres calcaires du site de Sandillon sauf dans les piézomètres CB4 et CA1 où les gradients de température sont supérieurs à $0,1^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Dans les alluvions, au contraire, ce seuil est très souvent dépassé puisque le gradient thermique est généralement supérieur à $0,1^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

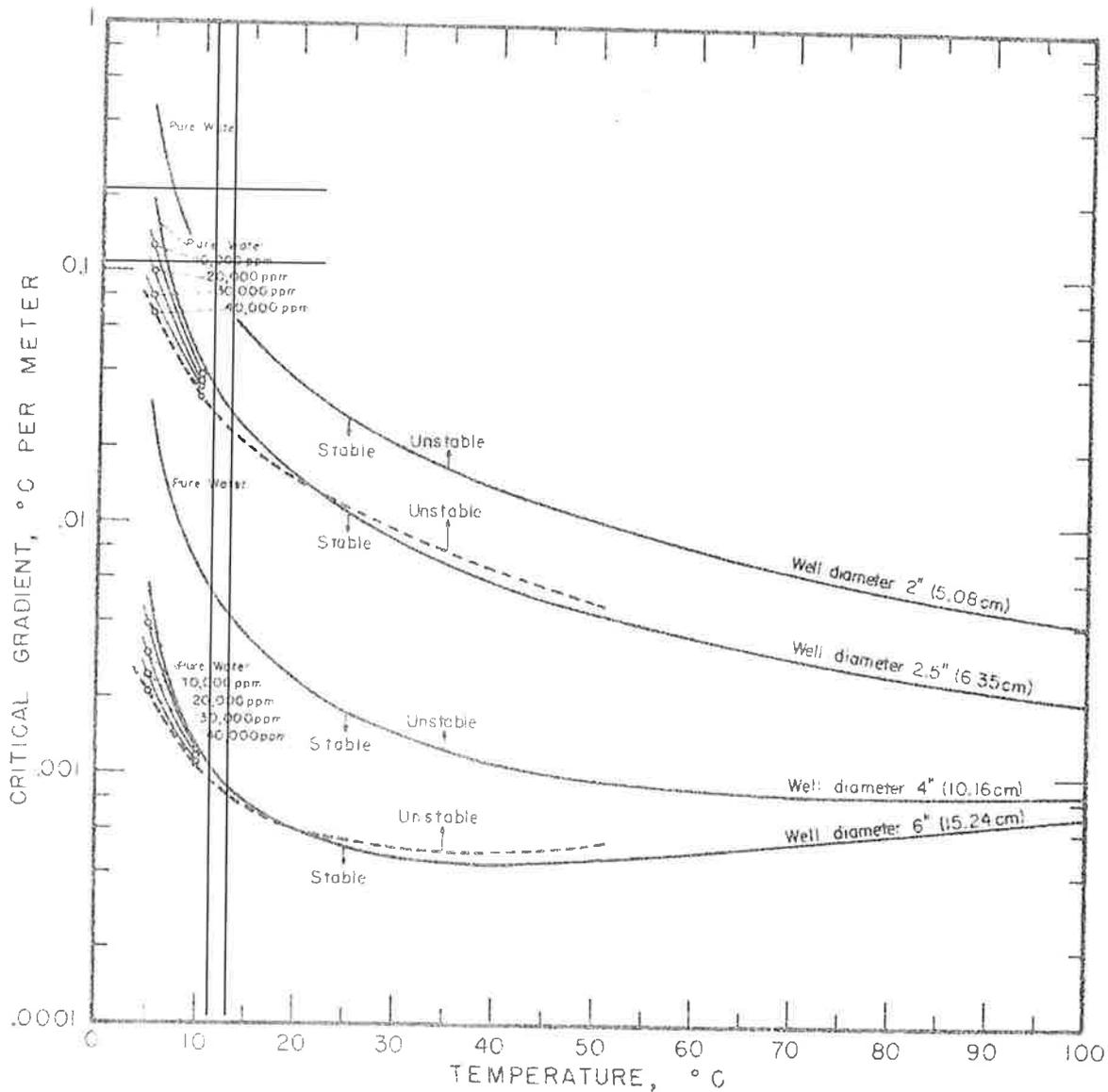


Figure 3.9 : Abaques de Sammel (1968) montrant les conditions critiques de température et de gradients de température pour que des courants de convection puissent exister dans les piézomètres.

A une température donnée, l'utilisation d'un piézomètre de petit diamètre diminue les risques de courants convectifs. Dans la nappe de Sandillon, les températures sont comprises entre 11 et 13°C. Dans les piézomètres calcaires, seuls les piézomètres CB4 et CA1 présentent un gradient de température suffisant pour que des courants de convection puissent être engendrés. Dans les alluvions, de nombreux piézomètres présentent des gradients supérieurs à 0,2°C/m ce qui entraîne la possibilité de l'existence de courants convectifs.

Dans un système karstique alimenté par des eaux de surface comme c'est le cas dans le Val d'Orléans, l'étude des profils thermiques permet une détermination assez facile des axes karstiques du fait du fort contraste de température qui peut exister entre les eaux de surface et la nappe. Ce contraste variant avec la saison, ce n'est pas seulement la variation verticale de température qui permet la localisation d'un drain mais également la variation dans le temps.

Sur le site d'étude, en vue de déterminer les couches perméables, des profils de température ont été réalisés dans les alluvions et les calcaires à l'aide de sondes manuelles au cours de trois campagnes en 1999 (février, mai et août) et de deux campagnes en 2000 (avril et mai). Deux sondes manuelles ont été utilisées au cours de ces missions. La première est une sonde mixte pH/T WTW 196T appartenant au Laboratoire de Géochimie des Eaux (4, Place Jussieu. 75252 Paris Cedex 05). Sa précision est le dixième de degré. La seconde appartenant à l'Ecole des Mines de Paris est une sonde mixte piézométrie/température OTT . Sa précision est le centième de degré. Il s'est révélé que cette seconde sonde était mieux adaptée à l'étude des variations verticales de température dans les piézomètres.

La mise en évidence d'un axe karstique lors de la première campagne a conduit à l'installation, en janvier 2000, de trois capteurs de température reliés à un enregistreur « datalogger » localisé en tête de piézomètre. Les deux premiers capteurs sont situés à 18 et 25 m de profondeur dans le piézomètre qui intercepte l'axe karstique à 25 m. Le troisième capteur qui donne la température extérieure, est incorporé à l'enregistreur. Les caractéristiques techniques du montage sont présentées en annexe 9. Le paramétrage du datalogger, la récupération et la visualisation des données s'effectue à l'aide d'un câble relié à un ordinateur portable. Les résultats sont traités à l'aide du logiciel Excel. L'évolution des températures avec un pas horaire est suivie de janvier 2000 à février 2001.

3.2.3. Profils de débits verticaux

L'interprétation des profils verticaux de température étant délicate pour les raisons exposées au paragraphe précédent, il est nécessaire de les compléter par des profils de débits verticaux.

Ces mesures s'effectuent à l'aide d'un micromoulinet à cellule photoélectrique. Cet appareil permet de mesurer des courants verticaux, ascendants ou descendants, à l'intérieur d'un forage (Fletcher et Driscoll, 1986 ; Lauga, 1990). L'hélice utilisée pour la mesure des débits verticaux donne la vitesse verticale v (en cm/s) en fonction du nombre de tours par seconde n de l'hélice selon l'équation: $v = 7,1 \times n + 0,4$ applicable dans les conditions suivantes:

Diamètre de la carcasse du micromoulinet: $D=42$ cm

Tube crépiné 52-60 mm

Hélice à 4 pâles

Des problèmes techniques ont eu lieu sur le micromoulinet au cours des trois premières campagnes de 1999 sur le site de Sandillon. Finalement, seule la dernière campagne de 2000 a permis de réaliser des logs de débits verticaux dans les piézomètres calcaires essentiellement, les piézomètres alluvionnaires ayant pour la plupart été détruits par l'avancée des travaux d'extraction. Les débits verticaux « naturels » n'étant pas mesurables il a fallu injecter de l'eau dans les piézomètres pour créer le courant nécessaire à l'observation des variations de débit liées à la stratigraphie. Il aurait été théoriquement plus facile de créer un courant ascendant en pompant mais ce procédé s'est révélé irréalisable du fait de la création, par le moteur électrique de la pompe, d'une perturbation électromagnétique enregistrée par le micromoulinet dans le guide d'onde que constitue le tube piézométrique.

La manière d'injecter l'eau dans les piézomètres a été déterminée par l'accessibilité du terrain :

-Dans les zones accessibles en tracteur, l'injection d'eau dans le piézomètre s'est effectuée à partir d'une citerne sur remorque dont le débit en sortie de robinet est quasiment constant (20 litres/mn).

-Pour les zones inaccessibles en tracteur, deux cas de figure se sont présentés :

1/ Il existe un forage à proximité du piézomètre à étudier. Dans ce cas, l'eau du forage est pompée et envoyée par des tuyaux d'arrosage dans le piézomètre à étudier. (Débit maximum : 15 litres/mn)

2/ Il n'existe pas de forage à proximité. Dans ce cas, l'eau est injectée par bidon de 25 l. Chaque injection correspond à une profondeur donnée du micromoulinet. En moyenne, l'injection manuelle de 30 litres d'eau dure 30s, ce qui donne un débit moyen de 60 litres/mn. Quand les débits produits par les autres méthodes sont insuffisants devant la grande perméabilité du terrain c'est cette technique qui est utilisée en plus des autres. Le débit d'injection est alors la somme des débits fournis par chaque méthode.

3.2.4. Piézométrie

Comme dans toute étude hydrogéologique, le niveau z de la nappe est une variable très importante à suivre puisqu'elle fournit les directions (fig.1.5) et vitesses V générales d'écoulement selon la loi de Darcy $V=K\text{grad}z$ (K =perméabilité), ainsi que les relations entre les points qui suivent la même évolution piézométrique. La mesure de la piézométrie s'effectue à l'aide d'une sonde manuelle lumineuse graduée tous les centimètres. La précision de la lecture est de l'ordre de 0,25 cm. Elles s'effectue à la tête des piézomètres. Ceux-ci sont repérés par le géomètre de la carrière dans le système NGF (Nivellement Général de France) avec une précision théorique du millimètre. Des relevés géométriques réalisés sur un même

piézomètre à partir de repères différents montrent que la précision réelle est d'environ 5 mm. Les mesures manuelles sont effectuées quotidiennement le premier mois de l'expérience puis le pas est adapté en fonction des événements à étudier. Le suivi piézométrique a conduit à élargir le champ d'observation à l'ensemble des facteurs qui influencent le niveau de la nappe, c'est à dire, dans l'ordre des influences les plus fortes aux moins fortes, le niveau de la Loire, le pompage de la carrière, les précipitations locales et enfin la pression atmosphérique.

A partir de novembre 1997, différents enregistreurs piézométriques ont été testés sur le site. Pour des raisons de stabilité du signal, de discrétion de l'appareil, d'autonomie et de précision, l'Orphimèdes® fabriqué par l'entreprise OTT a été retenu et installé à plusieurs exemplaires sur le site. Sa précision est du centimètre. Le facteur pouvant perturber la mesure est l'entortillement, dans les heures qui suivent son installation, du fil en kevlar autour du tube de mesure (voir annexe 10). Le décalage engendré sur la mesure est rectifié par reparamétrage à partir des mesures manuelles. De manière générale, les Orphimèdes® fonctionnent correctement quand ils ne sont pas manipulés. Le fait de les sortir d'un piézomètre pour effectuer un prélèvement risque de provoquer un décalage sur la mesure. Le paramétrage des Orphimèdes® et la récupération des données s'effectue sur le terrain par transmission infrarouge vers un ordinateur portable. Les résultats sont traités à l'aide du logiciel Excel. Le pas d'enregistrement varie de 5 mn à 2 heures. En général, un pas d'une heure suffit à observer toutes les fluctuations de la nappe. Le pas de 5 mn a été utilisé pour dessiner la courbe de rabattement de la nappe provoqué par les pompages de la carrière. Durant une grande partie de la thèse, trois points ont été équipés simultanément d'Orphimèdes®: P1 ou P2, Pf1 ou Pf2 et un piézomètre au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire (E, Z33, Q, CA1, O, Z, Y). Ces trois points décrivent un plan dont l'inclinaison donne la direction et le gradient hydraulique approximatifs de l'écoulement. Les mesures

piézométriques manuelles réalisées périodiquement sur l'ensemble du site permettent de dessiner une carte de la piézométrie locale beaucoup plus précise.

3.2.5. Calcul des cotes de la Loire à Sandillon

Comme il a été dit précédemment, il importe de suivre le niveau du plan de la Loire au droit de la carrière de Sandillon. Cette commune dispose d'une échelle hydro (fig.3.10) dont le zéro est à la cote 95,58 mNGF, c'est à dire environ 1m50 au-dessus du niveau normal de la Loire à Sandillon à l'étiage. De plus, les relevés y sont très rares. Ils sont en général bi-annuels et réalisés par la DIREN Centre dans les périodes où la Loire atteint ses extrema, c'est-à-dire à l'étiage et pendant les crues hivernales (tableau 3.5).

Il faut donc trouver une méthode permettant de calculer la cote de la Loire au droit de la carrière.

Les deux villes qui encadrent Sandillon et où des relevés ont lieu tous les matins à 8h00 sont Orléans (au niveau du Pont George V) et Gien (Vieux Pont). Les niveaux zéros aux échelles du pont Georges V à Orléans et du Vieux Pont à Gien ont les cotes respectives 90,17mNGF et 120,76 mNGF.

3.2.5.1. Estimation de la cote de la Loire à Sandillon en considérant fixe la pente de la Loire entre Sandillon et Orléans

La hauteur de la Loire lue sur l'échelle à Orléans (h_O) peut être prise comme référence et en considérant, en première approximation, que la pente moyenne de la Loire entre Orléans et Sandillon ne dépend pas du niveau de la Loire, la cote de la Loire (en mNGF) à Sandillon Y_S s'obtient à chaque instant par la relation :

$$Y_S = h_O + b$$

Il suffit d'une mesure ponctuelle au droit de la carrière pour calculer b . En janvier 1999, un repère a été placé sur l'échelle de la berge rive gauche de la Loire au droit de la carrière – cette échelle est appelée "Echelle Sandillon-Carrière" (fig.3.10). Le 26/1/99 à 9h00, le positionnement de la Loire par rapport à cette marque indique une cote de 95,46 mNGF. A 8h00 le même jour à Orléans, la cote de la Loire est de +0,68 m à l'échelle du Pont GeorgesV. On peut considérer que la variation horaire est négligeable puisque le lendemain, la Loire n'est descendue que de 3 cm.

$$b = 95,46 - 0,68 = 94,78 \quad \text{et} \quad Y_S = h_O + 94,78$$

3.2.5.2. Modèle de variation linéaire de la cote de la Loire à Orléans en fonction de la cote à Gien.

Les cotes de la Loire relevées quotidiennement à Orléans et Gien de janvier 1997 à octobre 2000 sont présentées en annexe 11. Si l'on reporte les cotes NGF de la Loire à Orléans, Y_O , en fonction des cotes NGF de la Loire à Gien, Y_G , pour toutes les données quotidiennes récoltées entre janvier 1997 et octobre 2000, on constate l'existence d'une corrélation linéaire entre Gien et Orléans sur trois domaines de cotes correspondant aux trois régimes hydrologiques suivants : étiage, moyennes eaux et crue. Les limites de ces domaines sont directement reliées à la forme de la courbe de tarage des débits en fonction des cotes de la Loire à Orléans (fig.3.11). Les meilleurs coefficients de corrélation R sont obtenus lorsqu'on introduit un déphasage φ entre Gien et Orléans (tableau 3.4). La cote à Orléans à $8h + \varphi$ est calculée par interpolation linéaire entre les cotes relevées à Orléans à 24h d'intervalle. Les meilleures corrélations sont obtenues pour des déphasages de 14h, 15h et 10h pour les trois régimes respectifs d'étiage, moyennes eaux et crue.

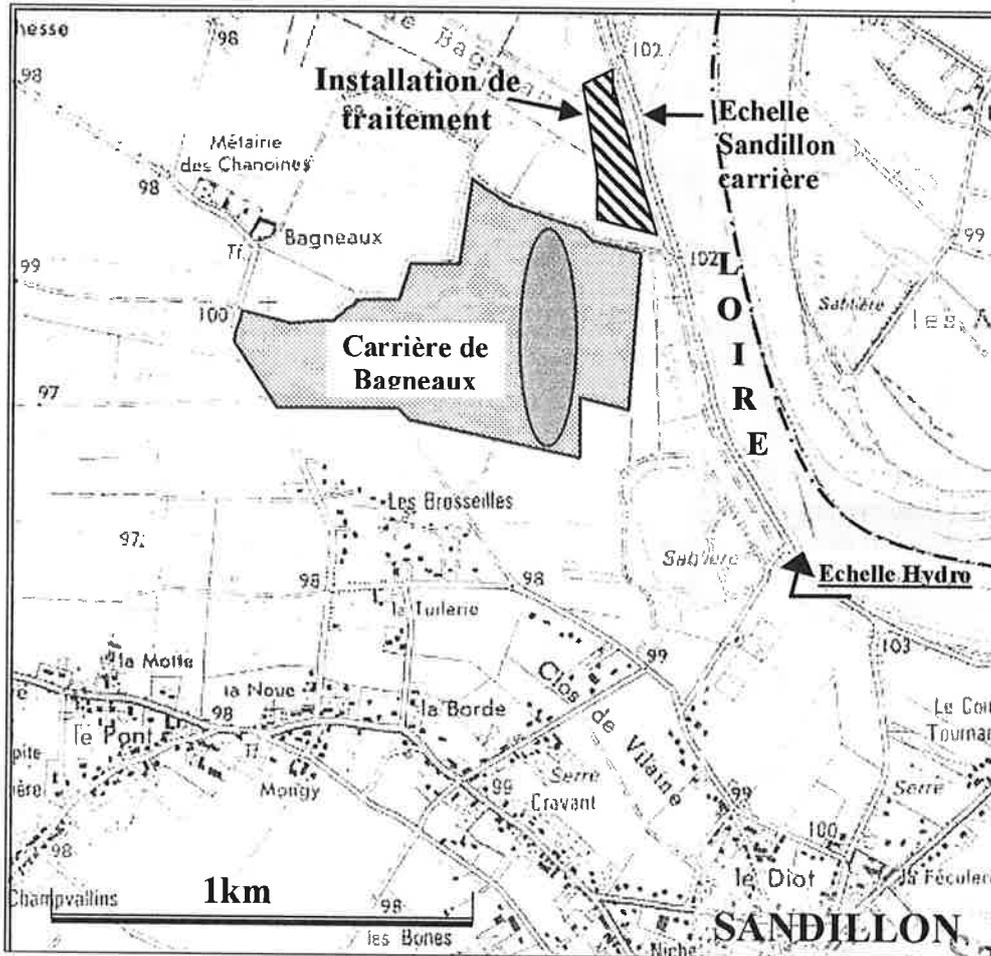


Fig 3.10: Localisation des échelles de cotes de la Loire à Sandillon.

L'échelle communale (échelle hydro) est l'échelle officielle de Sandillon utilisée épisodiquement par la DDE ou la DIREN. Les cotes de la Loire calculées dans ce travail à partir de Gien sont localisées à l'échelle "Sandillon-carrière".

Tableau 3.4 : Coefficients des droites de corrélation des cotes de la Loire entre Gien et Orléans pour un déphasage φ . Coefficients de détermination R^2 et écarts-types associés aux valeurs calculées selon le modèle linéaire sur chacun des régimes hydrologiques

$Y_O = AY_G + B$	Domaine	A	B	φ	R^2	σ^* (cm)
Régime hydrologique						
Etiage	$Y_G \leq 121,35$	1,225106636	-57,995	14h	0,992	6
Moyennes eaux	$121,35 < Y_G < 122,71$	0,424905386	39,0975	15h	0,962	5
Crue	$Y_G \geq 122,71$	0,80421963	-7,5233	10h	0,953	18

$\sigma^* = \text{Ecart-type sur } (Y_O \text{ mesuré} - Y_O \text{ calculé})$

Il est important de préciser que les temps de propagation des maxima entre Gien et Orléans fournis par la DDE sont de 24h, 20h et 16h pour les régimes respectifs d'étiage, de moyennes eaux et de crue. Le paramètre φ est un terme qui traduit la vitesse de transmission d'une onde mécanique et il traduit non seulement la transmission des maxima mais probablement aussi l'étalement du signal au cours de sa propagation entre Gien et Orléans.

Sur chaque domaine, une variation $\Delta Y_O = Y_O(t+\Delta t+\varphi) - Y_O(t+\varphi)$ du niveau de la Loire à Orléans est proportionnelle à la variation $\Delta Y_G = Y_G(t+\Delta t) - Y_G(t)$ du niveau de la Loire à Gien. $\Delta Y_O = A \cdot \Delta Y_G$.

Il existe trois régimes hydrologiques donc trois valeurs différentes pour le coefficient A. La variation de la Loire à Orléans n'est donc pas toujours proportionnelle à la variation à Gien. Comme Sandillon se trouve entre Gien et Orléans, il est très probable que l'on retrouve à Sandillon une variation en fonction de Gien qui dépend du régime hydrologique.

3.2.5.3. Modèle de variation polynomiale de la cote de la Loire à Orléans en fonction de la cote à Gien.

Au lieu de considérer les variations des cotes de la Loire à Orléans comme des fonctions linéaires des variations des cotes à Gien, il est possible de choisir un polynôme du 3^{ème} degré : $Y_O = A_3 Y_G^3 + A_2 Y_G^2 + A_1 Y_G - A_0$

Chaque terme du polynôme peut s'expliquer par des influences physiques subies par la Loire entre Gien et Orléans :

A_0 = terme de calage des cotes

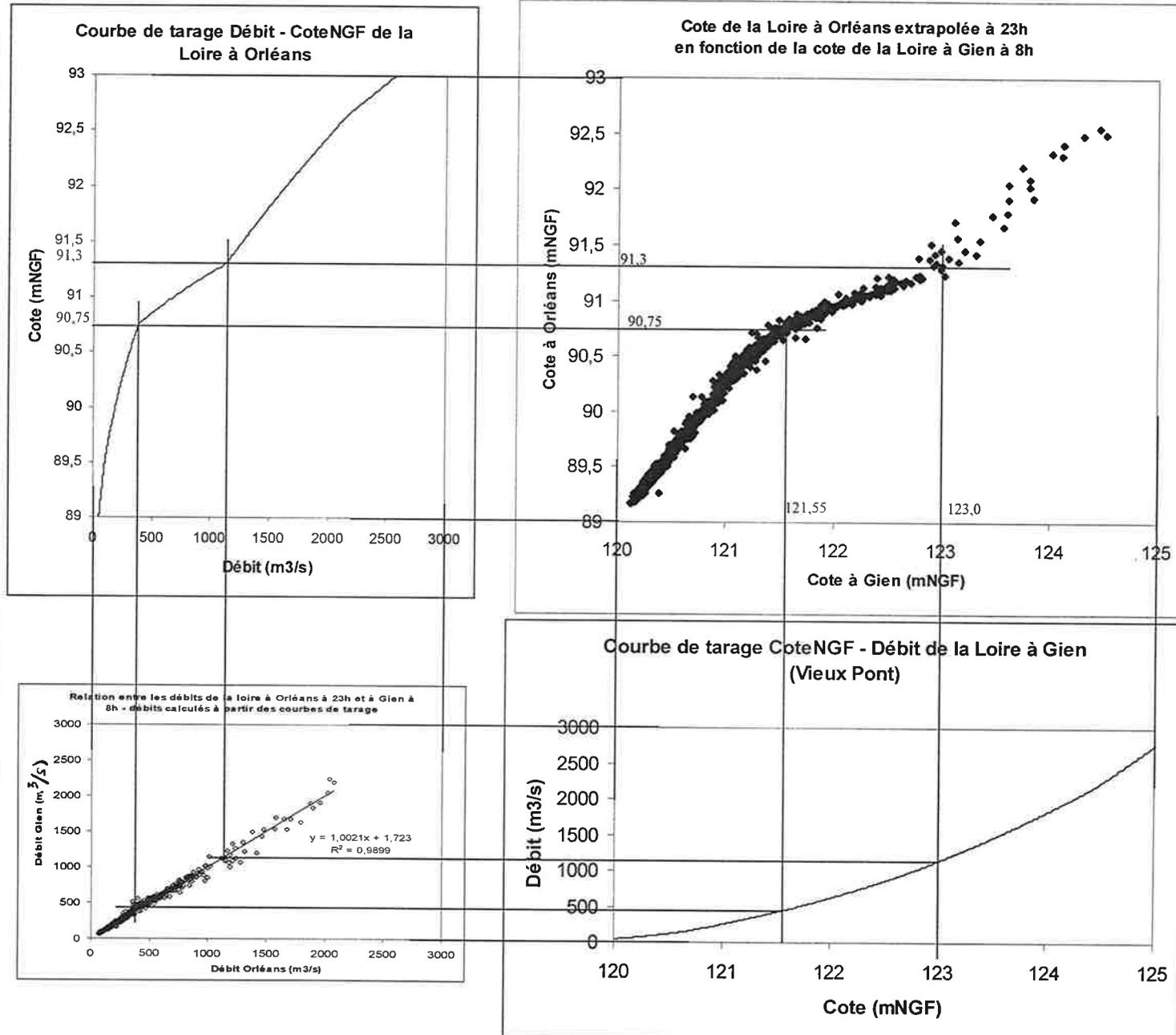
A_1 = terme d'amplification ou d'amortissement des fluctuations à Gien

Figure 3.11: Relation entre les cotes de la Loire à Gien et à Orléans.

La cote de la Loire à Orléans est reliée à la cote de la Loire à Gien relevée 15h plus tôt par une relation linéaire sur trois domaines distincts. Ces derniers coïncident avec les domaines de la courbe de tarage de la Loire à Orléans.

Le graphique en bas à gauche montre qu'il n'y a pas de variation spectaculaire de débit de la Loire entre Orléans et Gien. En effet, les points sont fortement corrélés ($R^2=0,9899$) par une droite passant quasiment sur l'origine et de pente égale à 1.

Les variations de tendance observées au niveau des points (121,55 ; 90,75) et (123,0 ; 91,3) sur le diagramme Cote Gien - Cote Orléans ne sont donc pas liées aux pertes de la Loire entre Gien et Orléans mais à la forme de la courbe de tarage à Orléans, c'est à dire certainement à la forme du lit de la Loire.



A2 = terme d'étalement lié à la forme de la section du lit de la Loire

A3 = terme lié aux variations de volume

Chacun des termes est extrêmement précis et pour une précision du centimètre, 9 chiffres après la virgule sont nécessaires dans l'expression du terme du troisième degré A3 par exemple. Le meilleur coefficient de détermination $R^2=0,993$ est obtenu pour un déphasage de 12 h entre Orléans et Gien (figure 3.12 ci-dessous).

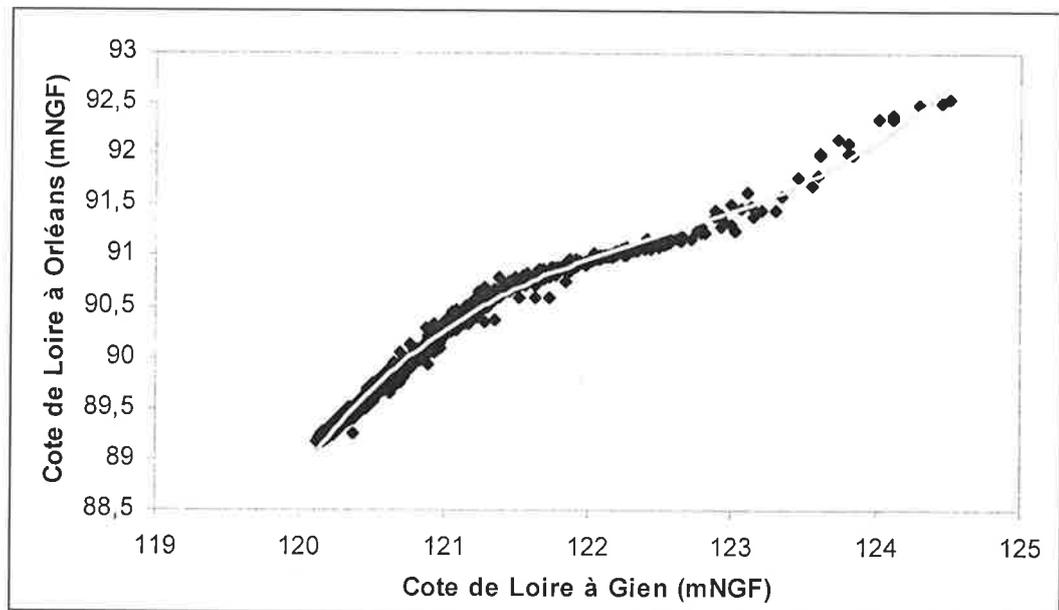


Figure 3.12 : Variation des cotes de Loire à Orléans en fonction des cotes à Gien 12h plus tôt pour les années 1997 à 2000 modélisée par un polynôme du troisième degré (courbe en gris) d'équation : $Y_O = 0,076185270Y_G^3 - 28,0049523Y_G^2 + 3431,89293Y_G - 140115,130$

Le déphasage (12h) qui donne le meilleur coefficient de corrélation englobe les trois régimes. Il est rassurant de trouver un déphasage compris entre 10h (crue) et 15h (moyennes eaux).

Une quatrième approche consiste à considérer que le passage des régimes de faibles débits aux régimes de débit plus élevés peut s'effectuer par ajouts successifs de termes de degrés supérieurs. Ainsi, si l'on reprend la relation $Y_O=f(Y_G)$ à l'étiage, on a :

$$Y_O = -57,995 + 1,22510664Y_G \quad (\text{tableau 3.4})$$

Les termes à rajouter à l'équation ci-dessus pour passer au régime moyen sont des termes du deuxième et troisième degrés. On a alors :

$$Y_O = -57,995 + 1,22510664Y_G + 0,006475853193876Y_G^2 - 0,000053372879535Y_G^3 \quad (\text{équation valable seulement en régime de moyennes eaux})$$

Enfin pour passer au régime de crue, il faut ajouter encore deux termes de degrés 4 et 5.

$$Y_O = -57,995 + 1,22510664Y_G + 0,006475853193876Y_G^2 - 0,000053372879535Y_G^3 - 2,1561440962076 \cdot 10^{-7}Y_G^4 + 1,75470199878 \cdot 10^{-9}Y_G^5$$

Chacun des termes est calculé par ajustement de fonctions de corrélation polynomiales sur chacun des domaines étudiés.

L'application de ces deux derniers modèles n'améliore pas de façon notable les coefficients de corrélation. Il semble également, de manière visuelle, que la courbe du troisième degré représente moins bien la variation observée que trois segments de droites. On préférera donc le modèle linéaire plus précis et plus simple dans son expression.

3.2.5.4. Application du modèle au calcul de la cote de la Loire à Sandillon

Le déphasage φ étant relié à la vitesse de transfert des variations du niveau de la Loire entre Gien et Orléans, il est logique de penser que φ dépend de la distance. On peut donc connaître φ_s , le déphasage entre Gien et Sandillon. La distance parcourue par la Loire entre Gien et Orléans étant de 71,8 km et de 58,9 km entre Gien et Sandillon, on estime $\varphi_s = 11\text{h}30$, 12 h et 8 h pour les trois régimes respectifs d'étiage, moyennes eaux et crue.

Il est ainsi possible de reporter les quelques relevés réalisés à Sandillon au temps t en fonction de la cote à Gien à $t-\varphi_s$ (tableau 3.5). La courbe obtenue est présentée figure 3.12. On constate l'existence de deux domaines de corrélation.

Le premier domaine ($Y_G < 121,26$ mNGF) coïncide avec celui observé pour la relation entre Gien et Orléans. Dans ce domaine, une variation de la Loire à Gien est amplifiée d'un facteur $A_s = 1,642$ à Sandillon, c'est à dire plus qu'à Orléans ($A = 1,225$).

Pour $Y_G > 121,26$ mNGF, il n'y a plus qu'un seul domaine de variation puisque les points relevés en période de crue s'alignent avec ceux relevés en période de moyennes eaux. Dans ce domaine, les variations de la Loire observées à Gien sont amorties ($A_s = 0,754$) à Sandillon.

L'écart entre les valeurs mesurées à l'échelle Sandillon-Carrière et les valeurs calculées ne dépasse pas 4 cm.

Les résultats du modèle sont également comparés aux relevés bi-annuels des cotes de la Loire sur l'échelle hydro de Sandillon située plus en amont (tableau 3.6 et fig.3.13). L'écart entre les deux stations est constant en période d'étiage (0,75-0,84 mètres). Il diminue ensuite lorsque la Loire est remontée d'un mètre pour augmenter linéairement avec la cote en période de moyennes eaux et de crue. Ces écarts sont ceux que l'on mesure sur le profil en long du plan de la Loire (annexe 11). Le changement de pente autour de 95 mNGF correspond au changement de régime de la Loire mis en évidence par le modèle: en période d'étiage, la pente de la Loire est à peu près égale à celle du lit. Lorsque le débit augmente, la surface s'aplanit dans un premier temps pour s'incliner ensuite à fur et à mesure que le débit continue d'augmenter.

Tableau 3.5 : Relevés manuels des cotes de la Loire à Gien, Sandillon et Orléans pour la construction de la courbe $Y_s=A_sY_G+B_s$ (figure 3.12 ci-dessous).

Loire à Gien		Loire à Orléans		Loire à Sandillon (carrière)		φ	φ_s
Cote (mNGF)	Date/heure	Cote (mNGF)	Date/heure	Cote (mNGF)	Date/heure		
122,12	20/1/00 3h00	91,00	20/1/99 18h00	95,77	20/1/99 15h00	15h	12h
122,14	20/1/99 4h45	91,01	20/1/99 19h45	95,81	20/1/99 16h45	15h	12h
121,73	25/1/99 21h00	90,85	26/1/99 12h00	95,46	26/1/99 9h00	15h	12h
122,02	16/2/99 6h30	90,94	16/2/99 21h30	95,70	16/2/99 18h30	15h	12h
121,87	17/2/99 21h30	90,89	18/2/99 12h30	95,61	18/2/99 9h30	15h	12h
120,91	3/11/99 0h30	90,11	3/11/99 14h30	94,52	3/11/00 12h	14h	11h30
120,27 (**)	(*)	89,35	(*)	93,50	17/8/88 (*)	14h	11h30
120,84 (**)	(*)	90,05	(*)	94,48	(*)	14h	11h30
123,94 (**)	(*)	92,15	(*)	97,10	(*)	10h	8h
124,90 (**)	(*)	92,92	(*)	97,90	(*)	10h	8h

(*) Date et/ou heure non indiquée - cote lue sur le profil de la Loire entre Châteauneuf et Orléans (Annexe 11)

(**) Cote à Gien calculée à partir du modèle $Y_G=(Y_0-B)/A$

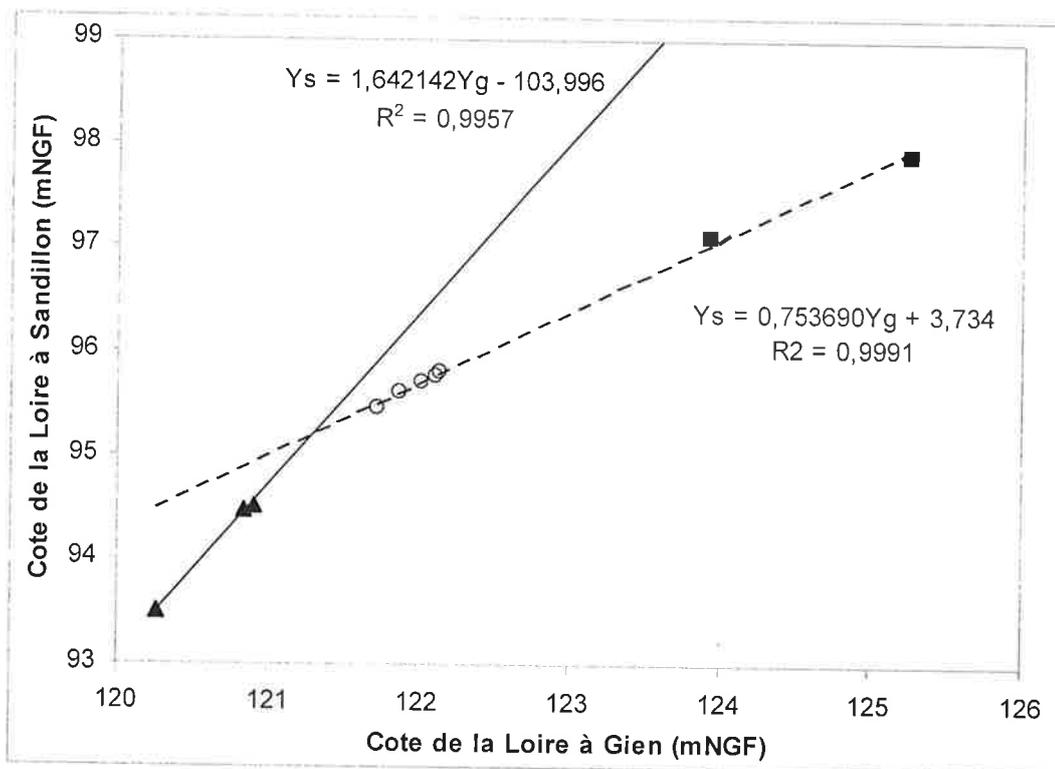


Figure 3.12 : Corrélations entre les cotes de la Loire à Gien et les cotes à Sandillon respectivement 12h, 11h30 et 8h plus tard pour les régimes d'étiage (▲), de moyennes eaux (○) et de crue (■).

La cote de la Loire à Sandillon peut donc s'exprimer en fonction de la cote à Gien par deux relations linéaires simples dont les coefficients apparaissent sur la figure 3.12. Les cotes de la Loire à Sandillon, calculées selon ce modèle, sont données en annexe 11 pour les années 1997 à 2000.

Il est alors possible d'étudier les variations de la nappe à Sandillon en fonction des variations de la Loire et de rechercher le déphasage pour lequel ces variations sont les mieux corrélées.

Le calcul des corrélations entre la Loire et la nappe de Sandillon s'effectuera finalement non pas sur les cotes calculées à Sandillon mais de préférence sur les cotes mesurées à Gien et Orléans.

3.2.6. L'analyse corrélatoire appliquée aux cotes de la Loire et de la nappe

3.2.6.1. Théorie

Dans le paragraphe précédent, on se sert, sans le nommer, d'un outil mathématique souvent utilisé en hydrogéologie : l'analyse corrélatoire croisée. Cette méthode a été souvent appliquée aux systèmes karstiques (Mangin, 1984; Gonzales et Lepiller, 1984; Padilla and Pulido-Bosh, 1995). Par l'étude croisée de séries chronologiques, elle permet par exemple de calculer les vitesses de transfert des précipitations, de décomposer le signal et de mettre ainsi en évidence plusieurs chemins de transmission d'un signal.

L'objet de ce paragraphe n'est pas de développer la théorie de l'analyse corrélatoire et spectrale mais de présenter les expressions mathématiques utilisées dans les calculs réalisés soit à partir d'EXCEL, soit à partir du logiciel STOCHASTOS 3.0 développé au Laboratoire souterrain du CNRS à Moulis F-09200 Saint-Girons. Les expressions qui suivent sont tirées des travaux de Jenkins et Watts (1968).

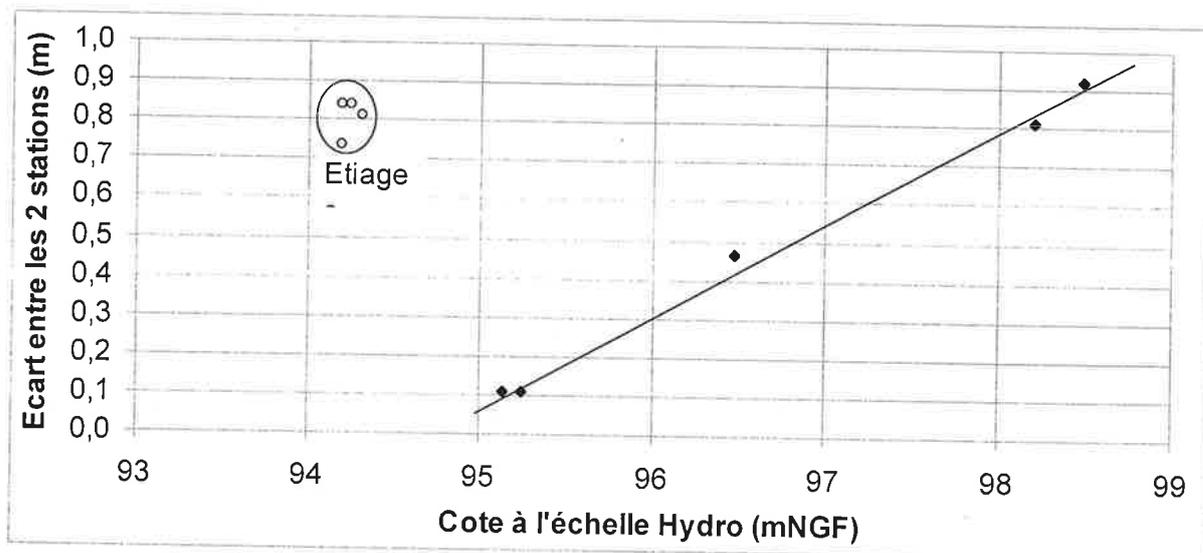


Figure 3.13: Ecarts entre les valeurs de cote de Loire relevées à l'échelle hydro et les valeurs calculées au même moment à l'échelle Sandillon-Carrière

Tableau 3.6: Comparaison des cotes de Loire relevées par la DIREN à l'échelle hydro de Sandillon et les cotes calculées à l'échelle Sandillon-carrière.

Date des relevés à l'échelle Hydro	Echelle Hydro (mNGF)	Echelle Sandillon-carrière (mNGF)	Ecart (m)	Régime de la Loire
30/7/97 15:00	94,19	93,45	0,74	étiage
1/5/98 11:40	98,49	97,57	0,92	crue
11/8/98 14:45	94,19	93,35	0,84	étiage
16/12/98 12:35	95,24	95,13	0,11	
1/2/99 9:15	96,48	96,01	0,47	crue
24/2/99 14:30	98,21	97,40	0,81	crue
3/8/99 13:50	94,25	93,41	0,84	étiage
25/1/00 15:10	95,14	95,03	0,11	
23/8/00 13:30	94,31	93,50	0,81	étiage

Soient deux séries chronologiques : la première, x_t ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) engendre la seconde y_t ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$) avec n le nombre de données par série. Les coefficients de corrélation entre la série x_t et les séries y_{t+k} (k =déphasage) et y_{t-k} sont donnés pour $k=0, 1, 2, \dots, m$, en prenant m comme troncature :

$$r_{+k} = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}} \quad r_{-k} = \frac{C_{yx}(k)}{\sqrt{C_x^2(0)C_y^2(0)}}$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad C_x(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2$$

$$C_{yx}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (y_t - \bar{y})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad C_y(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2$$

\bar{x} et \bar{y} sont les moyennes des séries respectives x_t et y_t .

3.2.6.2. Application aux cotes de la Loire et de la nappe

Les cotes de la Loire étant relevées quotidiennement, la construction des corrélogrammes Loire-Loire ne permet de trouver comme déphasage, qu'un multiple de 24h si l'on considère les séries chronologiques telles quelles. On interpole donc les données journalières en données horaires afin d'affiner la précision sur les déphasages. Quant aux mesures automatiques des niveaux de la nappe, celles-ci s'effectuent toutes les heures.

On dispose donc de deux types de fichiers sources à partir desquels on pourra construire les corrélogrammes croisés: des fichiers de données journalières et des fichiers de données horaires sur 4 ans (1997-2000).

Le logiciel STOCHASTOS permet d'effectuer rapidement un grand nombre d'incrémentations sur k mais la taille des fichiers sources est limitée à 8050 valeurs. Cela est

suffisant pour les fichiers de données journalières mais seules de petites périodes peuvent être étudiées à partir des données horaires.

Les calculs des corrélogrammes croisés entre les cotes horaires de la Loire et de la nappe à Sandillon sont réalisés à l'aide du logiciel EXCEL. Les résultats sont présentés en annexe 12.

La courbe $r(k)$ a été tracée figure 3.14 pour les cotes de la Loire à Gien en entrée et les cotes de la Loire à Orléans en sortie. Le premier maximum correspond à 12 heures de décalage. Le deuxième correspond à une année. Il indique un phénomène de périodicité lié au cycle hydrologique de la Loire.

L'étude des corrélations existant entre la Loire et la nappe sur le modèle de celles qui existent entre Gien et Orléans a montré des différences significatives entre les divers piézomètres du site. Ce sont ces différences d'impact de la Loire sur la nappe qui sont étudiées au chapitre 6.

3.2.7. Données météorologiques

Les précipitations journalières et les pressions atmosphériques sont fournies par Météo-France. Ces données se trouvent en annexe 13. Les pressions atmosphériques ont été recueillies pour la période correspondant aux tempêtes de fin décembre 1999.

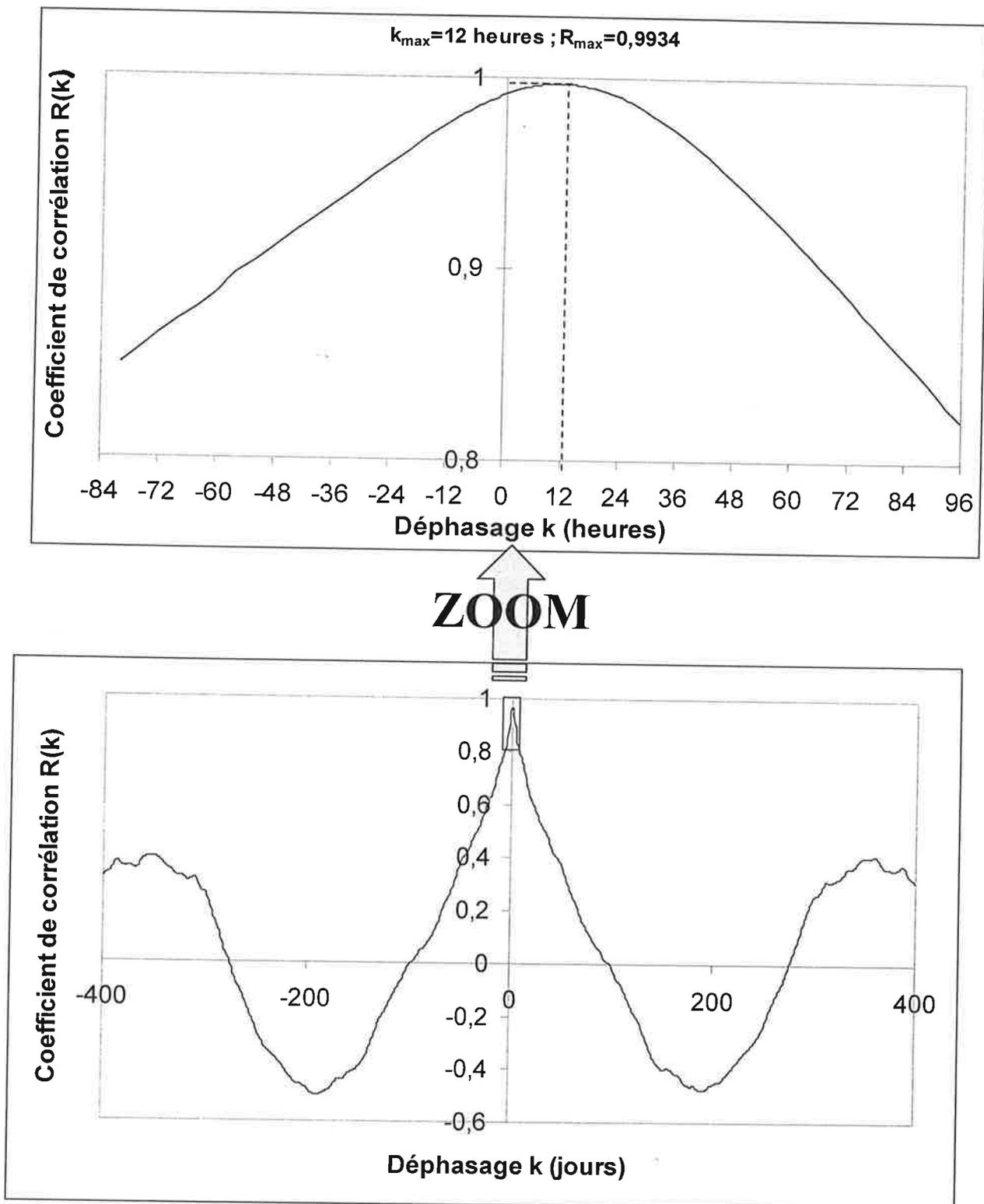


Figure 3.14: Corrélogrammes croisés des cotes de la Loire à Gien et à Orléans.

Le corrélogramme du bas est réalisé avec le logiciel STOCHASTOS à partir de 1389 relevés quotidiens (du 1/1/1997 au 20/10/2000). Troncature: $m=400$ jours. Le corrélogramme du haut fournit les coefficients de corrélation $R(k)$ pour une loi de variation plus fine (de type $y=ax^3+bx^2+cx+c$) des cotes y à Orléans en fonction des cotes x à Gien. Le calcul de $R(k)$ est réalisé sur 4345 données horaires (du 1/1/98 à 0h00 au 30/6/98 à 23h00).

3.3. Méthodes d'analyses géochimiques

La caractérisation géochimique de l'aquifère de Sandillon s'effectue par l'analyse chimique des eaux et des sédiments avec lesquels elles sont en équilibre en tous les points accessibles du réseau d'observation. Les teneurs naturelles des eaux permettent de connaître les relations éventuelles qui peuvent exister entre les différentes parties du réseau piézométrique. Elles témoignent en particulier de l'existence ou non de lois de mélange entre divers pôles. Dans notre cas précis, il importe de quantifier l'impact précis de la Loire dans l'hydrogéochimie des aquifères et de caractériser les échanges chimiques au sein de ces aquifères.

3.3.1. Les échantillons d'eau

3.3.1.1. Méthodes de prélèvement et conditionnement

Afin d'éviter les contaminations entre les différents points d'observation de la nappe, chaque piézomètre est équipé d'un système de prélèvement à poste. Etant donné le grand nombre de piézomètres à équiper dès le départ, il a été plus économique et plus performant de concevoir et de fabriquer les préleveurs au Laboratoire Pierre Süe. Ils sont réalisés à partir de tubes en PVC. Leur principe de fonctionnement est présenté dans l'annexe 14. Contrairement au préleveur à bille en téflon (annexe 14) qui échantillonne une grande partie de la hauteur d'eau au cours de sa descente puis de sa remontée dans un piézomètre, le préleveur en PVC permet des prélèvements précis à la profondeur choisie, si celle-ci n'est pas trop grande (< 10-12 mètres). Les prélèvements dans les piézomètres calcaires, dont la crépine se situe en dessous de 15 mètres, sont généralement réalisés à l'aide de préleveurs à bille. Un dernier type de préleveur mis au point par l'Ecole des Mines de Paris a été utilisé pour l'établissement de profils verticaux de concentration dans les piézomètres calcaires. Ce dernier préleveur présente les mêmes avantages que le préleveur en PVC avec en plus la possibilité de prélever

à grande profondeur. Des blancs ont été réalisés à l'aide des différents types de préleveurs. Aucun d'eux ne contamine les échantillons d'eau dans la gamme des éléments analysés (éléments majeurs et lanthanides).

A part les eaux destinées à la spectrofluorimétrie, tous les échantillons sont filtrés sur le terrain immédiatement après leur prélèvement. La filtration s'effectue à l'aide de seringues stériles de 20 ml munies de filtres jetables de marque Millipore 0,22 μm en acétate de cellulose ou de marque Lida 0,2 μm en nylon. Les échantillons filtrés sont acidifiés à l'acide nitrique 60% ultrapur Normatom™ jusqu'à $\text{pH}=2$, sauf pour l'analyse des anions. Ils sont enfin conservés au réfrigérateur dans des flacons de 60 ml en polyéthylène. Ces flacons sont préalablement trempés dans de l'eau acidifiée à $\text{pH}=2$ à l'acide nitrique Normatom™ pendant plusieurs jours (sauf pour les analyses d'anions où un simple trempage de quelques jours dans l'eau déminéralisée suffit). Lors du prélèvement, les flacons sont rincés 1 à 2 fois avec l'échantillon filtré. Les échantillons contenant de la fluorescéine sont conservés à l'abri de la lumière (André J.C. et Molinari J., 1976).

Lors des expériences de traçage réalisées pendant l'année 2000, une partie des piézomètres et points de prélèvements lointains (Bouillon, captage du Theuriet) ont été équipés de préleveurs automatiques d'échantillon. Le volume prélevé peut alors atteindre 500ml. Chaque préleveur possède 24 flacons récepteurs en téflon. Lorsque les traceurs recherchés sont des lanthanides et que les eaux sont peu chargées en matière en suspension (MES) (cas du Theuriet et du Bouillon), les flacons récepteurs sont préacidifiés ce qui permet d'éviter les phénomènes d'adsorption sur les parois ou de précipitation et coprecipitation des lanthanides. Les échantillons ainsi prélevés ne sont pas filtrés. Ce mode de conditionnement ne peut être appliqué pour les eaux alluviales où les MES sont de nature argileuse. Les lanthanides naturels retenus par les argiles sont alors mis en solution au moment de

l'acidification. Ce phénomène de contamination a été observé, lors du traçage de mai 2000, dans le préleveur automatique situé à la source du Bouillon. La contamination ne venait alors pas des MES mais d'un dépôt argileux présent à l'origine au fond des flacons récepteurs. Le simple nettoyage des flacons récepteurs a ensuite permis d'éviter une même contamination pour le traçage suivant en juin 2000.

3.3.1.2. Analyse des éléments majeurs

3.3.1.2.1. La chromatographie ionique

Les anions F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- et SO_4^{2-} et les cations Li^+ , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} sont dosés par chromatographie ionique. Deux appareils très similaires sont utilisés pendant la thèse.

Jusqu'à fin 1998, les analyses de majeurs sont réalisées sur le système Dionex DX-300 situé au Laboratoire de Géochimie-Cosmochimie (Institut de Physique du Globe de Paris, 4, Place Jussieu, 75 252 Paris cedex 05). Le principe de fonctionnement de cet appareil et ses performances sont décrites par Louvat (1997) ainsi que par Le Borgne (1997).

Fin 1998, le Laboratoire Pierre Süe s'équipe d'un système Dionex DX-120 aux performances voisines du Dionex DX-300. C'est sur cet appareil que sont effectuées les analyses d'éléments majeurs à partir de 1999. L'appareil fonctionne en mode isocratique (le même éluant passe en continu sur la colonne), la force éluante est donc la même du début à la fin de la séparation. Le supprimeur est en mode de régénération externe, le liquide régénérant est de l'eau milliQ ($18,3 \text{ M}\Omega$) sous pression d'azote (mode anionique: 18 psi ; mode cationique: 15 psi). Les détails techniques de chaque chaîne d'analyse figurent dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7: Caractéristiques du matériel Dionex et conditions d'utilisation pour les analyses par chromatographie ionique

	Mode anionique	Mode cationique
Colonne	Ionpac® AS4A-SC 4x250 mm	Ionpac® CS12A 4x250 mm
<i>Phase stationnaire</i>	Support macroporeux éthylvinylbenzène / divinylbenzène - greffage: groupements alkyl quaternaires ammonium	Support macroporeux éthylvinylbenzène / divinylbenzène - greffage: carboxylates et phosphonates
Précolonne	Ionpac® AG4A-SC 4 x 50 mm	Ionpac® CG12A 4 x 50 mm
Suppresseur	ASRS® -ULTRA 4 mm	CSRS® - ULTRA 4 mm
Détecteur	Cellule conductimétrique CDM-3	CDM-3
Eluant	Solution Na ₂ CO ₃ / NaHCO ₃ (1,8m M / 1,7 mM)	Acide méthanesulfonique (MSA) 0,02 M
Débit	1,2 ml/mn	1 ml/mn
Pression	~1300 psi	~1000 psi

1 psi (pound-force/square inch)=6894,76 Pascal

Tableau 3.8: Répétabilité de la méthode d'analyse par chromatographie ionique sur le système Dionex DX-300 pour deux échantillons types analysés sur colonnes anionique (Pfl) et cationique (A). Les dix analyses sont effectuées le même jour dans les mêmes conditions opératoires à partir de la même droite de calibration.

Numero de passage	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
	Echantillon Pfl (en µmol/L)					Echantillon A (en µmol/L)					
1	7,41	1564	2,709	1518	646,5	2,40	609	0,0	14,7	496	1014
2	7,11	1558	2,822	1511	647,7	2,44	580	0,6	15,0	498	1007
3	7,31	1557	2,651	1526	645,0	2,38	574	0,8	14,8	494	1004
4	7,04	1584	2,813	1514	646,2	2,31	601	0,0	14,6	484	996
5	7,31	1554	2,646	1518	647,8	2,34	574	0,7	14,5	489	995
6	7,24	1543	2,766	1521	646,4	2,34	578	0,8	14,5	490	999
7	7,05	1552	2,653	1516	645,9	2,36	574	1,0	14,5	490	1000
8	7,29	1579	2,713	1522	643,6	2,33	574	1,3	14,8	489	1000
9	7,18	1574	2,770	1517	646,7	2,35	577	0,9	14,6	490	999
10	6,93	1554	2,794	1532	645,4	2,36	580	0,0	15,0	492	1037
Moyennes	7,18	1562	2,734	1520	646,1	2,36	582	0,7	14,7	491	1005
Ecart types	0,14	13	0,065	6	1,2	0,04	12	0,4	0,2	4	12

L'intégration des pics d'élution s'effectue à l'aide du logiciel Peaknet. Un exemple de chromatogramme est donné fig.3.15.

Pour quelques échantillons, des dilutions ont été nécessaires, les concentrations atteignant parfois la limite de saturation de l'appareil. La répétabilité de la méthode d'analyse est présentée dans le tableau 3.8 pour des échantillons possédant des teneurs en éléments majeurs représentatives de la nappe alluviale. Ces tests de répétabilité montrent que NH_4^+ n'est pas dosable aux teneurs où il se trouve dans les eaux de nappe à Sandillon.

La justesse de la méthode est vérifiée sur des géostandards d'eaux naturelles (SLRS-2 et SOUR-01) pour l'analyse des cations (tableau 3.9).

Les phosphates H_2PO_4^- sont à l'état de traces dans les eaux analysées. C'est pourquoi ils n'apparaissent pas dans les résultats d'analyse.

3.3.1.2.2. Le pH

Le pH est mesuré aussitôt après prélèvement et avant filtration pour éviter la hausse du pH liée à la perte de CO_2 au moment de la filtration. Le pH-mètre est calibré à l'aide de solutions étalons mises à la même température que l'échantillon. Pour l'établissement de profils verticaux de pH, on utilise une sonde pH/T WTW 196T de mesure in situ prêtée par le Laboratoire de Géochimie des Eaux de l'Université ParisVII.

3.3.1.2.3. L'alcalinité

Le calcul de l'alcalinité $\text{Alk}=[\text{HCO}_3^-]+[\text{CO}_3^{2-}]$ des échantillons filtrés s'effectue par dosage à l'acide chlorhydrique 0,02 M. Le point d'équivalence est déterminé par la méthode de Gran (1952).

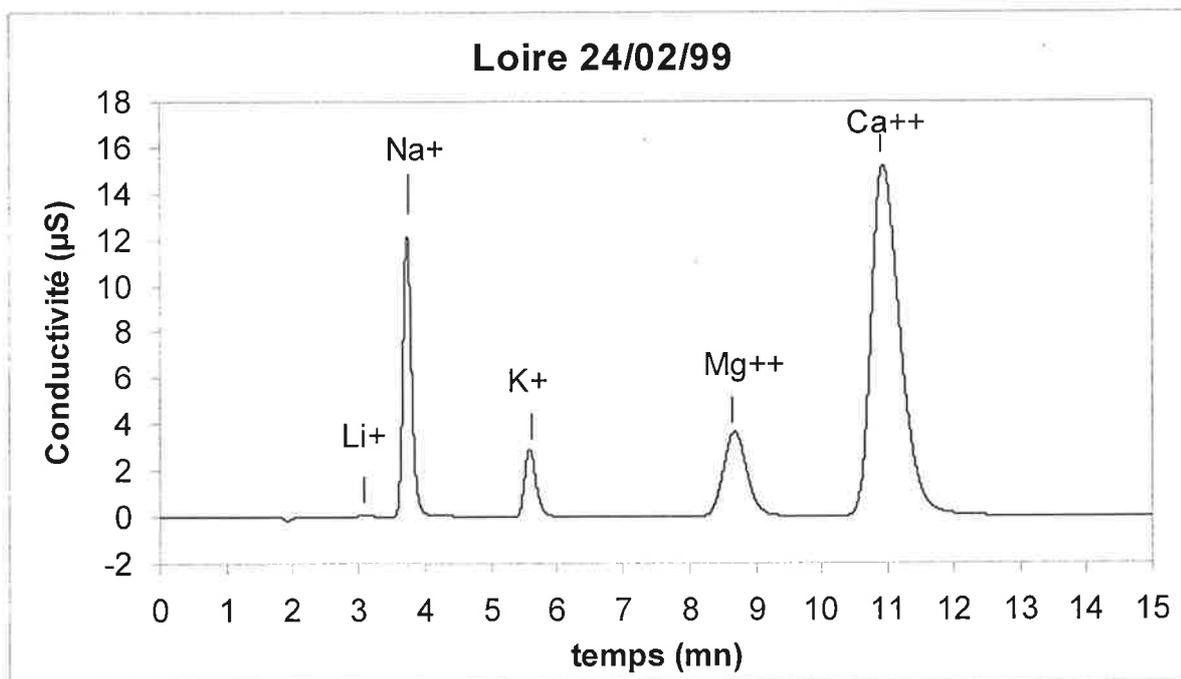


Figure 3.14: Exemple de chromatogramme pour l'analyse par chromatographie ionique des cations de l'eau de la Loire à Sandillon.

Tableau 3.9: Vérification de la justesse de l'analyse par chromatographie cationique sur les solutions standards SLRS-2 et SOUR-01

	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Date d'analyse
SLRS-2	0,03	1,85	0,72	1,59	5,63	févr-99
<i>valeurs certifiées</i>		<i>1,86+/-0,11</i>	<i>0,69+/-0,09</i>	<i>1,51+/-0,13</i>	<i>5,70+/-0,13</i>	
SOUR-01	0,03	44	6,5	20,7	34,4	févr-99
SOUR-01	0,02	41,2	6,31	20,1	33,4	mai-99
<i>valeurs certifiées</i>		<i>41,0+/-4,1</i>	<i>6,16+/-0,70</i>	<i>19,8+/-2,1</i>	<i>33,1+/-3,5</i>	

Le calcul de la somme des charges positives Σ^+ :

$$\Sigma^+ = [\text{Li}^+] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{NH}_4^+] + 2[\text{Mg}^{2+}] + 2[\text{Ca}^{2+}] + 10^{-\text{pH}}$$

et de la somme des charges négatives Σ^- :

$$\Sigma^- = [\text{F}^-] + [\text{Cl}^-] + [\text{Br}^-] + [\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + \text{Alk} + 10^{\text{pH}-14}$$

permet de calculer la balance ionique BI des échantillons.

$$\text{BI} = 2 \cdot 100 \cdot (\Sigma^+ - \Sigma^-) / (\Sigma^+ + \Sigma^-)$$

Les valeurs de BI sont généralement inférieures à 10%. Au delà, il faut prendre en compte dans la balance ionique des anions ou des cations supplémentaires. Le plus souvent, il y a un déficit de charges négatives pour les eaux riches en matière organique. La prise en compte des charges négatives de la matière organique dissoute permet d'équilibrer la balance.

L'indice de sursaturation des eaux vis à vis de la calcite (Michard, 1989) est donné par l'équation : $\Omega = [\text{CO}_3^{2-}] \cdot [\text{Ca}^{2+}] / K_s$ avec $K_s = 10^{-8,35}$ à 25°C.

3.3.1.2.4. Interprétation des teneurs en éléments majeurs mesurées dans les piézomètres

Il faut noter que les teneurs mesurées en nitrates et en sulfates dans les piézomètres peuvent être biaisées. En effet, le piézomètre lui-même peut perturber les teneurs naturelles puisque certaines bactéries consommatrices de nitrates s'y développent ce qui abaisse de manière considérable leur concentration. (Berner and Berner, 1987). De même, la décomposition de la matière organique en milieu anaérobie est une source d'hydrogène sulfureux H_2S qui s'oxyde en sulfates SO_4^{2-} lors de la remontée à l'air libre d'un échantillon d'eau de nappe souterraine. C'est pourquoi, pour l'étude des lois de mélange, des éléments

conservatifs comme le chlore ou le sodium seront préférés aux nitrates ou aux sulfates.

3.3.1.3. Analyse des lanthanides en solution

3.3.1.3.1. L'analyse par activation neutronique

Les premières analyses de lanthanides dans les eaux s'effectuaient par activation neutronique. Dans sa thèse (1977), Serge Bigot a mis au point une méthode d'analyse des lanthanides qu'il applique au dosage de La, Sm, Eu, Dy et Yb dans les eaux naturelles thermales ou superficielles. Trois méthodes sont développées en fonction des sensibilités de dosage requises.

La première méthode dite de « dosage rapide » consiste à déposer 200 μL de solution dans des coupelles d'aluminium de très grande pureté (99,9999%). Après évaporation de l'eau à l'étuve, les coupelles sont fermées puis irradiées sous flux de neutrons par groupe de 20 à 30. Chaque coupelle subit deux irradiations successives. La première dure 20 mn et permet le comptage des éléments de période courte (Dy, Eu). La seconde, d'une durée de 65 h, permet de doser les éléments de période longue (La, Sm, Yb). La sensibilité de la méthode (environ 2ppb) est limitée par les impuretés de l'aluminium qui interfèrent avec les éléments dosés. L'avantage de la méthode est de pouvoir analyser 50 à 100 échantillons par jour. Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux expériences de traçages artificiels où il est important d'analyser un grand nombre de prélèvements très vite de manière à ajuster les pas de prélèvement en fonction de la restitution observée et pour avoir des courbes de restitution les plus complètes possibles.

Les deux autres méthodes dites de « dosage sensible » et de « dosage de précision » développées par S. Bigot (1977) consistent à irradier 200 μL d'échantillon d'eau naturelle puis à diminuer le bruit de fond lié aux éléments interférant lors du comptage (alcalins, alcalino-terreux, halogènes, Ta) par fixations successives sur différentes phase solides. La

solution, débarrassée des éléments gênants, subit enfin une fixation sélective des lanthanides sur CaF_2 . Après centrifugation, le résidu solide est compté par spectrométrie gamma. Cette technique permet d'abaisser la limite de sensibilité à 100 ppt pour le dosage sensible et 2 ppt pour le dosage de précision. L'inconvénient de ces deux dernières méthodes est qu'elles nécessitent un traitement chimique lourd.

3.3.1.3.2. L'analyse par ICP-MS

La découverte de l'ICP-MS (Inductively Coupled Plasma with a Mass Spectrometer) a révolutionné l'analyse des lanthanides en solution. Avec cette technique, tous les lanthanides sont analysés simultanément. Les échantillons d'eaux naturelles filtrées et acidifiées sont analysés tels quels sans aucune autre préparation que l'ajout de standards internes. L'analyse d'un échantillon dure environ 7 mn ce qui permet de doser une soixantaine d'échantillons par jour. La limite de détection est de l'ordre de 10 ppt pour les lanthanides. Ce seuil est généralement suffisant pour doser des lanthanides résultant d'un traçage artificiel. Par contre, la mesure précise des teneurs naturelles en solution dans les eaux de Sandillon nécessite le plus généralement une pré-concentration des échantillons avant analyse. Cette concentration s'effectue habituellement sur colonne échangeuse d'ions (Pin et Al, 1994). Cependant, nous avons également concentré quelques échantillons d'eau de Loire et de nappe d'un facteur 5 à 10, par évaporation à l'évaporateur rotatif, la solution étant évaporée dans un ballon en téflon. La précipitation d'espèces en solution n'a pas été observée et les solutions évaporées ont été acidifiées à $\text{pH}=2$ immédiatement après l'opération afin d'empêcher d'éventuelles précipitations et co-précipitations.

C'est l'absence, en règle générale, de préparation chimique longue des échantillons, associée à la limite de détection suffisamment basse et à la rapidité de l'analyse, qui ont

déterminé le choix de l'analyse par ICP-MS comme technique de dosage des lanthanides dans les eaux naturelles tracées.

Dans ce travail, les lanthanides en solution sont analysés avec un appareil ICP-MS VG PlasmaQuad II+ localisé au Laboratoire Pierre Süe (Bât 639 - CEA Saclay - 91191 Gif sur Yvette cedex)

La méthode de dosage choisie est la calibration externe (étalonnage par des solutions de concentrations connues et croissantes). Les solutions étalons sont préparées à l'aide d'une solution standard commerciale (SPEX® Chemical ou AccuTrace™) multi-élémentaire à 10 ppm dans HNO₃ 5%. Deux gammes de 5 solutions étalons sont préparées : 0,02 – 0,05 – 0,1 – 0,2 – 0,5 ppb pour les échantillons peu concentrés en lanthanides et 0,5 – 1 – 2 – 5 – 10 ppb pour les échantillons plus concentrés. Les performances de l'ICP-MS étant les meilleures dans les basses concentrations, les solutions trop riches en traceurs sont systématiquement diluées. Dans chaque échantillon ou solution étalon, deux éléments encadrant par leur masse la famille des lanthanides sont rajoutés comme standards internes (Vanhaecke et Al., 1992) à la concentration 10 ppb. Ce sont l'indium (In115) et le rhenium (Re185), éléments à teneurs très faibles dans les eaux naturelles. Ils permettent de corriger les dérives du signal au cours d'une série d'analyses. L'analyse des lanthanides d'une solution dure 1mn10. Chaque mesure est répétée 3 fois, puis le système d'injection est rincé environ 3 mn à l'aide d'une eau de rinçage déminéralisée et acidifiée à pH=2. Le dosage d'une solution dure donc 7 mn environ.

Les isotopes de chaque lanthanide à doser (tableau 3.10) sont choisis en fonction de trois critères :

1/ Leurs abondances isotopiques :

Les isotopes les plus abondants donnent un signal plus important. Dans la mesure du possible, plusieurs isotopes sont sélectionnés parmi les plus abondants. La concentration obtenue sur chaque isotope doit être la même à l'incertitude de la mesure près. Le résultat final est la moyenne des concentrations pondérée des erreurs sur chaque isotope.

2/ Les interférences avec les éléments voisins de mêmes masses (interférences isobariques) ou de masses voisines (tableau 3.11).

Ex1 : Sm150 (abondance: 7,4%) et Nd150 (abondance: 5,6%)

Ex2 : Débordement du Ce140 sur Pr141

3/ Les interférences avec les oxydes et hydroxydes de baryum et des lanthanides (Ln) légers (interférences spectroscopiques). Les oxydes (LnO, BaO) et hydroxydes (LnOH, BaOH) se forment dans le plasma. La fraction d'oxyde formé dépend des conditions expérimentales (distance de la torche aux cônes, débit d'argon au nébuliseur) et de l'élément (Vaughan and Horlick, 1986). La correction des interférences est nécessaire pour des concentrations supérieures au ppb. Autrement, le biais induit est de l'ordre de l'incertitude de la mesure. Les coefficients d'interférence varient d'une expérience à l'autre et il faut les calculer pour chaque série d'analyses. Pour leur calcul on utilise des solutions mono-élémentaires à la concentration de l'étalon le plus concentré. Pour le baryum, on utilise une solution 100 ppb, ce qui correspond aux teneurs moyennes dans les échantillons d'eau de la nappe de Sandillon.

Un exemple de coefficients d'interférence calculés lors d'une série d'analyse est donné dans le tableau 3.11. Seules les solutions riches en europium et relativement pauvres en baryum (ex : solutions de lavage des argiles par l'EDTA) autorisent le dosage de cet élément dont les deux masses 151 et 153 interfèrent avec les oxydes et hydroxydes de baryum.

Tableau 3.10: Liste des isotopes choisis pour l'analyse des lanthanides par ICP-MS

Elément	Masse		Elément	Masse
Ba	135		Tb	159
La	139		Dy	161, 162, 163
Ce	140		Ho	165
Pr	141		Er	166, 167
Nd	143, 145, 146		Tm	169
Sm	147, 149, 152		Yb	171, 172, 173
Eu	151,153		Lu	175
Gd	157		Th	232

Tableau 3.11: Exemple de correction des interférences pour l'analyse des lanthanides dans les eaux de nappe alluviale. Procédure du 4/9/98.

La colonne de gauche indique les intensités corrigées (coups/sec) pour les éléments subissant une interférence. Les corrections sont calculées à partir des intensités I non corrigées ou déjà corrigées (en gras) soustraites du bruit de fond moyen.

Intensité Corrigée		Coeff. d'interf		Coeff. d'interf		Type d' interférence	
						Spectroscopique	Isobarique/ Masse voisine
Pr141=	I141-	0,003	× (I140-127)				Ce140
Eu151=	I151-	0,0014	× (I135-99)-	0,04	× (I147-96)	BaO, BaOH	Sm150,Sm152
Gd157=	I157-	0,0014	× (I140-127)-	0,0178	× (Pr141 -98)	CeOH, PrO	
Sm152=	I152-	0,0025	× (I135-99)-	0,0127	× (Gd157 -111)	BaO, BaOH	Gd152
Eu153=	I153-	0,0038	× (I135-99)-	0,043	× (I147-96)		Sm152,Sm154
Tb159=	I159-	0,023	× (I143-77)-	0,029	× (I157-111)	NdO, NdOH	Gd158,Gd160
Dy161=	I161-	0,016	× (I143-77)			NdO, NdOH	
Dy162=	I162-	0,022	× (I143-77)			NdO, NdOH	
Dy163=	I163-	0,012	× (I147-96)			SmO	
Ho165=	I165-	0,008	× (I147-96)			SmO, SmOH	
Er166=	I166-	0,011	× (I143-77)-	0,004	× (I147-87)	NdO, SmO(H)	
Yb171=	I171-	0,014	× (Gd157 -111)			GdO, GdOH	
Yb172=	I172-	0,018	× (Gd157 -111)			GdO, GdOH	
Yb173=	I173-	0,014	× (Gd157 -111)			GdO, GdOH	
Lu175=	I175-	0,014	× (Tb159 -128)			TbO	

4/ Les isotopes sont enfin choisis en fonction des traceurs utilisés. Par exemple, les deux isotopes les plus abondants du gadolinium Gd156 (20,5%) et Gd158 (24,9%) ne sont pas sélectionnés à cause des interférences isobariques avec Dy156 et Dy158 dont les abondances ne sont que de 0,1%. En effet, le dysprosium étant utilisé comme traceur, les rapports de concentrations entre Dy et Gd sont tels que les interférences isobariques ne sont pas corrigeables.

Les solutions géostandards disponibles dans le commerce n'étant pas certifiées pour les lanthanides, l'exactitude d'une série de mesures est contrôlée par analyse des solutions étalons tous les dix échantillons (tableau 3.12). De plus, la reproductibilité de la méthode est évaluée en repassant quelques échantillons analysés lors d'une manipulation précédente.

Tableau 3.12 : Exemple de calcul d'incertitudes sur les étalons (procédure du 23-11-99) et répétabilité de la méthode par passage des étalons en aveugle pendant l'analyse.

Concentrations en ppb.

On ne considère pas Sm152 qui interfère avec BaO, ni Dy163 qui interfère avec SmO. L'incertitude calculée sur chaque isotope d'un élément est supérieure à l'incertitude moyenne calculée sur les deux isotopes.

SAND 23.11.99		La	Sm147	Sm149	Dy161	Dy162	Sm _{mov}	Dy _{mov}
Etalons	<i>Concentrations exactes</i>							
	et1ppb	0,98	0,98	0,98	0,96	0,96	0,98	0,96
	et2ppb	1,94	1,93	1,93	1,89	1,89	1,93	1,89
	et5ppb	4,91	4,89	4,89	4,80	4,80	4,89	4,80
	et10ppb	9,84	9,78	9,78	9,60	9,60	9,78	9,60
	et15ppb	14,7	14,6	14,6	14,4	14,4	14,6	14,4
Etalons	<i>Concentrations recalculées après étalonnage</i>							
	et1ppb	0,98	0,99	1,02	0,90	0,93	1,01	0,92
	et2ppb	1,98	1,97	2,00	1,85	1,90	1,99	1,88
	et5ppb	4,95	4,89	4,97	4,80	4,83	4,93	4,82
	et10ppb	9,81	9,76	9,78	9,57	9,61	9,77	9,59
	et15ppb	14,7	14,6	14,6	14,4	14,4	14,6	14,4
Etalons	<i>Différences $C_{exacte} - C_{recalculée}$</i>							
	et1ppb	0,00	0,01	0,04	0,06	0,03	0,02	0,04
	et2ppb	0,04	0,04	0,07	0,04	0,01	0,05	0,01
	et5ppb	0,04	0,00	0,08	0,00	0,03	0,04	0,01
	et10ppb	0,03	0,02	0,00	0,03	0,01	0,01	0,01
	et15ppb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etalons	<i>Incertitude des mesures = $1,771\sigma$</i>							
	et1ppb	0,03	0,04	0,05	0,07	0,05	0,03	0,04
	et2ppb	0,04	0,05	0,06	0,09	0,07	0,04	0,05
	et5ppb	0,06	0,08	0,10	0,14	0,10	0,06	0,08
	et10ppb	0,10	0,12	0,15	0,21	0,15	0,09	0,12
	et15ppb	0,13	0,16	0,19	0,28	0,20	0,12	0,16
Standards passés en aveugle	std1ppb	0,96	0,97	1,04	0,89	0,93	1,01	0,91
	std5ppb	4,91	4,87	4,89	4,73	4,82	4,88	4,78
	std5ppb-bis	4,89	4,87	4,87	4,74	4,78	4,87	4,76
	std10ppb	9,77	9,84	9,89	9,65	9,81	9,87	9,73
Différences aux valeurs exactes	std1ppb	0,02	0,01	0,06	0,07	0,03	0,02	0,05
	std5ppb	0,00	0,02	0,00	0,07	0,02	0,01	0,02
	std5ppb-bis	0,02	0,02	0,02	0,06	0,02	0,02	0,04
	std10ppb	0,07	0,06	0,11	0,05	0,21	0,09	0,13

3.3.1.3.3. Calcul de l'erreur sur une analyse par ICP-MS

L'erreur analytique dépend de l'intensité du signal et de la concentration. Elle est en général inférieure à 4% pour le dysprosium, et inférieure à 10% pour le lanthane et le samarium. La méthode de calcul de l'erreur est décrite précisément dans la fiche 1-12 de l'ouvrage de Michèle Neuilly & CETAMA (1996) intitulé "Précision des dosages de traces". La théorie de ce calcul est expliquée par le même auteur dans l'ouvrage "Modélisation et estimation des erreurs de mesure" (1993). Une présentation de cette théorie appliquée à l'analyse par ICP-MS figure en annexe 15.

En résumé, l'erreur sur une mesure tient compte de l'incertitude sur l'étalonnage et de l'incertitude sur la mesure elle-même. Chaque échantillon ou étalon est mesuré 3 fois. La concentration est la moyenne des 3 mesures. Pour les éléments possédant 2 isotopes, la moyenne et l'écart type σ sont pondérés des incertitudes sur chaque isotope ce qui diminue l'incertitude du résultat (tableau 3.12). Exemple :

$$[\text{Sm}] = \frac{[\text{Sm}147]/\sigma^2_{\text{Sm}147} + [\text{Sm}149]/\sigma^2_{\text{Sm}149}}{(1/\sigma^2_{\text{Sm}147} + 1/\sigma^2_{\text{Sm}149})}$$

$$\sigma^2_{\text{Sm}} = 1 / (1/\sigma^2_{\text{Sm}147} + 1/\sigma^2_{\text{Sm}149})$$

Le résultat s'écrit sous la forme $C_0 \pm t_{0,975} \sigma$ où $t_{0,975}$ est donné par la table de Student (annexe 15) avec ν degrés de liberté. $\nu = N - r$, N étant le nombre de couples utilisés pour l'étalonnage et r le nombre de paramètres de la courbe d'étalonnage. Dans notre cas c'est une droite donc $r=2$. Chaque étalon et chaque échantillon est analysé 3 fois et on dispose de 5 étalons. Donc $N=15$ et $\nu=13$. La table de Student donne $t_{0,975}=1,771$.

3.3.2 Les sédiments

Lors de la réalisation des traçages dans les alluvions, une partie des traceurs s'est fixée sur les argiles. C'est ce qui a motivé le dosage des lanthanides dans ces sédiments. Cependant, la grande hétérogénéité en composition de ces sédiments a nécessité l'analyse des autres éléments afin de rechercher un élément caractéristique des argiles auquel les teneurs en lanthanides dans les alluvions peuvent être normalisées. Ce point est détaillé dans le chapitre 2. Dans ce paragraphe, seule la méthode de préparation et d'analyse des échantillons solides est présentée.

L'ICP-MS est certes plus adaptée au dosage des éléments traces en solution dans les eaux naturelles que l'activation neutronique, mais cette dernière technique l'emporte pour l'analyse globale des éléments traces dans les solides (Joron et Al., 1997). En effet, la préparation des échantillons est très simple (broyage) et l'activation neutronique permet d'analyser, après une ou deux irradiations, un grand nombre d'éléments dont la plupart des lanthanides. Des essais de mise en solution des sédiments broyés ont été réalisés au Laboratoire Pierre Süe. Mais étant donnée l'hétérogénéité minéralogique des sédiments, il a été difficile de développer un protocole simple permettant la mise en solution complète de la totalité des minéraux présents dans les sédiments alluvionnaires. Les résultats des analyses par ICP-MS des sédiments de la Loire mis en solution selon le protocole donné en annexe 16 comparés aux résultats des analyses par activation neutronique des mêmes sédiments ont révélé une mise en solution incomplète des alluvions (tableau 3.13). La mise en solution du géostandard ACE a été réussie si l'on compare les résultats aux valeurs certifiées fournies par Geostandards Newsletter.

Tableau 3.13 : Comparaison des méthodes ICP-MS et activation neutronique pour l'analyse du géostandard ACE et de l'échantillon I114-500 (sédiments de la Loire prélevés dans le puits d'injection pendant l'expérience de traçage alluvionnaire). Concentrations (ppm) des éléments dans la roche.

	A C E			I114 -500	
	<i>ICP-MS</i>	<i>INAA</i>	<i>Valeur certifiée</i>	<i>ICP-MS</i>	<i>INAA</i>
Ba	52.2±2.2	59±3	55±5	422±7.3	513±7
La	46.9±5.3	57.9±0.9	59±2	111±5	132.2±1.6
Ce	144±7.9	157.8	154±4.7	94.2±4.7	119±1
Pr	18.3±0.3		22.2	9.0±0.1	
Nd	80.5±8.5	88	92±6	35.1±3.9	50.4
Sm	23.5±1.4	24.68±0.05	24.2±0.8	42.6±2.2	52.96±0.09
Eu	1.36±0.07	2.19±0.12	2±0.09	0.98±0.04	2.48±0.17
Gd	23.3±1.2		26±1.5	5.7±0.3	
Tb	4.4±0.1	4.28	4.8±0.2	0.76±0.04	0.95±0.02
Dy	27.7±3.5	24.4±1	29±1.5	17.4±2.1	18.3±0.7
Ho	5.8±0.15		6.5±0.5	0.84±0.05	
Er	16.0±0.5		17.7±1.2	2.2±0.1	
Tm	2.4±0.1		2.6±0.24	0.23±0.04	
Yb	16.0±1.1	17.8±0.3	17.4±0.5	1.7±0.2	2.83±0.1
Lu	2.2±0.1		2.45±0.11	0.25±0.03	

3.3.2.1. Nature des échantillons et modes de prélèvement

Les sédiments analysés sont de nature différente :

-Le tout venant récolté dans les godets de l'excavatrice ou directement au sol sur les zones découvertes ou en cours d'extraction.

-L'argile ramassée sur la tarière lors des sondages de reconnaissance.

-Des blocs de calcaire ramassés dans le lit de la Loire ou sur la carrière.

-Les sédiments présents au fond des piézomètres sont récoltés par filtration de 500 ml d'eau boueuse sur des filtres en acétate de cellulose de porosité 0,45 μm . Après filtration, les sédiments sont détachés des filtres puis séchés environ une semaine à température ambiante et à l'abri de la poussière pour éviter les contaminations.

3.3.2.2. Préparation des échantillons

La méthode de préparation des échantillons est déterminée par la technique d'analyse utilisée : l'activation neutronique. Cette méthode nécessite une faible quantité de roche et par conséquent, l'échantillon à analyser doit être le plus représentatif possible. C'est pourquoi les sédiments sont finement broyés .

Les sédiments à analyser sont séchés puis broyés dans des creusets en agate jusqu'à une granulométrie inférieure à 125 μm . La capacité moyenne des creusets étant de 10 g, lorsqu'une grande quantité d'échantillon en grains a été prélevée, l'échantillonnage d'une fraction représentative de la totalité de l'échantillon s'effectue de la façon suivante :

L'ensemble de l'échantillon de départ est divisé en deux tas qui sont construits par ajout alternatif d'une petite quantité d'échantillon de départ. L'un des tas ainsi formé sert à la construction de deux nouveaux tas plus petits selon le même principe, et ainsi de suite jusqu'à ce que le tas soit d'une taille acceptable pour le creuset en agate.

Le broyage de la totalité de l'échantillon introduit dans le creuset est vérifié par tamisage à 125 μm . Ce tamisage permet également d'homogénéiser la poudre obtenue.

Seulement 80 à 100 mg de poudre sont finalement analysés.

L'irradiation de plusieurs navettes contenant des poudres d'un même échantillon ont permis de vérifier l'homogénéité de ces poudres. Les échantillons étudiés sont TVB fin (fraction de tout venant de granulométrie inférieure à 125 μm), TVH, GB, GH (tout venant non trié). Les tests d'homogénéité de ces échantillons sont présentés dans le tableau 3.14. Ils montrent l'homogénéité des poudres obtenues par tamisage.

3.3.2.3. Analyse des sédiments par activation neutronique

Les poudres à analyser sont emballées dans des feuilles d'aluminium. Une douzaine d'échantillons sont rassemblés par navette en cadmium ou en plastique qui sont envoyées au cœur des réacteurs.

En fonction des éléments à doser, les irradiations s'effectuent soit dans des navettes en plastique sous flux de neutrons thermiques (durée d'irradiation=30 s) sur le réacteur Orphée, soit dans les navettes en cadmium sous flux de neutrons épithermiques (durée d'irradiation=1 nuit) sur le réacteur Osiris. Ces réacteurs d'étude sont localisés sur le centre d'étude de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette. Après leur irradiation, les navettes sont stockées dans une piscine pendant $\frac{1}{2}$ h pour les irradiations de 30 s sous Orphée, et une semaine pour les irradiations d'une nuit sur Osiris, le temps que la radioactivité des éléments à demi-vies courtes diminue et passe en-dessous de la valeur maximale autorisée.

Le calcul des concentrations s'effectue à partir de géostandards irradiés avec les échantillons. La composition des géostandards est donnée dans l'annexe 17. L'exactitude de l'expérience est vérifiée à partir d'autres géostandards également intercalés entre les échantillons.

Les éléments dosés sur chaque type de réacteur, les temps d'irradiation, les temps au bout desquels les comptages sont réalisés, les temps de comptage et les géostandards utilisés pour le calcul des teneurs sont donnés dans l'annexe 17.

L'erreur fournie dans les tableaux de résultats (annexe 17) est l'erreur liée à la statistique de comptage plus l'erreur liée à la dispersion sur les géostandards.

Tableau 3.14 : Homogénéité des poudres obtenues par broyage et tamisage.

Les poudres ont été analysées dans deux navettes différentes : J32 et J33. On dispose de deux échantillons pour les poudres broyées et tamisées TVH, GH et GB et de trois échantillons pour la poudre TVB fin obtenue par simple tamisage du tout venant sec à 125 µm. Les teneurs sont données en ppm.

Echantillon	Sm	σ	Mo	σ	U	σ	Th	σ	Au	σ	As	σ
TVB fin J32	11,756	0,024	2,4	0,15	6,904	0,059	29,19	0,031	6,41	0,53	59,82	0,45
TVB fin J32	12,683	0,025	2,62	0,16	7,47	0,064	27,45	0,043	6,57	0,55	65,22	0,49
TVB fin J33	13,109	0,026	3,37	0,18	8,466	0,068	31,39	0,054	5,91	0,49	59,64	0,42
CV (%)	4,5	0,1	14,8	3,3	8,5	0,5	5,5	0,1	4,5	4,8	4,2	0,4
TVH J32	2,2471	0,0056	0,416	0,051	1,73	0,02	5,646	0,009	1,07	0,16	13,56	0,12
TVH J33	2,178	0,0065	0,347	0,06	1,661	0,02	6,244	0,011	0,89	0,21	10,41	0,11
CV (%)	1,6	0,2	9,0	10,2	2,0	0,8	5,0	0,1	9,2	13,0	13,1	0,7
GH J32	2,2057	0,0066	0,459	0,048	1,757	0,02	5,654	0,009	0,74	0,16	9,545	0,091
GH J33	2,118	0,0064	0,391	0,058	1,803	0,022	6,136	0,017	1,13	0,19	9,78	0,12
CV (%)	2,0	0,2	8,0	8,7	1,3	0,8	4,1	0,1	20,9	13,1	1,2	0,8
GB J32	1,7316	0,0052	0,339	0,045	1,678	0,019	5,605	0,009	0,54	0,13	8,79	0,084
GB J33	1,563	0,0047	0,338	0,055	1,577	0,019	5,151	0,009	0,49	0,17	8,89	0,11
CV (%)	5,1	0,2	0,1	10,3	3,1	0,8	4,2	0,1	4,9	20,1	0,6	0,8
Echantillon	W	σ r	Br	σ	Ta	err	Na (%)	σ	La	σ	Ce	σ
TVB fin J32	3,5	0,29	2,62	0,18	2,885	0,012	0,764	0,027	73,12	0,93	172,6	0,8
TVB fin J32	4,59	0,42	4,34	0,16	3,101	0,018	0,898	0,034	76,88	0,97	165,5	1,1
TVB fin J33	4,56	0,21	3,85	0,11	3,057	0,021	0,782	0,016	81,18	0,86	190	1
CV (%)	12,0	3,7	20,1	2,2	3,1	0,3	7,3	1,6	4,3	0,7	5,8	0,3
TVH J32	2,647	0,072	0,602	0,033	0,734	0,005	0,894	0,014	13,3	0,22	28,77	0,25
TVH J33	2,185	0,091	0,523	0,038	0,658	0,005	0,879	0,015	13,97	0,25	29,69	0,21
CV (%)	9,6	2,3	7,0	4,4	5,4	0,5	0,8	1,2	2,5	1,2	1,6	0,6
GH J32	1,012	0,056	0,633	0,033	0,641	0,005	0,756	0,013	12,72	0,22	26,91	0,23
GH J33	1,051	0,084	0,688	0,043	0,616	0,006	0,784	0,014	13,31	0,25	27,52	0,25
CV (%)	1,9	4,5	4,2	4,0	2,0	0,6	1,8	1,2	2,3	1,3	1,1	0,6
GB J32	0,765	0,047	0,449	0,027	0,435	0,004	0,713	0,012	10,43	0,19	21,19	0,2
GB J33	0,678	0,062	0,48	0,036	0,502	0,004	0,736	0,013	9,34	0,2	19,41	0,16
CV (%)	6,0	5,2	3,3	4,7	7,2	0,6	1,6	1,2	5,5	1,4	4,4	0,6
Echantillon	Yb	σ	Cr	σ	Hf	σ	Ba	σ	Sr	σ	Nd	σ
TVB fin J32	3,54	0,22	123	16	10,35	0,067	624,1	3	179,7	2,9	59,5	3,5
TVB fin J32	4,49	0,087	132	16	8,963	0,076	638,9	4,9	198,1	4,6	68,8	6,6
TVB fin J33	3,95	0,072	139	27	13,07	0,11	648,4	5,3	188,5	4,7	74,4	6,7
CV (%)	9,7	1,3	5,0	7,9	15,8	0,4	1,6	0,4	4,0	1,2	9,1	4,2
TVH J32	0,809	0,019	23,4	2,7	1,987	0,021	689,9	3,3	132,1	1,9	11,6	1,3
TVH J33	0,819	0,016	39,6	5,1	1,863	0,02	671,5	3,1	126,4	1,9	10,8	1,2
CV (%)	0,6	1,5	25,7	7,6	3,2	0,8	1,4	0,3	2,2	1,0	3,6	7,9
GH J32	0,733	0,018	20,6	2,3	1,75	0,018	629,9	3	114,7	1,6	9,2	1,2
GH J33	0,765	0,018	24,9	3,9	1,83	0,024	644,3	3,9	115,6	2,2	11,3	1,7
CV (%)	2,1	1,7	9,5	8,7	2,2	0,8	1,1	0,4	0,4	1,1	10,2	9,6
GB J32	0,691	0,017	9,1	1,3	1,823	0,018	637,1	3	100,9	1,5	9,6	1,2
GB J33	0,672	0,014	9,3	2,1	1,795	0,018	648,9	3	101,5	1,5		
CV (%)	1,4	1,6	1,1	12,0	0,8	0,7	0,9	0,3	0,3	1,0	0,0	12,5

Echantillon	Ag	σ	Zr	σ	Cs	σ	Ni	σ	Fe (%)	σ	Tb	σ
TVB fin J32	0,09	0,016	390	12	31,28	0,089	82,93	0,94	5,912	0,013	1,27	0,011
TVB fin J32			363	15	30,55	0,087	82,3	1,1	5,968	0,013	1,322	0,014
TVB fin J33	0,087	0,023	554	24	31,13	0,097	90,2	1,4	6,085	0,046	1,457	0,018
CV (%)	1,7	14,8	19,4	2,0	1,0	0,2	4,2	0,7	1,2	0,2	5,8	0,6
TVH J32	0,0468	0,0065	68,8	3,8	5,781	0,022	11,86	0,23	0,899	0,0029	0,219	0,0029
TVH J33			73,8	4,4	5,761	0,024	12,08	0,26	0,89	0,0076	0,233	0,0033
CV (%)	0,0	13,9	3,5	4,0	0,2	0,3	0,9	1,4	0,5	0,3	3,1	1,0
GH J32	0,0721	0,0071	60,7	3,4	5,634	0,022	11,39	0,22	0,756	0,0025	0,216	0,0027
GH J33			60,3	4,9	5,729	0,024	11,95	0,31	0,773	0,0074	0,222	0,0038
CV (%)	0,0	9,8	0,3	4,6	0,8	0,3	2,4	1,5	1,2	0,3	1,4	1,0
GB J32	0,0448	0,0052	66,8	3,3	4,754	0,018	5,768	0,059	0,473	0,002	0,171	0,0023
GB J33	0,0592	0,0062	67,3	3,8	4,848	0,019	6,34	0,17	0,48	0,0046	0,167	0,0025
CV (%)	13,8	7,7	0,4	3,7	1,0	0,3	4,7	0,9	0,7	0,4	1,3	1,0

Echantillon	Sc	σ	Rb	σ	Zn	σ	Co	σ	Eu	σ	Sb	σ
TVB fin J32	17,92	0,054	197,06	0,85	149,9	3,7	26,29	0,098	2,968	0,076	3,033	0,033
TVB fin J32	18,283	0,074	196,7	1,2	152,2	4,5	25,23	0,14	2,479	0,083	2,873	0,04
TVB fin J33	18,753	0,091	201,3	1,4	146,3	5,2	25,93	0,16	2,332	0,098	2,991	0,045
CV (%)	1,9	0,2	1,1	0,3	1,6	1,7	1,7	0,3	10,5	1,9	2,3	0,7
TVH J32	2,622	0,013	136,06	0,72	23,05	0,88	4,308	0,038	0,765	0,027	0,762	0,012
TVH J33	2,608	0,015	134	0,78	19,14	0,88	4,301	0,039	0,672	0,029	0,752	0,012
CV (%)	0,3	0,4	0,8	0,4	9,3	2,9	0,1	0,6	6,5	2,8	0,7	1,1
GH J32	2,267	0,011	132,89	0,71	17,62	0,71	3,84	0,034	0,649	0,023	0,63	0,011
GH J33	2,349	0,018	137,66	0,94	17,47	0,99	3,93	0,046	0,614	0,033	0,652	0,014
CV (%)	1,8	0,4	1,8	0,4	0,4	3,3	1,2	0,7	2,8	3,0	1,7	1,3
GB J32	1,3689	0,0083	132,05	0,64	10,29	0,51	2,55	0,21	0,605	0,023	0,548	0,0096
GB J33	1,3948	0,0095	134,76	0,72	10,39	0,56	2,604	0,026	0,561	0,025	0,577	0,0098
CV (%)	0,9	0,5	1,0	0,4	0,5	3,6	1,0	1,0	3,8	2,9	2,6	1,2

LEGENDE :

	X	σ
J32	a1	σ_1
J33	a2	σ_2
CV(%)	CVhét	CV σ

X=élément considéré ; σ =écart-type sur l'analyse
a1=concentration (ppm) obtenue sur la navette J32
a2=concentration (ppm) obtenue sur la navette J33
CVhét=coefficient de variation (%) entre les 2
navettes lié à l'hétérogénéité de la poudre obtenue
par broyage
CV σ =coefficient de variation (%)
 $CV\sigma = 200/(a1+a2)/\sqrt{(1/\sigma_1^2+1/\sigma_2^2)}$

Pour l'ensemble des éléments, on obtient un coefficient de variation inférieur à 15% sauf pour 4 éléments : le chrome et l'or dont l'analyse est peu précise, le brome et le zirconium dans la poudre TVB non broyée.

CHAPITRE 4

LES METHODES DE TRAÇAGE

Les observations géochimiques et physiques faites à partir de l'observatoire de Sandillon permettent de mettre en évidence l'absence ou l'existence de circulations souterraines qui doivent être confirmées ensuite par des expériences de traçage artificiel. Deux types de traceurs chimiques sont utilisés dans ces expériences.

Pour prouver l'existence d'une connexion entre deux points et calculer la vitesse d'écoulement de l'eau entre ces deux points, il suffit d'utiliser un traceur inerte vis-à-vis du milieu traversé. Il existe une large panoplie de ce type de traceurs dits « conservatifs » dont les caractéristiques sont décrites dans les deux premiers paragraphes de cette partie.

Pour étudier le couplage existant entre le transfert des éléments chimiques et les interactions avec le milieu qu'ils traversent, on choisit d'utiliser une deuxième gamme de traceurs : les complexes EDTA de lanthanides dont les propriétés sont décrites dans le troisième paragraphe. Le quatrième paragraphe fournit le support théorique de l'interprétation des traçages en milieu karstique.

4.1. Les traceurs classiques

Afin de connaître les directions et vitesses d'écoulement, les hydrogéologues ont pendant longtemps cherché à mettre au point des traceurs « parfaits », c'est-à-dire des espèces chimiques (atomes, molécules) se déplaçant comme le volume d'eau qu'elles marquent. Concrètement, un bon traceur artificiel est une espèce chimique quasi absente du milieu

naturel donc facilement détectable lorsqu'on l'injecte, qui n'interagit pas ou de façon très négligeable avec l'encaissant, qui n'est pas nocive pour l'environnement, qui s'analyse facilement et d'un prix abordable.

De nombreux ouvrages et publications (Käss, 1994 ; Gaspar, 1987) sont consacrés à la description et au mode d'emploi des traceurs les plus utilisés. Parmi ces traceurs, citons en particulier :

-Les isotopes de l'hydrogène : le tritium (^3H) ou le deutérium (D, ^2H) qui sont des traceurs presque parfaits. Faisant partie de la molécule d'eau, ces marqueurs se déplacent comme l'eau. Cependant, pour des questions de respect de l'environnement, il n'est plus permis d'utiliser le tritium. Quant à l'eau lourde (HDO), son utilisation coûte très cher en analyse et en quantité de traceur à préparer.

-Les sels : NaCl, LiBr, KI. Les cations peuvent être dosés ainsi que les anions. Le bruit de fond naturel en K^+ , Na^+ et Cl^- est souvent très important, c'est pourquoi I^- , Br^- et Li^+ sont beaucoup plus utilisés. Les teneurs naturelles maximales en ces ions, mesurées sur le site de Sandillon, sont présentées dans le tableau 4.1. Les iodures n'ont pas été dosés mais leur bruit de fond naturel est en général très bas ($<10^{-9}$ g/ml). Pour les autres éléments majeurs, le bruit de fond maximal est élevé en raison de l'épandage d'engrais.

Tableau 4.1 : Concentrations maximales ($\mu\text{mol/L}$) en sels pouvant éventuellement être utilisés comme traceurs dans les eaux présentes autour de la carrière de Sandillon.

Les eaux superficielles sont celles de la Loire et des lacs présents au niveau et autour de la carrière. Les maxima sont données pour la période de novembre 1996 à mai 1999.

Aquifère	Cl^-	Br^-	Li^+	Na^+	K^+
Eaux superficielles	803	1,4	4,9	895	313
Nappe alluviale	2467	4,2	4,8	2363	300
Nappe calcaire	1565	2,7	4,3	1086	99

-Les colorants : Parmi les nombreuses substances utilisables comme traceurs, les substances fluorescentes connaissent la faveur particulière des expérimentateurs. Leur très basse limite de détection, leur coût modéré et leur absence de toxicité aux faibles concentrations (Molinari et Rochat, 1978) sont parmi les qualités qui les font préférer à d'autres. La fluorescéine et ses dérivés xanthéniques (rhodamines, amidorhodamines, sulforhodamines, éosine, érythrosine) sont les plus utilisés. Signalons également l'utilisation des traceurs dérivés du naphthalène (acide amino-G, naphthionate de sodium) qui fluorescent dans le violet et qui sont quasi incolores. Ces derniers ont une longueur d'onde d'émission dans le domaine de fluorescence de la matière organique naturelle dissoute ce qui présente l'inconvénient d'un bruit de fond naturel élevé. Suite aux études de toxicité (Smart, 1977 ; Meus, 1996) réalisées sur la plupart de ces traceurs, certaines molécules comme les Rhodamine B et WT, ont été écartées.

-Les cations chélatés : Dès 1956, Lacey and Laguna vantent les propriétés d'une molécule organique, l'EDTA (Ethylenediamine tetraacetic acid) qui permet de réduire considérablement la rétention de pratiquement tous les cations polyvalents par les sols. Ces expériences de laboratoire sur des complexes EDTA de cobalt II, antimoine III et chrome III donneront lieu à de nombreuses expériences de traçage sur le terrain où d'autres éléments sont testés comme l'indium et les lanthanides dans des milieux karstiques (Gauthier et Al., 1983), granitiques (Toulhoat, 1987 ; Byegard et Al., 1999) et alluvionnaires (Bigot et Al., 1984). D'autres ligands plus complexants que l'EDTA ont été développés. Citons en particulier le DTPA (diethylenetriamine pentaacetic acid) qui donne des meilleurs taux de restitution que les complexes EDTA lors des traçages en milieu karstique (Cadic et Al., 1990), ou en milieu granitique (Byegard et Al., 1999). Citons également les éthers couronnes utilisés comme ligands spécifiques de certains ions, en particulier le DOTA (1,4,7,10-tetraazacyclododecane N,N',N'',N'''-tetraacetic acid) dont les constantes de complexation sont maximales pour les

lanthanides (ex: $\log K(\text{Lu})=25,4$). Les complexes de lanthanides suscitent un regain d'intérêt dans le cadre de la recherche liée aux stockages des déchets nucléaires. En effet, les ligands organiques peuvent simuler l'effet complexant de la matière organique naturelle dissoute tel que les acides humiques capables d'entraîner les radionucléides (Takahashi, 1998 ; Nagao, 1998). De plus, les lanthanides moyens et lourds constituent de bons analogues des actinides trivalents présents dans les déchets nucléaires.

-Les microorganismes : bactéries (Livrozet E, 1984), spores, bactériophages sont essentiellement utilisés en milieu karstique en raison de leur grande taille.

Chaque traceur possède un domaine d'utilisation (pH, redox, lithologie) qui lui est spécifique. Par exemple, les traceurs anioniques (I^- , Br^- , uranine) conviennent mieux aux formations alluviales que les traceurs cationiques (Li^+ , rhodamine B) qui s'adsorbent facilement sur les argiles. Li^+ est très utilisé dans les milieux karstiques (Käss and Löhnert, 1995 ; Antiguada, 1995). La rhodamine B qui s'adsorbe sur tous les matériaux avec lesquels elle rentre en contact, convient mieux aux expériences de traçage simulant des pollutions en mer (Gaspar, 1987).

Pour ce travail, on peut utiliser, comme traceurs conservatifs, les sels à bruit de fond naturel bas (Li^+ , Br^- , I^-) et les traceurs fluorescents. C'est finalement la mise à disposition d'un spectrofluorimètre par le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Orléans, qui a déterminé le choix de trois traceurs fluorescents pour le traçage des relations inter-nappes et des circulations en milieu karstique. Ce sont tous les trois des molécules organiques anioniques (fig.4.1), les formes cationiques s'adsorbant beaucoup trop facilement. Les caractéristiques chimiques ainsi que les longueurs d'onde d'absorption et d'émission sont présentées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2: Caractéristiques des traceurs fluorescents utilisés sur le site de Sandillon

Traceur	Formule chimique	M (g/mol)	λ_{ex} (nm)	λ_{em} (nm)	Propriétés (Käss, 1994)
Uranine (fluorescéine disodique)	$C_{20}H_{10}Na_2O_5$	376	490	515	Forte intensité de fluorescence, non-adsorbant à $pH > 6$, adsorbant à $pH < 6$, dégradable à la lumière, très soluble dans l'eau (> 100 g/l), bon marché
Sulforhodamine G (sel de sodium)	$C_{25}H_{25}N_2NaO_7S_2$	552	532	582	Moyenne intensité de fluorescence, faiblement adsorbant, indépendant du pH ou des conditions redox, insensible à la lumière. Soluble dans l'eau (50g/L)
Naphthionate de sodium	$C_{10}H_8NNaO_3S$	245,2	319	419	Faible intensité de fluorescence dans le bleu-violet, non-adsorbant.

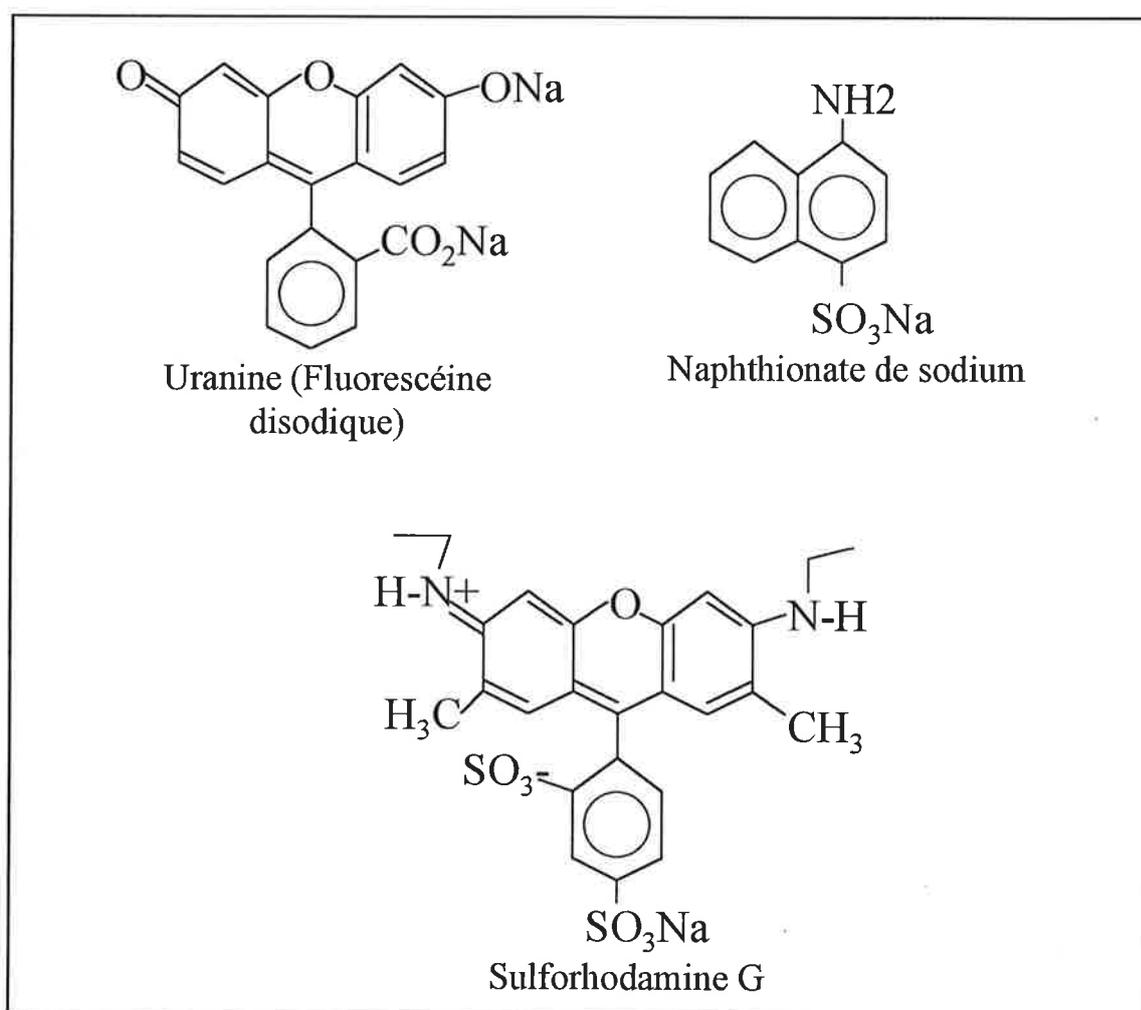


Figure 4.1: Formules chimiques semi-développées des colorants utilisés comme traceurs dans la nappe du Val d'Orléans.

Les 3 traceurs possèdent des longueurs d'onde bien distinctes, ce qui permet de les utiliser simultanément (multitraçage).

L'uranine ou sel disodique de la fluorescéine : c'est le traceur le plus utilisé des traceurs fluorescents. Cet engouement est parfaitement justifié comme l'ont montré des travaux de Rochat, Alary et Fourneaux (1981) relatifs à la faible diminution de fluorescence observée pour l'uranine après contact avec une phase carbonatée (CaCO_3), une phase silicatée (silice) et une phase argileuse (kaolin). Seuls les acides humiques provoquent une extinction quasi totale de fluorescence. Il faut également signaler que la fluorescence est abaissée par la présence de sels en solution et que l'iodure réagit avec la fluorescéine pour former des composés dérivés (André et Molinari, 1976). Il est donc préférable de ne pas utiliser la fluorescéine en même temps qu'un iodure.

La sulforhodamine G : Ce traceur xanthénique de couleur rouge est dérivé de la fluorescéine. Il est réputé non-toxique contrairement à la rhodamine WT qui possède des propriétés très voisines.

Le naphthionate de sodium : Il est utilisé comme agent de blanchiment dans les lessives. Il présente donc l'avantage d'être plus discret que les colorants précédents. L'inconvénient est qu'il fluoresce aux longueurs d'onde de la matière organique naturelle, ce qui augmente sa limite de détection.

De ces trois traceurs, on retiendra l'uranine comme traceur conservatif de référence dans le contexte étudié.

4.2. Analyse des traceurs fluorescents

4.2.1. Le principe de fluorescence

Lorsqu'un photon entre en collision avec les électrons d'un atome ou d'une molécule, s'il possède une énergie suffisante, il peut expulser un électron dans une orbitale inoccupée telle que l'énergie qui la sépare de l'état fondamental est $E_{\text{accueil}} - E_{\text{départ}} = hC/\lambda$ où h est la constante de Planck, C , la vitesse de la lumière et λ , la longueur d'onde de la lumière excitatrice.

L'énergie totale de la molécule rend compte des interactions de l'ensemble des électrons et des noyaux. Supposons que la molécule, dans son état fondamental S_0 , soit dans l'état d'énergie la plus basse, lors de l'absorption, la transition à l'état excité S_1 est si rapide qu'elle ne permet pas le changement des positions relatives des noyaux de la molécule (principe de Franck-Condon). La géométrie la plus stable dans l'état excité ne correspond pas toujours à celle de l'état fondamental. Il y aura en général de ce fait désactivation ultérieure de l'excès d'énergie, jusqu'au niveau vibrationnel le plus bas, celui de la forme S_1 .

En spectrofluorimétrie, deux types de spectres sont réalisés :

-Les spectres d'absorption : les transitions qui interviennent lors de l'absorption peuplent des états excités électroniques et vibrationnels de la molécule. Or, comme plusieurs états voisins de vibration peuvent être atteints, il n'y aura pas absorption pour une seule longueur d'onde. On observe généralement en solution une seule bande large d'absorption.

-Les spectres de fluorescence : la fluorescence correspond à une désexcitation radiative de S_1 . D'après le principe de Franck-Condon, la géométrie de la molécule ne change pas lors l'émission. Or, l'énergie de la molécule après émission de fluorescence ne peut être que supérieure ou égale à celle de l'état fondamental pour des raisons analogues à

celles qui ont été énoncées plus haut. Ce résultat explique donc que les spectres de fluorescence et d'absorption ne se recouvrent pratiquement pas.

4.2.2. Appareillage de mesure de fluorescence

Les trois traceurs sont analysés à l'aide d'un spectrofluorimètre Hitachi F2000 simple faisceau au Laboratoire d'Hydrologie de l'Université d'Orléans. L'appareil dispose de deux gammes de sensibilité: la gamme 700 V pour les échantillons peu concentrés (0-500 ng/mL d'uranine) et la gamme 400 V pour les échantillons plus concentrés (0,5-10 µg/mL d'uranine). Les limites de détection dépendent du bruit de fond naturel et de la teneur en MES. Comme les échantillons ne sont pas filtrés, il est préférable de les laisser décanter quelques jours avant de les analyser. Cela est surtout vrai pour la sulforhodamine G. Lors de l'analyse d'échantillons d'eau de nappe alluviale soupçonnés de contenir de la sulforhodamine G, on s'est rendu compte que ce qui passait pour la fin d'une restitution de traceur n'était en réalité qu'une baisse du bruit de fond liée à la décantation de la MES (Fig.4.2).

C'est pourquoi la présence soupçonnée de traceur est systématiquement confirmée ou démentie par des spectres d'émission et d'absorption.

L'intérêt des traceurs conservatifs comme l'uranine est qu'ils servent de références pour traiter le cas du transport non conservatif caractérisant certainement la majorité des espèces chimiques en solution. Les complexes de lanthanides qui sont abordés dans le paragraphe suivant permettent de traiter plus spécialement les interactions entre les espèces chimiques en solution et l'encaissant.

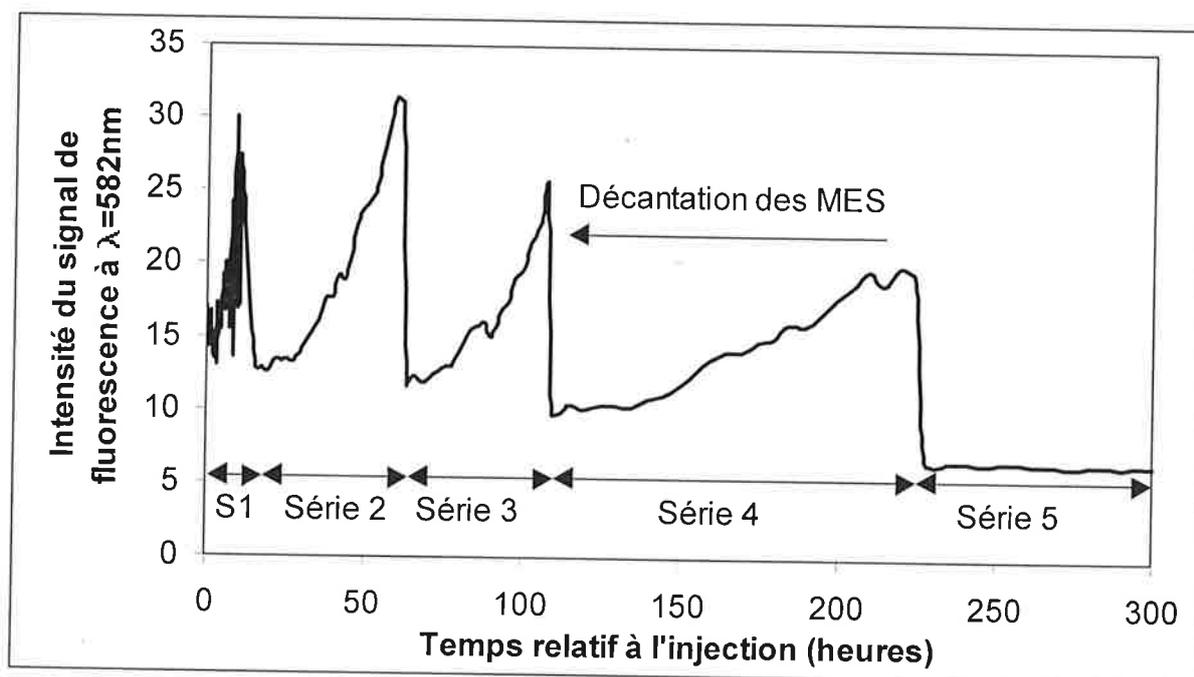


Figure 4.2: Mise en évidence de l'effet de diffusion par les MES observé sur les échantillons d'eau de nappe alluviale prélevés dans le piézomètre Z en juillet 2000 lors du traçage de la connexion nappe calcaire – nappe alluviale. Les 3 premières séries sont analysées dans la journée du dernier prélèvement de chaque série. Les premiers échantillons sont plus décantés que les derniers. La série 4 a été décantée environ 2 jours et la série 5 environ 2 semaines. Au bout de 2 semaines, la décantation est terminée et le signal est stable sur la série analysée.

4.3. L'apport des complexes EDTA de lanthanides

4.3.1. Les lanthanides dans les eaux naturelles

Les lanthanides se trouvent à l'état de traces dans le milieu naturel, c'est pourquoi on les appelle également « Terres Rares ». Du fait de leur taille et de leur valence, les terres rares ont des propriétés chimiques distinctes de leurs voisins Ba et Hf, dans la classification périodique des éléments. La contraction progressive du rayon ionique avec le numéro atomique confère des différences chimiques assez fines du lanthane au lutétium, ce qui permet à la famille des lanthanides d'enregistrer des processus géochimiques très fins dans les

systemes naturels. Ainsi, les fractionnements observés au sein de cette famille d'éléments dans les roches et les minéraux a contribué à l'étude de la différenciation de la terre ainsi que de son évolution chimique (Goldberg et Al., 1963 ; Haskin et Al., 1968 ; Taylor and McLennan, 1985). Les terres rares ont également été très utilisées en géochimie des eaux pour l'étude des interactions eau-roche (Sondag et Al., 1997), pour la recherche des sources des nappes souterraines ainsi que pour l'étude de mélanges (Johannesson et Al., 1997). Leur chimie en solution dans les eaux naturelles a fait l'objet d'études nombreuses (Sholkovitz, 1992, 1995 ; Dupré et Al., 1996). Retenons que dans les eaux naturelles, les lanthanides sont transportés essentiellement sous forme particulière et colloïdale. Dans la fraction dissoute, les lanthanides sont complexés par les ligands présents dans les eaux naturelles. Les complexes de carbonates sont généralement majoritaires, les phosphates peuvent également jouer un rôle important ainsi que la matière organique dissoute. L'ordre de stabilité des complexes est relié au rayon ionique des terres rares ce qui entraîne un fractionnement entre les phases dissoutes et solides. Les lanthanides légers tendent à se fixer sur la phase solide alors que les terres rares lourdes sont plus stables en solution. Les teneurs en terres rares sont également très dépendantes du pH. Elles croissent quand celui-ci diminue.

4.3.2. Les lanthanides utilisés comme traceurs artificiels

De par leur nom, les terres rares répondent d'emblée au premier critère pour constituer un bon traceur artificiel : leur faible abondance. Cependant, elles sont très peu solubles dans l'eau et leur utilisation comme traceurs ne peut être réalisée sans l'accompagnement d'une molécule complexante qui augmente leur stabilité en solution.

Dans tous les aquifères où ils ont été testés, les complexes EDTA de lanthanides cités précédemment se sont révélés de moins bons traceurs que l'uranine ou que d'autres traceurs conservatifs. Quel est donc l'intérêt de ces complexes ? Il se situe au même niveau que pour

leur exploitation en géochimie: un gradient de propriétés chimiques relié à la contraction du rayon ionique du lanthane au lutétium. Ainsi, comme pour un grand nombre de complexes naturels (carbonates, oxalates, phosphates..), la stabilité des complexes EDTA augmente avec le numéro atomique (tableau 4.3). Lorsque que plusieurs complexes EDTA de lanthanides sont injectés simultanément, ils se comportent comme une sonde du milieu vis-à-vis des processus de rétention. La comparaison des courbes de restitution des lanthanides permet de modéliser ces processus de rétention. Dans sa thèse, S. Bigot (1977) énonce les principes de cette théorie qui est ensuite appliquée par P. Toulhoat dans une fissure granitique au Mayet de Montagne. La comparaison des courbes de restitution des complexes de stabilité croissante permet à ce dernier de proposer un modèle de sorption non linéaire et non réversible.

L'un des avantages de l'utilisation des terres rares comme traceurs est de pouvoir identifier le passage des traceurs par l'anomalie créée sur le profil des lanthanides. En effet, normalisées aux abondances de la terre (Chondrites C1) ou de la croûte terrestre, les lanthanides présentent un profil régulier du lanthane au lutétium. Cette propriété des lanthanides a été utilisée lors du traçage réalisé le 18/5/00 par injection de 50 g de La, Sm, Dy et Yb dans le piézomètre karstique CA1. Le signal en concentration de chacune de ces terres rares obtenu à l'exutoire de la source du Bouillon était trop perturbé par une pollution liée à l'acidification des argiles déposées au fond du préleveur automatique pour donner un signal caractéristique d'une restitution. La normalisation des teneurs en traceurs par les lanthanides voisins a permis de reconstituer grossièrement le signal à la source du Bouillon (figure 4.3).

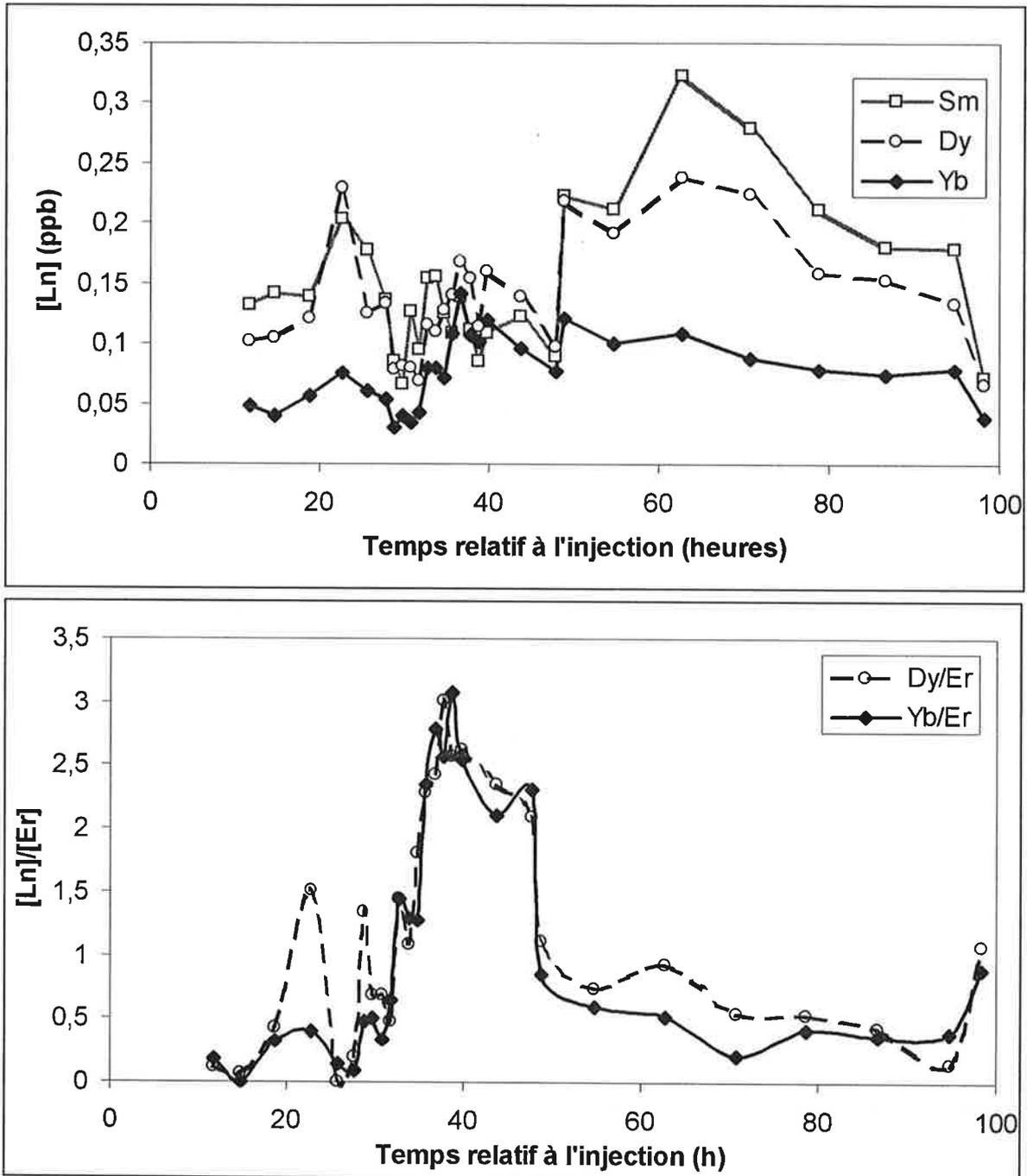


Figure 4.3: Reconstitution, grâce aux lanthanides naturels, du signal de restitution des traceurs lanthanides-EDTA à la résurgence du Bouillon en mai 2000.

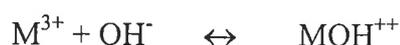
A la source du Bouillon, les teneurs en lanthanides utilisés comme traceurs entre le piézomètre CA1 et la résurgence karstique du Bouillon (figure du haut) sont masquées par les teneurs en terres rares naturelles issues de l'acidification des MES déposées au fond des flacons de prélèvement. Le signal de restitution devient visible (figure du bas) à la résurgence du Bouillon pour les lanthanides les mieux restitués (Dy et Yb) lorsque les teneurs en lanthanides sont normalisées à un lanthanide voisin non utilisé comme traceur, comme par exemple l'erbium pour le dysprosium et l'ytterbium.

4.3.3. Rappels sur la chimie des lanthanides en solution

Dans l'eau, les principales réactions qui affectent les ions lanthanides M^{3+} sont des réactions de complexation avec les ligands présents dans les eaux naturelles c'est-à-dire essentiellement H_2O , CO_3^{2-} , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et PO_4^{3-} . Ce paragraphe reprend les caractéristiques principales de la chimie des complexes de lanthanides en solution décrite par J. Chupeau (thèse 1991). Les constantes de stabilité β_n à force ionique nulle pour chaque réaction figurent dans le tableau 4.3:



Avec les ions hydroxydes:



Les complexes $M(OH)^{2+}$ et $M(OH)_3$ existent également mais ce sont des formes très minoritaires. Dans l'eau pure à $pH < 7$, on trouvera essentiellement MOH^{++} et à $pH > 7$, le précipité $M(OH)_3^s$.

En présence de nitrates, un seul complexe se forme, $M(NO_3)^{++}$ stable à $pH < 7$.

Avec les chlorures :



Les sulfates donnent les complexes suivants :



Tableau 4.3: Constantes de stabilité des complexes de lanthanides à 25°C et à force ionique nulle



$$\beta_n = [ML_n]/([M^{3+}][L]^n)$$

$$K_s = 1/([M^{3+}]^2[CO_3^{2-}]^3)$$

	OH-		CO ₃ ²⁻			NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻		Cl ⁻	PO ₄ ³⁻			EDTA (I=0)	EDTA (I=0,1)
	logβ1	logβ ₃ ^s	logβ1	logβ2	logKs	logβ1	logβ1	logβ2	logβ1	logβ1	logβ2	logβ1	logβ1	
La	5,34 +/- 0,10	20,7	7,12 +/- 0,09	11,59 +/- 0,22	33,4		3,64	5,29	0,48	10,96 +/- 0,11	17,63 +/- 0,29	15,5	15,46	
Ce	5,59 +/- 0,08	21,2	7,40 +/- 0,07	12,18 +/- 0,22		1,13	3,59	5,2	0,47	11,35 +/- 0,09	18,48 +/- 0,30	16,0	15,94	
Pr	5,73 +/- 0,09	21,5	7,57 +/- 0,08	12,54 +/- 0,22			3,62	4,92	0,44	11,60 +/- 0,10	19,08 +/- 0,29		16,36	
Nd	5,84 +/- 0,08	23,1	7,69 +/- 0,07	12,79 +/- 0,21	33	1,22	3,64	5,1	0,4	11,78 +/- 0,09	19,50 +/- 0,28	16,6	16,6	
Pm	5,94 +/-		7,81 +/-	13,08 +/-		1,31				11,95 +/-	19,96 +/-			
Sm	6,04 +/- 0,06	25,4	7,93 +/- 0,05	13,37 +/- 0,11	32,5		3,67	5,2	0,36	12,11 +/- 0,06	20,42 +/- 0,15	17,1	17,09	
Eu	6,10 +/- 0,05	25,6	8,00 +/- 0,03	13,52 +/- 0,07		1,23	3,67	5,41	0,34	12,22 +/- 0,04	20,66 +/- 0,09	17,3	17,29	
Gd	6,07 +/-	25,7	7,97 +/-	13,52 +/-	32,2		3,66	5,21	0,33	12,20 +/-	20,71 +/-	17,0	17,32	
Tb	6,14 +/- 0,06	25,5	8,08 +/- 0,05	13,73 +/- 0,09		0,97	3,64	5,15	0,32	12,39 +/- 0,07	21,02 +/- 0,12	17,9	17,88	
Dy	6,19 +/- 0,09	25,6	8,14 +/- 0,08	13,83 +/- 0,12	31,5		3,62	4,8	0,31	12,52 +/- 0,10	21,22 +/- 0,17	18,3	18,26	
Ho	6,22 +/- 0,12	25,9	8,18 +/- 0,11	13,86 +/- 0,16			3,59	4,9	0,3	12,59 +/- 0,13	21,27 +/- 0,22	18,8	18,53	
Er	6,27 +/- 0,14	24,9	8,24 +/- 0,14	13,98 +/- 0,23			3,59	5,1	0,26	12,69 +/- 0,17	21,41 +/- 0,31		18,85	
Tm	6,32 +/- 0,17		8,32 +/- 0,16	14,07 +/- 0,28		0,78	3,59	5,14	0,25	12,82 +/- 0,20	21,57 +/- 0,38		19,28	
Yb	6,40 +/- 0,18	25	8,40 +/- 0,18	14,22 +/- 0,33	31,1		3,58	5,2	0,24	12,94 +/- 0,22	21,79 +/- 0,44	19,5	19,51	
Lu	6,41 +/- 0,19	26,1	8,43 +/- 0,19	14,29 +/- 0,33			3,52	5,3	0,23	12,99 +/- 0,23	21,90 +/- 0,45		19,82	

OH⁻: log β1 donné par Lee and Byrne (1991); log β₃^s donné par Smith and Martell (1976)

CO₃²⁻: log β1 et log β2 calculés par Lee and Byrne (1991), log Ks: Smith and Martell (1976)

NO₃⁻: Choppin et Strazik (1965)

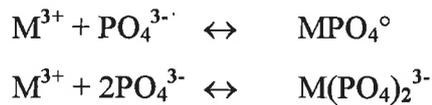
SO₄²⁻: Smith and Martell (1976)

Cl⁻: Mironov et Al. (1982), in Wood (1989).

PO₄³⁻: log β1 et log β2 calculés par Lee and Byrne (1991)

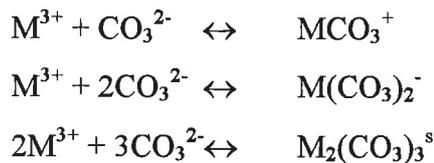
EDTA: à force ionique nulle, les données sont celles de Kragten (1978); à force ionique I=0,1, les données sont celles de Smith and Martell (1989)

Les phosphates donnent les complexes suivants



Le complexe $M(PO_4)_2^{3-}$ est en général très minoritaire sauf pour de fortes concentrations en phosphates.

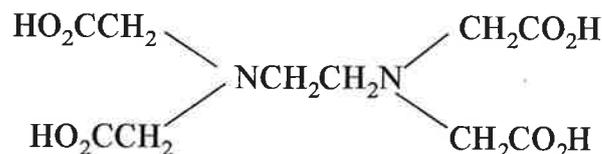
Les complexes de carbonates sont certainement la forme la plus probable sous laquelle se trouvent les lanthanides en solution dans les eaux naturelles, du fait de l'abondance de ce ligand dans les eaux naturelles d'une part et de la grande stabilité de ces complexes d'autre part.



Les complexes EDTA

L'EDTA (Ethylenediamine tetraacetic acid) est un tétraacide organique dont la configuration spatiale lui confère un pouvoir complexant très important vis-à-vis de nombreux cations.

Sa formule chimique semi-développée est la suivante :



Pour des raisons de commodité, la forme basique s'écrit habituellement Y^{4-} . Le diagramme de prédominance (figure 4.5) des espèces H_4Y , H_3Y^- , H_2Y^{2-} , HY^{3-} et Y^{4-} présente leurs domaines de stabilité en fonction du pH.

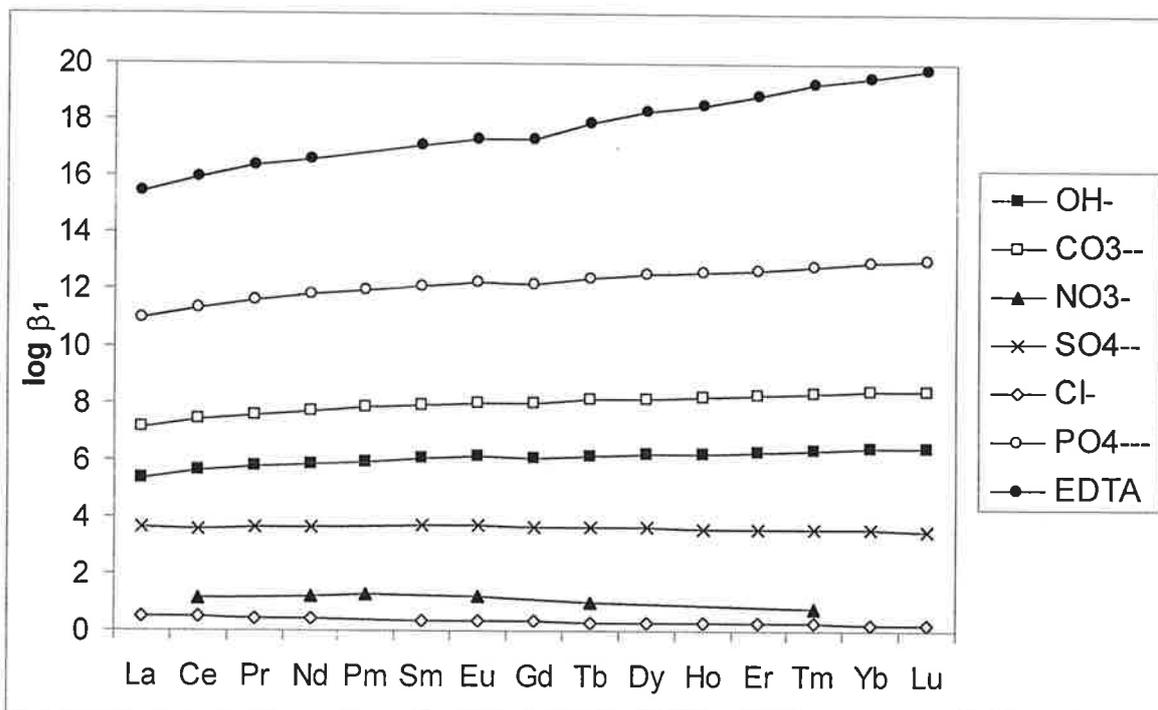


Figure 4.4: Evolution des constantes de stabilité des complexes de terres rares selon leur numéro atomique. Les constantes de stabilité correspondent à un seul ligand (β_1). Les valeurs des constantes sont données dans le tableau 4.3.

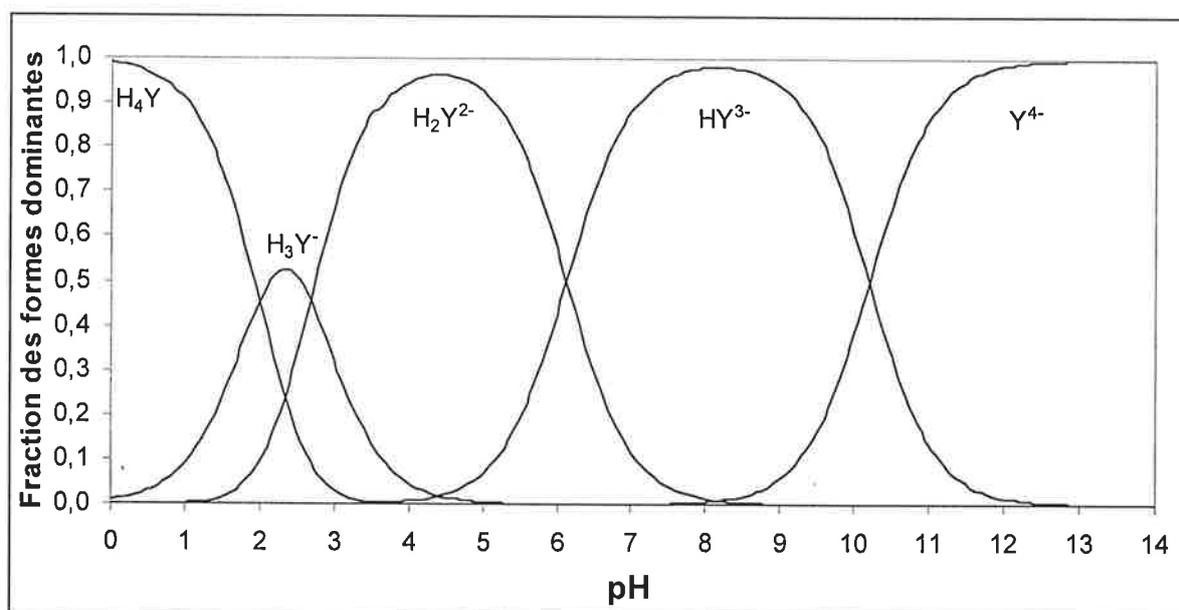
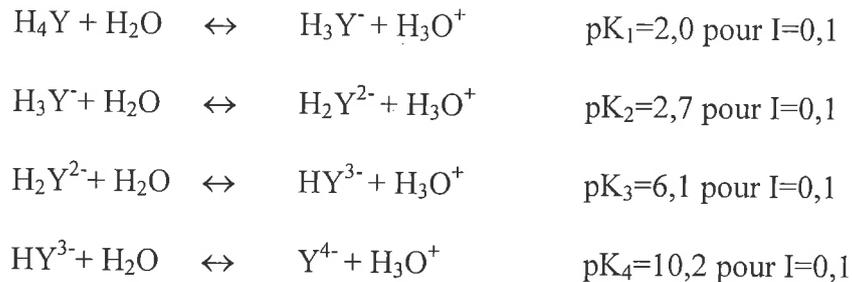


Figure 4.5 : Diagramme de distribution des espèces ioniques de l'EDTA en fonction du pH à 25°C et à force ionique $I=0,1$

Les valeurs des constantes d'acidité sont extraites de l'ouvrage « Critical stability constants – vol.6 : Second supplement » (Smith and Martell, 1989).

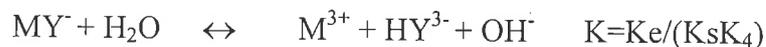
Les équilibres acido-basiques en solution s'écrivent :



On remarquera que dans le domaine de pH des eaux naturelles, c'est l'espèce HY^{3-} qui est la plus stable. Cependant, c'est la forme Y^{4-} qui forme les complexes les plus stables avec les lanthanides selon la réaction :



Mais la stabilité du complexe dans l'eau à pH=7 sera déterminée par l'équilibre :



où K_e est le produit ionique de l'eau ($K_e = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-]$) ; $\log K = \text{pK}_s + \text{pK}_4 - \text{pK}_e$

ex : pour le lanthane $\log K = -15,5 + 10,2 - 14 = -19,5$

pour le dysprosium, $\log K = -18,3 + 10,2 - 14 = -22,1$

Les constantes de stabilité des complexes EDTA sont supérieures à la majorité de celles des complexes naturels sauf pour les complexes diphosphates. Mais l'absence de phosphates dans les eaux de nappe de Sandillon évite de devoir les considérer. Au contraire, l'abondance des hydrogénocarbonates HCO_3^- liée à la dissolution du calcaire de Beauce permet d'affirmer que la deuxième forme majoritaire après les complexes EDTA sera représentée par les complexes de carbonates.

4.3.4. Préparation des traceurs au laboratoire

Les complexes EDTA de lanthanides sont préparés au laboratoire. La solution finale de traceurs s'obtient par mélange d'une solution nitrique (pH=2) de lanthanides et d'une solution d'éthylènediamine tétraacétate de sodium ou potassium à pH=12. On mélange 1,5 moles d'EDTA pour 1 mole de lanthanides ce qui permet de garder les complexes suffisamment longtemps stables en solution.

La méthode la plus simple consiste à dissoudre des sels hydratés de lanthanides: $\text{Ln}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dans une solution d'acide nitrique à pH=2. De même, pour la préparation de la solution d'EDTA, il est pratique de dissoudre un sel potassique ou sodique d'EDTA dans une solution d'hydroxyde de potassium ou de sodium à pH=12. Cependant, sauf pour le lanthane, on ne dispose pas de stocks de sels suffisants.

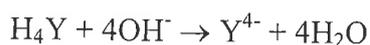
Les produits commerciaux les moins chers sont les oxydes de lanthanides et l'EDTA sous la forme H_4EDTA . La préparation des traceurs à partir des oxydes de lanthanides est plus périlleuse et beaucoup plus longue qu'à partir des sels de nitrates.

Les oxydes de lanthanides, sous forme de poudre, sont dissous dans de l'acide nitrique 69% dilué deux fois dans l'eau et chauffé sous hotte. La réaction (ci-dessous) est exothermique.



L'ajout des oxydes dans la solution nitrique doit être progressif. Et il est conseillé de ne pas dissoudre plus de 500 g d'oxyde à la fois. La dissolution est terminée lorsque la solution nitrique est limpide. La solution obtenue est ensuite diluée dans de l'eau du robinet jusqu'à pH=2.

La dissolution de l'EDTA dans la soude ou la potasse est également exothermique :



La complexation de Ln^{3+} par Y^{4-} est une opération délicate qui exige un contrôle rigoureux du pH. Elle doit s'effectuer, sous agitation, par ajout progressif de la solution complexante dans la solution nitrique et non l'inverse. En effet, l'opération inverse entraîne la précipitation des hydroxydes de lanthanides avant la réaction de complexation.

Les solutions finales de traceurs ont un pH proche de 7.

Les concentrations des solutions de traceurs synthétisées sont vérifiées par ICP-MS. Les lanthanides utilisés pour les traçages ont été puisés, pour la plupart, dans les restes d'anciens traçages réalisés par le laboratoire ou bien achetés pour les lanthanides manquant en stocks. L'origine, la pureté et les prix des lanthanides utilisés pour les traçages figurent dans le tableau 4.4. Les produits utilisés sur le terrain ne nécessitent pas une très grande pureté, cependant tous les produits disponibles sont d'une pureté d'au moins 99%.

4.3.5. Interférence des lanthanides avec les traceurs fluorescents

Lors des traçages réalisés sur la carrière de Sandillon, les injections d'uranine ont généralement précédé les injections de terres rares complexées à l'EDTA.

La première raison est le prix élevé des terres rares dans le commerce. On préfère ainsi explorer la nappe à l'aide de traceurs peu coûteux et utiliser ensuite les terres rares une fois précisées les caractéristiques du traçage (lieux de restitution, vitesse d'écoulement, durée de restitution...).

La deuxième raison est que les traceurs fluorescents sont des sels avec une molécule fluorescente sous forme anionique. Ces anions peuvent très bien avoir des propriétés complexantes et entrer en compétition avec l'EDTA vis-à-vis de la complexation des terres rares. La littérature mentionne peu de travaux à ce sujet.

Tableau 4.4: Caractéristiques des réactifs utilisés pour la synthèse des complexes EDTA de lanthanides utilisés comme traceurs.

Seuls les prix des lanthanides achetés pendant la thèse ont été indiqués. Les autres lanthanides ont été achetés 20 ans auparavant, pour certains, à des prix totalement différents du cours de 1999. La pureté des anciens produits est donnée par le fournisseur sous le terme "pur" sans aucune autre précision sur le degré de pureté. Mais l'analyse des solutions mères de traceurs n'a pas révélé de taux d'impureté supérieur à 1%.

Lanthanides	Forme	Formule chimique	Pureté	Marque	Prix (HT) en 1999/Origine
Lanthane	Nitrate	$\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	pur	Prolabo	Stocks anciens
Samarium	Oxyde	Sm_2O_3	99,9%	Strem Chemical	2010F/500g
Terbium	Oxyde	Tb_2O_3	pur	Prolabo	Stocks anciens
Dysprosium	Nitrate	$\text{Dy}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	99%	Prolabo	Stocks anciens
	Oxyde	Dy_2O_3	pur	Prolabo	Stocks anciens
Erbium	Oxyde	Er_2O_3	99,9%	Alpha Aesar	2070F/1kg
Ytterbium	Oxyde	Yb_2O_3	99,9%	Strem Chemical	804F/100g
EDTA	H_4Y	$[(\text{HOOCCH}_2)_2\text{NCH}_2]_2$	99%	Acros	414F/1kg

Citons cependant les travaux de Stakhverdov (1999) mettant en évidence non pas la complexation, mais l'association, hors-sphère de coordination, de plusieurs colorants xanthéniques avec des terres rares en solution.

L'étude de l'association de néodyme (Nd^{3+}) avec l'éosine (E^{2-}) le conduit à obtenir une valeur de la constante d'association K_{ass}^0 à force ionique nulle.



Cette valeur est de plus de 10 ordres de grandeur inférieure aux constantes de formation des complexes EDTA-lanthanides. L'éosine est un dérivé substitué de l'uranine. Il est donc fort probable que l'uranine ne forme pas non plus de paires d'ions fortement liées avec les terres rares.

De plus, lors du traçage ayant été réalisé en janvier 2000 par injection d'uranine dans le piézomètre alluvionnaire Pf2, il n'a pas été retrouvé de terres rares désorbées du terrain dans les échantillons d'eau tracée contrairement aux traçages réalisés avec de l'EDTA dans les alluvions. Il est donc peu probable que les colorants utilisés puissent rivaliser avec l'EDTA en ce qui concerne la complexation des lanthanides.

4.4. Interprétation des expériences de traçage en milieu karstique

La vérification de l'existence d'un lien entre une perte et un ou plusieurs exutoires n'est pas la seule information apportée par la technique du traçage en milieu karstique. Le traçage permet d'extraire une information beaucoup plus riche qui concerne, d'une part la structure de l'espace visité par le traceur appelé « le système traçage », d'autre part le transit

du volume d'eau tracé pouvant être assimilé à un volume d'eau polluée. Certaines conditions doivent alors être respectées (Lepiller et Mondain, 1986) :

- l'injection instantanée d'une masse connue de traceur à l'entrée du « système traçage » pour obtenir la réponse de ce dernier à une impulsion

- l'échantillonnage à l'entrée et à la sortie du système à un pas de temps adapté en vue de construire les fonctions d'entrée et de sortie du traceur, concentration de traceur= $f(\text{temps})$

- la mesure du débit à l'entrée du système pour construire la fonction d'entrée flux de traceur= $f(\text{temps})$

- la mesure du débit à la sortie du système pour obtenir la fonction de sortie flux de traceur= $f(\text{temps})$, encore appelée distribution des temps de séjour (DTS).

La réalisation de ces conditions permet le calcul de plusieurs paramètres :

- L'intégration de la fonction flux de sortie permet d'obtenir la masse de traceur restituée et de faire le bilan : Un mauvais bilan pour un traceur conservatif peut conduire à rechercher d'autres exutoires que ceux ayant fait l'objet d'une surveillance, ou à envisager une restitution différée.

- La normalisation de la courbe flux de sortie par la masse de traceur restituée (DTS normée) permet de calculer le temps moyen de séjour (temps de déplacement du centre de gravité du nuage) et la vitesse moyenne apparente de transit (rapport de la distance la plus probable sur le temps moyen de séjour). Ces deux paramètres permettent de décrire au mieux le déplacement du nuage puisqu'ils ne sont pas affectés par les causes de déformation de ces derniers (diffusion, adsorption-désorption, dispersion). L'analyse de la partie décroissante de la DTS permet de différencier des transits plus ou moins faciles de traceurs.

- A partir des courbes de concentration entrée et sortie, il est possible de calculer le taux de dilution subie par le traceur.

La réalisation pratique des traçages sur le terrain ne permet pas toujours de respecter les conditions rigoureuses de mise en œuvre imposées par les bases théoriques de l'interprétation, notamment en ce qui concerne l'obtention de la fonction d'entrée ou des débits de l'exutoire. Toutefois, il demeure possible de mener à bien l'interprétation des fonctions de sortie concentration=f(temps) en période de faibles fluctuations de débits.

4.4.1. La courbe de restitution C(t)

Elle permet d'avoir accès :

- au temps t_1 et à la vitesse maximale V_{\max} de transit des molécules de traceur les plus rapides, entre l'instant de l'injection $t=0$ et celui du début de restitution $t=t_1$;

- à la durée t_r de la restitution correspondant à l'intervalle de temps séparant t_1 de la fin de la restitution t_2 , temps à partir duquel le signal s'apparente au bruit de fond. $t_r=t_2-t_1$;

- au temps modal t_m et à la vitesse modale V_m de transit correspondant à la valeur maximale de la concentration C_{\max} atteinte au cours de la restitution ;

- à la concentration moyenne du nuage de traceur $C = \int_0^{+\infty} C(t)dt/t_r$.

Pour les calculs de vitesse, la distance prise en compte est la distance linéaire L la plus probable entre le point d'injection et la résurgence.

4.4.2. Le flux de traceur

Le produit du débit $Q(t)$ par la concentration $C(t)$ donne à chaque instant le flux de traceur qui passe à l'exutoire $\Phi(t)=C(t).Q(t)$

La masse de traceur restituée à l'exutoire est $M_r = \int_0^{+\infty} C(t)Q(t)dt$

Le rapport entre la masse restituée et la masse injectée M_0 détermine le taux de restitution $r\% = M_r \cdot 100 / M_0$

4.4.3. La distribution des temps de séjour (DTS)

La DTS représente la fonction densité de probabilité qu'a une molécule de séjourner dans le système entre t et $t+dt$.

$$\text{Elle s'écrit } h(t) = C(t)Q(t) / \int_0^{+\infty} C(t)Q(t)dt = \Phi(t)/M_r$$

La DTS constitue la fonction de sortie du système traçage normée par rapport à la masse de traceur restitué. Cette normalisation permet de comparer des traçages réalisés avec des masses de traceur différentes car la surface comprise sous la courbe est toujours unitaire. Elle permet également de comparer des traceurs inertes et des traceurs qui interagissent avec le système. Pour des mêmes conditions,

$$\text{si } Q = \text{Cte, alors } h(t) = C(t) / \int_0^{+\infty} C(t)dt \quad (1)$$

Pour les traçages réalisés entre la carrière et la résurgence du Bouillon et le captage du Theuriet, les débits du Theuriet sont connus et déterminés par le fonctionnement de l'usine en eau potable de la Lyonnaise des Eaux à la Source. La fonction débit du Theuriet est une fonction « créneau » du temps. Quant au débit du Bouillon, une seule mesure a été réalisée le 19/6/00 en période d'étiage. On peut cependant considérer comme constant le débit du Bouillon si le régime hydrologique de la Loire varie peu pendant la durée de restitution (environ 3 jours) et ainsi se ramener à la relation (1).

A partir de la DTS, on peut calculer le temps moyen de séjour t_s , la vitesse moyenne de transit V et la vitesse apparente de transit V_{app} .

$$t_s = \int_0^{+\infty} t \cdot h(t) dt \quad ; \quad V = L \int_0^{+\infty} h(t)/t \times dt \quad ; \quad V_{app} = L / t_s$$

Ces deux notions de vitesse revêtent des significations distinctes. La vitesse moyenne de transit des molécules de traceur prend en compte tous les phénomènes physiques susceptibles d'affecter le traceur au cours de son parcours souterrain (diffusion, dispersion, adsorption-désorption). La vitesse apparente de transit est calculée à partir du temps de déplacement du centre de gravité du nuage de traceur, repère qui matérialise le déplacement du nuage dans son ensemble. Cette vitesse ne rend compte par conséquent que du transport hydraulique du traceur (Mangin, Molinari et Paloc, 1976).

La DTS permet également d'évaluer la section S moyenne des drains. Ce calcul repose sur la méthode d'Allen qui permet de mesurer les débits par injection de traceur.

Lorsque le débit Q de la résurgence est constant pendant la durée du traçage et si la condition dite de bon mélange est vérifiée ($\int_0^{+\infty} C_i(t) dt = Cte$ en tout point i de la conduite) alors il est

possible d'écrire $V = Q \cdot t_s$ or $V = L \cdot S$ donc $S = Q \cdot t_s / L$

CHAPITRE 5

EXPERIENCES D'ADSORPTION ET DE DESORPTION DES TRACEURS EN BATCH

L'interprétation des expériences de traçage avec les complexes EDTA de lanthanides a nécessité, en laboratoire, la mise au point et la réalisation d'un protocole d'étude de l'adsorption des complexes de lanthanides et de la désorption de ces mêmes éléments sur les alluvions et le calcaire. Ce chapitre n'a pas pour objet l'étude précise et quantitative des mécanismes de fixation des lanthanides sur les matériaux sédimentaires mais plutôt l'étude qualitative des comportements relatifs des lanthanides injectés sous forme de complexes EDTA et des lanthanides naturels au contact du calcaire et des alluvions de la carrière.

La large majorité des expériences d'adsorption des lanthanides relatées dans la littérature concerne l'adsorption sur des phases solides simples et bien définies. Des études comparatives d'adsorption sur une phase argileuse (ex : kaolinite) assimilée à un mélange d'alumine (Al_2O_3) et de silice (SiO_2) et l'étude de l'adsorption sur ces oxydes simples ont montré l'additivité des propriétés d'adsorption de chaque phase (Marmier, 1994 ; Gorgeon, 1994). Or, les milieux naturels, en particulier les formations alluviales, sont des mélanges très complexes de phases minérales multiples. Ils sont composés d'une variété de cristaux (ex : sable siliceux), d'argiles, d'oxydes amorphes ainsi que de matière organique. La détermination de la composition exacte des alluvions ainsi que l'étude des propriétés d'adsorption de chaque phase constituerait un travail fastidieux dont l'utilité est très discutable

à cause de la grande hétérogénéité de ces milieux. Chupeau (1991) classe les degrés d'hétérogénéité dans les propriétés adsorbantes des surfaces solides des milieux naturels sur une échelle de degré d'hétérogénéité croissant :

- 1 Présence de défauts ponctuels sur une même face d'un oxyde
- 2 Présence de plusieurs faces sur un oxyde simple
- 3 Oxyde mixte
- 4 Présence de plusieurs phases minérales
- 5 Variabilité spatiale de la nature des phases
- 6 Variabilité spatiale de la proportion entre phases
- 7 Variabilité temporelle de la nature et des proportions entre phases

Généralement, l'étude des propriétés d'adsorption des matériaux naturels s'effectue dans une approche « globale ». Les constantes « apparentes » (ex : K_d) qui sont calculées représentent des valeurs moyennes sur un volume élémentaire représentatif du milieu naturel ou d'une partie seulement. Bunzl et Schimmack (1988) prennent en compte cette variabilité spatiale des propriétés de rétention d'un milieu naturel en utilisant un variogramme sur des valeurs de K_d pour des radionucléides.

Dans les alluvions de Sandillon, la nature des sédiments est très variable (Chapitre 2). C'est pourquoi, dans ce travail, l'adsorption des complexes Ln-EDTA sur les matériaux naturels du site est étudiée selon une approche globale. Le protocole expérimental choisi est le mode « batch ». Ce mode permet d'expliquer, de manière qualitative, les expériences de terrain qui ont montré que pendant les phases de descente de la nappe, les traceurs sont relativement statiques dans les alluvions.

Les études d'adsorption sont principalement réalisées sur les matériaux alluvionnaires fins qui possèdent les propriétés de rétention les plus fortes (argiles et fraction du tout venant inférieure à 125 μm). Les résultats obtenus par Byegard et al (1999a) ont fortement motivé l'étude de la cinétique d'adsorption des complexes EDTA de lanthanides afin de déterminer le temps au bout duquel l'équilibre d'adsorption est atteint. Les résultats obtenus sur le terrain ont par ailleurs nécessité l'étude de la désorption des lanthanides naturels par l'EDTA ainsi que l'étude de la réversibilité de l'adsorption.

5.1. Cinétique d'adsorption

La première série d'expériences décrites dans cette partie concerne la cinétique d'adsorption des traceurs sur différents types de sédiments. Les objectifs de cette série d'expériences sont de :

- définir un protocole permettant de reconstituer le mieux possible les conditions naturelles,
- définir un temps d'agitation au bout duquel les traceurs sont en équilibre avec les sédiments,
- montrer que seules les argiles et la partie fine (< 125 μm) du tout venant alluvionnaire fixent de façon importante les complexes EDTA de lanthanides et que l'on peut finalement négliger les autres phases de granulométrie supérieure à 125 μm dans l'étude de l'adsorption des traceurs.

Dans l'étude de la fixation des traceurs sur les sables, l'un des problèmes a été l'isolement des sables. Après le lavage de ces derniers à l'eau du robinet, il reste des argiles adsorbées sur les grains. Celles-ci peuvent accroître de manière importante l'adsorption des traceurs sur le sable. Dans le but de désorber les argiles des grains de sable, un lavage à l'eau acidifiée (pH=2) complète le lavage à l'eau du robinet. Le trempage dans l'eau acidifiée dure

une heure puis le sable est abondamment rincé à l'eau du robinet. L'eau de lavage a été analysée par ICP-MS et comparée à la composition des argiles et des sables lavés (tableau 5.1). Elle présente des teneurs importantes en terres rares, montrant le passage en solution d'éléments caractéristiques des argiles. La solution ayant été filtrée à 0,22 μm , il est probable que les teneurs en lanthanides mesurées en solution appartiennent en partie à une phase colloïdale héritée des fines argileuses (Sholkovitz, 1995). L'analyse des sédiments lavés à l'acide confirme l'efficacité du nettoyage puisqu'une baisse des teneurs en thorium et lanthanides est observée (tableau 5.1). On peut considérer que la composition du sable lavé à l'acide se rapproche de la composition du sable de Sandillon débarrassé de toutes ses impuretés.

Tableau 5.1: Teneurs en thorium et lanthanides dans le tout venant TVB (Cf figure 2.17) - fraction 0,5-1 mm - avant lavage (TVB), et après lavage à l'eau du robinet (TVBL) et à l'eau acidifiée (TVBL-H).

Teneurs des éléments en solution dans l'eau de lavage acide (pH=2).

	TVB 0,5-1mm <i>Non Lavé</i> (ppm)	TVBL 0,5-1 mm <i>Lavé à l'eau</i> (ppm)	TVBL-H <i>Lavé à l'eau pH=2</i> (ppm)	Eau de lavage (ppb)
La	13,8	9,5	8,3	26,35
Ce	28,0	18,6	16,8	33,4
Pr				6,2
Nd	11,4			24,3
Sm	2,37	1,51	1,36	5,5
Eu	0,75	0,53	0,51	1,8
Gd				6,2
Tb	0,24	0,17	0,15	0,95
Dy				5,3
Ho				1
Er				2,6
Tm				0,35
Yb	0,80	0,59	0,50	1,99
Lu				0,27
Th	5,73	4,16	3,78	

La cinétique d'adsorption des complexes lanthanides-EDTA est réalisée sur 6 types de sédiments récoltés sur la carrière :

TV : Tout venant fin de granulométrie $< 125 \mu\text{m}$ obtenu par tamisage et récolté dans la partie immergée des alluvions de la Loire sur la carrière de Sandillon.

AG : Argile grise récoltée lors d'un sondage sur la carrière.

CA : Calcaire de Beauce en grains ($< 4 \text{ mm}$).

CB : Calcaire de Beauce broyé ($< 125 \mu\text{m}$).

S : Sable de la Loire provenant du tout-venant lavé à l'eau et de granulométrie $0,5\text{mm} < \varnothing < 1\text{mm}$.

SH : Sable précédent rincé à l'eau acidifiée ($\text{pH}=2$).

A priori, ce sont les sédiments argileux TV et AG qui sont sensés fixer les traceurs de manière la plus importante.

Les lanthanides étudiés sont ceux qui sont utilisés lors du traçage de la nappe alluviale de la Loire en mars 1997, c'est-à-dire le lanthane, le samarium et le dysprosium. L'adsorption de l'ytterbium sera également étudiée à titre de comparaison pour le temps d'agitation le plus élevé (figure 5.4). Cela permet de parcourir pratiquement toute la gamme des lanthanides.

Le protocole expérimental est inspiré d'un travail similaire réalisé par J.Byegård et Al. (1999a, 1999b). On cherche, de plus, à travailler dans des conditions proches du terrain et en particulier celles du piézomètre d'injection I ($\text{pH}=7,1$ et force ionique $I=0,01$) où l'on peut observer in situ l'adsorption des traceurs sur les alluvions.

5.1.1. Solutions en équilibre avec les sédiments

Avant l'introduction des traceurs, 2 g de sédiments sont équilibrés pendant au moins 3 jours avec 50 ml de deux types de solution :

1/ Une solution d'«eau naturelle» prélevée dans le piézomètre alluvionnaire O où l'eau est de composition chimique voisine du puits d'injection I. Cette eau est filtrée à $0,45\mu\text{m}$ afin d'ôter les MES argileuses indésirables pour les expériences d'adsorption sur les matériaux non-argileux. Les sédiments en équilibre avec cette eau naturelle portent le suffixe **EN**.

2/ Une solution de synthèse de KNO_3 0,01M à $\text{pH}=7,1$ et de force ionique $I=0,01$ c'est-à-dire égale à la force ionique de la solution naturelle. KNO_3 est choisi comme sel de fond d'une part parce qu'il est communément admis que ces ions sont indifférents vis-à-vis de la sorption compétitive avec les lanthanides et l'EDTA (contrairement à Na^+ et Cl^-), d'autre part parce que ce sont des éléments majeurs dominants dans la nappe alluviale étudiée, en particulier les nitrates. Les sédiments en équilibre avec cette solution portent le suffixe **K**.

Pour ces deux solutions, on choisit de ne pas utiliser de tampon pH de peur d'apporter un ligand supplémentaire susceptible d'entrer en compétition avec l'EDTA vis-à-vis de la complexation des lanthanides. L'ajustement du pH à 7,1, par ajout de HNO_3 ou de KOH dans les deux solutions avant la mise en équilibre avec les sédiments, s'avère difficile à cause de la lenteur de la réaction d'équilibre entre le CO_2 dissous et le CO_2 atmosphérique, principale source de perturbation du pH en l'absence de tampon. $\text{CO}_2+2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3^-+\text{H}_3\text{O}^+$

Le pH est un facteur important dans les processus de sorption aussi est-il soigneusement mesuré tout au long de l'agitation.

5.1.2. Préparation des traceurs

Les traceurs sont préparés à partir du sel $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et des solutions commerciales Fisher Scientific mono-élémentaires Sm et Dy 1000 ± 2 ppm, HNO_3 2%. Quant à l'ytterbium, on part de son oxyde Yb_2O_3 dissous par chauffage dans de l'acide nitrique 69%

dilué deux fois. Les solutions nitriques de lanthanides sont ensuite mélangées en une seule solution de traceurs à 200 ppm et à pH=0,9. Une solution d'EDTA à pH=13,1 est préparée à partir de son sel de potassium dissous dans KOH. On mélange 100 ml de chacune de ces deux solutions en versant la solution d'EDTA dans la solution acide pour obtenir la solution de traceurs dont on ajuste le pH à 7,1 par ajout de solutions diluées KOH ou HNO₃. La solution obtenue dite solution mère, est à la concentration 96 ppm pour chaque lanthanide et comporte 1,5 équivalents d'EDTA.

5.1.3. Déroulement des expériences d'adsorption

Les "batches" sont des flacons en polyéthylène de 60 ml préalablement mis à tremper dans l'acide nitrique à pH=2 puis rincés plusieurs fois dans de l'eau déminéralisée. A chaque flacon correspond un temps d'agitation. Les temps d'agitation considérés suivent une suite géométrique de raison 2 et de premier terme $t_0=1$ mn et de dernier terme $t=267$ h (11jours 3h). L'ensemble des résultats obtenus est présenté dans le tableau 5.2.

Les échantillons sont numérotés selon le code PREF-SED -SOL - N

PREF: préfixe indiquant la nature des traceurs. Pas de préfixe pour les solutions contenant le mélange La, Sm, Dy. PREF= "Y" pour Yb seul; PREF= "4" pour La, Sm, Dy, Yb

SED: symbole du sédiment dans le Batch

SOL: solution en équilibre avec le sédiment. SOL="EN" ou "K"

N: numéro de série correspondant au temps d'agitation $t=2^N$

Tableau 5.2: Etude en batch de la cinétique d'adsorption des complexes EDTA de lanthanides (La, Sm, Dy, Yb) sur les sédiments prélevés sur la carrière de Sandillon.

ECH.	pH (1)	pH (3)	Durée (h)	Durée (mn)	La err (ppb)	Sm err (ppb)	Dy err (ppb)	Yb err (ppb)		ECH.	pH (1)	pH (3)	Durée (h)	Durée (mn)	La err (ppb)	Sm err (ppb)	Dy err (ppb)	Yb err (ppb)
TEN-0	7,72			1+/-0,5	1151	987	980			TK-0	6,38			1+/-0,5	1143	981	975	
TEN-2				4	1100	951	967			TK-2				4	1137	972	990	
TEN-5	7,69	7,91		31	1078	934	924			TK-5	6,36	6,41		34	1120	965	951	
TEN-7	7,59	7,83	2h07	127	1132	967	957			TK-7	6,67	6,44	2h09	129	1173	994	988	
TEN-9	7,66		8h13	493	1100	946	927			TK-9	6,35		8h10	490	1116,5	967	957	
TEN-10	7,7	7,75	16h55	1015	1090	943	929			TK-10	6,41	6,43	16h56	1016	1101	951	937	
TEN-11	7,66	7,87	33h44	2024	1101	962	958			TK-11	6,31	6,37	33h41	2021	1103	963	946	
TEN-12		7,73	69h39	4179	1085	940	936			TK-12		6,48	69h38	4178	1079	942	930	
4-TEN-12	8,05	7,98	68h54	4134	878 33	849 22	901 23	824 26		4-TK-12	6,86	6,67	68h58	4138	903 34	832 22	869 23	799 25
4-TEN-14		8,03	265h55	15955	735 30	789 21	843 22	764		4-TK-14		6,31	266h00	15960	868 33	799 21	840 22	765
TV-EN-0	7,21			1+/-0,5	921	846	889			TV-K-0	6,95			1+/-0,5	938	855	894	
TV-EN-2				4	749,2	783	885			TV-K-2				4	770	790	861	
TV-EN-3	7,2	7,32		9	683,6	790	877			TV-K-3	6,84	6,94		9	690	771	841	
TV-EN-4	7,17	7,32		18	522	762	870			TV-K-4	6,82	6,98		18	578	783	874	
TV-EN-5	7,27	7,36		36	363	724	854			TV-K-5	6,72	7,03		37	455	796	901	
TV-EN-6	7,2	7,38	1h07	67	181	672	875			TV-K-6	6,72	6,89	1h09	69	271	748	881	
TV-EN-7	7,29	7,34	2h10	130	95,7	595	855			TV-K-7	6,72	6,84	2h13	133	174	680	864	
TV-EN-8	7,26	7,33	4h15	255	54,3	477	827			TV-K-8	6,75	6,89	4h17	257	112	585	821	
TV-EN-9	7,27	7,33	8h08	488	43,5	378	773			TV-K-9	6,78	7,12	8h08	488	96,19	524	814	
TV-EN-10	7,13	7,27	17h00	1020	36	283	754			TV-K-10	6,85	6,96	17h04	1024	66,8	407	793	
TV-EN-11	7,22	7,23	33h42	2022	23,8	208	718			TV-K-11	6,97	7,07	33h39	2019	40,1	288	732	
TV-EN-12		7,24	69h39	4179	19,7	161	633			TV-K-12		7,01	69h40	4180	36,4	256	706	
4-TV-EN-12	7,37	7,56	68h33	4113	11	96	450	543		4-TV-K-12	6,98	7,17	68h37	4117	26	194	624	694
Y-TV-EN-12	7,3	7,59	68h34	4114				581 21		Y-TV-K-12	6,96	7,15	68h37	4117				601 17
TV-EN-13	7,23	7,56	139h05	8345	<LD	85	488			TV-K-13	7,03	7,19	139h08	8348	33	215	640	
TV-EN-14		7,58	267h07	16027	<LD	68	440			TV-K-14		7,01	267h10	16030	10	92	479	
4-TV-EN-14		7,55	266h05	15965	<LD	67	433	647		4-TV-K-14		7,08	266h10	15970	12	110	516	662
AG-EN-0	7,32			1+/-0,5	994	906	927			AG-K-0	6,64			1+/-0,5	966,2	901	915	
AG-EN-2				4	863	844	890			AG-K-2				4	739	802	842	
AG-EN-5	7,33	7,41		36	392	794	881			AG-K-5	6,56	6,67		39	344	858	937	
AG-EN-7	7,31	7,38	2h14	134	110,2	710	927			AG-K-7	6,79	6,68	2h15	135	161	785	932	
AG-EN-9	7,34	7,39	8h09	489	61,9	495	886			AG-K-9	6,7	6,77	8h08	488	90,8	626	919	
AG-EN-10	7,3	7,34	17h25	1045	49,9	370	826			AG-K-10	6,58	6,72	17h07	1027	64,2	470	864	
AG-EN-11	7,36	7,38	33h43	2023	38	286	807			AG-K-11	6,61	6,59	33h44	2024	50,6	390	883	
AG-EN-12		7,32	69h42	4182	37,6	266	801			AG-K-12		6,79	69h42	4182	34,7	285	826	
AG-EN-13	7,46	7,4	139h10	8350	25	182	713			AG-K-13	7,77	6,87	139h12	8352	12	140	703	
4-AG-EN-14		7,62	266h15	15975	23	167	669	760		4-AG-K-14		6,82	266h20	15980	12	120	623	731

ECH.	pH (1)	pH (3)	Durée (h)	Durée (mn)	La err (ppb)	Sm err (ppb)	Dy err (ppb)	Yb err (ppb)		ECH.	pH (1)	pH (3)	Durée (h)	Durée (mn)	La err (ppb)	Sm err (ppb)	Dy err (ppb)	Yb err (ppb)
CA-EN-0	7,7			1+/-0,5	979,6	911	938			CA-K-0	8,99			1+/-0,5	988	900	926	
CA-EN-2				4	840	854	954			CA-K-2				4	923	872	943	
CA-EN-5	7,38	7,68		41	235	641	862			CA-K-5	8,82	8,89		40	544	756	892	
CA-EN-7	7,55	7,71	2h16	136	56,5	473	838			CA-K-7	8,85	8,95	2h18	138	184	594	875	
CA-EN-9	7,75	7,78	8h10	490	7,3	175	751			CA-K-9	9,07	9,08	8h10	490	15,1	286	815	
CA-EN-10	7,52	7,76	17h11	1031	0,71	36,5	561			CA-K-10	8,92	8,98	17h13	1033	2,09	96,3	673	
CA-EN-11	7,71	7,94	33h42	2022	0	10,2	366			CA-K-11	9,05	8,90	33h42	2022	<LD	29,3	513	
CA-EN-12		7,73	69h43	4183	0	3,0	174			CA-K-12		8,77	69h45	4185	<LD	7,1	353	
Y-CA-EN-12	7,72	7,82	68h39	4119				542 20		Y-CA-K-12	9,13	8,77	68h41	4121				598 22
4-CA-EN-12	7,69	7,87	68h40	4120	<LD	3,8	258	656		4-CA-K-12	9,2	8,88	68h43	4123	<LD	10	394	676
CA-EN-13	7,74	7,9	139h17	8357	<LD	1,2	74			CA-K-13	9,49	9,08	139h19	8359	<LD	1,7	186	
4-CA-EN-14		7,91	266h25	15985	<LD		31	428		4-CA-K-14		8,48	266h30	15990	<LD		70	490
CB-AlphaQ	9,06	8,59								CB-K-blanc	9,06	8,66						
CB-EN-blanc	7,81	7,72								4-CB-K-12	8,88	8,65	68h46	4126	<LD	5,1	159	325
4-CB-EN-12	7,74	7,84	68h45	4125	<LD	2,8	106	337		Y-CB-K-12	8,95	8,67	68h46	4126			285 15	
Y-CB-EN-12	7,74	7,8	68h44	4124				267 15		CB-K-13	8,93	8,64	139h39	8379	<LD	1,3	79	
CB-EN-13	7,74	7,72	139h37	8377	<LD		47			4-CB-K-14		8,52	267h05	16025	<LD		42	258
CB-EN-14		7,85	267h13	16033	<LD		27			S-K-0	7,33			1+/-0,5	1095	940	929	
4-CB-EN-14		7,85	266h45	16005	<LD		31	281		S-K-5	7,38	6,92		39	1088	923	920	
S-EN-0	7,62			1+/-0,5	1176	1008	1005			S-K-7	7,12	6,86	2h21	141	1077	938	944	
S-EN-5	7,73	7,87		37	1002	926	930			S-K-9	7,11	7,53	8h06	486	940	933	939	
S-EN-7	7,82	7,88	2h18	138	832	903	935			S-K-12		7,67	69h46	4186	634	831	895	
S-EN-9	7,71	7,83	8h09	489	562,2	840	901			S-K-13	8,21	7,51	139h27	8367	565	741	871	
S-EN-12		7,76	69h45	4185	252	733	887			4-S-K-14		7,53	266h35	15995	335	564	796	781
S-EN-13	7,93									SH-EN-0	7,58			1+/-0,5	1124	967	958	
4-S-EN-14		8,07	266h32	15992	48	380	774	726		SH-EN-5	7,59	7,8		40	1114	931	925	
SH-EN-0	7,58			1+/-0,5	1116	961	952			SH-EN-7	7,55	7,73	2h21	141	1089	924	929	
SH-EN-5	7,59	7,8		40	1046	953	970			SH-EN-9	7,56	7,76	8h05	485	1017	936	928	
SH-EN-7	7,55	7,73	2h21	141	744	879	922			SH-EN-12		7,69	69h48	4188	165,8	713	906	
SH-EN-9	7,56	7,76	8h05	485	450	843	920			SH-EN-13	7,63	7,84	139h32	8372	48	453	843	
SH-EN-12		7,69	69h48	4188	165,8	713	906			4-SH-EN-14		7,96	266h38	15998	27	271	647	626
SH-EN-13	7,63	7,84	139h32	8372	48	453	843			SH-K-0	5,17			1+/-0,5	1124	967	958	
4-SH-EN-14		7,96	266h38	15998	27	271	647	626		SH-K-5	5,19	5,77		40	1114	931	925	
										SH-K-7	5,24	5,96	2h23	143	1089	924	929	
										SH-K-9	5,24	5,89	8h04	484	1017	936	928	
										SH-K-12		7,11	69h49	4189	875	896	916	
										SH-K-13	5,75	6,86	139h34	8374	587	783	893	
										4-SH-K-14		6,94	266h42	16002	511	702	799	754

(1) pH des solutions en contact avec les sédiments, avant agitation

(3) pH des solutions après agitation

err: incertitude de la mesure par ICP-MS

Après mise en équilibre des sédiments pendant trois jours avec la solution EN ou K, le pH est mesuré. 525±5µl de la solution mère à 96 ppm de traceurs sont introduits dans les flacons qui sont aussitôt mis sous agitation. Afin de vérifier que les traceurs ne précipitent ni ne s'adsorbent sur les parois, on introduit des solutions témoins TK et TEN ne comportant pas de sédiments. Dans les conditions de travail, la température est celle du laboratoire, elle est égale à 22,5°C. Les flacons sont protégés de la lumière avant, pendant et après l'agitation, la dégradation photochimique des complexes métalliques EDTA, en particulier Fe(III)-EDTA étant un fait bien établi dans la littérature scientifique (Klopffer et Al, 1988 ; Kari and Giger, 1995). Après l'arrêt de l'agitation, une partie de la solution obtenue dans chaque batch est filtrée avec des filtres millipore en acétate de cellulose de porosité 0,22 µm adaptables sur seringues. Les filtrats sont acidifiés à pH=2 et stockés au réfrigérateur à l'abri de la lumière. Le pH est ensuite mesuré sur la deuxième partie de la solution non filtrée. Le temps de mise en contact solution-sédiment qui apparaît dans le tableau 5.2 correspond au temps écoulé entre l'introduction de la solution de traceurs et l'opération filtration-acidification.

Les solutions filtrées sont analysées par ICP-MS. On reporte la fraction de traceur en solution C/C_0 en fonction du temps d'agitation, C_0 étant la concentration initiale ($t=0$) en traceurs et C , la concentration de traceur en solution au temps d'agitation t .

5.1.4. Les solutions témoins

La figure 5.1 présente les variations des traceurs en solution (C/C_0) dans les solutions témoins ne comportant pas de sédiment. Globalement, on observe une légère baisse au cours du temps des teneurs en solution pour tous les lanthanides, et plus particulièrement pour le lanthane dans la solution "EN" en fin d'agitation. Ces diminutions de teneurs sont moins importantes dans la solution "K".

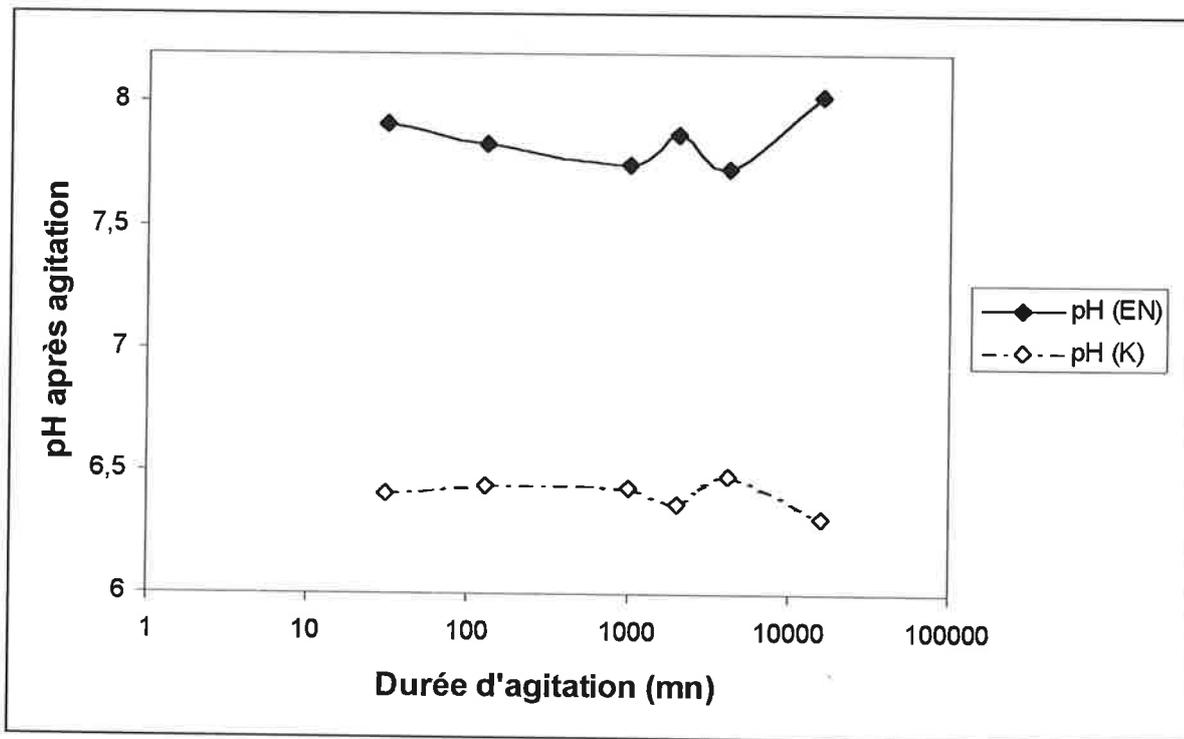
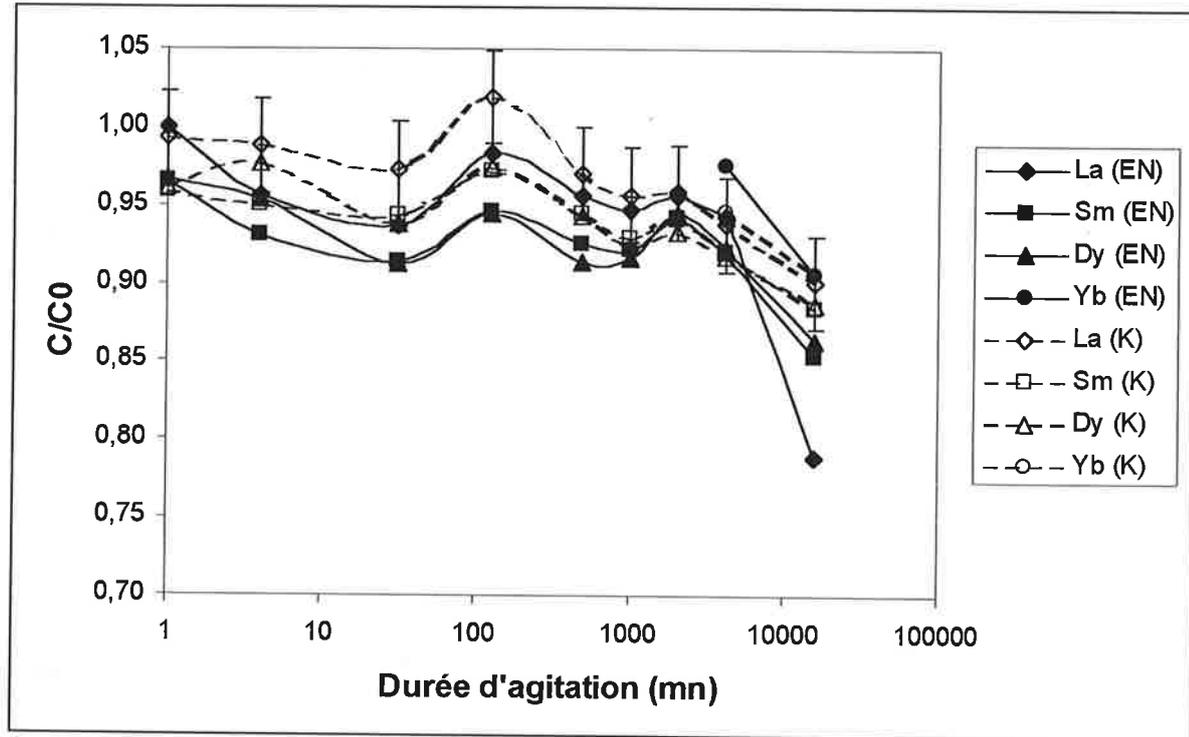


Figure 5.1: Evolution des teneurs en traceurs en solution (C/C_0) et du pH au cours de l'agitation dans les flacons témoins. La barre d'erreur a été reportée pour le lanthane dans la solution K. On peut expliquer les chutes des teneurs en lanthane dans la solution témoin "EN" par la précipitation du carbonate $\text{La}_2(\text{CO}_3)_3$.

Ces baisses de concentration s'expliquent, dans la solution d'eau naturelle, par la présence d'un grand nombre de cations susceptibles de s'échanger avec les lanthanides complexés. Cette diminution des teneurs en complexes Ln-EDTA dans les solutions naturelles a été observée par Byegard et Al. (1999a) pour le Nd, Eu, Gd, Tb, Yb et Lu. Elle s'explique par l'échange des terres rares avec principalement les ions Ca^{2+} ($\log K=10,7$), Fe^{2+} ($\log K=14,3$), Mg^{2+} ($\log K=8,8$) et Mn^{2+} ($\log K=13,9$) où K est la constante de stabilité des complexes EDTA correspondants. La chute des teneurs en lanthane s'explique également par la précipitation du carbonate de lanthane $\text{La}_2(\text{CO}_3)_3$. Ce point est démontré au chapitre 7 lors de l'interprétation des expériences de traçage de terrain par les expériences en batch. Cette réaction de précipitation n'a pas lieu dans la solution témoin K qui possède un pH acide (figure 5.1). Dans l'ensemble, les baisses de teneurs observées dans les solutions témoins sont négligeables devant les variations de teneurs observées dans les solutions en contact avec les sédiments.

5.1.5. Le pH

De manière générale, le pH des solutions est stable au cours de l'agitation (figure 5.2) et il est constant à plus ou moins $1/10^{\text{ème}}$ sauf pour les sables en présence de solution K (SK et SHK) où les solutions ne sont probablement pas à l'équilibre avec le solide au début de l'agitation. La solution K, au contact du calcaire, présente un pH particulièrement basique au début de l'agitation. Le pH diminue à la fin mais il faudrait prolonger l'expérience pour confirmer cette baisse probablement liée à une mise en équilibre lente de la solution avec la calcite.

La solution EN semble être déjà en équilibre avec les sédiments, d'une part parce que son pH ne varie quasiment pas au cours de l'agitation, d'autre part parce qu'il est voisin des pH mesurés sur le terrain à la fois dans les alluvions et les calcaires. Remarquons que pour l'ensemble des échantillons, $\text{pH}(\text{EN})$ est compris entre 7,2 et 7,9 et $\text{pH}(\text{K})$ entre 5,2 et 9,1.

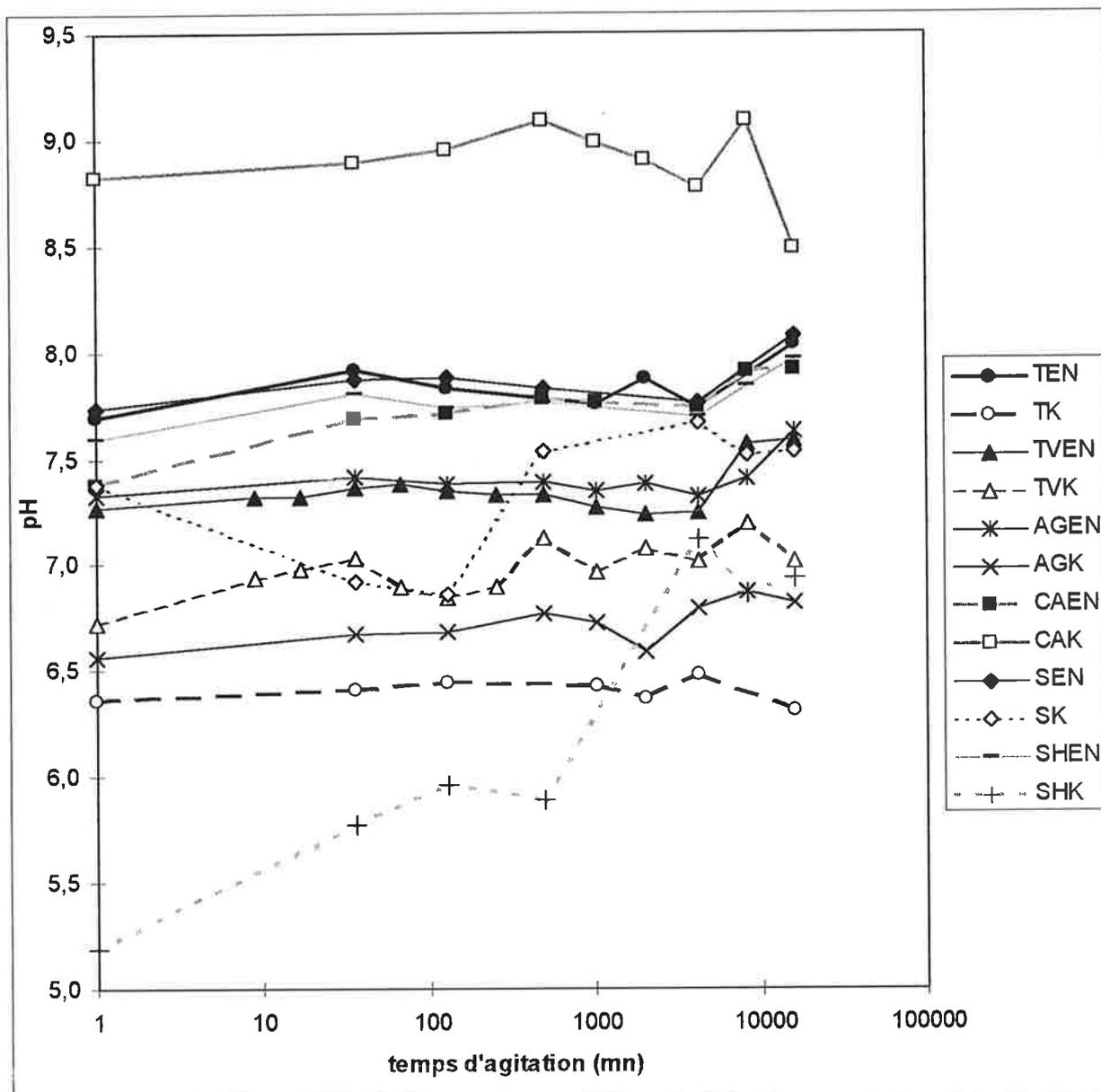


Figure 5.2: Stabilité du pH au cours du temps dans les solutions en contact avec les sédiments.

Les solutions EN ont un pH compris entre 7,2 et 7,9. Le pH de ces solutions est assez stable au cours de l'agitation alors que les solutions K présentent des écarts beaucoup plus importants à la fois dans le temps et entre les différents types de sédiments. Les variations de pH les plus importantes au cours du temps sont obtenues dans les solutions en contact avec le sable non lavé à l'acide (SK) et lavé à l'acide (SHK).

On peut donc considérer que la solution EN est bien tamponnée. Notons également que les solutions TVEN sont au pH de la nappe alluviale dans le piézomètre O ou I. Avec la solution "EN", on a donc réussi à se placer dans les mêmes conditions de pH et de composition chimique que dans la nappe alluviale, après avoir fait subir à l'eau de nappe des changements de température, une filtration et un réajustement de pH. Les résultats obtenus avec la solution "K" de même force ionique sont moins concluants du fait de la trop forte variabilité en pH.

5.1.6. Variations des teneurs en lanthanides dans les solutions en équilibre avec les sédiments

Les résultats obtenus pour les 5 types de sédiments sont présentés sur les figures 5.3a et 5.3b. Ils font l'objet d'une interprétation détaillée dans le chapitre 7. Ce paragraphe ne s'attarde donc pas sur les résultats obtenus.

Dans toutes les solutions on note une diminution rapide des teneurs en lanthanides. Les vitesses de fixation des lanthanides et les %fixés en fin d'agitation varient dans le sens $La > Sm > Dy$, c'est à dire de manière inversement proportionnelle aux constantes de stabilité des complexes EDTA en solution. Les traceurs se fixent fortement sur le calcaire et les argiles TV et AG et nettement moins sur les sables sauf le lanthane qui présente tout de même un taux de fixation d'environ 80% à la fin de l'expérience. Le dysprosium est le plus stable des trois traceurs, il ne s'adsorbe quasiment pas sur les sables.

Il est étrange que l'adsorption des lanthanides sur les sables ne diffère pas plus entre le sable lavé à l'eau et celui lavé à l'acide ! Ce résultat possède une explication simple: au cours de l'agitation, les grains de sable sont fragmentés, ce qui provoque la mise en solution de particules fines et l'augmentation de la surface d'échange avec la solution.

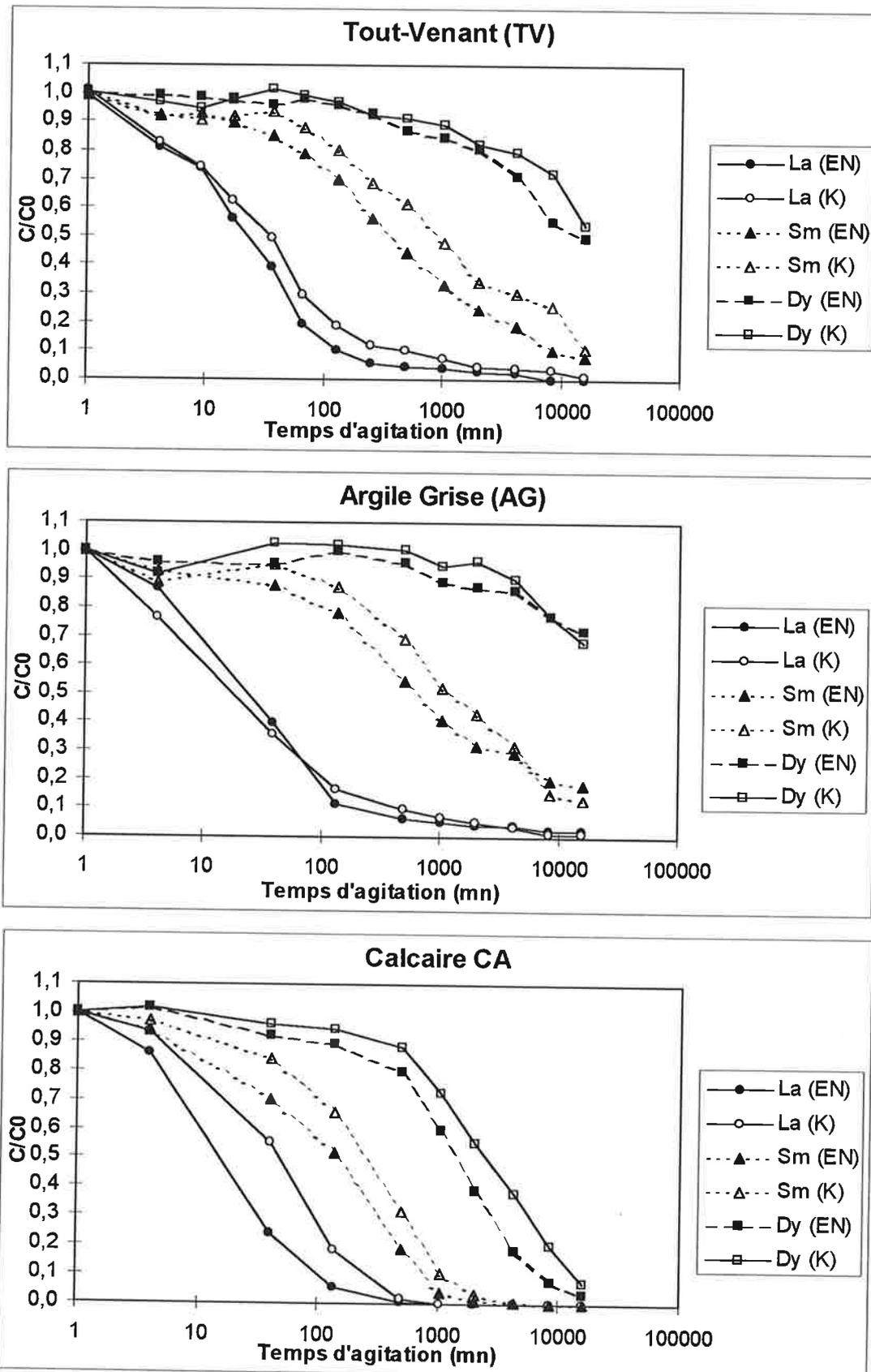


Figure 5.3a: Evolution des teneurs en La, Sm et Dy dans les solutions "EN" et "K" au contact des sédiments argileux (AG et TV) et calcaire (CA). Les lanthanides sont introduits en solution sous forme de complexes EDTA à la concentration $C_0=1$ ppm.

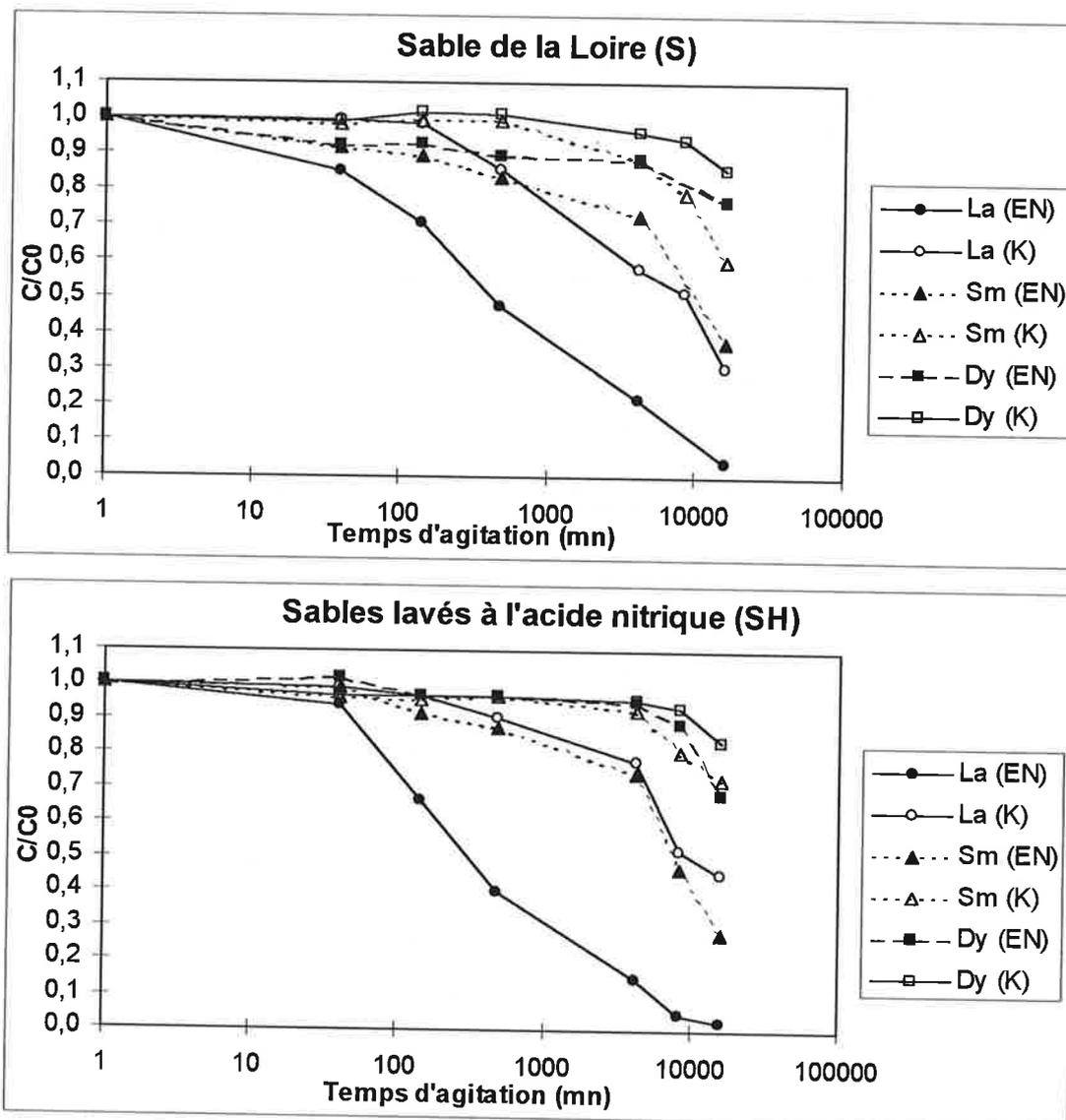


Figure 5.3b: Evolution des teneurs en La, Sm et Dy dans les solutions "EN" et "K" au contact des sables lavés à l'eau (S) et lavés à l'eau acidifiée (SH). Les lanthanides sont introduits en solution sous forme de complexes EDTA à la concentration $C_0=1$ ppm. On observe une fixation des lanthanides sur le sable, fixation moins rapide et moins importante que sur les autres sédiments.

Cette modification granulométrique se manifeste par un trouble de la solution, au cours de l'agitation, lié à la mise en suspension de particules fines.

5.1.7. Bilan des expériences de cinétique d'adsorption

L'étude de la cinétique d'adsorption montre que les réactions de fixation des complexes de lanthanides sur les matériaux prélevés sur le site de Sandillon ont des cinétiques variables. Les vitesses de fixation sont proportionnelles aux constantes de stabilité des complexes EDTA. Au bout de 11 jours et 3 h d'adsorption, l'équilibre n'est toujours pas atteint dans aucune des solutions testées. Il semble bien, d'après les expériences d'adsorption sur le sable, que les phases solides subissent des modifications de structure (broyage par agitation) augmentant, au cours du temps, leur capacité de fixation des traceurs. Ce phénomène mis en évidence avec le sable a certainement également lieu avec les sédiments argileux et le calcaire. L'augmentation des taux de fixation entre le calcaire graveleux CA (< 4 mm) et le calcaire broyé CB (< 125 μm) en est l'illustration (figure 5.4). Globalement, il faut retenir que la fixation des lanthanides complexes à l'EDTA suit l'ordre calcaire>argiles>sables.

Pour une telle étude où le pH a une grande importance puisqu'il contrôle la spéciation des espèces lanthanidiques en solution (par les complexes d'hydroxydes et de carbonates entre autres), la solution naturelle est celle qui convient le mieux dans tous les types de sédiments. Cependant, sur le tout venant (TV) et l'argile grise (AG), la solution K permet également de rendre compte de conditions de pH existant sur le terrain. On utilisera donc les deux solutions par la suite dans l'interprétation des expériences de terrain.

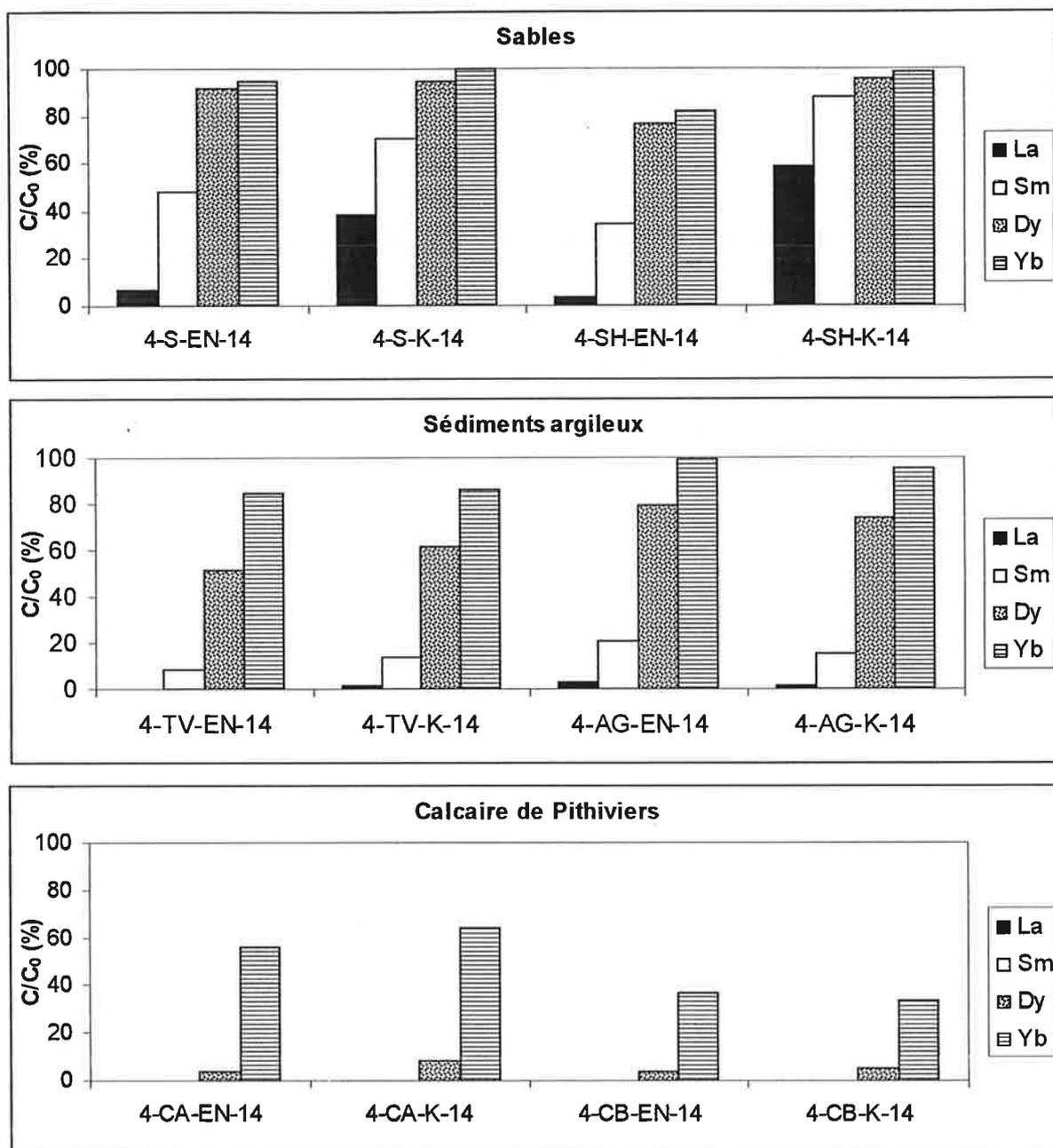


Figure 5.4: Taux de fixation, sur les sédiments de la carrière de Sandillon, des complexes EDTA de La, Sm, Dy et Yb au bout de 11 jours 3 heures d'agitation de 50 ml d'une solution à 1 ppm en chaque lanthanide au contact de 2 g de sédiments.

De haut en bas, les sédiments sont classés par ordre croissant de fixation des traceurs. Les taux de fixation les plus importants sont obtenus avec les sédiments calcaires où seuls les lanthanides lourds demeurent en solution à des teneurs détectables au bout de 11j 3h d'agitation. La fixation de l'Yb et du Dy est plus importante sur le calcaire finement broyé CB (< 125 µm) que sur le calcaire granulaire CA (< 4 mm).

5.2. Réversibilité de l'adsorption.

L'étude en batch de la réversibilité de l'adsorption des lanthanides complexés à l'EDTA sur le tout venant a été motivée par les teneurs en traceurs quasi constantes mesurées dans les sédiments du puits d'injection alors que les teneurs en solution diminuaient considérablement impliquant des processus de sorption non réversibles sur les alluvions.

Pour étudier la réversibilité de l'adsorption les expérimentateurs tracent généralement d'abord l'isotherme d'adsorption avec un temps d'agitation égal au temps nécessaire pour atteindre l'équilibre. Puis l'expérience de désorption est réalisée dans les conditions de pH et de sel de fond équivalentes. Si les deux isothermes se superposent, c'est que la réaction est réversible. Pour la réalisation de la désorption, plusieurs choix s'offrent à l'expérimentateur (Drot, 1998):

1/ Prélever la totalité du surnageant puis le remplacer par un volume identique de sel de fond, ajusté en pH. Après agitation la mesure en solution peut être effectuée.

2/ Ne pas prélever la totalité du surnageant et déterminer par pesée la quantité de liquide restant en contact avec le solide. La mesure est réalisée après renouvellement de la colonne de liquide au moyen de la solution de sel de fond ajustée en pH et agitation de la suspension.

3/ Eliminer la totalité du surnageant, laver le solide avec un minimum de solution de sel de fond puis le remettre en contact avec le volume de sel de fond correspondant au volume utilisé pour l'adsorption.

Le protocole 1/ nécessite l'élimination complète du surnageant, or, une pellicule d'eau contenant une certaine quantité de traceur va rester en surface de chacun des grains de tout venant. Il en résulte que les concentrations en traceurs désorbés déterminées selon cette méthode seront surestimées. Le protocole 3/ conduit à une désorption inférieure à la valeur

réelle en raison de la désorption partielle de l'étape de lavage. C'est le protocole 2/ qui apparaît le plus juste. Cependant, comme on s'attend a priori à une sorption faiblement réversible d'après les expériences de terrain, le protocole 1/ plus simple à mettre en œuvre devrait suffire.

Pour cette expérience, 2 grammes de tout venant TV fin (fraction $<125 \mu\text{m}$) sont mis au contact d'une solution d'eau naturelle « EN » (50 ml) pendant 2 jours 16h dans des batches contenant des teneurs en traceurs La, Sm, Dy et Yb allant de 20 ppb à 100 ppm. Une fois l'agitation arrêtée, les solutions sont filtrées à $0,45 \mu\text{m}$ puis remises en contact avec de l'eau naturelle « EN » pendant la même durée d'agitation. Les solutions sont dosées par ICP-MS. Le pH des solutions varie entre 6,7 et 7,4.

Le temps d'agitation a été choisi en fonction des études cinétiques réalisées en batch. Ces dernières ont montré qu'au bout de 11 jours d'agitation, l'équilibre entre les traceurs et le tout venant n'est toujours pas atteint. On décide donc de fixer arbitrairement le temps d'agitation à une valeur où le lanthane et le samarium sont presque totalement fixés : deux jours et 16 heures. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5.3.

On trace la masse de traceur adsorbée en fin d'agitation par unité de masse de sédiment en fonction de sa concentration en solution. Les courbes tracées ne sont pas des "isothermes" puisque l'équilibre n'est pas atteint. Les courbes montrant la non réversibilité de la réaction sont présentées sur la figure 5.5.

Les pseudo-isothermes de sorption et de désorption sont présentés sur la figure 5.6. Ces courbes montrent que pour une concentration en solution donnée, les teneurs fixées sur le tout venant sont bien plus importantes pour les lanthanides légers que pour les lanthanides lourds plus faiblement fixés. Cet écart est très prononcé pour les faibles concentrations.

Tableau 5.3: Etude de la réversibilité de l'adsorption des complexes EDTA de lanthanides.

Teneurs en lanthanides (ppb) mesurées en solution à la fin de l'adsorption et de la désorption pour des concentrations initiales variables de traceurs en solution

Concentration initiale approximative	Traceur	20ppb	50ppb	100ppb	500ppb	1ppm	5ppm	10ppm	50ppm	100ppm
Témoins	La	15,9	39,1	70	398	822	4190	8180	39900	92700
Teneur en solution en fin d'adsorption	La	0,020	0,05	0,17	3,59	11,1	570	2580	32100	69800
Teneur en solution en fin de désorption	La				0,07	0,37	8,9	32	221	524
m adsorbée (µg/g) en fin d'adsorption	La	0,40	0,98	1,75	9,86	20,27	90,50	140,00	195,00	572,50
m adsorbée en fin de désorption (µg/g)	La	0,40	0,98	1,75	9,86	20,26	90,28	139,20	189,48	559,40
Témoins	Sm	16,2	40	78,5	406	806	4020	7910	39300	85200
Teneur en solution en fin d'adsorption	Sm	0,090	0,37	1,35	32,8	117	2050	5530	33700	71300
Teneur en solution en fin de désorption	Sm				0,535	2,67	35,2	111,2	605	1430
m adsorbée (µg/g) en fin d'adsorption	Sm	0,40	0,99	1,93	9,33	17,2	49,3	59,5	140,0	347,5
m adsorbée en fin de désorption (µg/g)	Sm	0,40	0,99	1,93	9,32	17,2	48,4	56,7	124,9	311,8
Témoins	Dy	19,4	44	87	425	847	4320	8400	41000	89000
Teneur en solution en fin d'adsorption	Dy	7,05	16,8	36,7	233	520	3460	7580	38800	79100
Teneur en solution en fin de désorption	Dy	0,65	1,74	3,77	14,83	31,7	120,3	298,3	953	1800
m adsorbée (µg/g) en fin d'adsorption	Dy	0,31	0,68	1,26	4,80	8,18	21,5	20,5	55	247,5
m adsorbée en fin de désorption (µg/g)	Dy	0,29	0,64	1,16	4,43	7,38	18,5	13,0	31,2	202,5
Témoins	Yb	16,5	37	76	393	736	3830	7720	36600	79600
Teneur en solution en fin d'adsorption	Yb	15,2	29	63	331	640	3430	7150	35700	68800
Teneur en solution en fin de désorption	Yb	1,12	2,34	5,44	17,5	34,6	92	236	690	1170
m adsorbée (µg/g) en fin d'adsorption	Yb	0,033	0,20	0,33	1,55	2,40	10	14,3	22,5	270
m adsorbée en fin de désorption (µg/g)	Yb	0,005	0,14	0,19	1,11	1,54	7,70	8,35	5,3	240,8

Mais lorsque la concentration en traceur augmente, les quantités de traceurs fixées se rapprochent d'un lanthanide à l'autre, pour une quantité de traceurs en solution donnée.

La difficulté d'une telle expérience est de pouvoir affirmer que les traceurs analysés en solution proviennent bien de la désorption et non des sédiments contenant peut-être encore de la solution précédente non totalement évacuée lors de la filtration. Le choix du protocole 1/ conduit forcément à une telle incertitude, incertitude qui n'est pas gênante si l'on veut seulement prouver la non-réversibilité des processus de sorption des lanthanides initialement sous la forme de complexe EDTA en solution.

Le calcul du facteur de dilution $[Ln]_{ads}/[Ln]_{desads}$ ($[Ln]_{ads}$ étant la concentration en solution à la fin de l'adsorption et $[Ln]_{desads}$ la concentration de la solution en fin de désorption) montre que l'on a, en effet, pour chaque batch, des facteurs de dilution très proches pour l'ytterbium et le dysprosium (figure 5.7) dont l'adsorption est beaucoup plus lente que pour le lanthane et le samarium. Les teneurs observées en solution en fin d'adsorption sont donc certainement en partie issues de la solution d'origine. Dans ce cas les teneurs en traceurs libérés par désorption sont surestimées. La fixation des complexes EDTA de lanthanides sur les sédiments est donc irréversible dans les conditions de l'expérience.

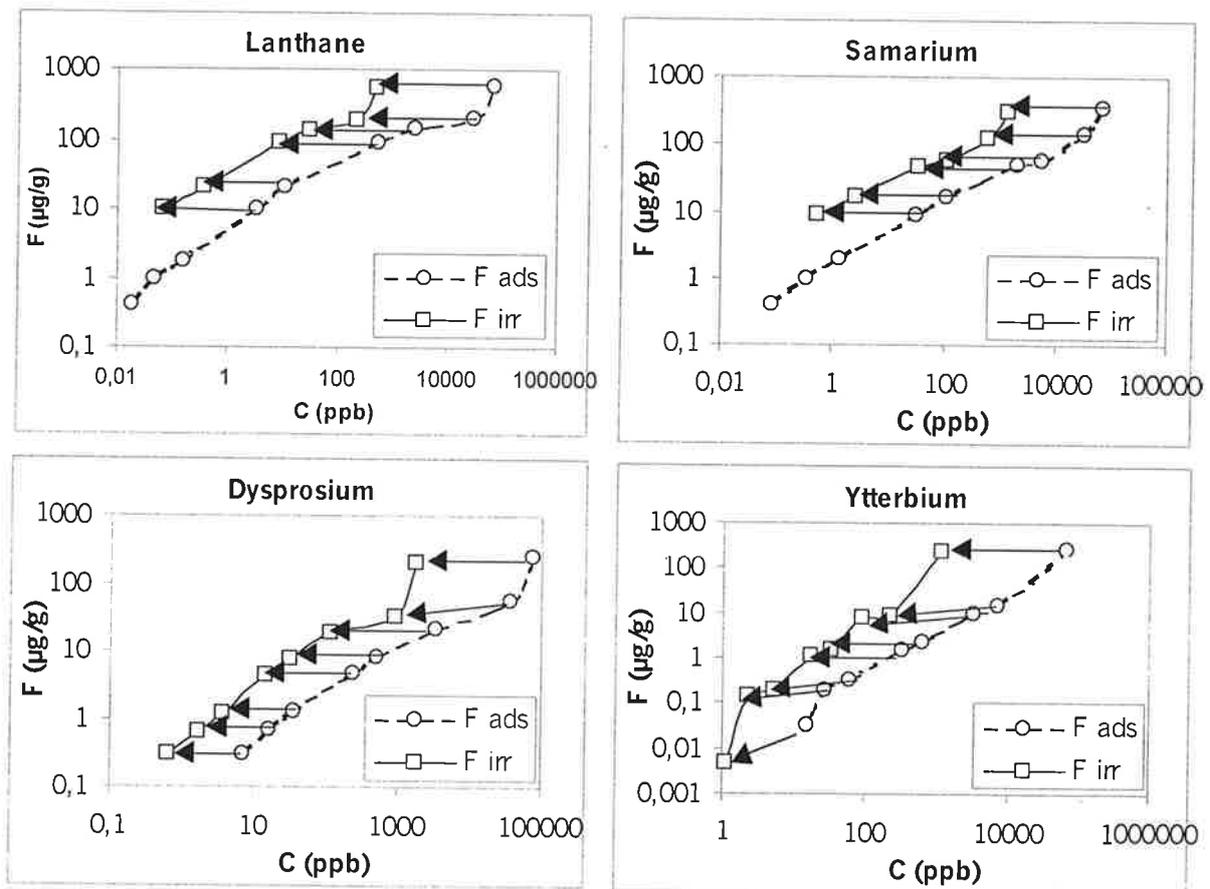


Figure 5.5 : Etude montrant la non-réversibilité de l'adsorption des complexes EDTA de lanthanides sur les alluvions argileuses.

La masse de traceur F_{ads} fixée en fin d'adsorption par gramme de sédiment est tracée en fonction de la concentration C de traceurs en solution (\circ). Lors de l'opération inverse de désorption, les mêmes sédiments sur lesquels se sont fixés les traceurs sont remis en solution avec la même solution (de force ionique 0,01) ne contenant pas de traceurs. Après la même durée d'agitation que pour l'adsorption (2 jours 16 h), on trace la masse F_{irr} de traceurs encore fixés sur les sédiments en fonction de la concentration de traceurs passés en solution (\square). Les flèches représentent la désorption des traceurs. Si la réaction de sorption était réversible les 2 courbes F_{ads} et F_{irr} seraient superposées. Or ce n'est pas le cas. Seule une faible quantité de traceurs est désorbée. De plus, les teneurs observées en solution en fin de désorption sont certainement en partie issues de la solution obtenue à la fin de l'adsorption et non totalement évacuée des sédiments lors de la filtration.

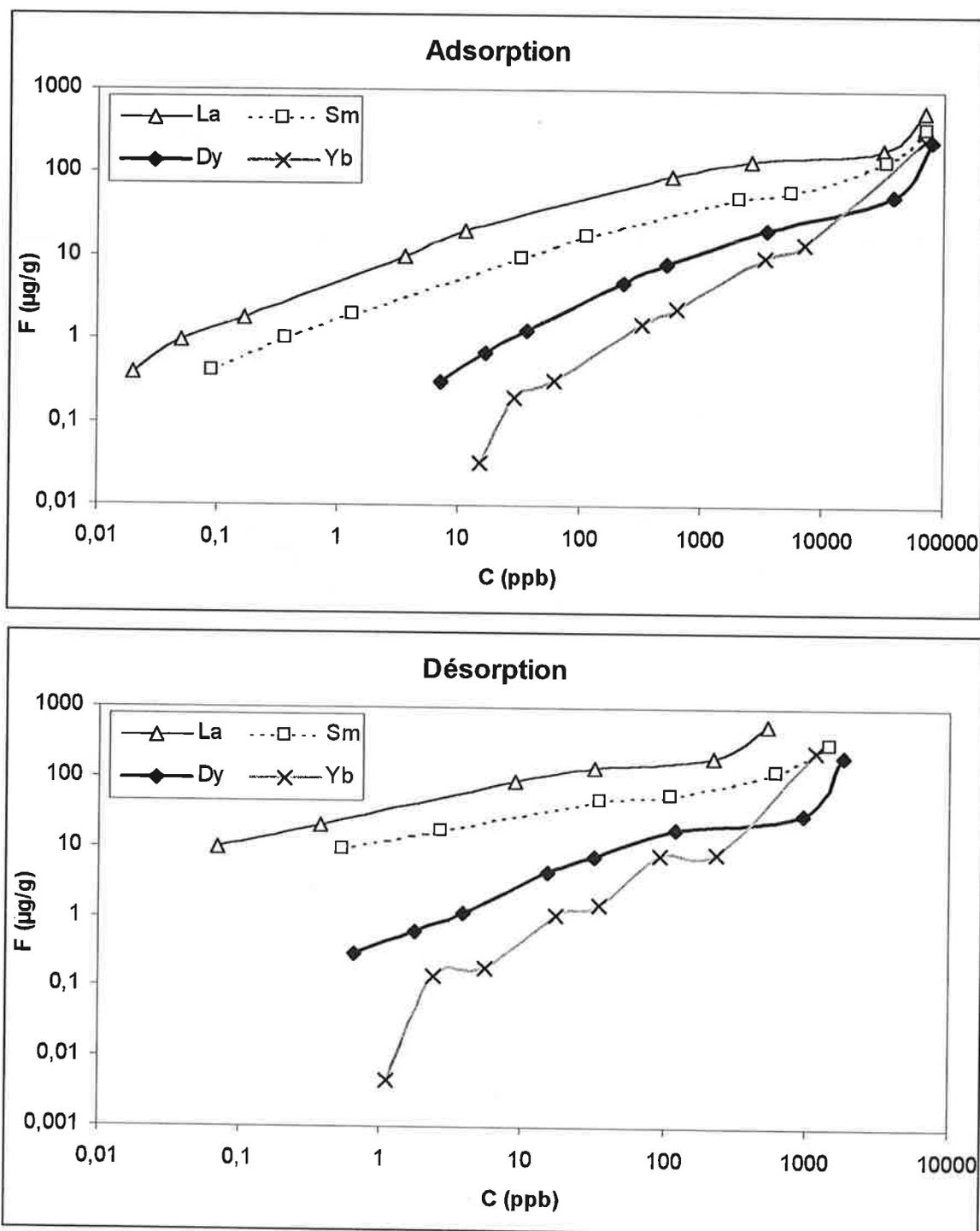


Figure 5.6: Concentrations des lanthanides fixés sur le tout venant en fonction de la concentration en solution obtenue en fin d'adsorption (graphique du haut) et en fin de désorption (graphique du bas).

Pour une concentration en solution donnée, la quantité de lanthanide fixé varie dans le sens $La > Sm > Dy > Yb$. Les écarts entre les différents lanthanides sont plus beaucoup importants pour les faibles concentrations.

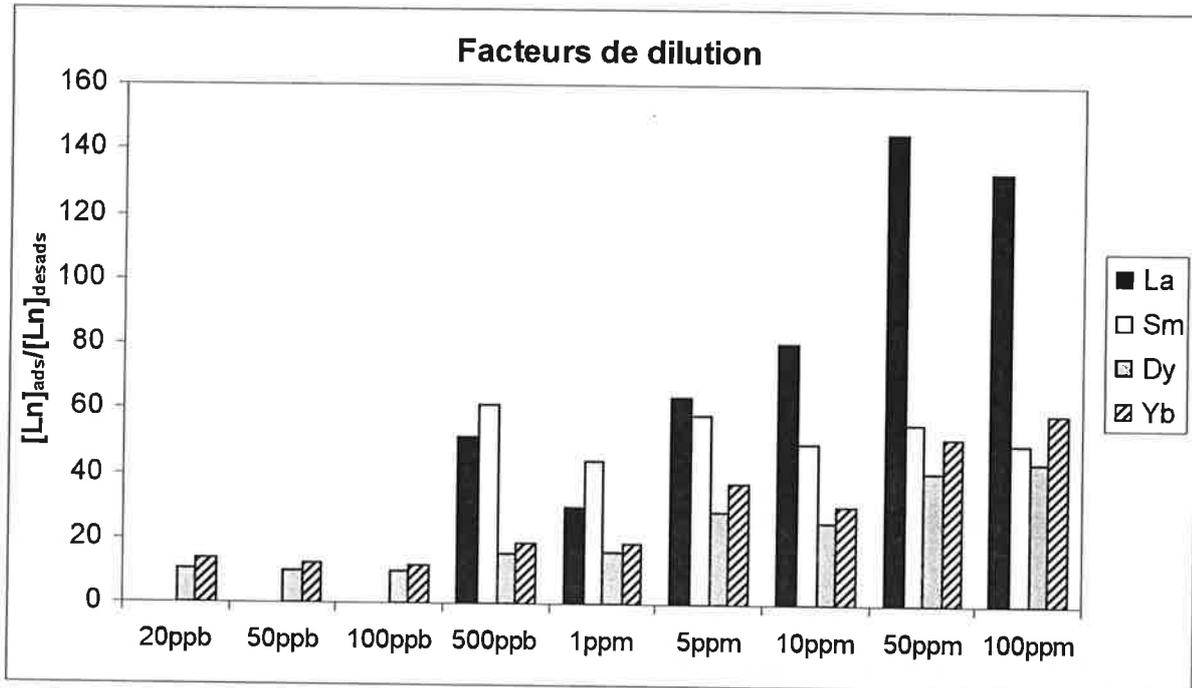


Figure 5.7 : Facteurs de dilution des traceurs entre les solutions obtenues en fin de sorption et celles obtenues en fin de désorption.

Les valeurs de concentrations en abscisse sont les valeurs initiales en solution au début de l'agitation. Il est possible d'expliquer les teneurs en solution obtenues en fin de désorption par la dilution, lors de l'ajout de la solution sel de fond "EN", de la faible quantité de soluté contenue entre les grains des sédiments filtrés après l'adsorption. Les facteurs de dilution sont très proches pour les traceurs les plus stables Dy et Yb. Ce point milite en faveur de l'interprétation des teneurs en solution en fin de désorption par un effet de dilution. Pour les lanthanides légers (La et Sm), le facteur de dilution est surestimé par l'adsorption du lanthane et du samarium.

5.3. Désorption des lanthanides naturels

Lors des injections de complexes EDTA dans les alluvions, des quantités importantes de lanthanides naturels ont été extraites du milieu. Il a alors fallu vérifier qu'il était possible d'interpréter cela comme une extraction, par l'excès d'EDTA (0,5 équivalent en excès), des lanthanides naturels des sédiments. Signalons par ailleurs que le lavage à l'EDTA est très utilisé pour l'extraction des métaux dans le sol (Quevauviller et Al., 1998).

D'autre part, on a voulu étudier, par une expérience simple de lavage au CaCl_2 0,5 M, le type de mécanisme d'adsorption des complexes EDTA de lanthanides sur les alluvions.

5.3.1. Lavage des sédiments à l'EDTA

Pour cette expérience, le procédé d'extraction décrit par Quevauviller et Al. (1998) a été repris et légèrement modifié. Deux solutions extractives sont préparées: la première contient $5 \cdot 10^{-2}$ mol/L d'EDTA, la seconde est à la concentration $5 \cdot 10^{-3}$ mol/L. 5 grammes de sédiments (AG, CB et TV) sont agités pendant 2 heures au contact de 50 ml d'une solution extractive. Après filtration à $0,22 \mu\text{m}$, les solutions sont analysées par ICP-MS. Le pH des solutions après agitation sont donnés dans le tableau 5.5 ci-dessous.

Tableau 5.5 : pH des solutions après extraction des sédiments à l'EDTA

	CB	TV	AG
EDTA $5 \cdot 10^{-3}$ M	7,87	5,94	5,05
EDTA $5 \cdot 10^{-2}$ M	7,55	6,28	5,94

Lors de la désorption, par l'EDTA de la fraction d'éléments échangeables dans les sédiments, il peut se produire une dissolution des phases minérales par l'EDTA. Par exemple, Nowack et Sigg (1996) montrent qu'à $\text{pH}=6,27$, il suffit d'une vingtaine de minutes pour complexer tout l'EDTA d'une solution $1,17 \cdot 10^{-4}$ mol/L d'EDTA initialement sous forme non

complexée, par simple dissolution d'oxydes de fer(III) amorphes par l'EDTA.

Afin d'étudier qualitativement l'éventuelle dissolution des sédiments par les solutions extractives d'EDTA, 2 g de tout venant alluvionnaire fin ($< 125 \mu\text{m}$) préalablement irradié par activation neutronique ont été placés pendant une nuit (12 h) au contact de 50 ml d'une solution extractive d'EDTA 5.10^{-2} mol/L. Les activités de la solution filtrée et du même volume de solution en équilibre avec les sédiments activés ont ensuite été comptées sur des détecteurs Ge-Li. Les irradiations de sédiments datant de quelques mois, seuls les éléments à demi-vies longues ont pu être ainsi analysés. Les quantités élémentaires en solution sont présentées, pour chaque élément, sur la figure 5.8. Ces résultats sont semi-quantitatifs puisque la géométrie du comptage n'est pas strictement la même entre la solution et le mélange solution-sédiment.

Comme on l'a montré précédemment, les phases minérales qui contiennent les terres rares sont les mêmes que celles qui contiennent les lanthanides. On dispose donc, avec le thorium, d'un moyen pour vérifier que ces phases argileuses ne sont pas dissoutes par l'EDTA. Alors que le thorium ne passe quasiment pas en solution, les lanthanides sont fortement mis en solution, ce qui implique d'une part la faible dissolution des phases solides contenant les terres rares, et d'autre part la fixation superficielle des lanthanides sur les sédiments (figure 5.8). Par ailleurs, il est fort probable que le thorium mesuré en solution soit contenu dans des colloïdes.

5.3.2. Lavage des sédiments au CaCl_2 0,5 mol/L

Si, par lavage des sédiments à l'aide d'une solution CaCl_2 0,5 M, la désorption des lanthanides fixés est réalisée, c'est que l'adsorption des lanthanides s'effectue sous la forme de complexes de "sphère externe". Dans le cas contraire, il faut parler de complexes de "sphère interne" (Ildefonse et Al., 1999).

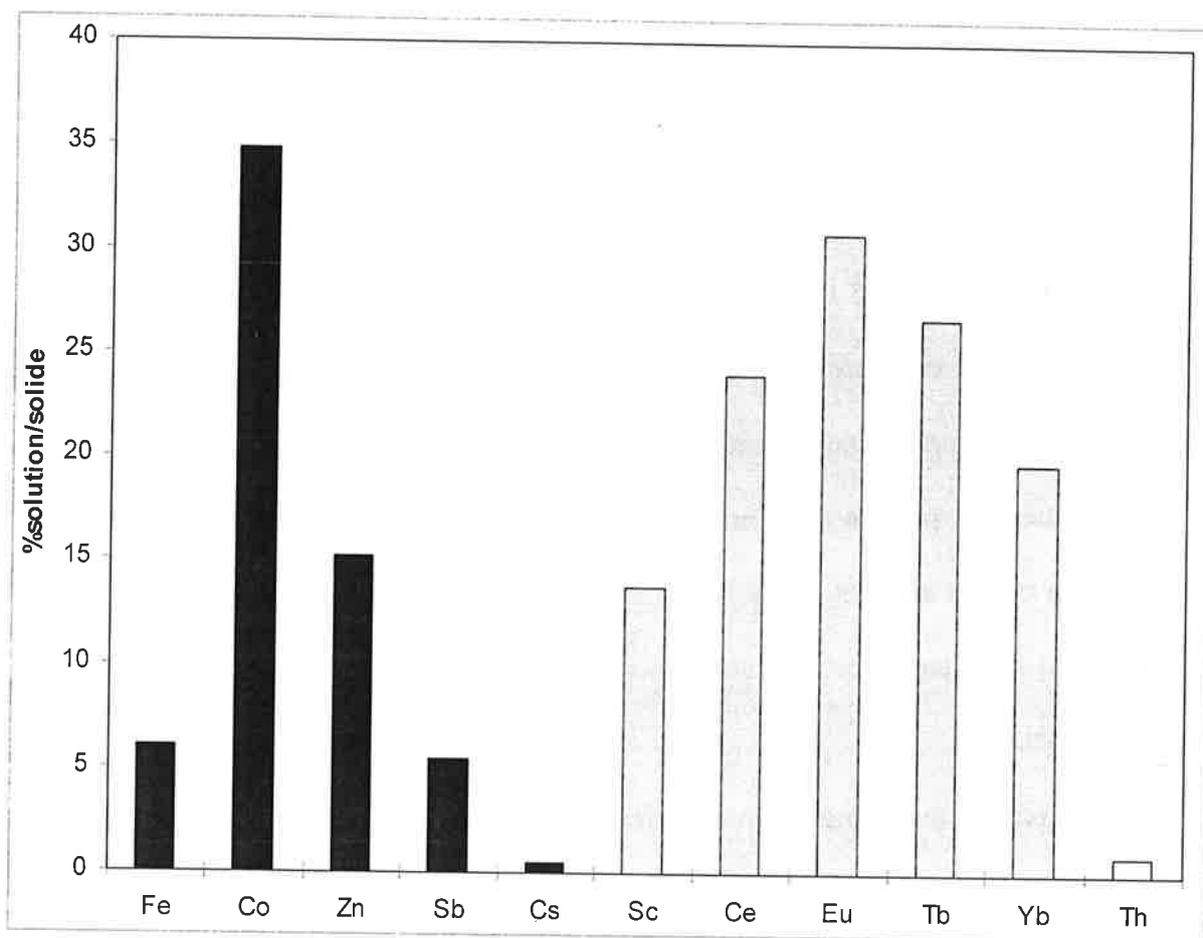


Figure 5.8: Pourcentages de la quantité passée en solution par rapport à la quantité initialement présente dans le tout venant fin (<125 μm), pour les éléments à demi-vie longue, après lavage du tout venant à l'EDTA 5.10⁻² M pendant 12 heures.

La faible quantité de thorium qui passe en solution montre que les phases argileuses riches en thorium ne sont que très faiblement dissoutes. Les teneurs en thorium mesurées en solution sont par ailleurs probablement liées à des phases colloïdales. Les teneurs en terres rares étant corrélées aux teneurs en thorium dans les sédiments de la Loire, on en déduit que les lanthanides qui passent en solution lors du lavage à l'EDTA ne proviennent pas de la dissolution des phases argileuses par l'EDTA mais bien d'une désorption de surface.

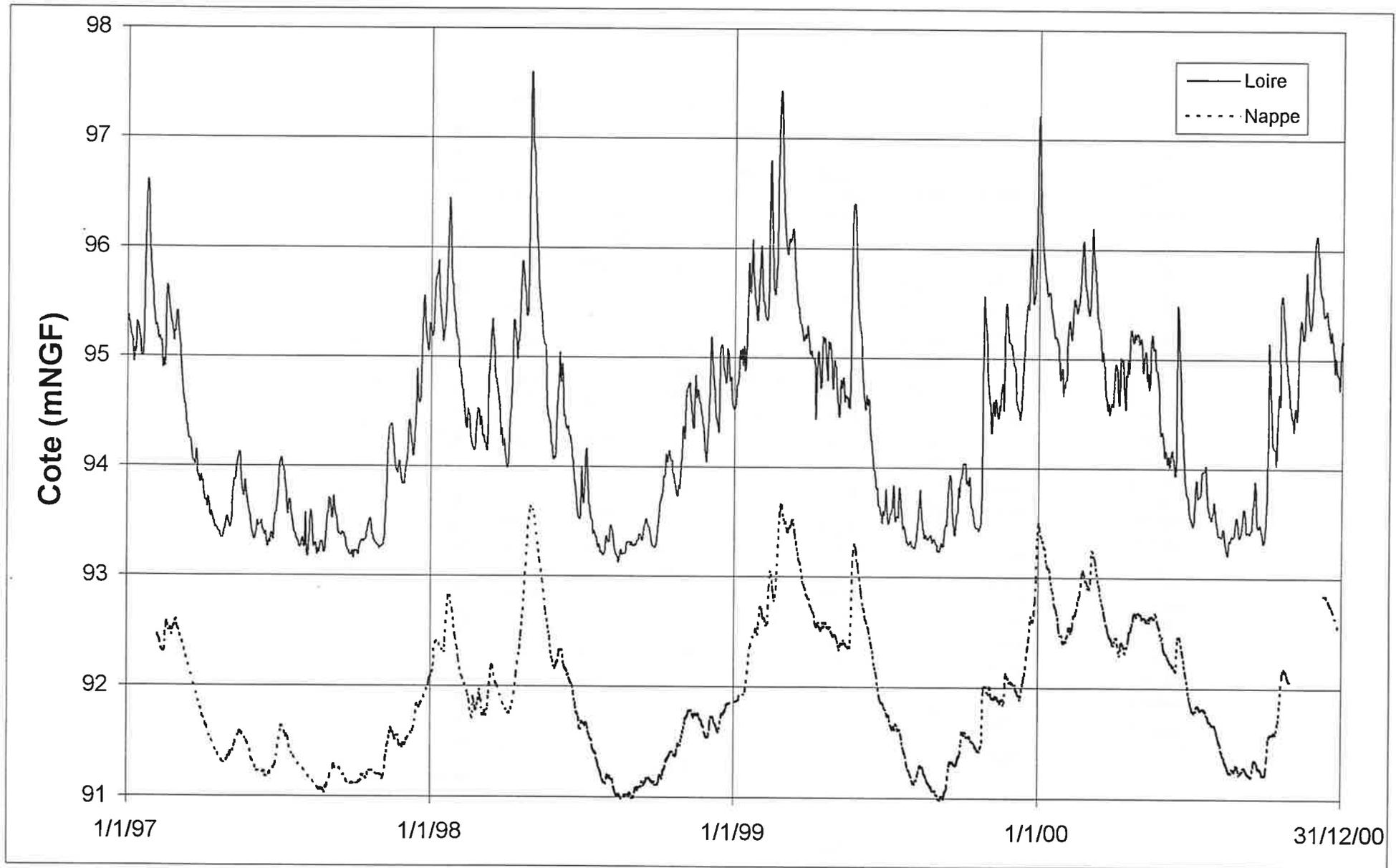
Les sédiments naturels comportant une multitude de phases minérales, différents processus de spéciation peuvent coexister.

Pour cette expérience, 1 g de sédiments argileux sont mis en équilibre avec 30 ml d'une solution CaCl_2 0,5 M pendant 12 heures. Les solutions sont filtrées à $0,45 \mu\text{m}$ et analysées. Du fait de leur importante salinité, l'analyse par ICP-MS des solutions obtenues nécessite leur dilution au moins d'un facteur 10. Deux types de sédiments argileux sont étudiés: l'argile grise AG et le sédiment "Sed I" récolté dans le piézomètre d'injection le 12/5/98. Les résultats obtenus sont présentés et interprétés dans le chapitre 7. A la fin de l'agitation, les pH des solutions sont de 6,34 pour la solution témoin ne contenant pas de sédiments, 5,45 pour la solution AG et 6,91 pour la solution "Sed I".

TROISIEME PARTIE

COMPREHENSION DES MECANISMES DE TRANSFERT DES ESPECES CHIMIQUES DANS LE SYSTEME LOIRE/NAPPE ALLUVIALE/NAPPE CALCAIRE A PARTIR DE L'OBSERVATOIRE DE SANDILLON

Figure 6.1: Variations parallèles de la cote de la nappe à Sandillon au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire (piézomètres B,E,Z33,Q,O,CA1,Z,Y) et de la cote de la Loire à Sandillon calculée à partir de Gien.



CHAPITRE 6

SUIVIS PIEZOMETRIQUES ET ETUDE HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE DE SANDILLON

Ce chapitre présente les traits généraux de la piézométrie de l'aquifère au niveau de la carrière, y compris les différentes influences mineures, et vise à caractériser les réponses différentielles de la nappe à l'ensemble des sollicitations de son environnement. Cette caractérisation, menée sur 4 cycles hydrologiques, a permis de saisir non seulement les tendances générales du système mais aussi l'impact d'événements exceptionnels comme les crues ou les tempêtes de la fin de l'année 1999. Il faut également souligner que l'identification de chacun de ces facteurs n'a pu être réalisée que grâce à l'observation permanente effectuée sur une longue durée avec un pas de temps suffisamment petit. L'installation des enregistreurs piézométriques automatiques, à l'automne 1997, en différents points du site, a permis de mettre en évidence des influences de courte période qui ne pouvaient pas être décelées par des mesures manuelles pratiquement trop espacées dans le temps.

6.1. Caractéristiques générales des variations piézométriques de la nappe

6.1.1. Une piézométrie contrôlée par la Loire

Les chroniques des cotes piézométriques de la Loire à Sandillon, calculées à partir des cotes de Gien (chapitre 3), et celles de la nappe alluviale, au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire, ont été reportées sur la figure 6.1. L'étude de ces chroniques conduit aux trois résultats suivants:

1/ Le plan d'eau de la Loire est situé au-dessus du niveau de la nappe quelle que soit la saison (tableau 6.1): +1,74 m à l'étiage; +2,5 m en moyenne et jusqu'à +3,95 m pendant les crues.

Tableau 6.1: Moyennes et extrema des cotes de la Loire et de la nappe à Sandillon ainsi que de leurs écarts de mars 1997 à décembre 2000

	Cotes de la Loire calculées à Sandillon (mNGF)	Cotes de la nappe à Sandillon*	Écarts entre les cotes de la Loire et celles de la nappe (mètres)
Moyenne	94,49	91,96	2,50
Maximum	97,58	93,66	3,95
Minimum	93,26	90,95	1,74

(*) Cotes mesurées sur l'observatoire piézométrique implanté en 1997

Si l'on considère la distance moyenne de la Loire au réseau piézométrique implanté en 1997 (600 m), et le gradient hydraulique maximal donné par les cartes piézométriques (10^{-3}), il faut rajouter 0,6 mètres à la cote de la nappe mesurée sur le réseau piézométrique pour obtenir la cote de la nappe au niveau de la Loire. Cette correction place toujours le plan d'eau du fleuve entre 1,1 et 3,35 mètres au-dessus de la nappe.

2/ Le niveau de la nappe suit, à quelques nuances près, le niveau de la Loire. Ce dernier étant positionné au-dessus de la nappe, cela implique que la Loire contrôle rigoureusement le niveau de la nappe.

3/ La différence de cote entre la nappe et la Loire varie au cours du temps (fig.6.2). Elle est assez faible en période d'étiage et augmente en période de crue.

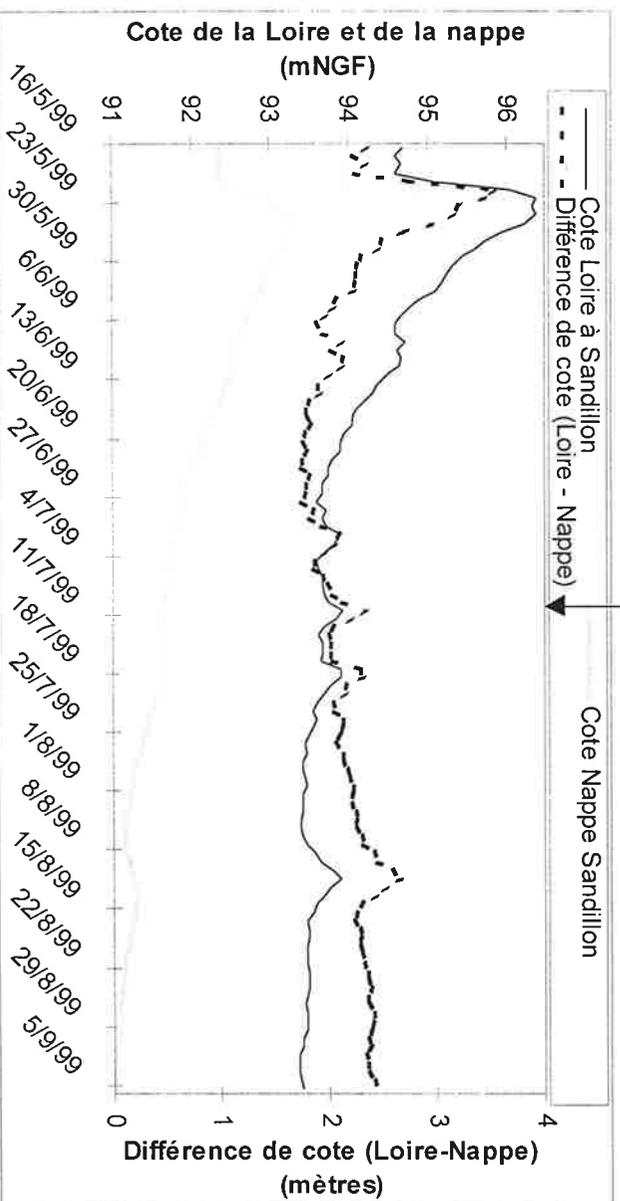
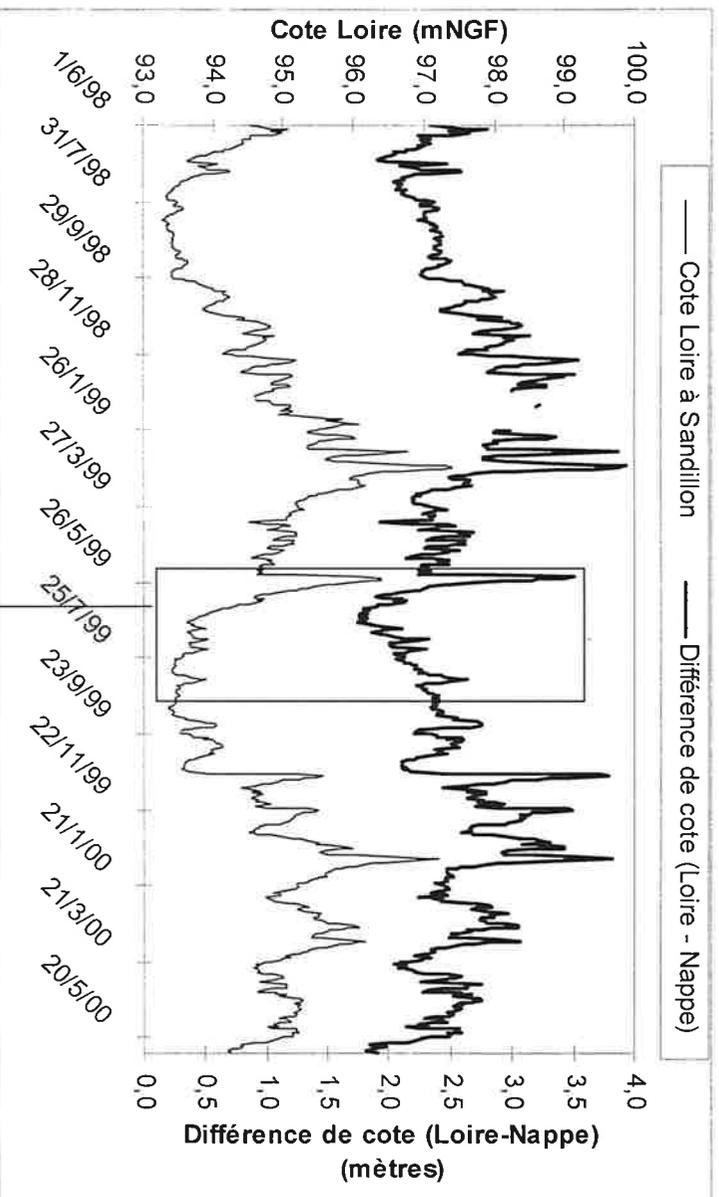


Figure 6.2: Différences de cotes entre la Loire à Sandillon et la nappe alluviale au niveau du réseau piézométrique implanté en février 1997.

Sur deux cycles hydrologiques complets, du 1/6/98 au 31/5/00 (graphique du haut), l'écart entre la cote de la Loire et celle de la nappe varie de 1,74 mètres à l'étiage à 3,95 mètres en période de crue. La moyenne de cet écart sur deux ans est de 2,50 mètres. Le graphique du bas montre que l'écart se creuse en période de crue pour diminuer après passage de la crue. Sur les longues périodes de descente (graphique du bas), l'écart se stabilise au bout d'un certain temps. En plein été, alors que le niveau de la Loire est quasiment constant, l'écart se creuse à nouveau à cause de la diminution plus rapide et régulière de la cote de la nappe. Cela montre qu'à l'étiage la nappe n'est pas suffisamment alimentée par rapport à ses pertes. Cela commence à se produire quand la Loire passe en dessous de la cote 93,6 mètres NGF (débit correspondant de la Loire à Gien = 85,4 m³/s).

6.1.2. Différences de cotes entre la nappe alluviale et la nappe calcaire

On dispose de 6 multiplets répartis tout autour de la carrière (fig.2.5) pour étudier les différences de cotes entre la nappe alluviale et la nappe du calcaire de Pithiviers. Ces piézomètres sont les suivants:

<u>Multiplets</u>	<u>Piézo calcaires</u>	<u>Piézo alluvionnaires</u>	<u>Piézo mixte (alluvions-calcaire)</u>
(Z19, Z32)	Z32	Z19	
(Z20, Z34)	Z34	Z20	
(Z21, Z35, Z36)	Z35	Z21	Z36
(P1, P2)	P1	P2	
(Pf1, Pf2)	Pf1	Pf2	
(CA2, X, Y, Z)	CA2	X, Y, Z	

Au moins une vingtaine de relevés manuels ont été réalisés sur chacun de ces multiplets.

On dispose également de relevés toutes les heures en P1 et P2 qui ont été équipés d'enregistreurs automatiques de niveau de nappe du 19/5/00 au 30/10/00. Toutes les mesures synchrones du niveau de la nappe dans le calcaire et dans les alluvions figurent dans l'annexe 21. A titre d'exemple, la figure 6.3 présente l'étude comparée des variations piézométriques simultanées des nappes alluviale et calcaire au niveau des 3 multiplets de piézomètres de l'observatoire implanté en 1997. Les résultats, décrits sur cet exemple, sont comparables à ceux obtenus sur l'ensemble du site, à savoir:

-La différence de cote entre les deux nappes est faible, de l'ordre de quelques centimètres. La différence maximale de niveau entre nappe calcaire et nappe alluviale, huit centimètres, a été mesurée en P1-P2 en période de descente de la Loire.

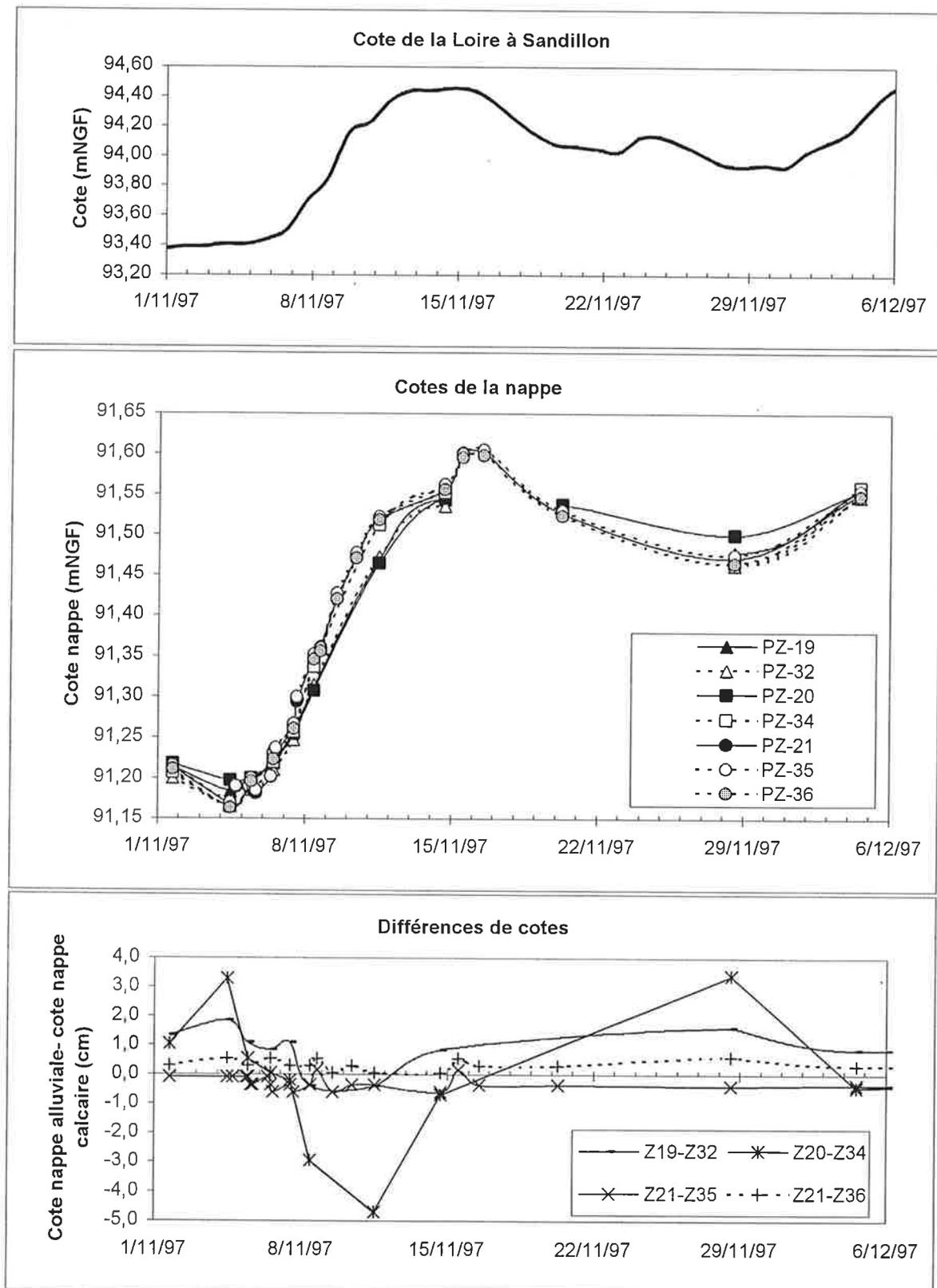


Figure 6.3: Comparaison des cotes de la nappe alluviale et des cotes de la nappe du calcaire de Pithiviers au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire.

Les doublets de piézomètres alluvionnaires (points noirs) et calcaires (points blancs) sont (Z19-Z32) et (Z20-Z34). Le triplet (Z21, Z35, Z36) est composé en plus d'un piézomètre mixte alluvion-calcaire (point gris):

Z36. En chacun des trois multiplets, la différence de cote entre les deux nappes (graphique du bas) est inférieure à 2 cm sauf au niveau du doublet (Z20, Z34) où l'écart entre les deux nappes atteint 4 cm en période de descente de la Loire, et 5 cm en période de remontée de la Loire. Pour les doublets (Z19-Z32) et (Z20-Z34) où il existe une différence de cote sensible entre les deux nappes, le niveau de la nappe alluviale se trouve au-dessus de celui de la nappe calcaire en période de descente et inversement, en période de crue, la nappe calcaire est en charge par rapport à la nappe alluviale.

Les différences piézométriques sont très faibles (inférieures à 1 cm) pour les multiplots (Z21, Z35, Z36) et (CA2, X) en raison, probablement, de transferts de charges rapides entre les deux nappes, à cet endroit.

-Les différences de cotes s'inversent avec le régime de la Loire. En période de descente de la Loire, la nappe alluviale est généralement en charge de quelques centimètres par rapport à la nappe calcaire. En période de crue, c'est l'inverse.

On constate clairement qu'il n'existe pas de différence significative de cote entre les piézomètres plongeant dans la nappe calcaire et ceux implantés dans la nappe alluviale. Les nappes calcaire et alluviale ont donc des transferts de charges rapides l'une vers l'autre. Les différences de charge minimales observées entre les deux nappes ne s'expriment qu'en relation avec la dynamique imposée par la Loire. En période de remontée, comme en période de descente, la nappe calcaire réagit plus vite que la nappe alluviale. Les différences de charge les plus importantes sont certainement liées à une plus faible perméabilité verticale du terrain. La présence d'une couche marneuse sous alluviale peut rentrer en jeu dans ce terme "perméabilité verticale". Lors du forage des piézomètres P1 et P2, une couche épaisse de marne blanchâtre avait été mise en évidence entre le calcaire fissuré et les alluvions, entre 9 m et 16,8 m de profondeur (annexe 5). Cette couche se rattache certainement à la formation des marnes de Blamont, assez perméable. Une telle épaisseur au niveau du doublet (P1,P2) est probablement à l'origine des 8 cm de différence piézométrique parfois observés entre P1 et P2. Au niveau de Pf1-Pf2, cette couche n'est présente que sur un mètre. Les différences de cotes sont également plus faibles : 4 cm maximum. Quant aux multiplots implantés en 1997, il est probable qu'une couche semi-imperméable sous-alluviale soit présente au niveau du piézomètre Z20. Cependant, une telle information n'a pas été fournie dans le rapport établi à la suite des forages de 1997.

6.2. Les influences mineures sur la piézométrie

6.2.1. Les pompages de la carrière

Dès leur installation, les enregistreurs piézométriques ont permis d'observer, dans les piézomètres calcaires essentiellement, de petites oscillations journalières de période 24h, s'arrêtant le week-end et reprenant le lundi. Le suivi précis des heures de mise en route et d'arrêt des pompes de la carrière a permis de conclure rapidement que ces oscillations de faibles amplitude (8 cm maximum) étaient liées non pas à un effet de marée mais bien à l'activité des pompes de la carrière. Il est très probable que seules les 2 pompes situées dans le calcaire, sous l'installation technique (débit total = 700 m³/h) soient responsables du rabattement de la nappe, la pompe située dans le lac en eau claire (débit = 400 m³/h) étant isolée par le colmatage du lac. En effet, ce dernier se situe, en moyenne, plus de 2 mètres au-dessus du niveau de la nappe (fig.6.10).

En fixant, pendant trois jours, le pas d'enregistrement des cotes piézométriques au minimum, c'est-à-dire 5 mn, les courbes de rabattement de la nappe en fonction du temps (figure 6.4) ont permis de calculer (tableau 6.2) la transmissivité T^1 et le coefficient d'emmagasinement S^2 de la nappe calcaire entre les pompes de l'installation technique et les piézomètres P1, Pf1, CA1, CA2, CA3 et CB8 qui étaient équipés d'enregistreurs automatiques. Les détails du calcul de T et S figurent dans l'annexe 8. Pour ce calcul, les trois courbes de rabattement obtenues pendant les pompages sur les trois jours d'observation ont été superposées afin d'obtenir une moyenne qui compense la faible précision (1 cm) que l'on a sur la mesure automatique de la cote de la nappe. La même opération a été effectuée pour les courbes de remontée de la nappe.

¹ La transmissivité d'un aquifère est le produit de son épaisseur e par sa perméabilité K ; $T=K.e$

² Le coefficient d'emmagasinement, S , traduit la compressibilité de l'aquifère.

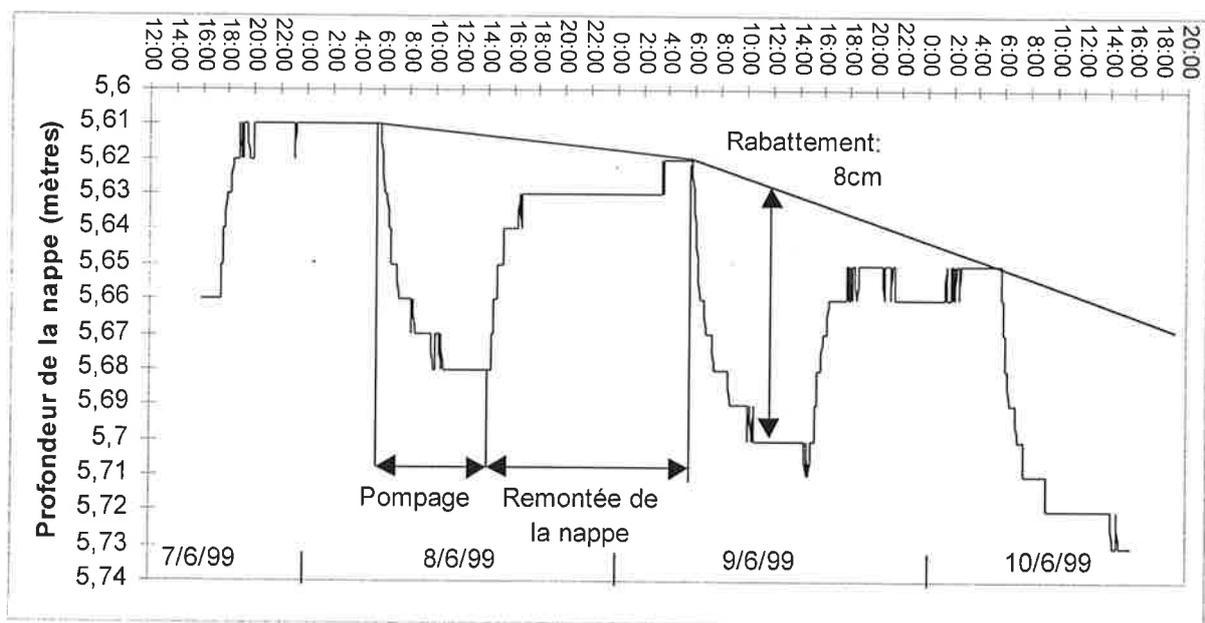


Figure 6.4: Oscillations quotidiennes de la nappe liées au pompage de la carrière.
Piézomètre CB8.

Le rabattement de la nappe commence après la mise en route des pompes vers 6h00. L'arrêt du pompage, en fin d'après-midi, entraîne la remontée de la nappe. Les courbes de pompage et de remontée de la nappe ont été interprétées pour calculer les paramètres hydrodynamiques moyens, T et S de la nappe du calcaire de Pithiviers (tableau 6.2 ci-dessous).

Tableau 6.2: Transmissivités et coefficients d'emmagasinement moyens de la nappe du calcaire de Pithiviers calculés à partir des rabattements journaliers de la nappe liés aux pompes de la carrière. Rabattement maximal (Rmax) observé dans la nappe.

Piézomètre	Distance ⁽¹⁾ aux pompages (mètres)	Transmissivité moyenne (m ² /s)		S ⁽²⁾	Rmax (cm)
		Pompage ⁽²⁾	Remontée ⁽³⁾		
P1	260	2	1,2	$3,1 \cdot 10^{-3}$	6
Pf1	1010	3,9	2,7	$1,1 \cdot 10^{-3}$	3
CA1	850	2,4	1,8	$4,2 \cdot 10^{-4}$	5
CA2	860	2,4	1,8	$4,1 \cdot 10^{-4}$	5
CA3	1090	2,9	2,2	$5,0 \cdot 10^{-4}$	4
CB8	780	1,1	1,1	$7,6 \cdot 10^{-4}$	8

(1) La distance aux pompages, prise en compte dans le calcul de S, est la distance au milieu des deux pompes qui sont séparées de 80 mètres.

(2) La courbe de rabattement de la nappe engendrée par le pompage permet de calculer T et S par l'approximation de Jacob (De Marsily, 1994).

(3) A l'arrêt du pompage, la nappe remonte. La courbe de remontée permet de calculer T, toujours en utilisant la méthode de Jacob (De Marsily, 1994).

Les valeurs de transmissivité obtenues par pompage et remontée de la nappe sont relativement proches. Ces valeurs sont plus élevées que les valeurs de transmissivité de la nappe du calcaire de Pithiviers généralement données dans la littérature ($10^{-3} - 0,7 \text{ m}^2/\text{s}$; Zunino, 1979).

Desprez (1967) rapporte, qu'aux captages AEP du Theuriet et du Gouffre, les transmissivités mesurées par essai de débit sont respectivement 0,27 et 0,67 m^2/s . Ces valeurs élevées sont très certainement liées à la localisation des forages AEP dans des zones karstiques du calcaire de Pithiviers. Il semble de même que les fortes transmissivités obtenues au niveau des piézomètres calcaires de la carrière de Sandillon soient liées à une forte karstification du calcaire sous la carrière. Quant aux coefficients d'emménagement calculés à partir des pompages de la carrière, ils se situent dans la gamme $2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$ donnée par Jauffret et Rousselot (1988) pour la nappe du calcaire de Pithiviers.

Les oscillations journalières ont une amplitude variable d'un piézomètre à l'autre. Ainsi sont-elles de l'ordre de 8 cm en CB8 mais seulement de 3 cm en Pfl. L'amplitude de ces oscillations n'est pas liée uniquement à la distance à la station de pompage, puisque CB8, situé à 780 mètres des pompes, présente des amplitudes plus grandes que P1 qui est situé à 260 mètres des pompes. Ces différences d'amplitudes sont le reflet de l'hétérogénéité du calcaire (ex: degré variable de fissuration) entre les pompages et les piézomètres.

Bien que les oscillations piézométriques journalières liées au fonctionnement de la carrière soient négligeables devant l'influence de la Loire, ces perturbations peuvent engendrer des gradients hydrauliques locaux (5 cm entre CB8 et Pfl pendant la journée)

puisqu'elles ne sont pas ressenties de la même manière en tout point du réseau calcaire. Il faut donc tenir compte de ces oscillations pour l'interprétation des mesures piézométriques et des différences de charge entre nappe calcaire et nappe alluviale. En période de remontée de la Loire, les différences de charge liées au pompage sont compensées par la mise en charge de la nappe calcaire. Dans le paragraphe 6.1.2, les différences observées au niveau des doublets piézométriques montrent que la nappe calcaire est en charge par rapport à la nappe alluviale quand la Loire remonte, même en période de pompage. Les pompages de la carrière ont donc une influence sur la piézométrie de la nappe, négligeable devant la Loire en période de crue. Par contre, à l'étiage, il est possible que l'effet des pompages ne soit plus négligeable puisque le niveau de la nappe continue de baisser alors que celui de la Loire s'est stabilisé (fig.6.2).

6.2.2. Les précipitations

Le suivi des précipitations à Orléans de Mars 1997 à Mars 2001 (fig.6.5), c'est à dire pendant quatre cycles hydrologiques complets, a permis d'appréhender le poids de cette influence sur le régime de la nappe. Les observations précédentes montrent que la piézométrie de la nappe est peu sensible aux précipitations locales. C'est l'intégration des précipitations sur tout le bassin versant de la Loire qui entraîne la remontée du fleuve puis de la nappe. On peut cependant observer, de manière exceptionnelle, lors de fortes précipitations locales, la remontée de la nappe avant celle de la Loire (figure 6.7) ou même sans qu'il y ait remontée de la Loire (figure 6.6).

Il faut souligner que lors des précipitations du 1^{er} Novembre 1999, on observe en P1-P2, la mise en charge plus rapide et plus forte de la nappe du calcaire par rapport à la nappe alluviale. Cela confirme que la remontée de la nappe alluviale est forcée par celle du calcaire. Les précipitations locales sont donc absorbées non par infiltration vers la nappe alluviale mais par la nappe du calcaire de Pithiviers.

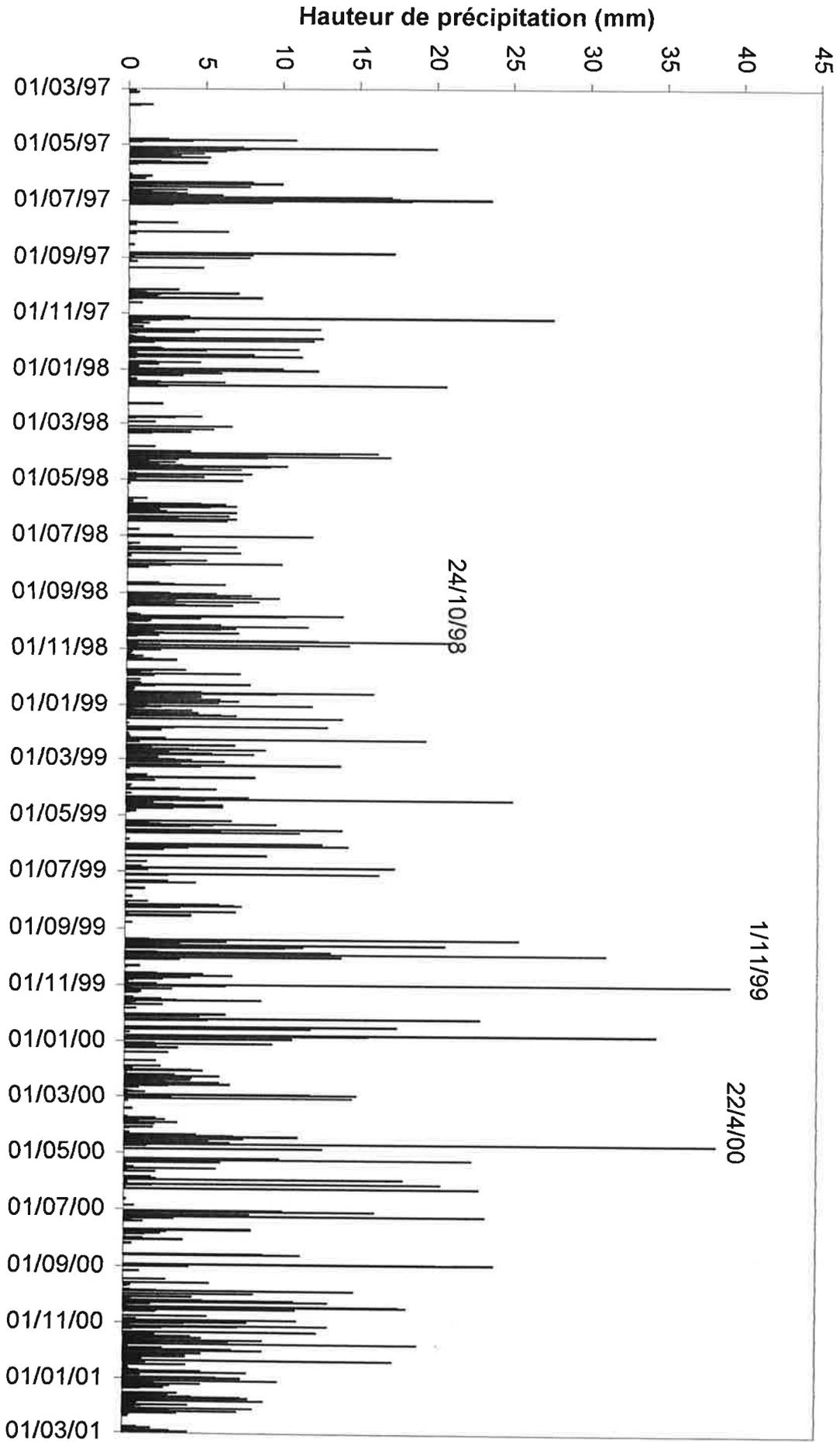


Figure 6.5: Précipitations à Orléans du 1er Mars 1997 au 31 Février 2001

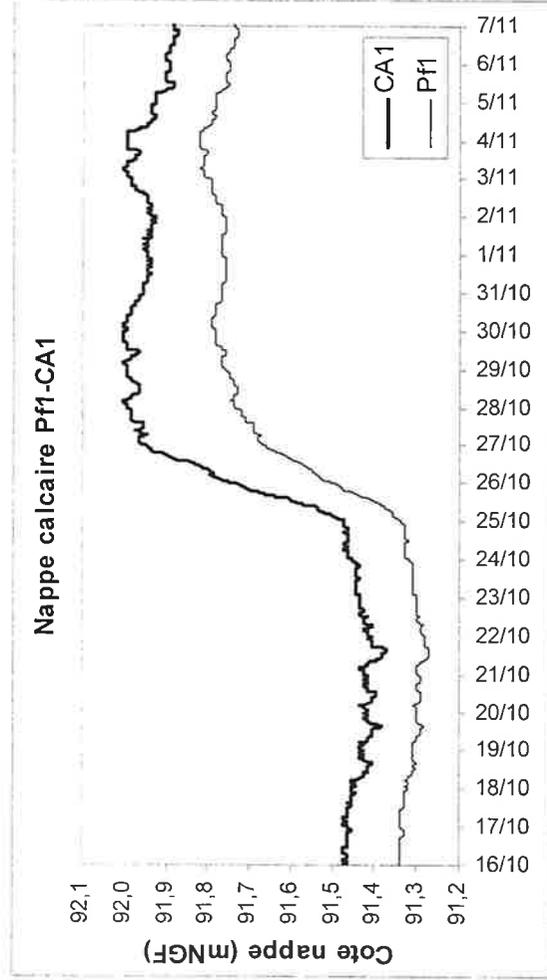
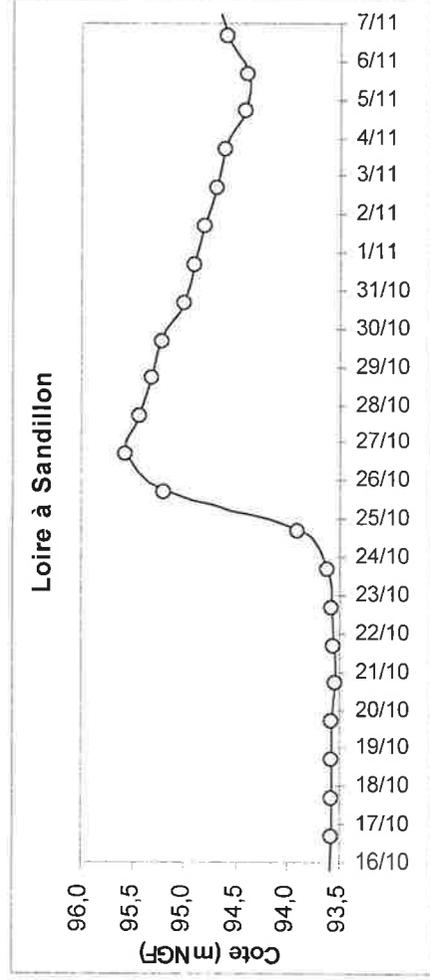
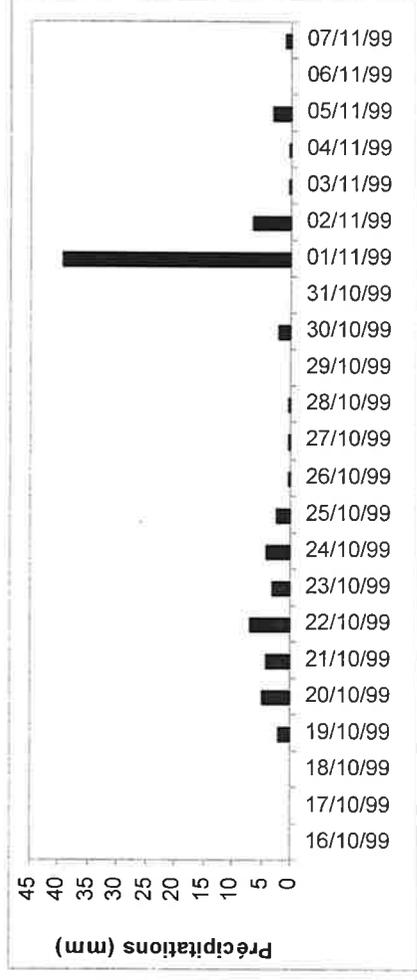


Figure 6.6 : Situation du 16/10 au 6/11/99. Suite aux précipitations de la deuxième moitié du mois d'Octobre (graphique du haut), la Loire remonte de 2 mètres. La remontée du fleuve commence réellement le 24/10, elle entraîne celle de la nappe le 25, soit environ 24h après. Dans ce cas, la remontée de la nappe est liée à la remontée de la Loire. Au contraire, les précipitations du 1^{er} Novembre 99 sont très fortes à Orléans (39,3 mm en 24h). Elles entraînent, à partir du 2/11, la remontée de la nappe de 8 cm en CA1 et de 5 cm en Pf1 alors que la Loire continue de descendre. D'une manière plus générale, on observe un ralentissement de la descente de la nappe, imposé par les fortes précipitations locales.

Cette absorption rapide des précipitations locales peut s'expliquer par les pertes des ruisseaux de la rive gauche de la Loire (ex : ruisseau de Lenche) situés à l'amont hydraulique de Sandillon. Il existe également des systèmes de drainage qui se déversent directement dans le calcaire (chapitre 2, §2.3.3). L'absorption des précipitations par les pertes dans le calcaire est confortée par la remontée plus importante de la nappe au niveau du piézomètre CA1, qui intercepte un axe karstique, plutôt qu'en Pf1, non karstique (chapitre 8).

Cet exemple démontre, une fois de plus, l'existence de transferts rapides via le réseau karstique, entre le réseau hydrologique de la région du Val d'Orléans et la nappe du calcaire de Pithiviers.

Cet exemple montre également que des réservoirs de surface, dans le Val d'Orléans, temporairement remplis par les précipitations locales peuvent se rajouter au réservoir principal du Bassin de la Loire, dans l'alimentation de la nappe du calcaire de Pithiviers.

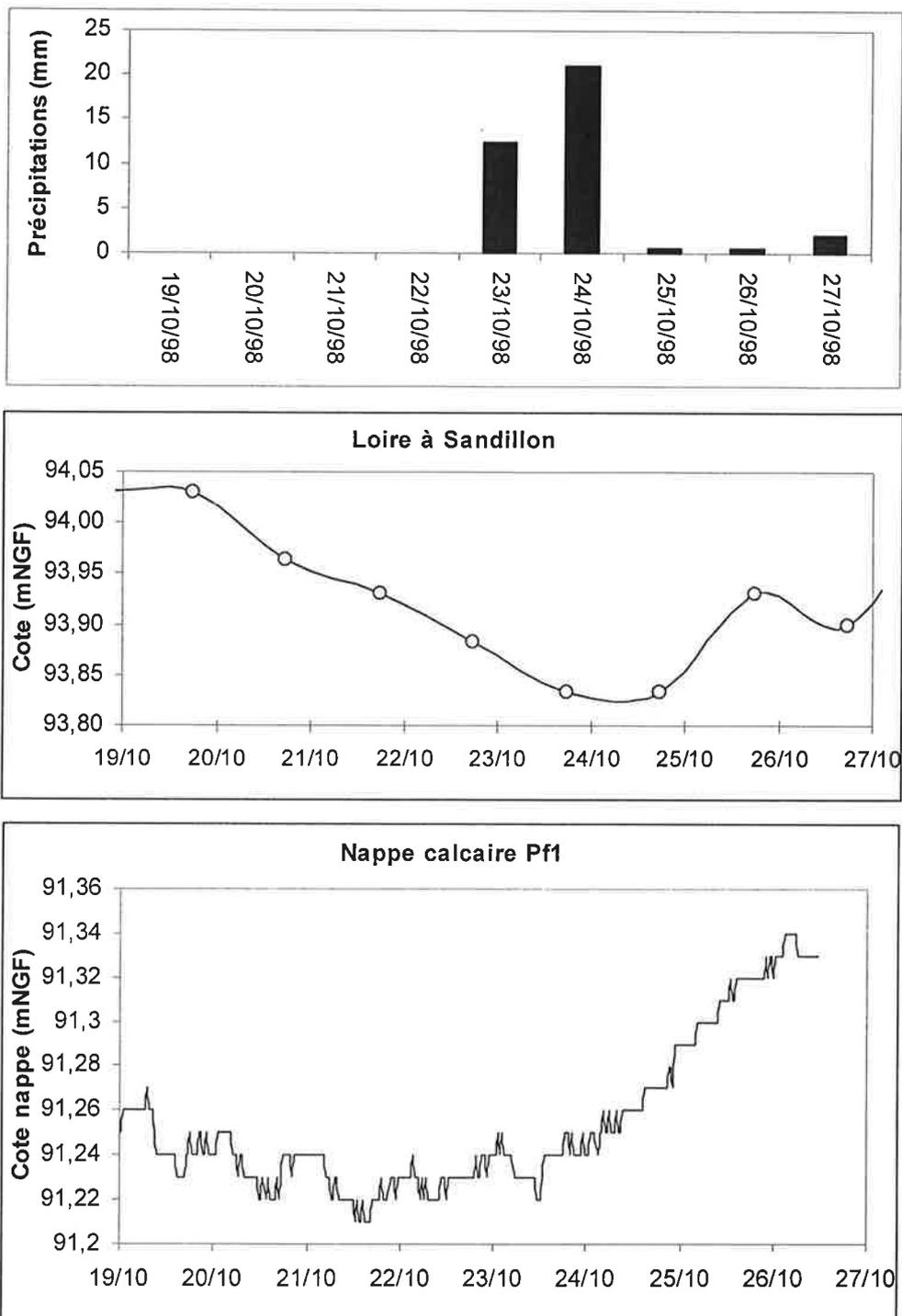


Figure 6.7 : Remontée de la nappe avant celle de la Loire : Situation du 19/10 au 27/10/98. Après une période de sécheresse, il tombe environ 35 mm entre le 23 et le 24/10/98. Cela entraîne la remontée de la nappe du calcaire (exemple de Pf1) dès le 23/10 c'est-à-dire trois jours avant la remontée de la Loire au niveau de Sandillon.

6.2.3. La pression atmosphérique

Les deux seuls piézomètres CA1 et P2, qui étaient équipés d'enregistreurs opérationnels fin décembre 1999 présentent tous les deux des impulsions rapides du niveau de la nappe visibles sur les chroniques piézométriques (figs. 6.8 et 6.9) pour les journées du 26 et 27/12/99.

Ces remontées soudaines, de 7 cm, ne peuvent être reliées aux précipitations locales (fig.6.9) puisque des quantités de précipitations similaires les 8/12 et 17/12 n'ont pas donné de réponses équivalentes. De plus, la vitesse de réaction de la nappe est trop rapide, surtout le 26/12, pour être une réponse à des précipitations même brutales. Enfin, on peut difficilement expliquer, en cas de précipitations, la descente rapide de la nappe juste après sa remontée, dans une situation générale de montée de la Loire et pendant les heures d'arrêt des pompes de la carrière (le 27/12 par exemple).

La figure 6.9 montre que cette remontée brutale est liée à une baisse exceptionnelle de la pression atmosphérique (jusqu'à 952,5 hPa) lors du passage des tempêtes dévastatrices fin décembre 1999. Les niveaux piézométriques redescendent à leur niveaux "normaux" une fois les dépressions passées. Sur cet exemple, on constate que la nappe réagit de la même manière au niveau des piézomètres P2 et CA1 (même amplitude, temps de réponse identiques; fig.6.10). Ainsi, la nappe réagit à une perturbation atmosphérique très étalée dans l'espace et très brutale qui affecte simultanément l'ensemble de la nappe au niveau du réseau piézométrique.

Sur l'ensemble des enregistrements piézométriques effectués de 1997 à 2000, de tels phénomènes n'ont été observés que pour les tempêtes de décembre 1999. C'est donc un phénomène exceptionnel.

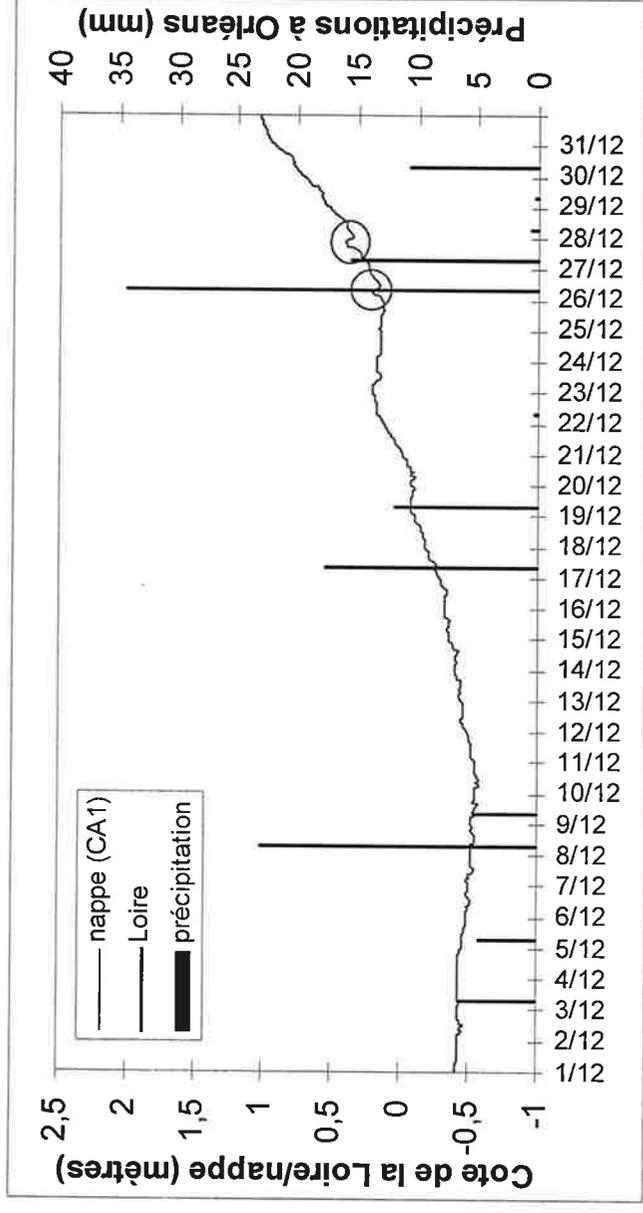


Figure 6.8: Mise en évidence du caractère exceptionnel des remontées rapides du niveau de la nappe observées à Sandillon fin décembre 1999.

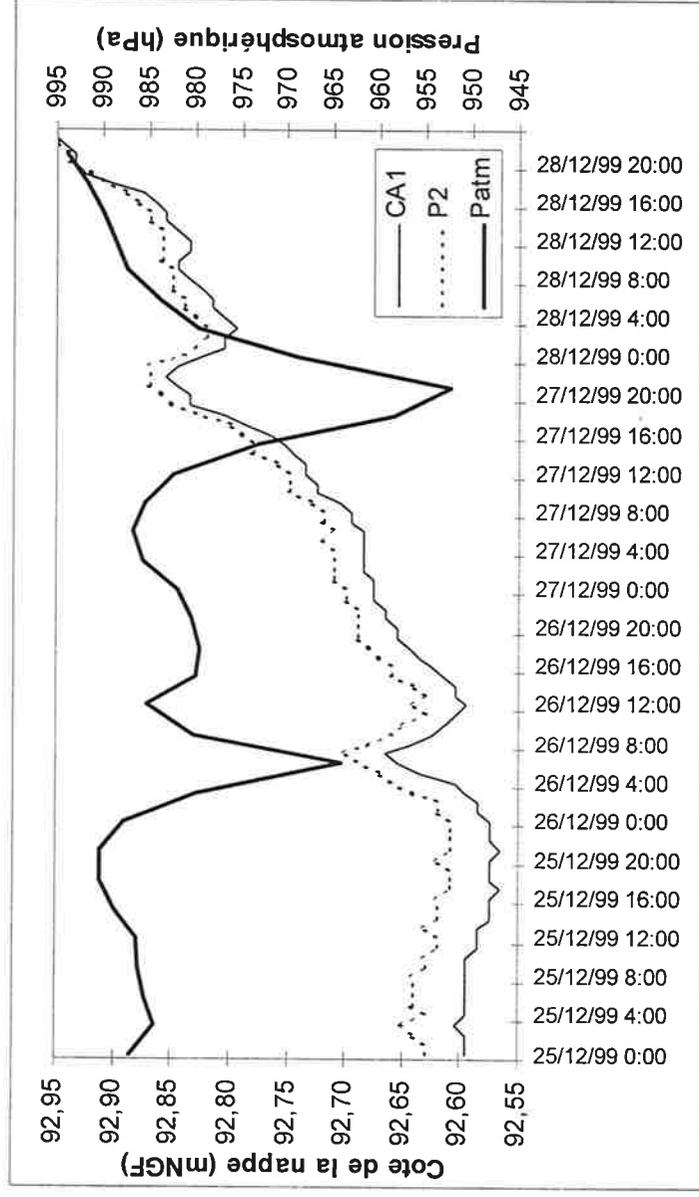


Figure 6.9: Coïncidence des passages des fortes dépressions de fin décembre 1999 avec les impulsions rapides enregistrées par la nappe. Les pressions ont été enregistrées par Météo-France à Orléans-Bricy

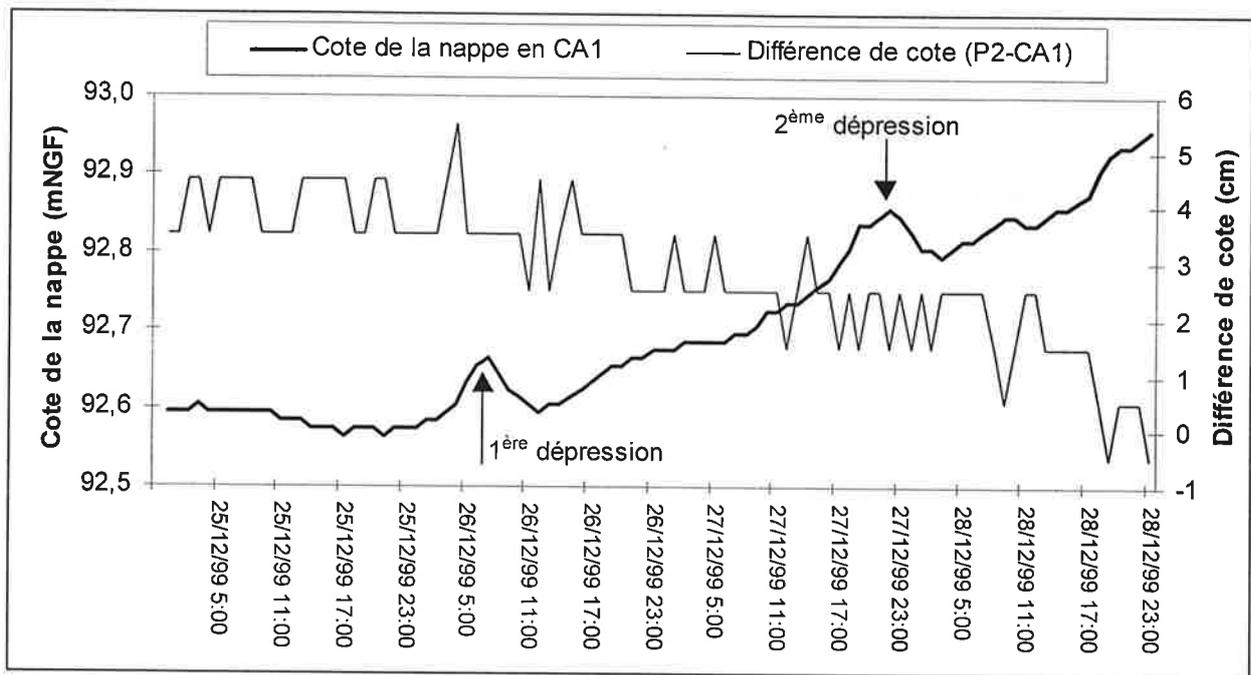


Figure 6.10 : Différences de cote de la nappe entre les piézomètres CA1 et P2 lors des passages des fortes dépressions fin décembre 1999. L'absence de modification de l'écart piézométrique entre CA1 et P2, supérieure à la précision sur la mesure piézométrique (1 cm), au passage des dépressions, montre que la nappe répond simultanément et avec la même amplitude aux dépressions.

6.2.4. Le lac d'exploitation

On ne dispose que d'une seule mesure du niveau piézométrique du plan d'eau du lac d'exploitation. C'est celle qui a été réalisée lors des levés piézométriques du 20/1/99 parmi lesquels figurent aussi les niveaux des autres plans d'eau de la carrière (fig.6.11). Les plans d'eau des lacs de décantation sont situés plusieurs mètres au-dessus du niveau de la nappe ce qui prouve leur colmatage par les boues issues du lavage du tout-venant. Ils sont donc isolés du reste de l'aquifère. Par conséquent, seul le lac de gravière peut jouer un rôle important sur la piézométrie.

Le jour du relevé piézométrique, la nappe est ascendante. Le lac d'extraction, qui possède un coefficient d'emmagasinement égal à 1, se remplit moins vite que la nappe au

cours de la remontée de cette dernière. Cela explique que son plan d'eau se trouve alors 14 cm en dessous du niveau de la nappe mesuré au point le plus proche, Z32 (fig.6.11). En période de descente de la nappe, le plan d'eau du lac se situe au-dessus du plan de la nappe. Les observations visuelles attestent que pour la période de crue de Mars 2001, le lac est remonté et descendu plus lentement que la nappe dans son ensemble. Ce déphasage et l'amortissement des fluctuations piézométriques des lacs sont particulièrement bien illustrés par les variations de niveau du lac de l'ancienne gravière, Etancar, qui ont une périodicité annuelle, phénomène amplifié par le colmatage partiel du fond et des berges du lac.

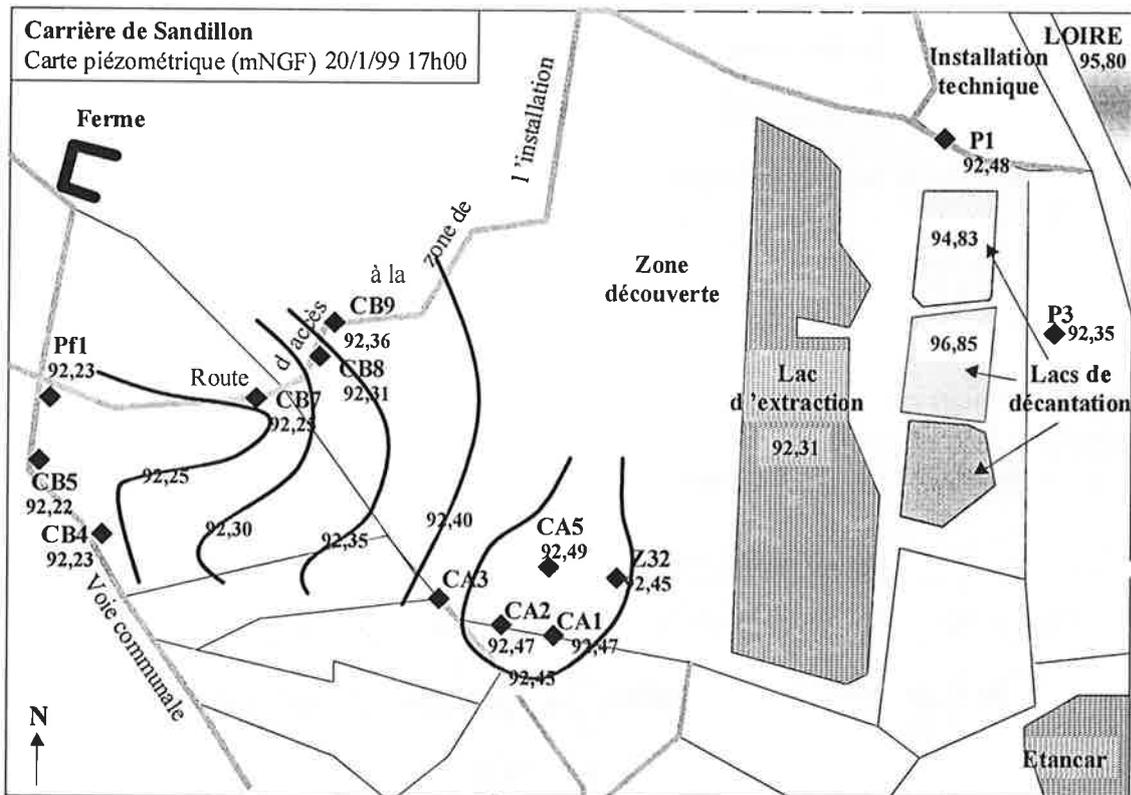


Figure 6.11 : Carte piézométrique de la nappe au niveau de la carrière de Sandillon le 20/1/99.

Sur cette carte sont reportés les relevés géométriques des cotes des différents plans d'eau (Loire, lac d'extraction, lac en eau claire, lac de décantation).

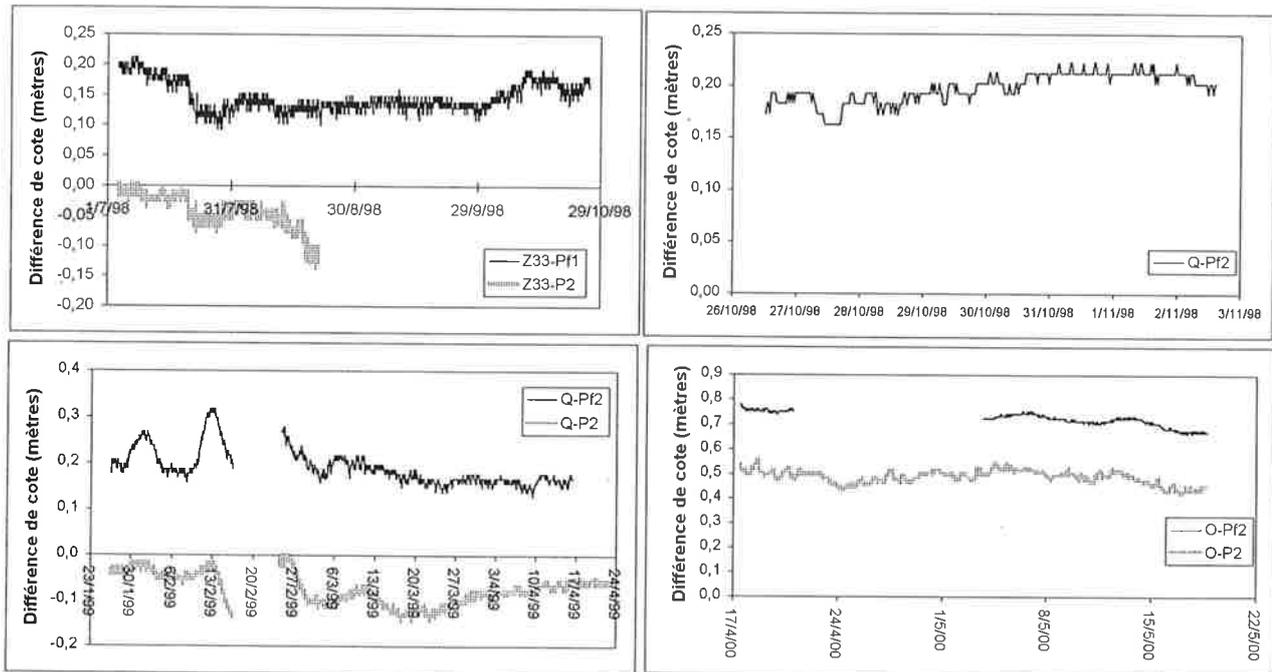
Les cotes relatives du lac et de la nappe mesurées le 20/1/99 n'ont donc rien à voir avec la situation de régime dit permanent modélisée au chapitre 2 (§2.4.1.2, fig.2.9) puisqu'on observe un rabattement de la nappe à l'aval du lac au lieu d'une élévation du niveau. Cette différence est uniquement liée à la variabilité du régime hydrologique de la Loire.

Pendant le traçage réalisé dans la nappe alluviale en mars 1997, le lac d'exploitation était de petite taille et localisé à environ 400 mètres du réseau piézométrique alluvionnaire. Il apparaît clairement, sur la figure 6.11, que le rabattement aval de la nappe, lié à la présence du lac, ne concerne qu'une faible tranche de la nappe en période de remontée de la Loire. Il est donc évident que la première expérience de traçage réalisée dans la nappe alluviale entre 1997 et 1999 n'ait pas été concernée par ce rabattement.

A partir de la moitié de l'année 1999, le lac d'exploitation s'étend jusqu'au niveau du piézomètre O, alors situé à 25 mètres du lac. La figure 6.12 montre que les écarts piézométriques entre O et des piézomètres de référence situés en amont (P1) et en aval (Pf1) du lac, deviennent importants à partir d'octobre 1999. On a donc une influence croissante du lac sur les piézomètres situés à proximité.

En conclusion, l'influence du lac est négligeable au niveau du réseau piézométrique implanté en 1997, jusqu'à l'automne 1999, c'est-à-dire pendant toute la durée du traçage dans les alluvions. A partir de la fin de l'année 1999, l'influence piézométrique du lac liée à l'avancée des travaux d'extraction se traduit par un amortissement des fluctuations de la nappe au voisinage du lac. Cet amortissement conduit à des écarts piézométriques importants entre les piézomètres situés près du lac (ex : O) et le reste du réseau de piézomètres.

Enregistrements piézométriques automatiques



Relevés piézométriques manuels

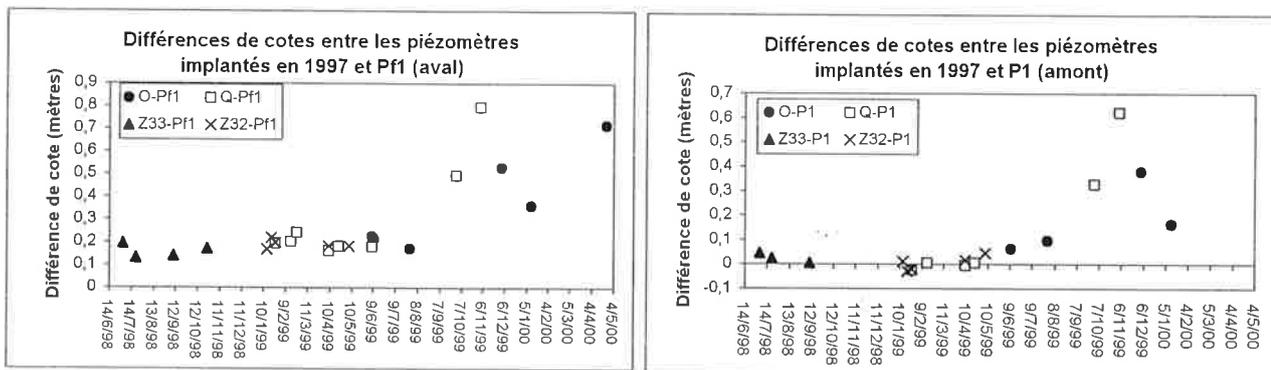


Figure 6.12: Accroissement, au cours de l'avancée du lac d'extraction, des écarts piézométriques entre les piézomètres localisés sur le réseau piézométrique implanté en 1997 (piézomètres O, Q, Z32, Z33) et les piézomètres de référence P1-P2 (amont), et Pf1-Pf2 (aval)

On ne dispose pas de suivi continu entre les piézomètres situés sur le réseau piézométrique implanté en 1997 et les piézomètres de référence amont et aval, mais seulement de quelques mesures manuelles (2 graphiques du bas) et de 4 périodes pendant lesquelles les piézomètres étudiés étaient équipés d'enregistreurs automatiques de niveau (4 graphiques du haut). Les différences de charges étant de l'ordre de quelques centimètres entre les nappes alluviale et calcaire, on peut considérer que les écarts entre deux piézomètres d'un même doublet (ex: Pf1 et Pf2) sont quasiment identiques. Avant octobre 1999, les écarts entre les piézomètres implantés en 1997 et les piézomètres aval (Pf1 et Pf2) sont compris entre 15 et 30 cm, les écarts avec les piézomètres amont varient entre -15 et +5 cm. Ces écarts deviennent très importants à partir d'octobre 1999, en liaison avec l'avancée du lac d'exploitation. Ce dernier se situe à 25 mètres au nord du piézomètre O en janvier 2000. Pour la plupart des mesures dont on dispose après octobre 1999, la nappe, au niveau du réseau piézométrique de 1997, se situe entre 16 et 62 cm au-dessus des piézomètres amont P1 et P2 alors que ces derniers étaient pratiquement au même niveau piézométrique au début de l'expérience. La variabilité des écarts est liée à celle du régime hydrologique. Elle est accentuée par la proximité du lac d'extraction. En effet, le lac amortit considérablement les fluctuations de la Loire. Cet amortissement se répercute sur les piézomètres situés à proximité. En particulier, en période de descente de la Loire, le lac se trouve en retard par rapport à la descente de la nappe, ce qui se traduit par des cotes plus élevées pour le lac et les piézomètres situés à proximité, que pour les piézomètres situés à l'amont. C'est dans ce cas que l'on se trouve le plus souvent puisque la Loire est descendante la majeure partie du temps, les remontées du fleuve étant de courte durée.

6.3. Réponses différentielles de la nappe aux fluctuations de la Loire

Les paragraphes précédents, ont montré que la nappe ne réagissait pas avec la même amplitude et la même rapidité aux diverses sollicitations piézométriques de son environnement (Loire, pompage, précipitations), selon l'endroit où l'on se place. La nappe calcaire, de manière générale, présente des variations piézométriques plus rapides que la nappe alluviale. L'objet de cette partie est d'étudier d'un peu plus près les différentes réponses piézométriques de la nappe aux fluctuations de la Loire qui constitue la facteur d'influence principal.

Les différences de réponses de la nappe entre les piézomètres sont analysées par comparaison des chroniques piézométriques et par l'analyse corrélatrice croisée (ACC) entre les cotes de la Loire et les cotes de la nappe (chapitre 3).

6.3.1. Etude des réponses différentielles à l'échelle du kilomètre

On étudie en premier lieu les réponses de la nappe à l'échelle de l'observatoire piézométrique étendu composé essentiellement de piézomètres calcaires.

6.3.1.1. Analyses des corrélations croisées Loire-nappe

Les calculs par ACC sont effectués non pas sur la cote calculée à Sandillon mais sur les cotes de Gien et d'Orléans qui sont des valeurs mesurées. L'ACC fournit deux types de résultats : la valeur du coefficient de détermination R^2 (R : coefficient de corrélation) et le déphasage en temps entre la Loire et la nappe qui permet d'obtenir la meilleure corrélation. Les résultats de l'ACC figurant dans l'annexe 12 sont synthétisés dans le tableau 6.3.

Tableau 6.3: Temps de réponse moyen (déphasages) de la nappe de Sandillon aux fluctuations de la Loire à Gien et Orléans calculés par analyse corrélatrice croisée sur diverses périodes - coefficients de détermination correspondants (R²max).

Les corrélations sont généralement meilleures avec les cotes de Loire à Orléans. La différence de déphasage obtenue entre Gien et Orléans (de 10 à 15h) correspond au temps de transmission des cotes de Loire de Gien à Orléans.

Période étudiée	Evènement saisi	Piézo	Corrélation avec Gien		Corrélation avec Orléans		Déphasage Sandillon*(h)
			Déphasage (h)	R ² max	Déphasage (h)	R ² max	
26/1-16/2/99	Montée de la Loire (dont 1 crue)	P2	37	0,91	28	0,86	30
		Q	32	0,94	22	0,90	24
		Pf2	42	0,91	33	0,87	35
22/4-7/6/99	Crue	P2	60	0,81	45-46	0,86	48
		CA1	39-40	0,83	28-29	0,88	30
		CA2	40	0,83	28	0,88	30
		CA3	52-53	0,80	39-40	0,85	42
		CB8	50	0,79	37-38	0,85	40
		Pf1	56-57	0,80	43-44	0,86	46
19/5-9/8/00	Crue	P1	29-30	0,79	15-16	0,87	18
		P2	31-32	0,78	18	0,86	20
		Z	48	0,71	34	0,80	36
17/4-19/5/00	Phase stationnaire	P2	92-93	0,11	76	0,16	79
		O	120	0,29	108	0,39	111
30/9/99-9/8/00	Cycle hydrol.	P2	60-64	0,74	50-52	0,79	53
24/2/99-17/4/00	Cycle hydrol.	CA1	50-54	0,80	46-50	0,87	
22/4-21/12/99	Cycle hydrol.	Pf1	84	0,71	80-84	0,78	
19/5-26/10/98	Basses eaux	Z33	97-101	0,83	91-96	0,84	
24/2-18/5/99	Descente	Pf2	560	0,84	572	0,80	
3/7-26/10/98	Basses eaux	Pf1	204	0,72	196-200	0,72	
7/11-14/12	Montée puis palier	E	40	0,71	18	0,80	
26/1-22/4/99	Montée puis descente	Q	56-57	0,64	48-50	0,56	
26/10/98-16/2/99	Montée	Pf2	40-41	0,85	32	0,86	34

(*) Le déphasage φ_s de la nappe avec la Loire à Sandillon se calcule à partir des déphasages de Gien (φ_G) et Orléans (φ_O) et des distances parcourues par la Loire entre les échelles hydrométriques de ces trois communes : $\varphi_s = \varphi_O + (\varphi_G - \varphi_O) \times (\text{distance Orléans-Sandillon}) / (\text{distance Orléans-Gien})$

Orléans-Sandillon : 12,9 km

Orléans-Gien : 71,8 km

Cycle hydrol. : Calculs effectués sur un cycle hydrologique.

A travers les différents calculs réalisés par ACC, il s'est révélé que l'utilisation de cet outil possède quelques limites et nécessite quelques précautions qui sont rappelées afin d'interpréter correctement les résultats .

- Cette méthode ne peut s'appliquer que pour les piézomètres où un nombre suffisant de mesures a été réalisé à pas de temps suffisamment petit et sur une période suffisamment longue. Autrement dit, seuls les piézomètres équipés d'enregistreurs automatiques du niveau de la nappe ont pu servir à l'étude des corrélations entre les cotes de la nappe et de la Loire.

- Les études de crues fournissent des valeurs relativement faibles pour le déphasage entre la Loire et la nappe tandis que les études des périodes de descente fournissent des déphasages très élevés, parfois aberrants, avec des coefficients de détermination pourtant très corrects. Par exemple, sur la période du 26/1 au 16/2/99, le déphasage calculé en Pf2 est de 42h ($R^2=0,91$) avec Gien. Ce déphasage atteint 560 h ($R^2=0,84$) sur la période de descente de la Loire, du 24/2/99 au 18/5/99. La figure 6.13 apporte une explication à ce résultat. Le retard de la nappe aux fluctuations de la Loire se traduit par un effet d'hystérésis sur un diagramme cotes de la nappe en fonction des cotes de la Loire au même instant. Sur la figure 6.13, on remarque que les points s'alignent facilement en période de descente pour un grand nombre de valeurs du déphasage k , ce qui explique que k peut atteindre des valeurs élevées. Au contraire, la remontée de la Loire introduit des points non-alignés dont l'écart à une droite de régression est minimum pour une seule valeur de k . Le temps de réponse k est donc contrôlé par les phases de remontée de la Loire. Par conséquent, le calcul du déphasage de la nappe doit s'effectuer sur des périodes encadrant une phase de remontée de la Loire.

- Les résultats ne sont pas systématiquement reproductibles d'une période à l'autre.

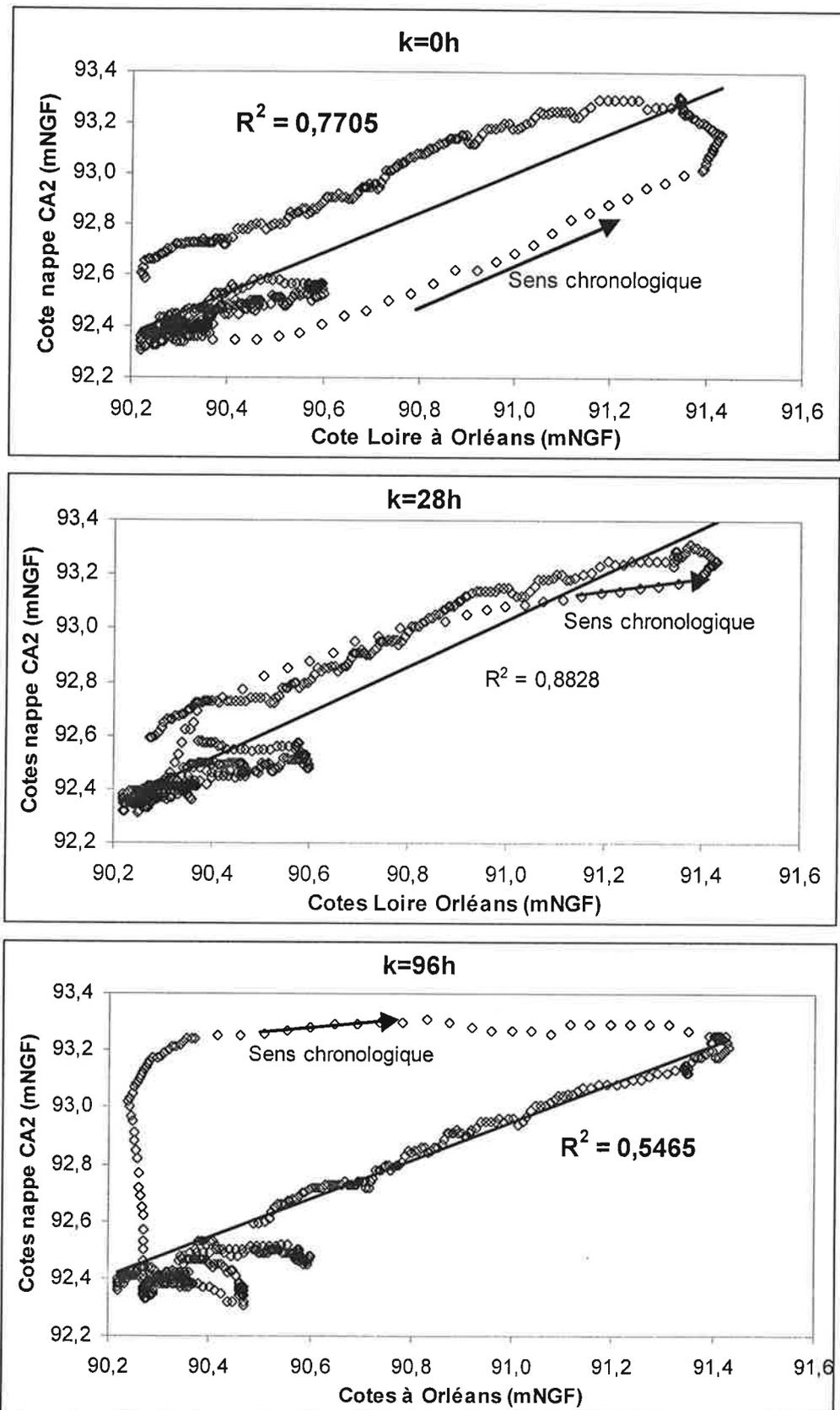


Figure 6.13: Cotes de la nappe calcaire au piézomètre CA2 en fonction des cotes de la Loire à Orléans k heures plus tôt pour la période du 22/4/99 au 7/6/99 (552 données bi-horaires). La réponse à la crue de la Loire de fin mai 99 enregistrée pendant cette période se traduit par un effet d'hystérésis à $k=0$. Cet effet disparaît pour un déphasage de 28h qui est le temps moyen de réponse de la nappe à la crue. Il réapparaît pour des déphasages trop importants (ex: $k=96h$).

Par conséquent, seuls les piézomètres dont les niveaux de nappe ont été suivis simultanément, et en période de crue, peuvent être comparés par ACC en terme de temps de réponse aux fluctuations de la Loire.

Pendant la période du 22/4/99 au 7/6/99, qui englobe une crue de la Loire, 6 piézomètres enregistreurs fonctionnaient en même temps. Le nombre de piézomètres équipés en systèmes de mesures automatiques a ensuite été de 3 en moyenne. C'est pourquoi, il est très intéressant d'étudier la crue de mai 99. Pour cette analyse, on se réfère au tableau 6.3.

Pendant la période du 22/4/99 au 7/6/99, le temps de réponse de la nappe varie de 28h à 46h avec Orléans et de 39h à 60h avec Gien. La différence des déphasages mesurés entre Gien et Orléans correspond au temps de transmission d'une impulsion de la Loire de Gien à Orléans (entre 10 et 15 h, Cf. chapitre 3). CA1 et CA2 sont les piézomètres qui ont les meilleurs temps de réponse et également les meilleurs coefficients de corrélation. Viennent ensuite CB8 et CA3 puis Pf1 et P2. Il est assez surprenant que P2 soit classé dernier, en terme de temps de réponse aux fluctuations de la Loire, étant donné sa plus grande proximité à la Loire. Peut-être est-ce parce qu'étant le seul piézomètre alluvionnaire de la liste, il réagit moins vite que les autres. Mais cette explication s'effondre si l'on regarde la crue de juin 2000 où P2 réagit pratiquement en même temps que son double calcaire, P1. En cet endroit du Val d'Orléans, les relations de l'aquifère avec la Loire sont complexes parce que le plan d'eau du fleuve se trouve environ 3 mètres au-dessus de la surface piézométrique. Par conséquent, il est possible que la Loire soit, par endroit, complètement déconnectée de la nappe. Il se peut également que P1 et P2 se trouvent dans une zone faiblement perméable et faiblement desservie par le réseau de fissures karstique, argument soutenu par la faible transmissivité calculée à partir du pompage de la carrière (tableau 6.2). Au contraire, le piézomètre CA1 qui intercepte un drain karstique (chapitre 3) possède, dans tous les événements étudiés (tableau 6.3), la plus grande vitesse de réaction aux fluctuations de la Loire. CA2 réagit également très

vite alors qu'il n'est pas directement sur l'axe passant par CA1 (chapitre 3) mais c'est probablement sa très faible distance à cet axe karstique qui lui confère un temps de réponse identique à CA1.

Cela confirme clairement que les temps de réponse de la nappe aux fluctuations de la Loire sont liés non pas à la distance au fleuve mais à la distance aux drains karstiques par lesquels sont transmises les impulsions de la Loire.

6.3.1.2. Comparaison des chroniques des cotes de la Loire et de la nappe

Les temps de réponse de la nappe aux fluctuations de la Loire calculés par ACC sont des temps moyens qui varient d'un événement à l'autre parce qu'ils intègrent des évolutions relatives de la Loire et de la nappe qui ne sont pas forcément reproductibles : vitesse de montée des eaux de la Loire, durée de la crue... C'est pourquoi il est nécessaire d'étudier, en plus, directement les chroniques, en particulier au moment des crues où l'on peut calculer le temps exact de réponse de la nappe au début de la remontée de la Loire, ainsi que la durée de la remontée. Pour cela, la crue de mai 99 est à nouveau prise comme exemple. Les détails de l'analyse de cet événement sont reportés sur la figure 6.14. Le suivi direct des chroniques piézométriques permet d'apporter les précisions suivantes :

-La nappe répond en moins de 24 h en tout point du réseau, à une impulsion de la Loire. Les différences de temps de réaction sont faibles d'un piézomètre à l'autre.

-Par contre, l'amplitude et la durée de remontée de la nappe varient considérablement d'un piézomètre à l'autre (jusqu'à 48 h de différence). La distance à la Loire, ne permet pas d'expliquer les différences observées entre P2 et CA1-CA2.

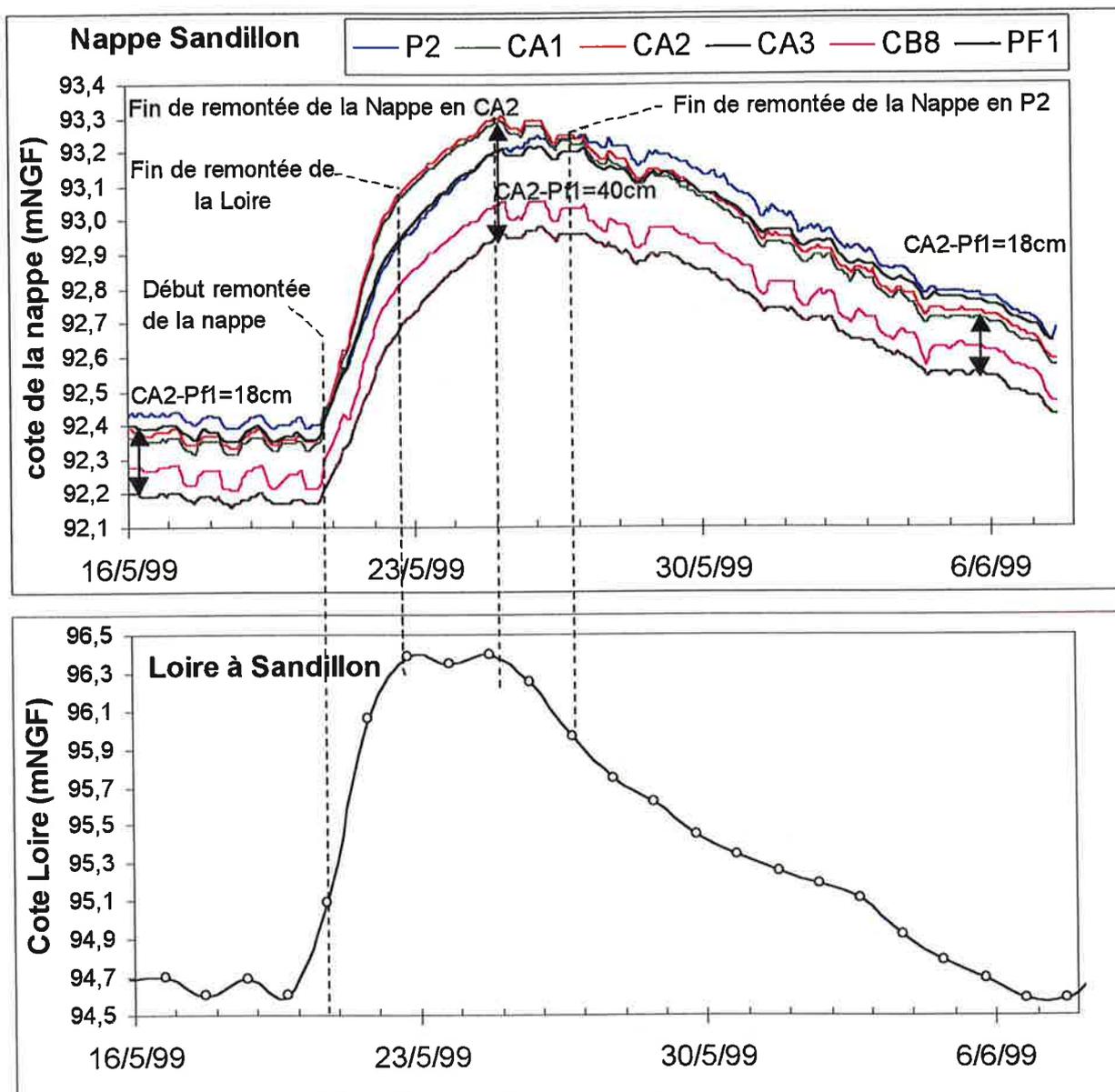


Figure 6.14 : Evolution des cotes piézométriques en plusieurs points de la nappe à Sandillon (graphique du haut) en réponse à une crue de la Loire (graphique du bas).

Les piézomètres sont tous implantés dans la nappe du calcaire de Pithiviers sauf P2 qui se trouve dans les alluvions. Les petites fluctuations journalières sont engendrées par le pompage de l'installation technique. Le pas d'enregistrement des cotes de la nappe est d'1h. Les cotes journalières de la Loire à 18h à Sandillon sont calculées à partir des cotes de Gien. Tous les points de la nappe répondent quasiment en même temps et en moins de 24h à la remontée de la Loire. Les vitesses de remontée et de descente de la nappe ainsi que les amplitudes des fluctuations varient ensuite de manière importante d'un piézomètre à l'autre, ce qui entraîne l'augmentation du gradient hydraulique. Par exemple, l'écart entre les piézomètres CA2 (ou CA1) et Pf1 est de 18 cm avant la crue. Cet écart atteint 40 cm lorsque CA1 et CA2 atteignent leur maximum, 48h environ après la Loire. L'écart initial (18 cm) est retrouvé après 12 jours de descente de la nappe. On observe également que les crues entraînent des inversions de cotes, donc d'écoulement: P2 et CA3 qui se trouvent au-dessus de CA1 et CA2 quand la Loire est descendante, se retrouvent en dessous de CA1 et CA2 en période de crue.

Seule la relation avec un réseau de circulations karstiques permet de rendre compte de ce décalage. Par exemple, les piézomètres CA1 et CA2 situés sur un axe karstique présentent des amplitudes grandes et des remontées de courtes durées. Au contraire, au niveau de CA3, qui est situé non loin de CA2, la réponse de la nappe est plus amortie en amplitude et elle dure plus longtemps.

-L'ordre des amplitudes et durées de remontée de la nappe est cohérent, aux incertitudes des mesures près, avec l'ordre des temps de réponses moyens donnés par l'ACC (tableau 6.4). Par exemple, P2 présente le déphasage le plus élevé en ACC. C'est également P2 qui présente la durée de remontée la plus longue.

Tableau 6.4 : Paramètres caractérisant la réponses de la nappe de Sandillon à la crue de la Loire de mai 1999 – Comparaison des résultats de l'analyse corrélatoire et de l'interprétation directe des chroniques piézométriques

Piézomètre	Analyse corrélatoire	Lecture directe des chroniques					
	Déphasage à Sandillon(h)	Début de la remontée	Cote début de la remontée	Fin de la remontée	Cote fin de la remontée	Amplitude remontée (m)	Durée remontée
P2	48	20/5 12h	92,39 mNGF	27/5 4h	93,25 mNGF	0,86	6 jours 16h
CA1	30	20/5 12h	92,32 mNGF	25/5 4h	93,29 mNGF	0,97	4 jours 16h
CA2	30	20/5 14h	92,35 mNGF	25/5 4h	93,31 mNGF	0,96	4 jours 14h
CA3	42	20/5 14h	92,36 mNGF	25/5 20h	93,22 mNGF	0,86	5 jours 6h
CB8	40	20/5 16h	92,21 mNGF	26/5 2h	93,05 mNGF	0,84	5 jours 10h
Pf1	46	20/5 16h	92,17 mNGF	26/5 4h	92,98 mNGF	0,81	5 jours 12h
Loire Sandillon	0	19/5 18h	94,6 mNGF	22/5 18h	96,39 mNGF	1,19	3 jours

L'interprétation directe des chroniques permet de donner un sens aux résultats de l'ACC à savoir que le déphasage de la nappe à une impulsion de la Loire, calculé par ACC, traduit non seulement le temps de réponse de la nappe mais aussi la durée de cette réponse. Les différentes vitesses et amplitudes de réponse de la nappe entre zones karstiques (CA1-CA2) et zones non karstiques (ex : Pf1, CA3) ont pour conséquence l'augmentation et

l'inversion des gradients hydrauliques à proximité de ces axes. Les cartes piézométriques qui suivent donnent une bonne représentation de ces inversions.

6.3.1.3. Cartes piézométriques à l'échelle de la carrière

Les cartes piézométriques (fig 1.10 et 1.18) disponibles dans la littérature et le commerce, pour la région de Sandillon, indiquent, qu'au niveau de la carrière, la nappe s'écoule globalement vers les sources du Loiret, c'est-à-dire vers le Sud-Ouest. Réalisée en novembre 1966, en période d'étiage, la carte de Desprez (1976) situe les axes karstiques au niveau des vallées piézométriques ou talwegs, d'où le terme "axe de drainage". Ce sont finalement ces axes d'écoulements privilégiés qui imposent la direction générale d'écoulement de la nappe. Le bien fondé de cette interprétation de Desprez est confirmé par nos observations précédentes sur les variations piézométriques de la nappe. En période de descente de la Loire, les réseaux de circulations karstiques drainent la nappe.

Le réseau piézométrique calcaire a permis d'affiner la piézométrie de la nappe calcaire au niveau de la carrière et de confirmer :

- la direction d'écoulement, globalement d'Est en Ouest mais avec de nombreuses nuances,
- la présence d'axes de drainage dans la partie sud de la carrière,
- le rôle primordial joué par ces axes dans l'évolution piézométrique et les inversions de gradients hydrauliques.

Les différents relevés effectués en 1999 et 2000 figurent dans l'annexe 19. 5 cartes tracées à la main sur différentes périodes se trouvent également dans l'annexe 19. Ces cartes ont été construites en majorité en période de descente de la Loire, sauf celle du 24/2/99, en fin

de crue. Dans l'étude piézométrique présente, deux cartes représentatives de deux situations opposées, la crue du 24/2/99 et l'étiage du 29/7/99 (fig.6.15), ont été choisies.

Influence d'un axe de circulation karstique

La présence de l'axe karstique passant par CA1 et dans les environs de CA2 et CB4 est visible sur les 2 cartes piézométriques tracées pour les deux situations étudiées. En période de descente, cet axe se matérialise par une ligne de drainage vers laquelle convergent les lignes de courant. Au contraire, en période de crue, cet axe n'est plus drainant mais forçant et les lignes de courant divergent autour de cet axe. En période de crue de la Loire, les axes karstiques jouent le rôle de veines qui alimentent la nappe. Et inversement, en période de descente de la Loire, c'est majoritairement par ces axes que l'eau s'évacue.

Dans l'étude d'impact réalisée avant l'ouverture de la carrière (Chigot et Al., 1994), il est écrit qu'aucun axe karstique ne traverse la carrière. Cette étude démontre qu'il en existe au moins un le long de la carrière, à la limite du bois de Brosseilles, visible sur la piézométrie à l'échelle de la carrière, et confirmé par traçage dans les calcaires (chapitre 8). Les écoulements dans la partie sud des terrains exploités sont donc sous l'influence de cet axe. Il est également probable que le piézomètre CA5 soit également proche d'un axe de ce type, étant données les fortes amplitudes piézométriques observées comme pour CA1 et CA2.

Directions d'écoulement et gradients hydrauliques

Les cartes tracées à partir du réseau piézométrique calcaire montrent une direction générale d'écoulement vers l'Est au niveau de la carrière. Cependant, cette direction est très nuancée selon l'endroit où l'on se trouve et selon le régime de la Loire. De manière générale, en période de descente, les écoulements sont drainés vers l'axe karstique pour la partie sud-ouest de la carrière.

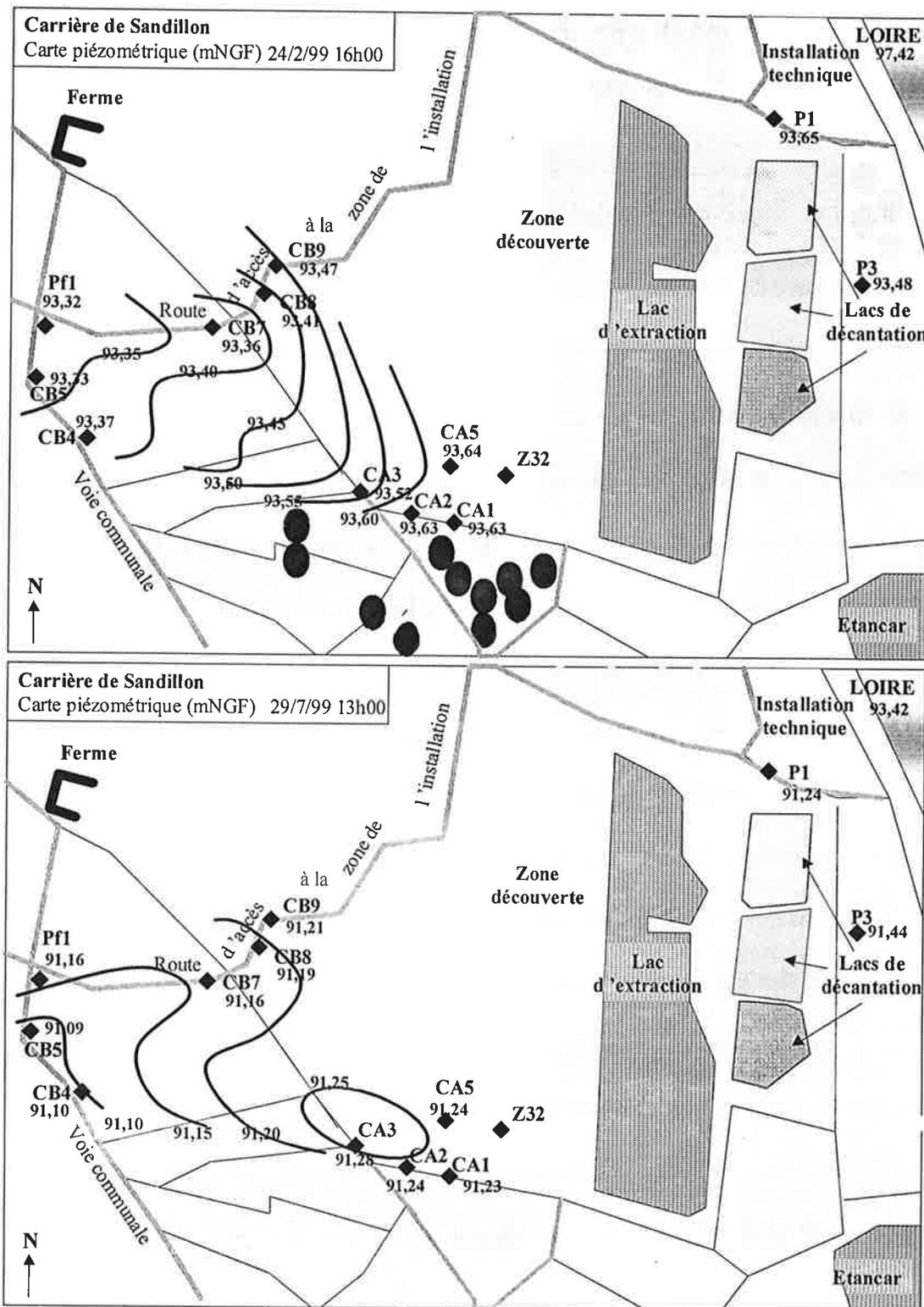


Figure 6.15: Cartes piézométriques de la nappe calcaire au niveau de la carrière de Sandillon, construites à partir des relevés du 24/2/99 (crue), et du 29/7/99 (étiage).

L'inclinaison des isopièzes en bordure sud de la carrière signale la présence d'un drain karstique selon l'axe CA1-CA2 passant au sud de CB4. Cet axe se manifeste par une mise en charge locale de la nappe en période de crue (présence d'une crête sur la carte piézométrique) et par un drainage de la nappe en période descendante de la Loire (présence d'une vallée sur la carte piézométrique).

En période de crue, la surcharge hydraulique apportée par ce même axe inverse les écoulements vers le nord à proximité de l'axe. Il faut préciser, pour la suite de ce travail, que des inversions d'écoulement sont également visibles entre Pfl et CB4. En période de descente, l'écoulement s'effectue de Pfl vers CB4 alors qu'en période de crue, cette direction s'inverse.

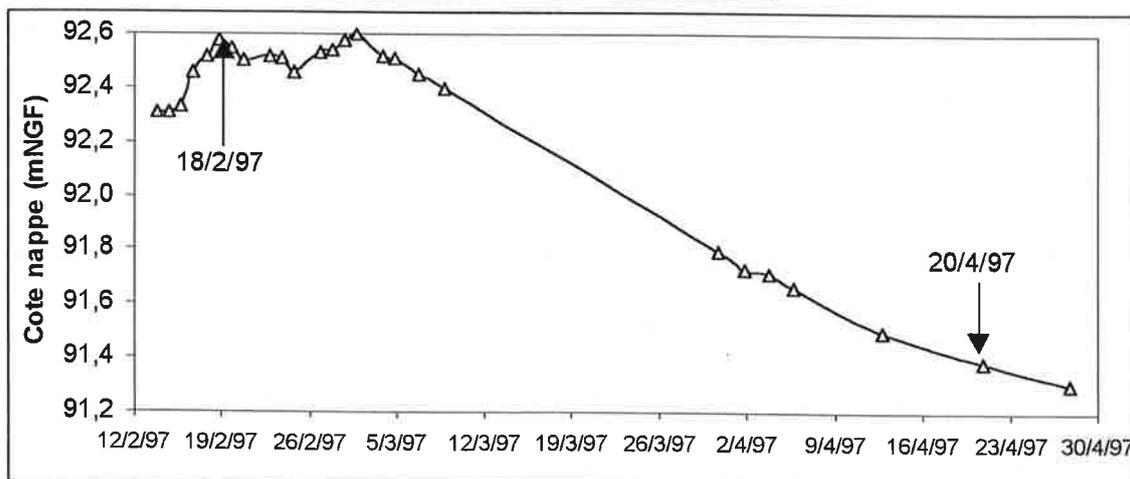
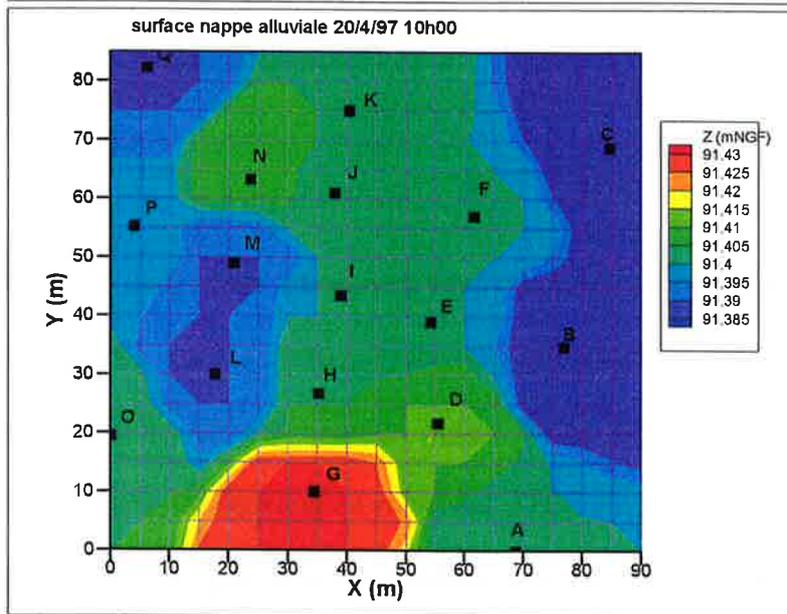
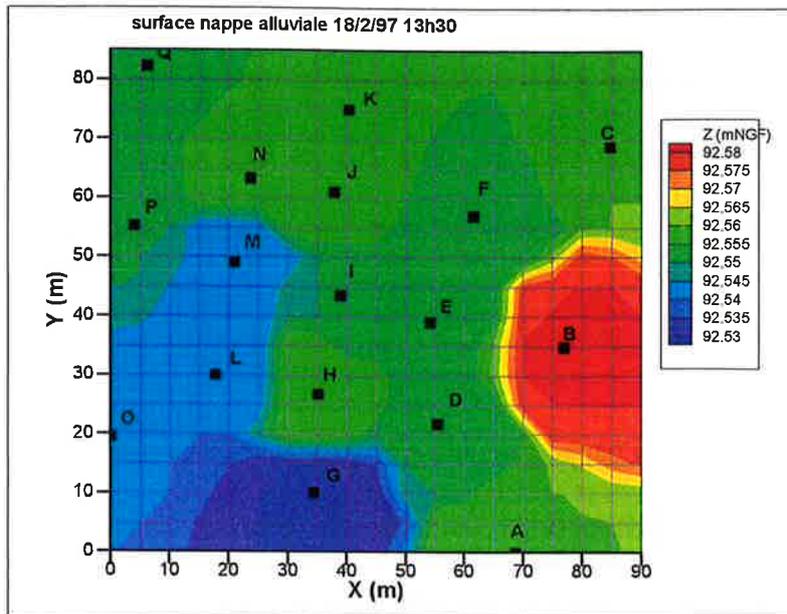
Le gradient hydraulique moyen de la nappe calculé au niveau du réseau calcaire est de $0,2 \cdot 10^{-3}$ en période d'étiage et $0,6 \cdot 10^{-3}$ en période de crue. Ce gradient peut atteindre localement $1,6 \cdot 10^{-3}$ au voisinage de l'axe karstique en période de crue (fig.6.15). Ces valeurs sont cohérentes avec les valeurs obtenues par lecture des cartes piézométriques de la région de Sandillon (Desprez, 1976).

6.3.2. Etude des réponses différentielles à l'échelle de la centaine de mètres

L'expérience de traçage dans les alluvions, réalisée à partir de mars 1997, a été complétée d'une phase de suivi des cotes de la nappe alluviale au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire implanté en février 1997. Les cotes de la nappe relevées pendant cette période sont présentées en annexe 20. La construction, à l'aide du logiciel Tecplot, de cartes représentant, en 3 dimensions, la répartition des charges de la nappe sur le réseau alluvionnaire, a permis de définir une surface de nappe caractéristique des régimes de crue et descente de la Loire. Ces cartes sont présentées dans l'annexe 20.

L'étude des fluctuations piézométriques de la nappe à l'échelle de l'observatoire alluvionnaire conduit aux résultats suivants :

-La surface piézométrique de la nappe alluviale, à l'échelle du réseau alluvionnaire, n'indique aucune direction d'écoulement particulière (figure 6.16).



En fonction du régime hydrologique de la Loire, la surface piézométrique de la nappe alluviale, au niveau de l'observatoire alluvionnaire implanté en février 1997, présente des différences de charges locales qui s'inversent lorsque le régime de la Loire change. Par exemple, le 18/2/97, la nappe se trouve en fin de remontée, B est alors un point haut et G est un point bas. Lorsque la Loire redescend, la nappe redescend plus vite en B qu'en G, ce qui place G comme point haut en fin de descente (20/4/97) et B comme point bas. En fin de descente, d'autres points bas apparaissent : L, M, P et Q. Les différences locales de charge peuvent conduire à des écoulements locaux qui n'ont plus rien à voir avec le gradient Est-Ouest indiqué par la piézométrie à l'échelle de la carrière.

Figure 6.16 : Cartes piézométriques de la nappe alluviale en fonction du régime ascendant ou descendant de la nappe

-Les différences de charges peuvent être importantes à courte distance ce qui peut induire des déplacements très locaux. Par exemple, la différence de cote entre G et B peut atteindre 10 cm en période de descente, ce qui implique un gradient hydraulique local égal à 2.10^{-3} , supérieur au gradient maximal ($1,6.10^{-3}$) observé dans la nappe calcaire à proximité des axes karstiques (§6.3.1.3).

-Les gradients hydrauliques locaux s'inversent entre période de descente et période de crue. Ainsi, en fin de période de descente de la nappe, on distingue deux séries de points bas. La première constituée par B et C se situe à l'Est du réseau. La deuxième, moins marquée, formée par L, M, P et Q, se situe à l'Ouest. G et, dans une moindre mesure, D, constituent des points haut. En période de remontée de la nappe, deux points se distinguent au milieu d'une surface relativement plane : B, point haut, et G, point bas.

-Les amplitudes des variations piézométriques ne sont donc pas directement corrélées aux perméabilités ponctuelles (figure 6.17). K, par exemple, possède une forte perméabilité mais ne se démarque ni comme point haut ni comme point bas. Les amplitudes de variations piézométriques ne sont pas non plus liées directement à la profondeur du toit calcaire (figure 6.18). Il serait en effet tentant de penser que plus le toit calcaire est élevé, plus les amplitudes piézométriques sont importantes. Or ce n'est pas ce que l'on observe pour l'ensemble des piézomètres, sauf B. Les amplitudes des variations piézométriques dans les alluvions sont certainement le résultat de la somme de plusieurs facteurs : perméabilité locale, profondeur du toit calcaire, perméabilité de la couche présente entre le calcaire et les alluvions, et de la proximité ou non d'un axe de circulation karstique.

Il est regrettable, pour cause d'avancée rapide des travaux d'extraction, de n'avoir pu mesurer la perméabilité ponctuelle au niveau des points particuliers B et G. Mais d'après ses fluctuations piézométriques importantes, B doit être considéré comme étant en relation privilégiée avec la nappe du calcaire sous-jacente.

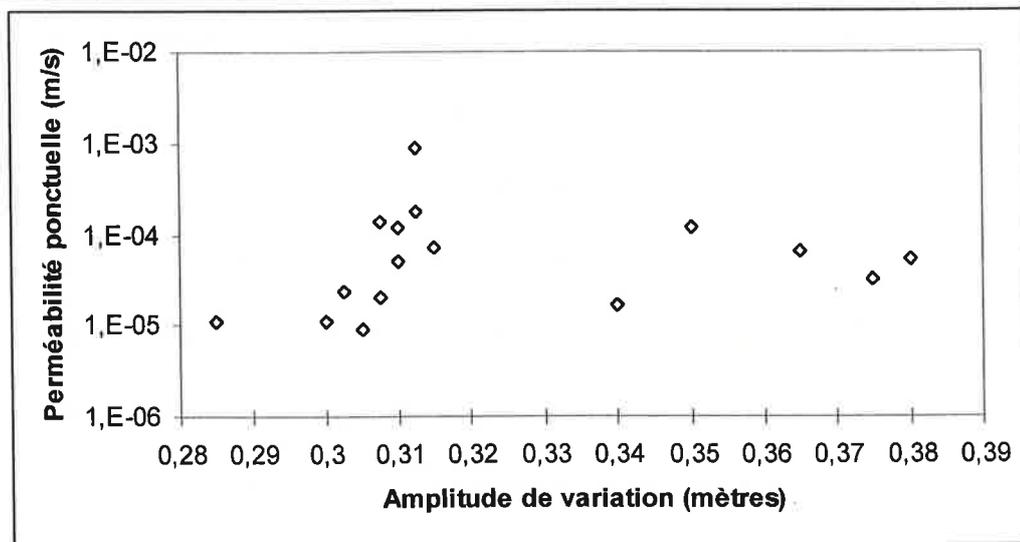
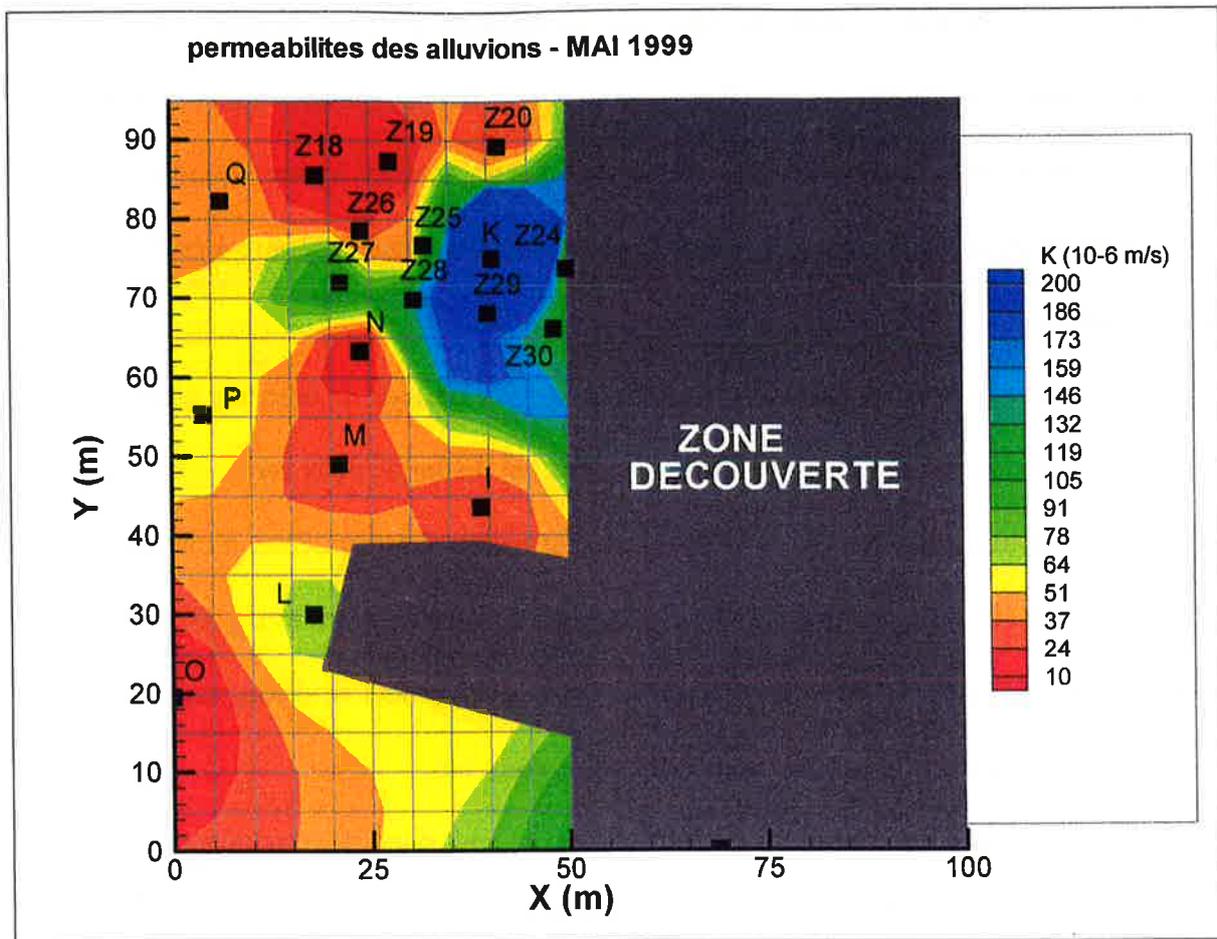


Figure 6.17 : Perméabilités ponctuelles (graphique du haut) au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire et étude des corrélations (graphique du bas) entre les perméabilités et les amplitudes piézométriques observées pendant la montée de la nappe alluviale du 4/11 au 11/11/97.

Toutes les perméabilités n'ont pu être mesurées, les travaux d'extraction de la carrière ayant entamé la partie Est du réseau piézométrique au moment des mesures.

Il semble être situé sur une fenêtre par laquelle la nappe calcaire alimente la nappe alluviale en période de crue, et par laquelle la nappe alluviale se vide en période de descente. B bénéficie à la fois de la proximité d'un chenal à circulation karstique, de la faible profondeur du toit calcaire et certainement d'une forte perméabilité des alluvions.

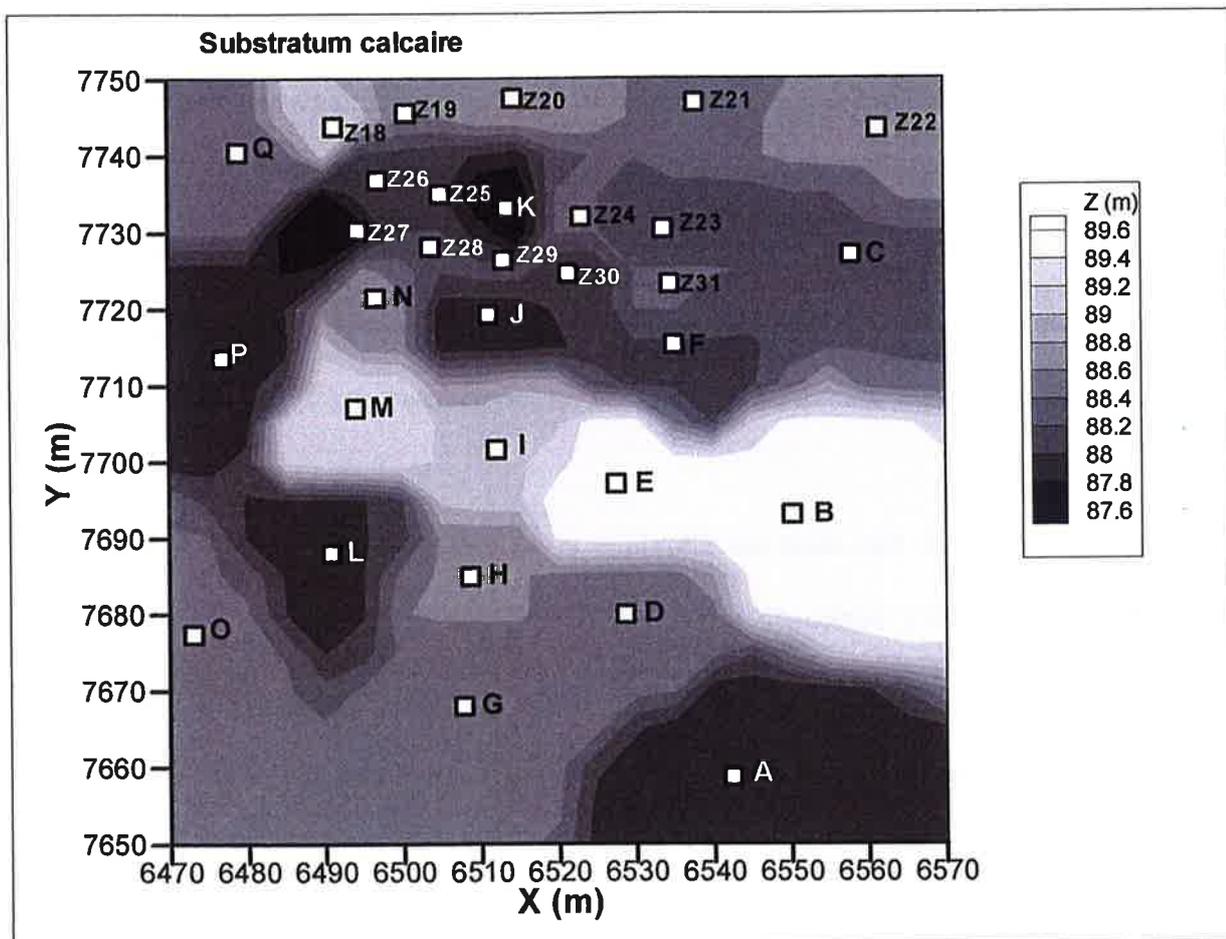


Figure 6.18: Carte de répartition de la cote NGF du substratum calcaire au niveau du réseau piézométrique implanté en 1997.

La hauteur du toit calcaire varie sur deux mètres. Le piézomètre B se situe dans une zone où le toit calcaire se situe à faible profondeur. C'est aussi en B que les variations piézométriques de la nappe sont les plus importantes. Cependant, cette observation n'est pas applicable au reste du réseau piézométrique.

6.4. Bilan sur l'étude hydrodynamique de la nappe

Le suivi piézométrique de la nappe au niveau de la carrière permet de confirmer quelques points déjà présentés dans les chapitres précédents :

-Le niveau de la nappe suit étroitement celui de la Loire sur l'ensemble de la carrière.

-La piézométrie à l'échelle de la carrière confirme une "direction générale d'écoulement" d'Est en Ouest.

-Les différences de niveau entre la nappe alluviale et la nappe du calcaire de Pithiviers sont très faibles, inférieures à quelques centimètres, et ne s'expliquent que par la dynamique des transferts de charge. Les deux nappes ne sont donc pas dissociées dans ce contexte. Ce résultat était prévisible d'après les sondages de reconnaissance (chapitre 2) montrant que le substratum imperméable, à la base des alluvions, était soit inexistant, soit de faible épaisseur. Les analyses de majeurs démontraient, par ailleurs, le passage des engrais des alluvions au calcaire (chapitre 2).

-Il existe, à la fois dans les alluvions et le calcaire, des hétérogénéités dans les circulations souterraines, hétérogénéités caractérisées, dans le chapitre 2, par des teneurs très variables en éléments majeurs. Les zones du calcaire à teneurs élevées en éléments majeurs (ex : Pf1) se caractérisent par de faibles amplitudes de variations piézométriques. Au contraire, les zones à faibles teneurs (ex : CA1) se caractérisent par des variations piézométriques importantes.

-Le lac d'extraction n'a pas d'influence significative sur la piézométrie de la nappe dans les trois premières années de cette étude (1997, 1998, 1999).

Cette étude apporte un regard nouveau sur le fonctionnement transitoire de la nappe en relation avec la Loire. Le régime habituel de la nappe est la phase descendante. Pendant cette période, les axes karstiques constituent des axes de drainage vers lesquels convergent

localement les lignes de courant. Périodiquement, les crues de la Loire mettent ces axes sous pression par rapport au reste de la nappe et inversent de ce fait les circulations. Ce déséquilibre est lié à des transferts de charge plus rapides par les karsts. Les axes de circulations karstiques ne sont alors plus des axes de drainage mais des axes d'alimentation. Les crues engendrent donc des bouleversements importants dans la piézométrie de la nappe. En plus de ces axes de circulation préférentielle, la karstification globale du calcaire augmente la perméabilité et le tout se manifeste par l'obtention de transmissivités élevées à partir du rabattement créé par les pompes de la carrière. Cette forte transmissivité explique la rapidité avec laquelle sont transmises les montées de la Loire (en moins de 24h sur l'ensemble de la carrière par rapport à Sandillon).

Dans les alluvions, on n'observe pas, à l'échelle de la centaine de mètres, de gradient piézométrique selon la direction générale de l'écoulement mais des gradients locaux qui peuvent être importants et qui s'inversent entre les phases de montée et de descente de la Loire. Ces différences piézométriques sont le reflet non d'une hétérogénéité des perméabilités ponctuelles des alluvions mais d'une variabilité des connexions aux alimentations karstiques de la nappe par lesquelles transitent les impacts de la Loire.

L'écoulement global de la nappe n'est donc que la résultante d'une dynamique imposée par le régime hydraulique de la Loire et le réseau de chenaux karstiques qui maille le calcaire de Pithiviers du Val d'Orléans. Cet écoulement général impose des écoulements locaux complexes et périodiques en dehors de ces chenaux karstiques sur l'ensemble de la nappe associant, dans le domaine étudié, ses deux sous-ensembles calcaire et alluvionnaire. En liaison avec les précipitations sur l'ensemble du bassin, ce sont essentiellement la fréquence, l'amplitude et les vitesses de montée et descente de la Loire qui déforment la surface

piézométrique et provoquent des inversions locales de circulations dans les directions imposées par la structure du réseau de circulations karstiques.

CHAPITRE 7

MIGRATIONS DIFFERENTIELLES D'ESPECES CHIMIQUES DANS LA NAPPE ALLUVIALE

Ce chapitre présente l'expérience de traçage multi-élémentaire effectuée dans la nappe des alluvions de la carrière ainsi que les observations préliminaires et les expériences réalisées ultérieurement dans le but d'interpréter ce traçage.

7.1. Un milieu à forte variabilité spatiale et temporelle

Le caractère hétérogène de la nappe alluviale a déjà été abordé dans les chapitres précédents. L'étude de la lithologie et les analyses granulométriques de tout-venant (chapitre 2) ont montré une forte variabilité des teneurs en argile au sein des alluvions. Il existe une distribution complexe allant des zones très argileuses à des zones sableuses. L'hétérogénéité lithologique se confirme par celles des perméabilités ponctuelles mesurées par "slug test" et les différences de réponses piézométriques (chapitre 6). En étudiant l'impact des cultures sur la nappe, on a également montré les écarts importants des teneurs en éléments majeurs entre des points très proches de la nappe. On reprend, dans cette partie, la description des hétérogénéités physico-chimiques à l'échelle de l'observatoire alluvionnaire implanté en 1997 ainsi que les variations observées au cours du temps.

7.1.1. Observations géochimiques

Les teneurs en éléments majeurs des échantillons d'eau prélevés sur l'observatoire piézométrique implanté en 1997 sont données en annexe 18. En tout, cinq séries complètes de prélèvements ont été effectuées entre 1997 et 1998, avant la destruction du

réseau piézométrique. Toutes ces séries n'ont pas donné lieu à des analyses complètes d'éléments majeurs. Les analyses effectuées pour chaque série sont données dans le tableau 7.1.

Tableau 7.1: Dates des prélèvements et analyses en éléments majeurs réalisées sur les échantillons d'eau de nappe prélevés sur l'observatoire piézométrique alluvionnaire.

Dates des prélèvements	Réseau initial (implanté en février 1997)			Réseau étendu (extension en Octobre 1997)		
	Anions	Cations	Alk, pH	Anions	Cations	Alk, pH
13/03/97	X					
25/3-3/4/1997	X	X	X			
07/10/97		X				
22/10/97					X	
20-22/7/98	X	X	X	X	X	X

Alk=Alcalinité

7.1.1.1. Hétérogénéités spatiales des teneurs naturelles

Des cartes de distribution des éléments majeurs ont été tracées sur le réseau étendu à partir des analyses complètes effectuées sur les échantillons de juillet 1998 (figs.7.1 et 7.2). Cette période correspond à une phase de descente de la Loire.

Ces cartes montrent la grande variabilité à courte distance des teneurs dans les eaux de nappe alluviale. En caractérisant la dispersion spatiale par le coefficient de variation (écart-type / moyenne), on obtient les valeurs suivantes:

Tableau 7.2 : Coefficients de variation (%) caractérisant la distribution spatiale des éléments majeurs dans les eaux de nappe alluviale du réseau piézométrique implanté en février 1997

Dates des prélèvements	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
13/03/97	35	53	22	21	16	26	25
25/3-3/4/1997	24	36	20				
07/10/97				18	14	29	23
20-22/7/98	23	34	24	18	30	27	24

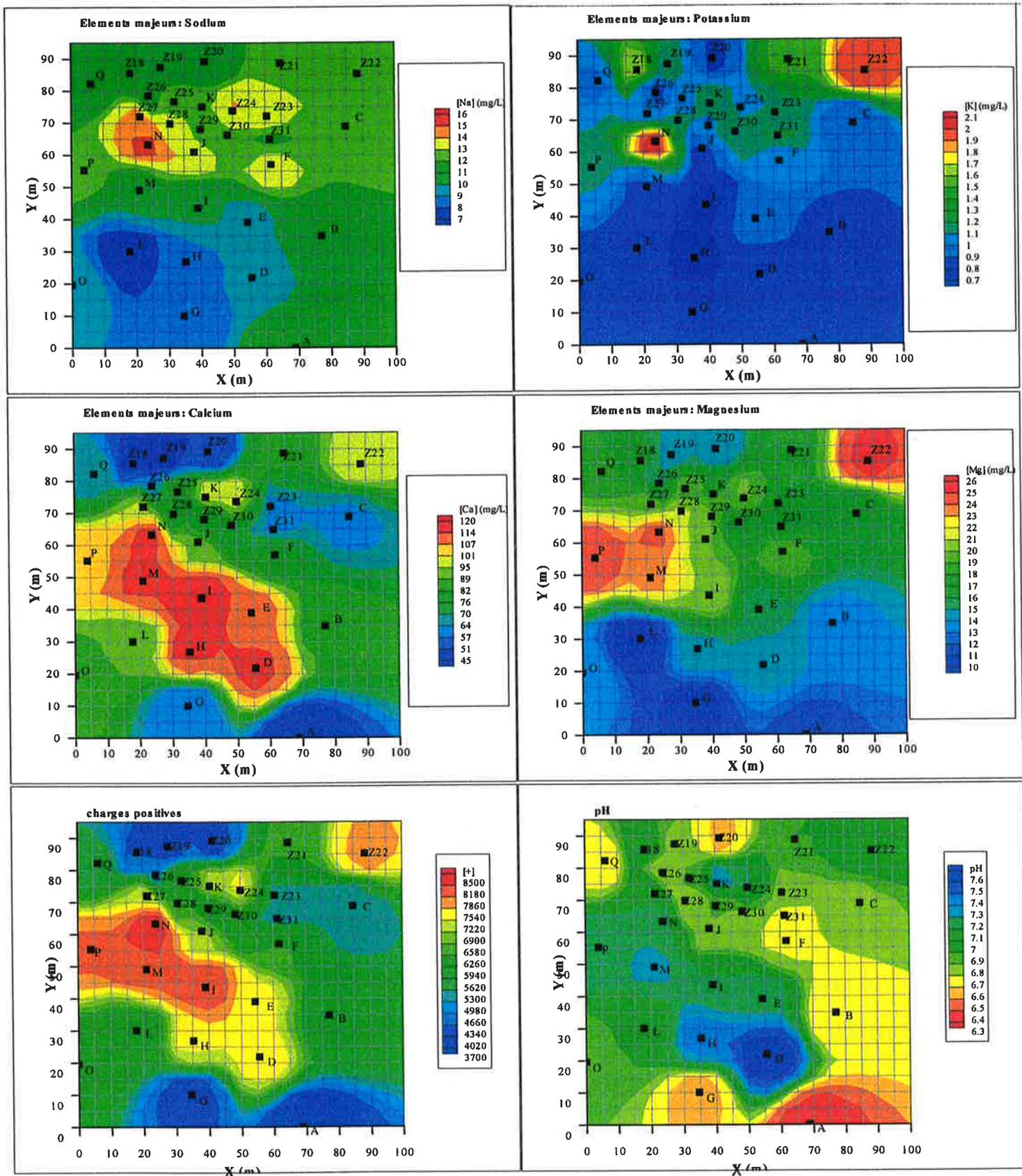


Figure 7.1 : Distributions des teneurs en cations, du pH et de la somme des charges positives ($\mu\text{eq/L}$) dans la nappe alluviale de Sandillon au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire le 20-21/7/98

L'élément qui est distribué de la manière la plus homogène est le potassium. Les nitrates sont, au contraire, les moins bien répartis.

Pour chaque élément, on aperçoit, sur les cartes de répartition (figures 7.1 et 7.2), des domaines définis par des gammes de concentrations élevées (en rouge-jaune), moyennes (en vert) et faibles (en bleu). Même si les domaines ne sont pas identiques selon l'élément choisi, il est tout de même possible de dégager quelques caractéristiques sur la répartition des éléments dans la nappe à l'échelle de l'observatoire:

-Les eaux les plus chargées (somme des charges positives; fig.7.1) se situent dans la zone milieu-Ouest constituée par les piézomètres D, E, H, I, M, N et P et également en Z22. Ces points se caractérisent également par des teneurs élevées en hydrogénocarbonate de calcium et une sursaturation vis-à-vis de la calcite. Les perméabilités ponctuelles mesurées pour I, M, N et P (les perméabilités dans D, E, H et Z22 n'ont pas été mesurées) sont également les plus faibles ($<5,4 \cdot 10^{-5}$ m/s) du réseau. Ces points constituent donc une zone d'accumulation des éléments transférés dans la nappe. Ils forment une région à pH légèrement basique ($7,2 < \text{pH} < 7,7$). Inversement, les zones les moins chargées, c'est-à-dire le Sud, l'Est et le Nord-Ouest, sont caractérisées par des pH légèrement acides ($6,3 < \text{pH} < 6,8$).

-Les teneurs en nitrates sont très variables. Trois points sont particulièrement pollués: N, Q et Z21. Les très faibles teneurs observées en Z18, Z19 et Z22 sont très probablement liées à une contamination par des bactéries dénitrifiantes. Par ailleurs, la présence d'activité bactérienne, dans ces 3 piézomètres, se manifeste par une odeur d' H_2S . De plus, des bactéries rousses filamenteuses ont été identifiées dans ces piézomètres par un laboratoire de l'Institut National de Recherche en Agronomie (J.C. Druart; I.N.R.A. - Station d'Hydrobiologie Lacustre - 75, Avenue de Corzent BP 511 74203 THONON-les-BAINS) comme étant du groupe *Leptothrix Ochracea*.

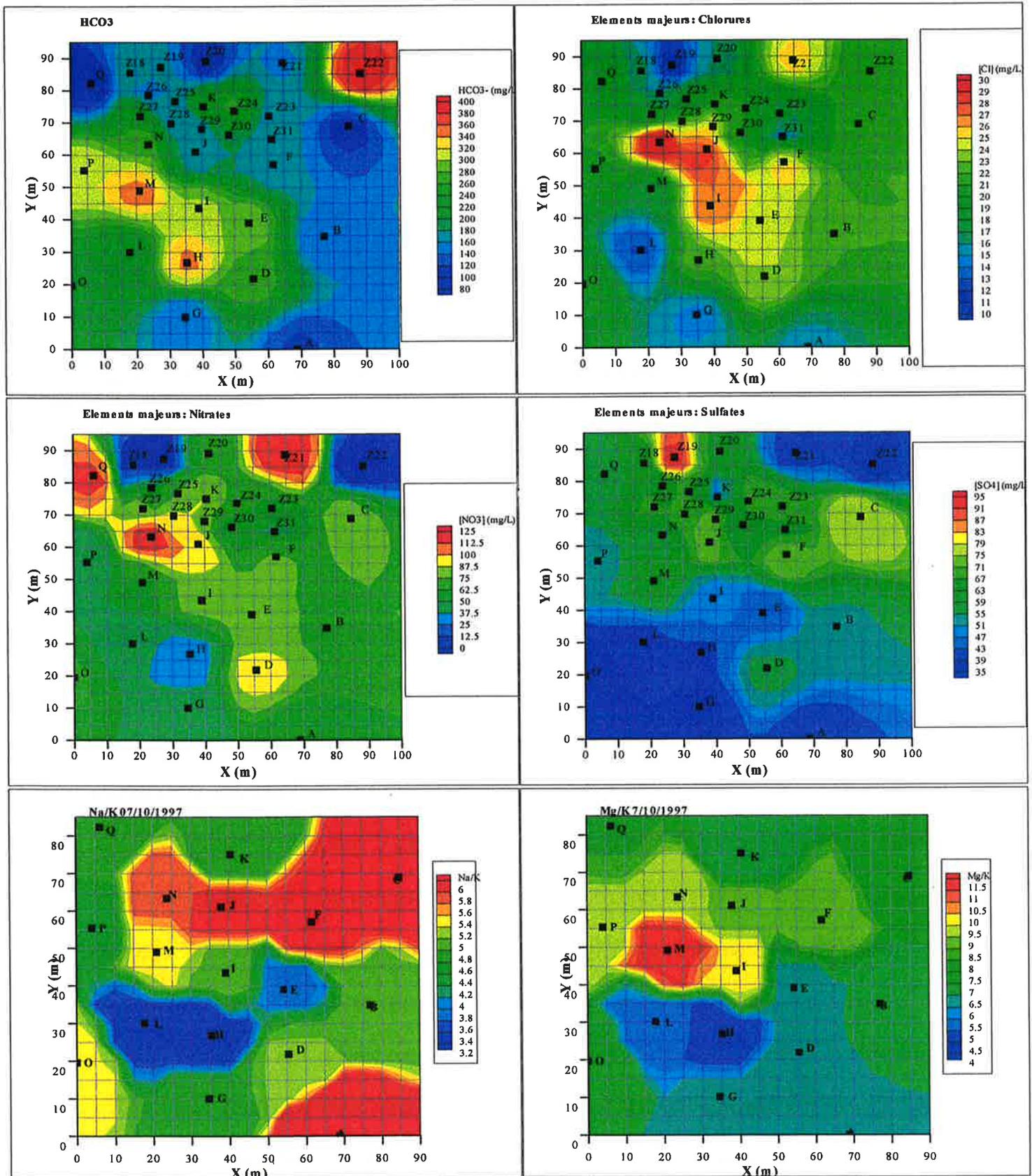


Figure 7.2 : Distributions des anions dans la nappe alluviale de Sandillon, au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire les 20-21/7/98, et des rapports Na/K et Mg/K en période de remontée de la Loire, le 7/10/97

Ces bactéries ont la particularité de réduire les oxydes de fer et de manganèse (Cullimore, 1978).

- Les chlorures sont assez bien corrélés aux nitrates. Ils forment une zone à teneurs élevées au niveau des piézomètres D, E, F, I, J, N et au niveau de Z21. Cet élément peu retenu par adsorption et peu assimilé par les organismes vivants constitue un bon traceur des circulations souterraines. Les teneurs étant faibles dans les précipitations, on peut considérer que l'enrichissement des eaux en chlorures par rapport à la Loire est dû essentiellement aux apports de surface (engrais). Or, sur le site, les apports en KCl n'ont pas eu lieu depuis le début des années 1990 (chapitre 2). Le site porte donc la trace d'apports anciens qui n'ont pas été lessivés et qui se sont peu déplacés puisqu'ils coïncident également avec les apports récents (nitrates).

- Trois éléments majeurs ont des répartitions comparables: le potassium, le magnésium et les sulfates. Leurs teneurs sont les plus basses dans le 1/3 sud du réseau.

- Les rapports Na/K et Mg/K ont été représentés figure 7.2 pour une période de remontée de la Loire (le 7/10/97), afin de visualiser les effets de mélange par les eaux du système Loire-axes karstiques dont les rapports Na/K et Mg/K sont faibles: $Na/K=2,90\pm 0,41$ et $Mg/K=1,44\pm 0,20$ (moyennes calculées sur les teneurs mesurées dans les eaux de la Loire et de la source du Bouillon sur le cycle 1979-1980, Cf. chapitre 1). Les rapports Na/K et Mg/K mesurés dans la nappe alluviale sont supérieurs à ceux du système (Loire – axes karstiques) ce qui montre la différenciation chimique des eaux de nappe par rapport à la Loire. Les rapports Na/K sont 1,1 à 3 fois plus élevés et les rapports Mg/K, 2,8 à 8 fois plus élevés. Ces rapports sont assez variables dans l'espace. La zone où les deux rapports sont faibles en même temps est constituée par les piézomètres L, H et E. Si l'on considère seulement le rapport Mg/K, cette zone s'étend sur tout le sud du réseau et comprend A, B, D et G, en plus des piézomètres précédents. Il est intéressant de remarquer que le piézomètre L est un point bas, en période de

descente de la nappe. On peut considérer que L est localisé non loin d'une "fenêtre" où des échanges s'effectuent plus facilement avec la nappe calcaire. I, J, M et N sont situés dans une zone à rapports élevés, ce qui indique que la Loire a un faible impact chimique sur cette zone.

La répartition hétérogène des éléments majeurs au sein de la nappe alluviale montre la faible extension des mélanges horizontaux. Quelques points semblent totalement isolés (Z21, Z22) et il existe une zone caractérisée par des teneurs élevées en presque tous les éléments majeurs, autour des piézomètres I, J, N et M. En particulier, les teneurs en chlorures très élevées à cet endroit, identifient une zone d'eau stagnante. On doit souligner que cette zone se situe par ailleurs sur un plateau piézométrique à la fois en période de crue et en période de descente des eaux (chapitre 6).

Les piézomètres B et G qui constituent les extrema piézométriques de la nappe sont caractérisés par des teneurs moyennes ou faibles en quasiment tous les éléments majeurs. G présente les plus faibles oscillations piézométriques et se situe probablement dans une zone argileuse. En période de descente des eaux, il représente le point le plus haut de la nappe à l'échelle du réseau alluvionnaire. B, au contraire, constitue un point bas en période de descente et un point haut en période de remontée. Ces deux cas illustrent deux situations extrêmes, celle de zones à très faibles perméabilités où les circulations et mélanges sont très limités, celle au contraire, de zones à fortes perméabilités où des circulations et donc des échanges plus importants interviennent.

7.1.1.2. Evolution des teneurs naturelles en fonction du régime hydrologique

Après avoir étudié la variabilité spatiale, l'analyse de la variabilité temporelle des teneurs en éléments majeurs peut apporter des informations intéressantes sur les zones où s'effectuent les échanges importants entre les divers compartiments de la nappe.

Pour cette étude, seuls les prélèvements effectués sur les 17 piézomètres du réseau initial peuvent être comparés puisqu'on ne dispose que d'une série complète de prélèvements sur l'ensemble du réseau étendu, celle de juillet 1998. Les comparaisons des teneurs, d'une série de prélèvements à l'autre, sont représentées sur la figure 7.3.

Etude d'une phase descendante: du 13/3/97 à fin mars 97:

Pour cette période, on ne dispose que des analyses d'anions. Le piézomètre F n'a pas été échantillonné fin mars 97. Les teneurs en sulfates augmentent de manière importante et relativement homogène sur l'ensemble du réseau et plus particulièrement en K. Les variations obtenues pour les chlorures et les nitrates diffèrent beaucoup plus d'un piézomètre à l'autre que celles des sulfates. De plus, les variations en ces deux éléments sont assez bien corrélées. Les fortes variations dans le temps, obtenues pour les chlorures et les nitrates, permettent de classer les piézomètres:

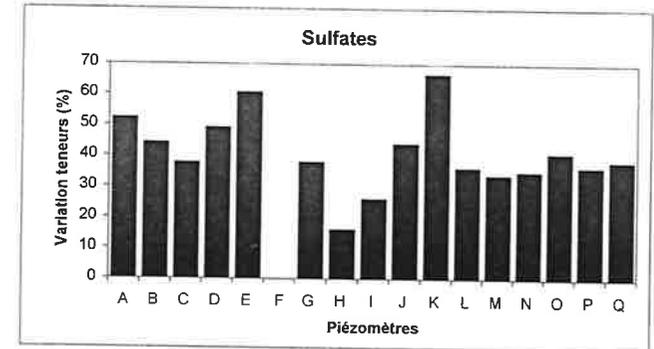
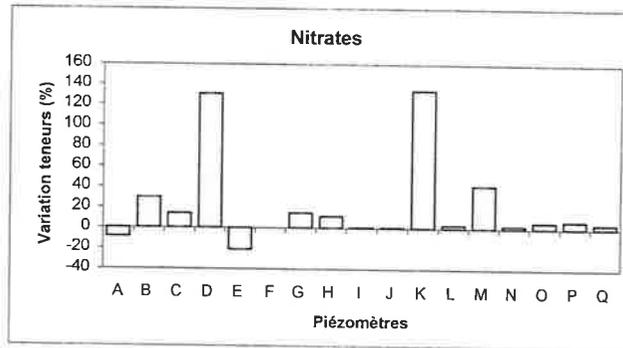
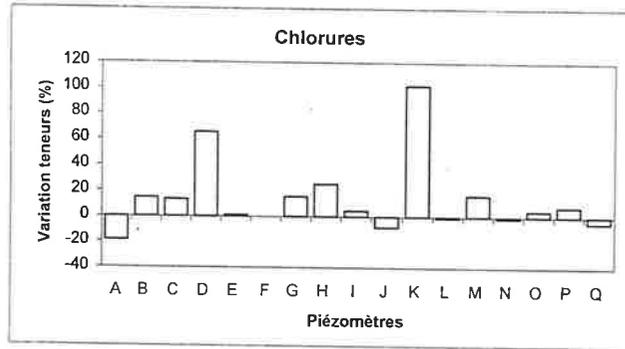
-I, J, L, N, O, P et Q sont caractérisés par de faibles variations temporelles.

-K, D, H, B et M sont caractérisés par des variations plus importantes en chlorures et nitrates, surtout K et D.

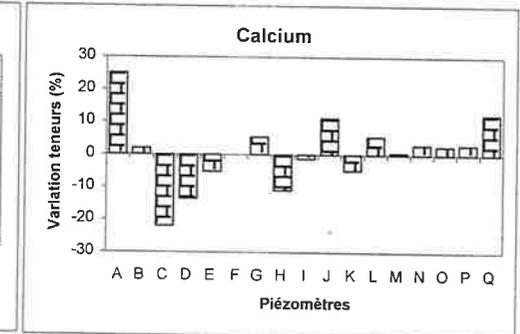
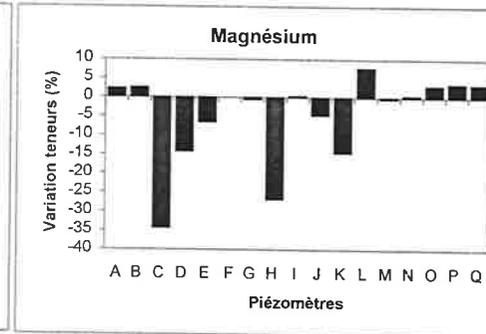
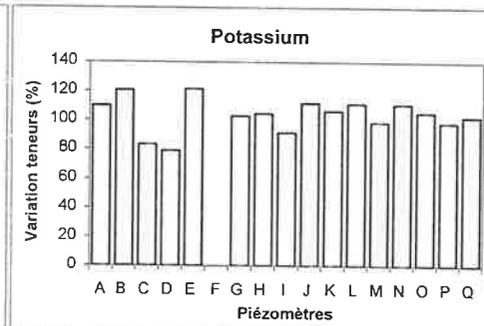
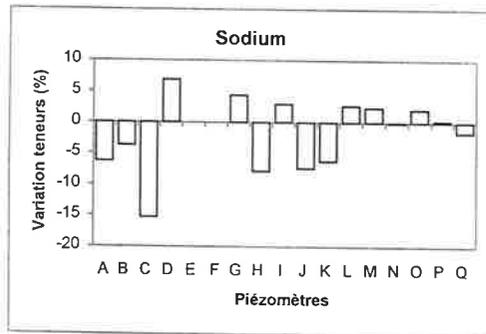
Etude d'une phase de remontée de la nappe, le 7/10/97:

Seules les teneurs en cations sont disponibles. On compare les teneurs entre mars 97, période descendante, et la période de montée de la nappe du 7/10/97.

Variations des teneurs en anions, du 13/3/97 au 3/4/97



Variations des teneurs en cations, du 3/4/97 au 7/10/97



Variations des teneurs en cations, du 7/10/97 au 20-22/7/98

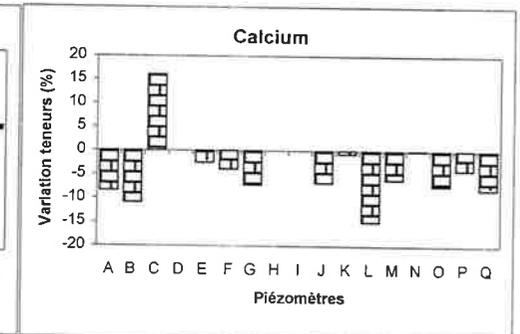
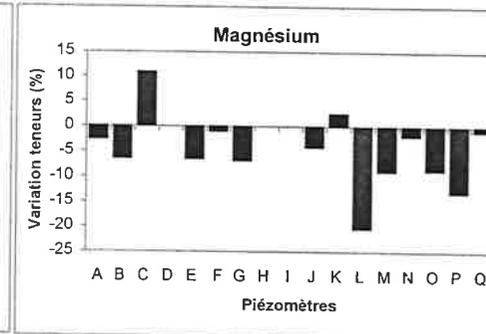
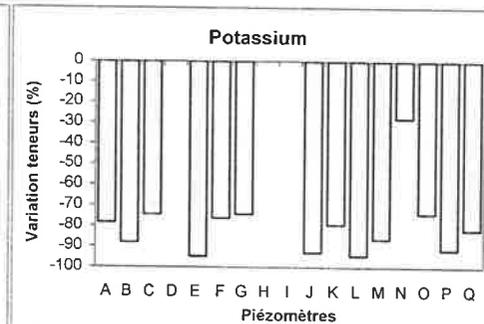
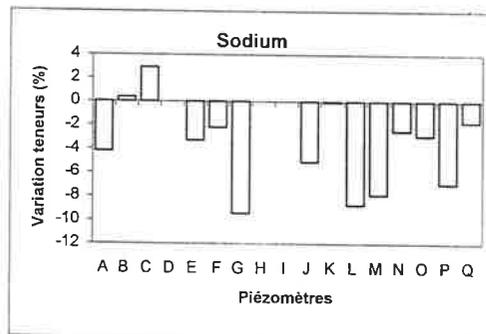


Figure 7.3: Variations, au cours du temps, des teneurs en éléments majeurs dans la nappe alluviale au niveau du réseau piézométrique implanté en 1997.

La remontée de la nappe se traduit par une augmentation considérable des teneurs en potassium sur la totalité du réseau et de manière maximale en B (de 0,55 à 2,24 mg/L) et E (de 0,65 à 2,65 mg/L). Les autres éléments, surtout Mg^{2+} , présentent des écarts plus importants entre piézomètres. Les teneurs en Mg^{2+} chutent de manière importante dans les piézomètres C, D, H et K. Elles sont quasi constantes en G, I, M et N.

Comparaison de la situation du 7/10/97 et de l'étiage de juillet 98.

Les variations observées sont inversées par rapport à l'exemple précédent, c'est-à-dire qu'il y a une chute des teneurs en potassium sur l'ensemble du réseau. Les teneurs en magnésium subissent une augmentation importante en C, et une diminution en L et P. Les teneurs en magnésium stagnent en F, N et Q.

Bilan

Sur le plan chimique, les phases de montée de la nappe se caractérisent par une très forte augmentation des teneurs en potassium dans tous les piézomètres. Les phases de descente sont caractérisées par une augmentation des teneurs en sulfates et une baisse des teneurs en potassium dans tous les piézomètres. Dans l'ensemble, les teneurs en sodium varient peu dans le temps (pas plus de 15%).

Certaines zones présentent des variations faibles en chlorures, nitrates et magnésium. Ces zones coïncident avec les domaines de fortes concentrations, identifiés dans le paragraphe précédent, et qui englobent les piézomètres I, J et N. Cela confirme l'isolement de cette zone.

L'étude des variations temporelles permet de mettre en évidence des piézomètres où les teneurs évoluent de manière importante au cours du temps: B, C, D, H et K. Au niveau de ces piézomètres, il y a des échanges importants avec le reste du réseau d'une part, avec les eaux profondes de la nappe du calcaire d'autre part.

La perméabilité mesurée dans le piézomètre K est l'une des plus élevées du réseau (chapitre 3), ce qui peut expliquer les mouvements d'espèces chimiques observés au niveau de ce piézomètre.

7.1.1.3. Etude des mélanges avec les eaux du système "Loire-axes karstiques" au niveau du piézomètre I

Ayant servi de puits d'injection lors du traçage réalisé en mars 1997 dans les alluvions, le piézomètre I a fait l'objet de trois études particulières:

-Suivi des éléments majeurs au cours du temps, en particulier des rapports Na/K et Mg/K permettant de suivre le mélange des eaux de la nappe alluviale avec les eaux du pôle de mélange "Loire-axe karstique" (chapitre 1).

-Suivi des éléments majeurs lors d'une expérience de pompage dans le piézomètre I.

-Etude du profil vertical des éléments majeurs dans le piézomètre I.

Ces résultats sont représentés sur la figure 7.4.

Ces trois études montrent qu'au niveau du piézomètre I, pourtant caractérisé par des teneurs importantes en éléments majeurs et par de faibles variations saisonnières de ces teneurs, on observe un mélange significatif des eaux de la nappe alluviale avec les eaux du système "Loire-axes karstiques". Ce mélange affecte essentiellement les couches profondes du piézomètre I et il est très marqué en période de remontée de la nappe. On peut donc en déduire que les couches profondes du piézomètre I sont en communication avec une zone où l'eau se renouvelle en période de remontée de la nappe.

Figure 7.4

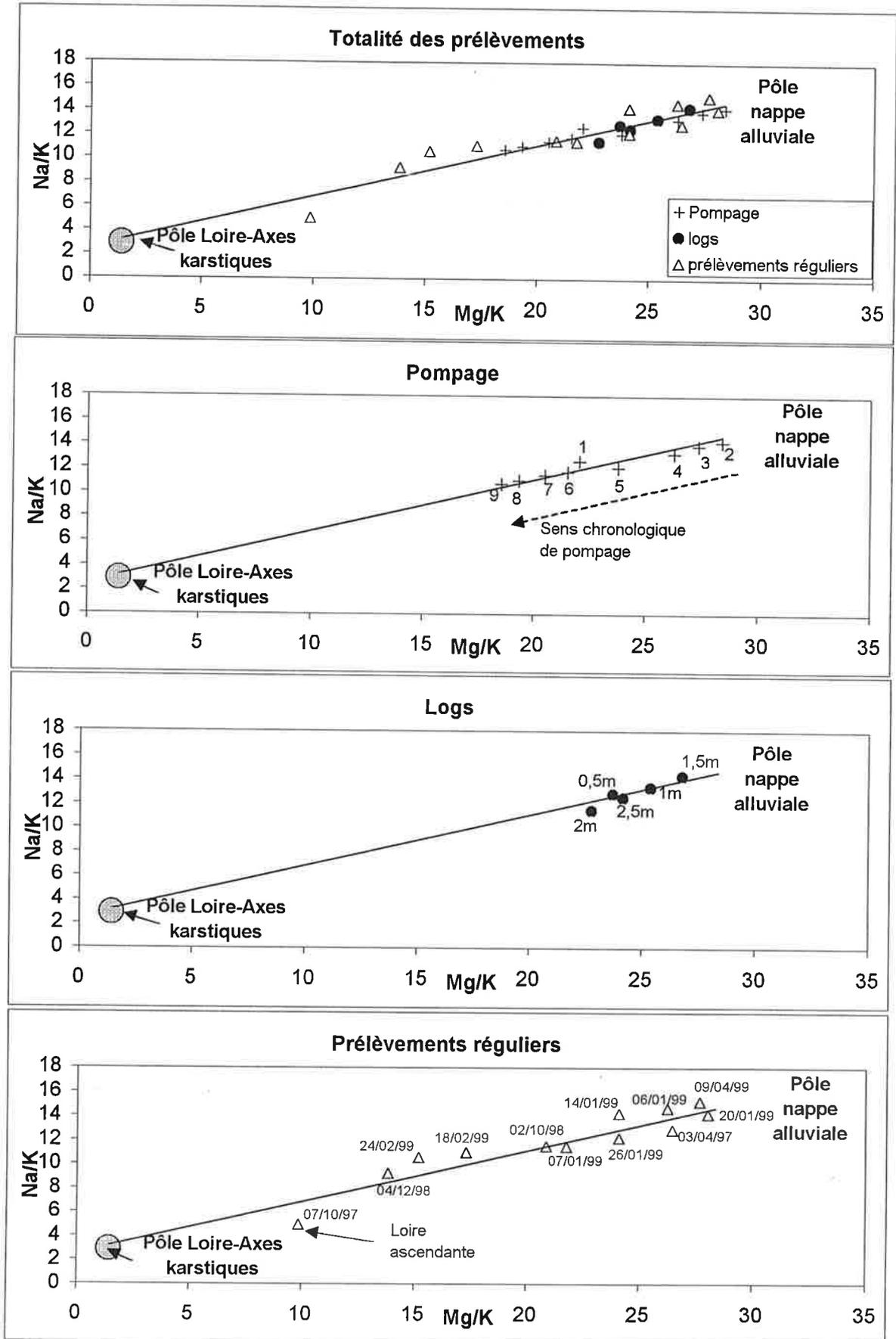


Figure 7.4: Diagramme Mg/K – Na/K des eaux de nappe prélevées dans le piézomètre I.

Légende

Ce diagramme met en évidence, dans le piézomètre I, le mélange des eaux de nappe alluviale avec l'eau de la Loire transitant par la nappe du calcaire. Les points représentant les prélèvements réalisés dans le piézomètre I de 1997 à 1999 s'alignent sur une droite qui passent par le pôle "Loire-axes karstiques" défini par les rapports quasi-constants: $Na/K=2,90\pm 0,41$ et $Mg/K=1,44\pm 0,20$ (Cf. chapitre 1). Cette droite est représentée, sur les graphiques, par la courbe de tendance passant par tous les points (calculée avec le logiciel excel). Trois types de prélèvements sont regroupés sur ce diagramme: des prélèvements effectués régulièrement (Δ) aux dates indiquées sur la figure, des prélèvements numérotés de 1 à 9 (+) réalisés dans l'ordre correspondant en sortie de pompe lors d'une expérience de pompage dans I (le 17/2/99), et des prélèvements réalisés aux profondeurs indiquées sur le graphique à partir de la surface de la nappe (\bullet). Les trois types de données convergent vers le même résultat: les eaux de la nappe se mélangent avec celles de la Loire au niveau des couches profondes en contact avec le calcaire de Pithiviers. En effet, globalement, plus le prélèvement est effectué en profondeur, plus l'eau prélevée contient une part importante d'eau de la Loire. De même, au cours d'un pompage, mis à part le premier prélèvement (1), l'eau drainée provient des couches profondes de la nappe aux caractéristiques plus proches des eaux de la Loire. Enfin, c'est en période de remontée de la Loire que les apports du fleuve sont les plus importants (prélèvement du 7/10/97).

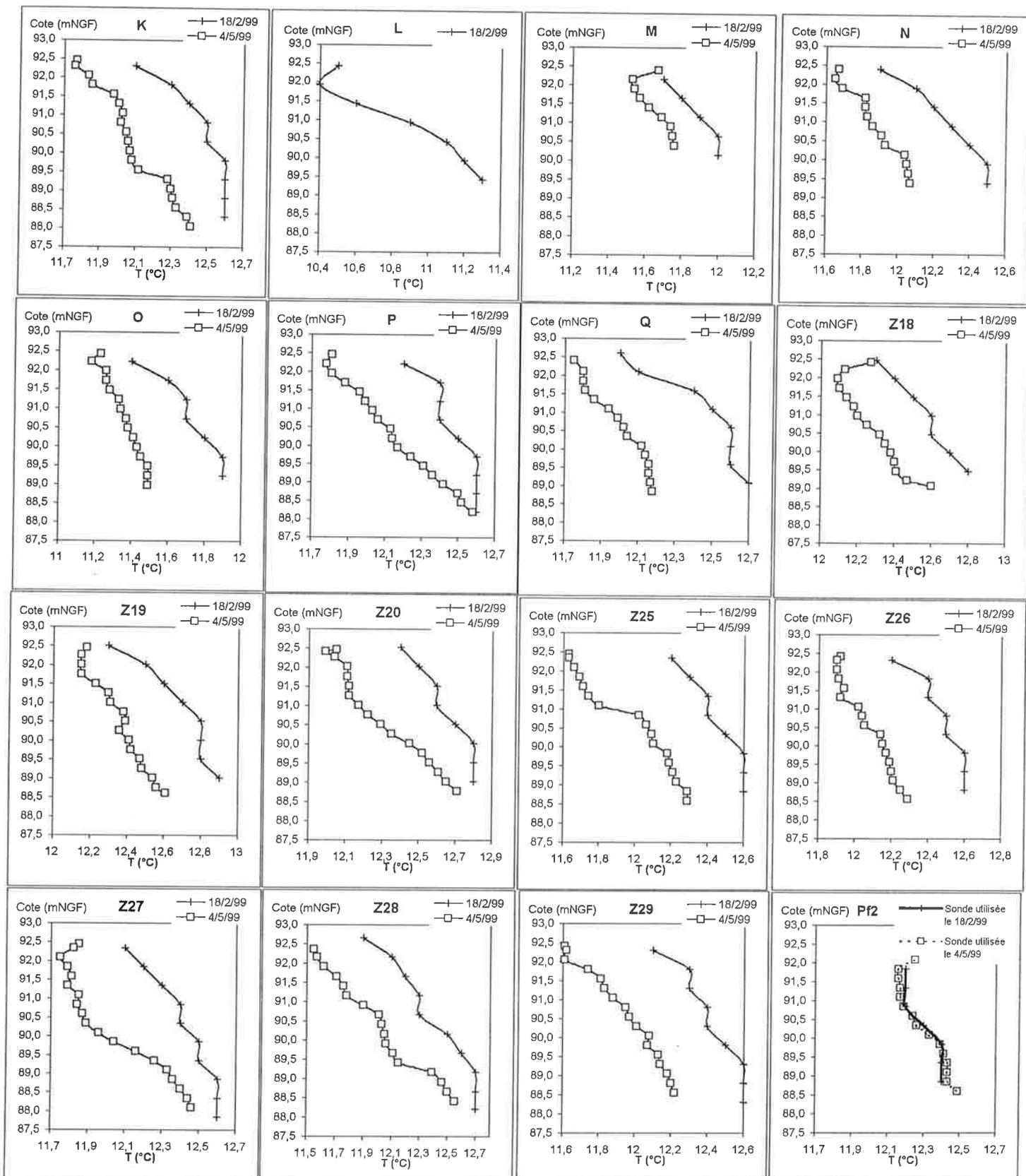
7.1.2. Observations des profils de température

Deux séries de diagraphies en température ont été réalisées dans les piézomètres alluvionnaires rescapés du réseau de 1997. La première série a été effectuée le 18/2/99 en début de remontée de la nappe, la deuxième le 4/5/99 en période de descente de la nappe. Les profils sont présentés sur la figure 7.5. Ils ne concernent que la partie crépinée des piézomètres. Les profils de température ont été réalisés à l'aide de deux sondes différentes. La sonde utilisée en février 1999 possède une précision du 10^{ème} de degré. La précision de la sonde utilisée en mai 1999 est du 100^{ème} de degré. Lors de la campagne de mai 1999, les deux sondes ont été comparées dans le piézomètre Pf2 (figure 7.5). Elles fournissent, à la précision des mesures près, les mêmes températures. Cela permet de comparer les profils de température réalisés lors des deux campagnes.

Les températures mesurées dans la nappe alluviale sont comprises entre 10,8°C et 12,9°C. Elles sont plus chaudes de 2/10^{èmes} à 4/10^{èmes} de degré en février qu'en mai. Globalement, les températures varient assez peu sur le réseau en dessous d'une certaine cote. Si l'on prend, par exemple, la cote 89 mNGF, les températures de la nappe sont comprises entre 12,10 et 12,65°C en mai 99. Seuls les piézomètres L et O se distinguent avec des températures plus basses (respectivement 11°1 et 11°5).

D'une manière générale, dans tous les piézomètres alluvionnaires, il existe un gradient positif de température de haut en bas. Notons toutefois que ce gradient peut s'inverser pendant la période été-automne durant laquelle les températures sont plus chaudes en surface (figure 7.6). La présence de ce gradient montre qu'il n'y a pas de mélanges rapides ni de mouvements convectifs importants à l'intérieur des piézomètres. Ce gradient est plus ou moins fort et plus ou moins régulier d'un piézomètre à l'autre. Chaque domaine de la nappe a donc une dynamique propre soulignant les faibles mélanges d'un domaine à l'autre de la nappe alluviale.

Figure 7.5: Profils verticaux de température dans la nappe alluviale en Février et Mai 1999.



NB: Les températures ont été mesurées à l'aide de 2 sondes différentes lors des deux campagnes. On vérifie par des mesures effectuées le même jour dans le piézo Pf2 à l'aide des deux sondes (graphique en bas à droite) que les réponses sont les mêmes.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences: la lithologie (conductivités thermiques des phases minérales), la hauteur du toit calcaire, la circulation des fluides dans la partie calcaire ou dans les alluvions. Le suivi des températures dans la nappe calcaire (chapitre 8) montre que les variations de température sont importantes (supérieures à 4°C) au niveau des axes de circulations karstiques alimentés par la Loire. Les zones de la nappe du calcaire situées à proximité de ces zones d'écoulement sont donc caractérisées par des variations plus importantes de température que les zones isolées (ex: Pfl) qui présentent de faibles variations saisonnières (Figure 7.6). On peut imaginer que ces variations importantes de gradients se répercutent dans les zones profondes de la nappe alluviale. Cependant les variations en température observées au fond des piézomètres entre février et mai 99 montrent, entre ces deux dates, un refroidissement de la nappe en profondeur alors que l'on pourrait s'attendre à un réchauffement si l'on se situait à proximité immédiate d'un réseau de circulation karstique. Ce refroidissement peut donc s'expliquer en partie par les battements de la nappe entraînant une translation verticale du gradient de température. Cependant, la différence de niveau de la nappe entre les deux relevés n'est que de 35 cm, ce qui est trop faible pour expliquer les différences de température observées entre les deux périodes. Les profils de température résultent donc de plusieurs paramètres qu'il est difficile de hiérarchiser et d'en quantifier les effets. Il faut retenir que la diversité des profils, sur les deux périodes étudiées, confirme l'absence d'une circulation horizontale homogène à l'échelle du réseau d'observation.

Il existe pourtant des piézomètres où la température est relativement constante sur une partie de la hauteur quelle que soit la saison. Il s'agit des piézomètres K, Q, Z25, Z26, Z27, Z28 et Z29. Dans ces puits, la température de l'eau à la cote 89 mNGF est comprise entre 12,6 et 12,7°C en février 99 et entre 12,2 et 12,4 °C en mai 99.

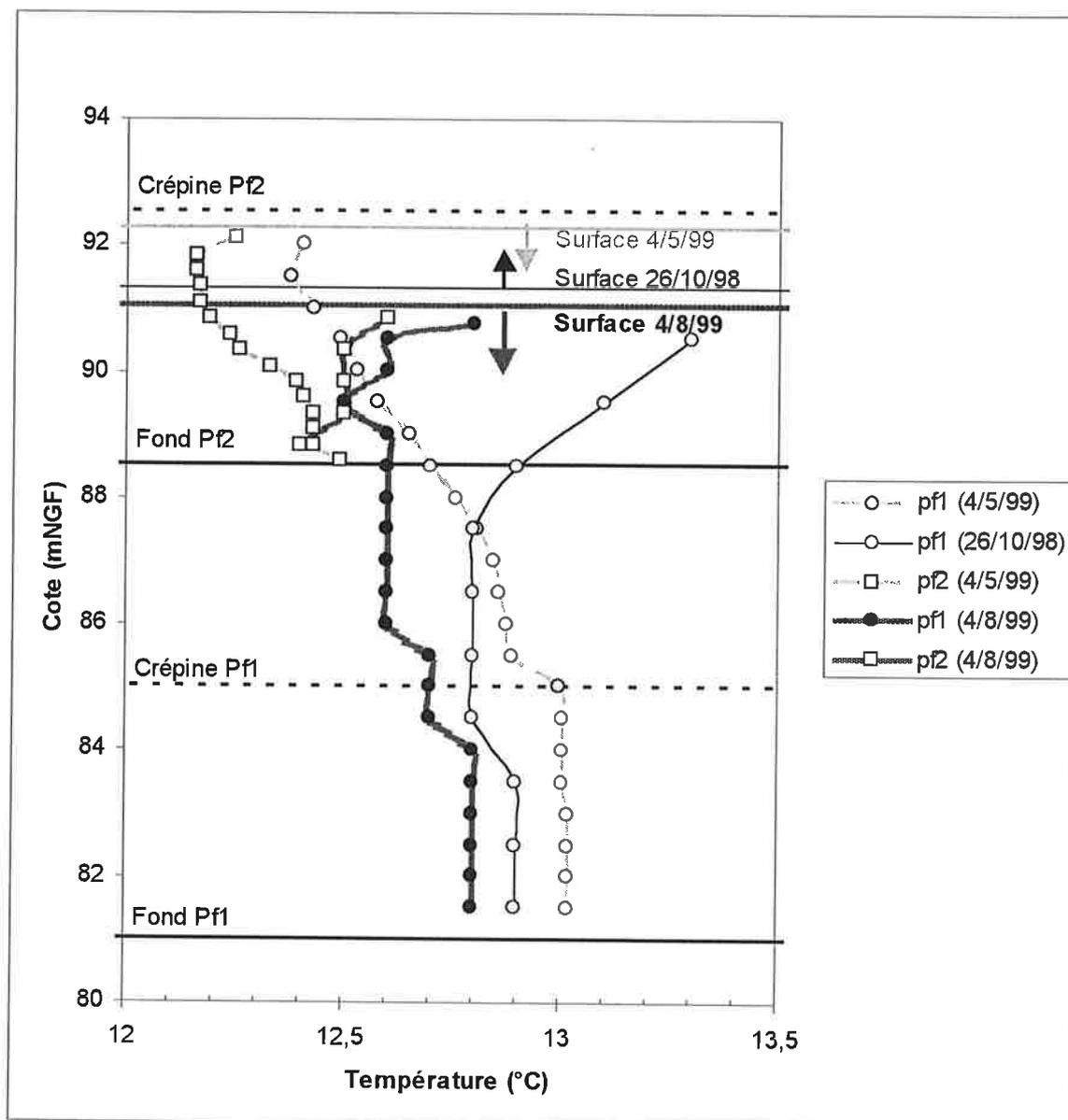


Figure 7.6 : Profils de température dans les piézomètres Pf1 (calcaire) et Pf2 (alluvionnaire).

Les températures mesurées en Pf1 dans la nappe du calcaire au niveau de la partie crépinée sont assez stables dans le temps, et constantes sur les 3 derniers mètres du piézomètre (variation maximale observée: 0,2°C). Les changements du gradient thermique dans la colonne d'eau sont donc essentiellement dus aux variations de la température de surface. Dans Pf1 et Pf2, le gradient thermique change d'une période à l'autre. Faible le 4/8/99, il croît le 4/5/99, avec une température de surface basse et une température élevée et constante au delà de la crépine. Au contraire, on observe un gradient inverse le 26/10/98 qu'expliquerait une température de surface élevée. Les faibles variations thermiques observées dans la partie calcaire de la nappe témoignent de l'absence de circulations d'eau importantes en provenance de la surface (circulations karstiques) au niveau du doublet Pf1-Pf2.

En février 99, période de montée de la nappe, les différences de températures entre ces piézomètres sont égales à l'imprécision de la mesure réalisée avec la première sonde ($0,1^{\circ}\text{C}$), c'est-à-dire quasiment nulles, alors qu'en mai 99, période de descente, les écarts sont plus importants ($0,2\pm 0,02^{\circ}\text{C}$). Ceci traduit des circulations horizontales plus importantes lors de la remontée de la nappe qu'en période de descente. Les piézomètres K, Q, Z25, Z26, Z27, Z28 et Z29, pourraient être en relation au niveau d'une couche perméable située à la base des alluvions. D'autre part, ces piézomètres sont caractérisés par des teneurs moyennes et homogènes en éléments majeurs ainsi que par des perméabilités assez faibles (sauf Z26 et Q).

7.2. Sondage géochimique de la nappe alluviale à l'aide des complexes EDTA de lanthanides

Dans cette partie, les résultats obtenus lors de deux traçages sont décrits: celui du 17/3/97 au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire implanté en février 1997 et celui du 11/1/00 entre Pf2 et Pf1, ce second traçage étant réalisé dans le but d'une interprétation correcte du premier. Plutôt que de parler de "traçage", il est plus précis d'employer le terme "sondage géochimique" puisque l'on analyse la réponse de la nappe à un déséquilibre géochimique brutal. L'analyse de cette réponse conduit non seulement à la connaissance des paramètres de l'écoulement (vitesses, directions) mais elle permet aussi d'accéder aux processus de transferts et d'échanges des espèces injectées.

7.2.1. Déroulement du traçage du 17/3/97

L'expérience de traçage réalisée à l'aide des complexes EDTA de La, Sm et Dy a lieu à partir du 17 mars 1997 sur le réseau piézométrique alluvionnaire. Pour le choix du piézomètre d'injection, seules les chroniques piézométriques réalisées entre février et mars 1997 ainsi qu'une première série d'analyses d'anions sont disponibles. Les autres informations présentées dans la partie 7.1 précédente sont acquises par la suite. Aussi, c'est le piézomètre central I, qui est choisi comme puits d'injection. 100 g de chaque lanthanide complexé avec 1,5 équivalents d'EDTA (au total: 861 g sous forme Y^{4-}) sont injectés en solution dans 20 litres d'eau. 80 litres d'eau supplémentaires sont ensuite déversés dans le piézomètre afin d'extraire le traceur du puits d'injection. Les quantités de traceurs et le pas de prélèvement ont été choisis en fonction des expériences de Bigot (1977) réalisées avec succès dans les alluvions de la Loire à Darvoy, plus en amont. Le pas est passé de 30 mn, au début de l'expérience, à 2 semaines, fin avril, alors que les traceurs ne sont toujours pas observés en dehors du puits d'injection.

Le premier passage des traceurs a lieu le 10/5/97, au moment de la remontée de la Loire, dans les puits J et K situés au nord du puits d'injection (fig.7.7). Les traceurs passent également dans le piézomètre F à partir du 28/6/97, puis dans les piézomètres M et N le 5/7/97. Des traces de dysprosium (environ 50 ppt) sont également détectées le 5/7/97 dans les piézomètres L, P et Q. Après l'extension du réseau, en octobre 1997, les traceurs passent dans les piézomètres situés au nord du réseau (Z21, Z23, Z30 et Z31), le 7/11/97. A partir du 12/12/97, les traceurs passent au sud du réseau, dans le piézomètre L. Quelques traces de dysprosium sont détectées en E et H le 22/1/98.

Les piézomètres D et H sont détruits en juin 1998. Dans la dernière série quasi complète de prélèvements, le 6/10/98, seul le piézomètre J contient encore du traceur ($[Dy]=84$ ppt) en dehors du puits d'injection. L'essentiel du réseau étant détruit après cette date, les 11 derniers prélèvements ont lieu uniquement dans le puits d'injection, I, jusqu'à sa destruction le 24/2/99. A cette date, les teneurs en traceurs dans le piézomètre I sont encore importantes : $[La]=250$ ppt; $[Sm]=160$ ppt ; $[Dy]=530$ ppt. Le suivi du traçage s'est effectué sur quasiment deux années. Les cartes de répartition du dysprosium pour les différentes étapes décrites ci-dessus sont présentées sur la figure 7.7. Les résultats complets du traçage figurent dans l'annexe 22.

7.2.2. Interrogations sur le(s) chemin(s) emprunté(s) par les traceurs

Parmi les trois traceurs utilisés, le dysprosium est le traceur qui s'adsorbe le moins. Il est donc détecté le plus longtemps en dehors du puits d'injection. C'est pourquoi ce lanthanide est choisi préférentiellement aux deux autres pour étudier les circulations d'eau dans les alluvions. Les courbes de restitution du dysprosium ont été tracées sur les figures 7.8a et 7.8b, pour les piézomètres où l'on observe une évolution des teneurs au cours du temps, c'est-à-dire les piézomètres F, J, K, L et Z30.

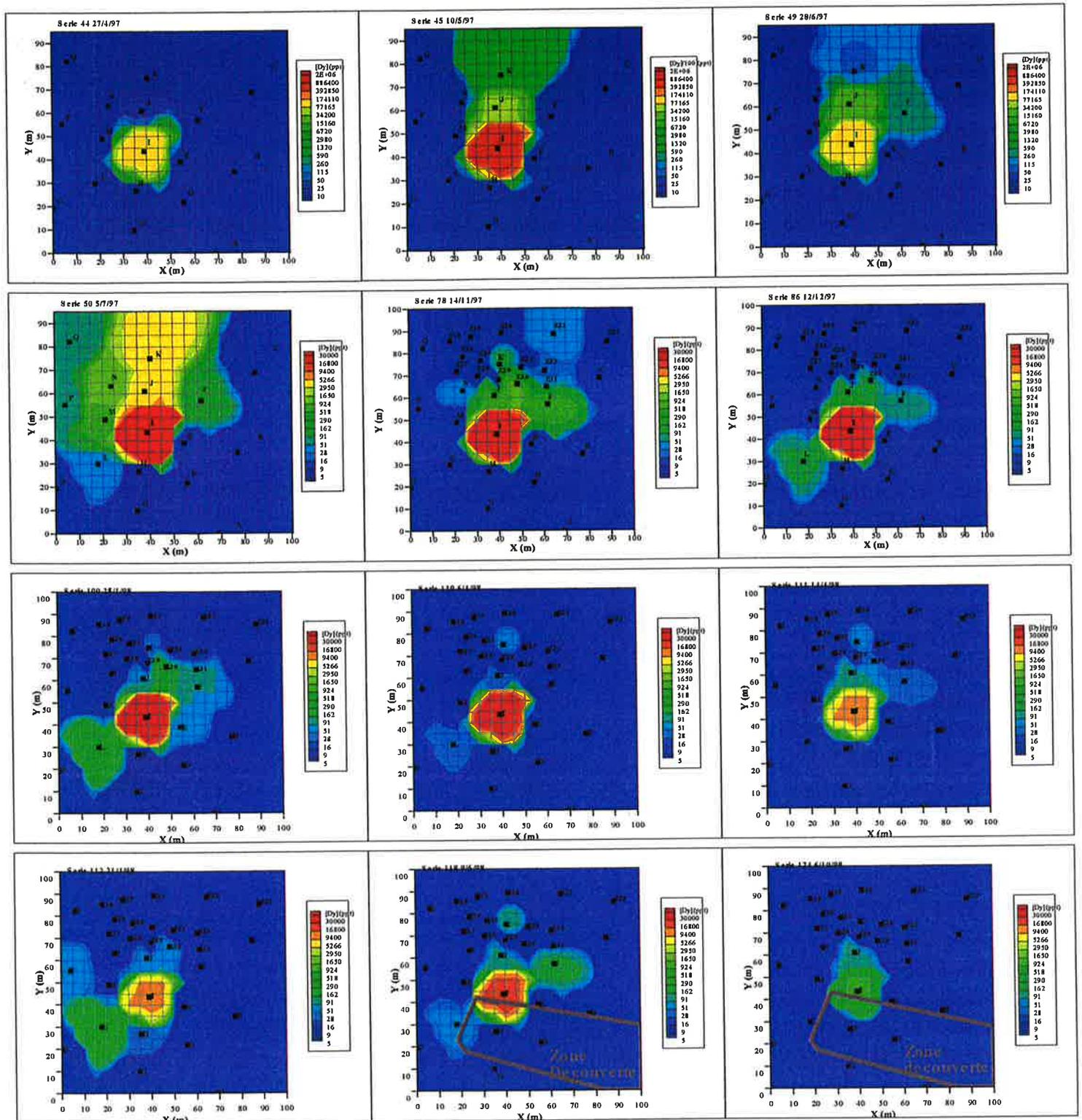


Figure 7.7 : Evolution de la distribution des teneurs en dysprosium dans la nappe alluviale au cours du temps lors du traçage réalisé le 17/3/97 dans le piézomètre I.

Les teneurs en lanthane et samarium sont passées rapidement en dessous du seuil de détection de l'analyse par ICP-MS dans l'ensemble du réseau sauf en I. C'est pourquoi seules les teneurs en dysprosium, suivies pendant 1 an et demi sur l'ensemble du réseau, sont représentées sur ces cartes. Les concentrations sont interpolées par la méthode « inverse de la distance » (Cf. annexe 20) à l'aide du logiciel Tecplot. Les couleurs représentant les gammes de concentration suivent une loi exponentielle. La légende correspondante change à partir de la carte du 5/7/97.

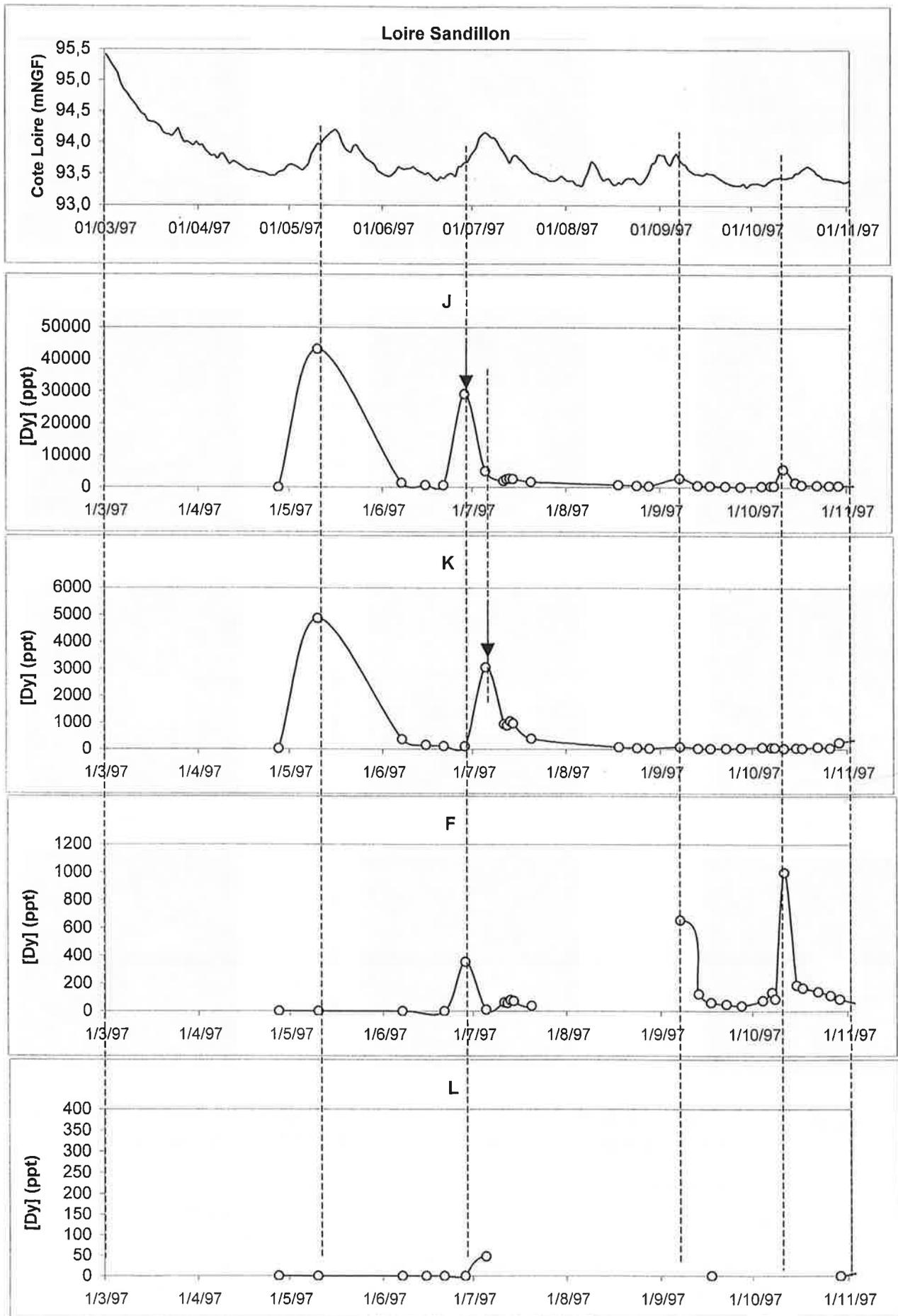


Figure 7.8a : Courbes de restitution du dysprosium, lors du traçage du 17/3/97, dans les piézomètres F, J, K, et L en relation avec les fluctuations de la cote de la Loire à Sandillon.

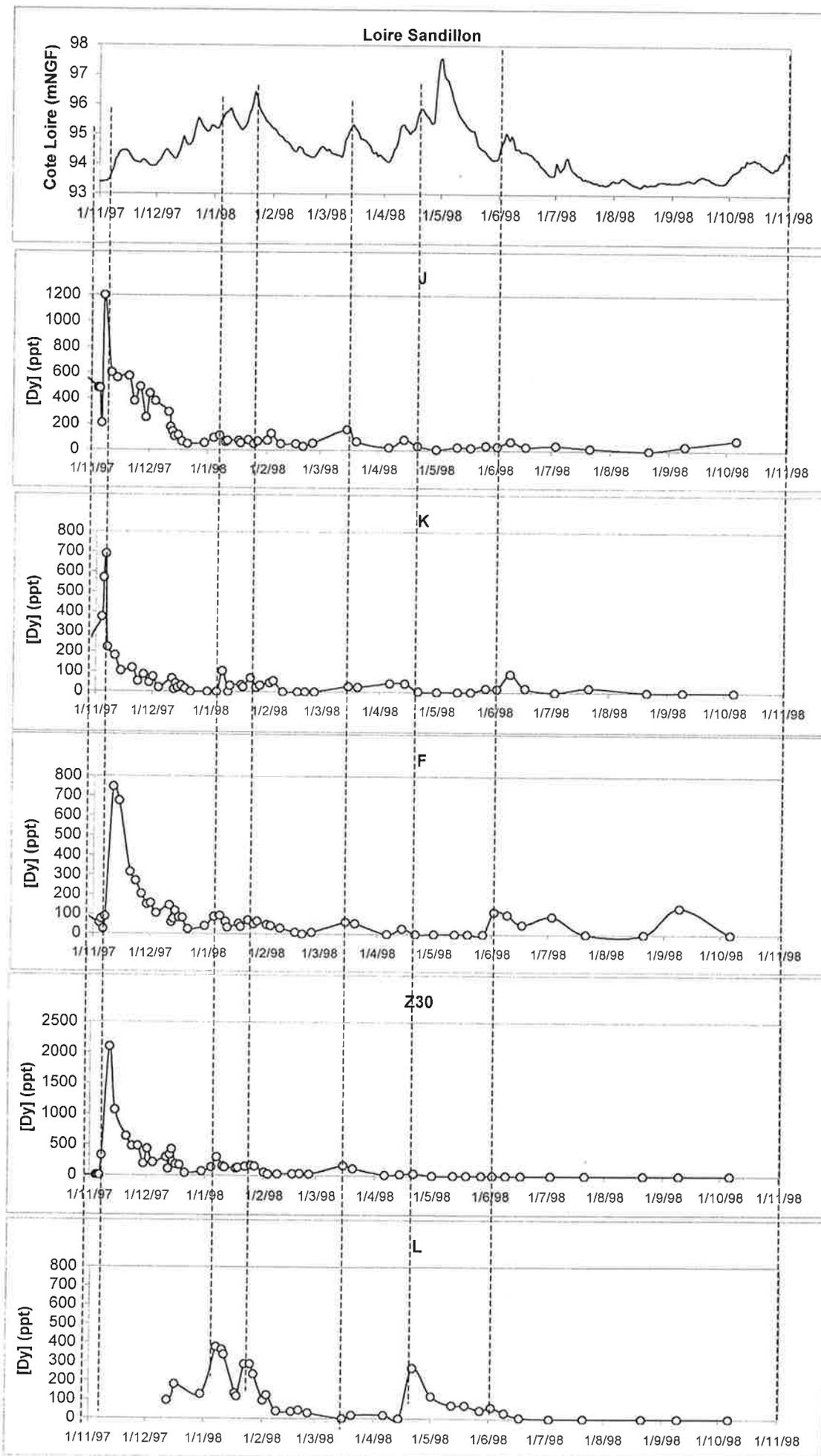


Figure 7.8a : Courbes de restitution du dysprosium, lors du traçage du 17/3/97, dans les piézomètres F, J, K, L et Z30 en relation avec les fluctuations de la cote de la Loire à Sandillon.

Les piézomètres M, N, P, Q, et H ont également « vu » du dysprosium mais ces passages ont été de très courte durée et à l'état de traces le plus souvent.

Il faut remarquer que les traceurs ont été observés dans le piézomètre K qui s'était distingué des autres piézomètres par sa perméabilité plus importante et par ses variations temporelles importantes en éléments majeurs, indiquant des circulations d'espèces chimiques, probablement en provenance des piézomètres voisins chargés en éléments majeurs comme I, J et N.

Le premier passage de traceurs a eu lieu alors que le pas de prélèvement était passé à 2 semaines. C'est pourquoi l'on ne dispose pas d'une courbe de restitution mais seulement d'un prélèvement à forte concentration, le 10/5/97, puis de quelques prélèvements dans la fin de la restitution. Lors du deuxième passage de traceurs, le 28/6/97, le pas de prélèvement est plus serré et permet donc de calculer une vitesse de déplacement des traceurs. Si l'on considère, comme le montrent l'alignement I, J, K et les concentrations en dysprosium mesurées dans les puits J et K, que le traceur observé en K le 5/7/97 provient du piézomètre J (figure 7.8a), on obtient une vitesse de déplacement des traceurs d'au moins 2 mètres/jour pendant ce deuxième passage. Cette valeur est inférieure aux vitesses maximales mesurées par Bigot (1977) lors de traçages réalisés à Darvoy: 7 m/h. La vitesse est la même pour les trois lanthanides (figure 7.9). Cette vitesse élevée ne s'explique pas par la loi de Darcy $V=K\text{grad}z$. Puisque les valeurs maximales obtenues sur le réseau piézométrique alluvionnaire pour la perméabilité K et le gradient hydraulique $\text{grad}z$ sont respectivement $8,8 \cdot 10^{-4}$ m/s et $2 \cdot 10^{-3}$, ce qui donne une vitesse de Darcy égale à $1,8 \cdot 10^{-6}$ m/s, soit 15 cm/jour. Avec une telle vitesse, il faudrait plus de 3 mois aux traceurs pour atteindre le piézomètre J à partir du puits d'injection.

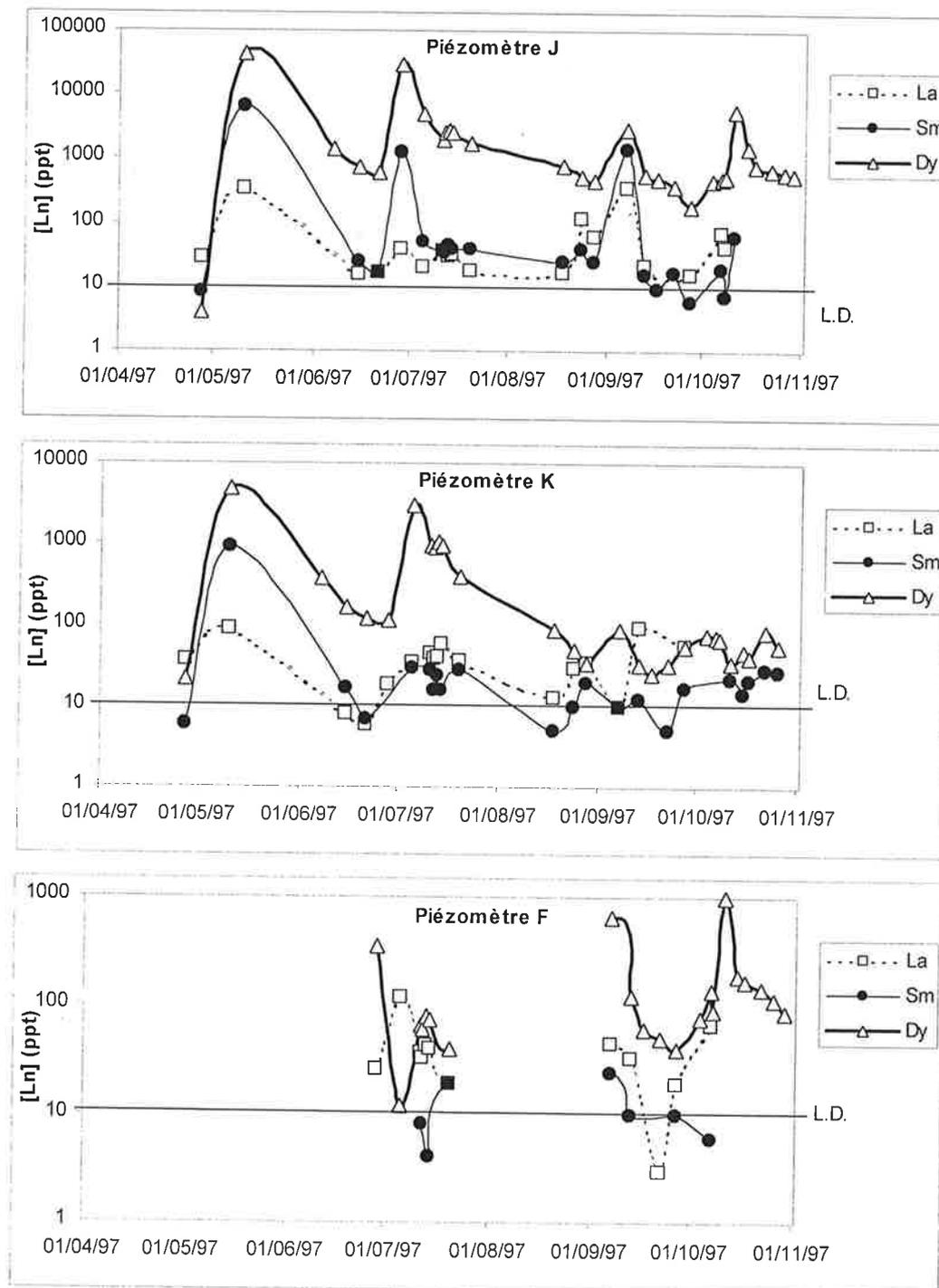


Figure 7.9 : Courbes de restitution, dans les piézomètres J, K et F, des trois lanthanides injectés en I le 17/3/97.

Le lanthane, le samarium et le dysprosium ont été injectés dans la nappe en quantités identiques (100 g de chaque). Cependant, un ordre de grandeur sépare les teneurs observées lors du premier pic de restitution. Les teneurs en lanthane se confondent très rapidement avec le bruit de fond naturel (quelques ppt), suivies ensuite par le samarium. En dehors du puits d'injection où les teneurs dans les trois terres rares restent importantes, seul le dysprosium sera observé après novembre 1997 dans les autres piézomètres du réseau alluvionnaire.

Une tentative de modélisation simple de l'écoulement au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire a été réalisée à partir des données piézométriques de deux phases d'évolution de la nappe: une phase de descente (18/2/97), et une phase de remontée (20/4/97). Les situations piézométriques représentées sont caractéristiques de ces deux types de régimes. Elles ont été choisies également en raison des écarts de cotes importants entre les différents piézomètres. En reprenant le logiciel ASM (Aquifer Simulation Model) utilisé dans l'étude de l'impact piézométrique de la carrière faite par le BRGM, le réseau piézométrique a été limité autour du puits d'injection, à un rectangle de 55 mètres de large et de 75 mètres de long. Le réseau est découpé en 11×15 mailles carrées de 5 mètres de côté. La nappe est assimilée à un milieu homogène et isotrope de perméabilité $8,8 \cdot 10^{-4}$ m/s, c'est à dire la perméabilité la plus élevée mesurée sur le terrain (au niveau du piézomètre K). Les limites du terrain sont à potentiel fixé par les mesures piézométriques (tableau 7.3). Pour l'étude du transport, ASM utilise une méthode de déplacement de particules. Le nombre de particules a été fixé à 100, la masse injectée à 1 kg, les dispersivités longitudinales et axiales sont respectivement fixées à 1 m et 0,1 m ce qui est de l'ordre des valeurs généralement rencontrées dans les formations alluvionnaires (Courtois, 1999). La porosité est fixée à 10%. Le coefficient de diffusion moléculaire est fixé à $1 \cdot 10^{-9}$. Sur chacun des régimes considérés, le déplacement des particules a été calculé pour 8 jours, 16 jours et 32 jours (figure 7.10).

Les déplacements simulés ne correspondent ni aux vitesses de déplacement des traceurs observées ni aux directions d'écoulement suivies par les traceurs lors de la remontée de la nappe en mai 1997. Notons toutefois que ce modèle met en évidence les faibles distances parcourues par les traceurs, surtout en période de descente de la nappe, ainsi que les variations de direction d'écoulement entre les deux régimes qui contribuent à la dispersion des traceurs sur le terrain (macrodispersion).

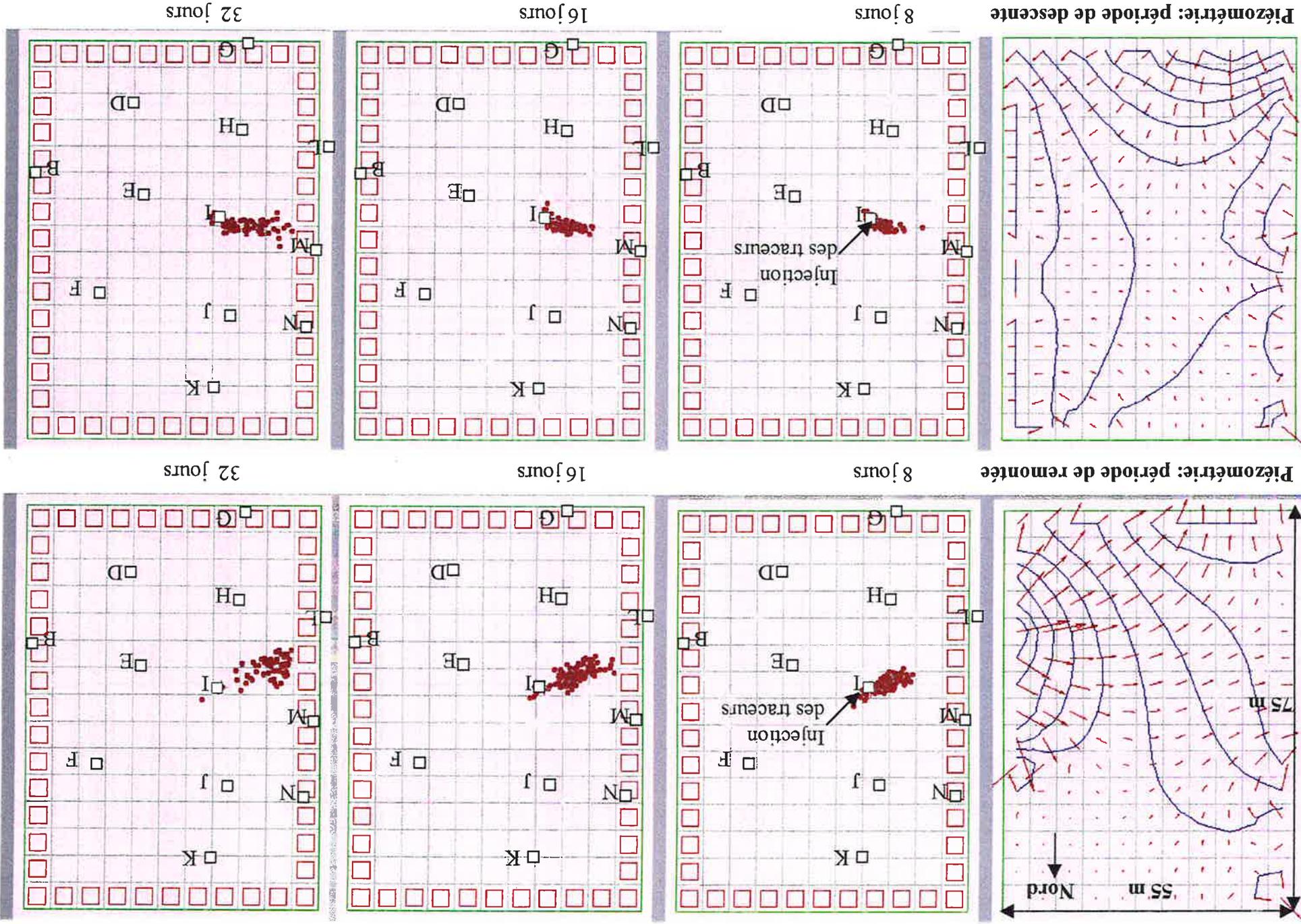


Figure 7.10 : Modélisation de la piézométrie de la nappe alluviale et du déplacement des traceurs injectés en I pendant la montée de la nappe (en haut) et la descente de la nappe (en bas) - Les isopièzes sont séparées de 0,5 cm.

Tableau 7.3: Cotes de la nappe (mNGF) imposées aux limites du modèle ASM en phases de montée et descente de la nappe.

Les cotes mesurées sont interpolées par la méthode "inverse de la distance".

Phase de montée de la nappe: 18/2/97 13h30

92,55	92,555	92,5575	92,5575	92,5575	92,5575	92,5575	92,5575	92,5575	92,5575	92,5575
92,555										92,5575
92,5575										92,5575
92,5575										92,5575
92,55										92,555
92,545										92,55
92,5425										92,57
92,5425										92,575
92,5425										92,575
92,5425										92,58
92,5425										92,58
92,5425										92,575
92,5425										92,57
92,54										92,56
92,5355	92,535	92,53	92,53	92,535	92,54	92,545	92,55	92,55	92,555	92,5575

Phase de descente de la nappe: 20/4/97 10h00

91,39	91,4025	91,4025	91,4025	91,4025	91,4025	91,4025	91,3975	91,39	91,385	91,385
91,4										91,385
91,405										91,385
91,4075										91,385
91,4075										91,385
91,4025										91,39
91,3925										91,39
91,385										91,385
91,3875										91,385
91,39										91,385
91,3925										91,385
91,3925										91,385
91,3975										91,385
91,41										91,39
91,42	91,425	91,43	91,425	91,4225	91,415	91,41	91,4075	91,405	91,4	91,395

Ce modèle simple rend également compte du passage des traceurs dans le piézomètre L en période de remontée de la Loire, en décembre 1997 (figure 7.8b). Mais comment expliquer d'une part le passage des traceurs dans les piézomètres J et K situés au nord du réseau et, d'autre part, les vitesses d'écoulement mesurées lors de la remontée de la Loire début juillet 97?

Il est possible d'expliquer les vitesses importantes observées de plusieurs manières :

-Il existe des chenaux de perméabilité supérieure à la perméabilité maximale mesurée par «Slug tests».

-Il existe des gradients hydrauliques locaux plus importants que 2.10^{-3} . La maille du réseau piézométrique est trop grande pour permettre d'identifier ces gradients ou bien ces gradients sont de trop courtes durées pour être observables.

-Les traceurs ont pu passer par le calcaire sous-jacent aux alluvions, et de perméabilité supérieure.

7.2.2.1. Existence de chenaux de forte perméabilité

Considérons premièrement l'éventualité d'un déplacement par des alluvions en supposant que les perméabilités que nous avons mesurées sont inférieures à celles que l'on peut trouver dans des chenaux alluvionnaires très perméables. Cette hypothèse est tout à fait justifiée puisque les perméabilités mesurées par "slug tests" sont des moyennes sur toute la hauteur saturée. Par ailleurs, Zunino (1979) fournit comme valeur maximale de transmissivité de la nappe alluviale dans le Val d'Orléans $T=3.10^{-2}$ m²/s, ce qui donne une perméabilité égale à 6.10^{-3} m/s au moment de l'expérience où l'épaisseur de la nappe est d'environ 5 mètres. Le déplacement implique d'être rapide et engendré par la remontée de la Loire puisque l'on n'obtient pas une courbe de restitution étalée mais bel et bien une impulsion rapide au moment

de la remontée de la Loire. En prenant le gradient maximal ($2 \cdot 10^{-3}$) mesuré dans la nappe alluviale au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire implanté en 1997, on obtient une vitesse de Darcy égale à 1 m/jour. Cette vitesse est de l'ordre de celle que l'on observe entre J et K : 2 m/j.

7.2.2.2. Existence de gradients hydrauliques importants et momentanés

Supposons maintenant qu'il existe des gradients hydrauliques importants qui ont échappé à notre observation. En reprenant la valeur de perméabilité maximale mesurée dans les alluvions sur le réseau piézométrique alluvionnaire, $K=8,8 \cdot 10^{-4}$ m/s, il faut un gradient hydraulique de $2,6 \cdot 10^{-2}$ pour obtenir la vitesse mesurée entre J et K : 2 mètres/jour. Un tel gradient a échappé à notre observation au niveau du site expérimental alluvionnaire. Cependant, de tels gradients se produisent au moment de fortes remontées de la Loire. Ainsi, le 17 mars 2001, pendant la récente période de crue de la Loire, la nappe était plus haute de 18 cm au niveau du piézomètre X qu'au niveau du piézomètre Z, distants seulement de 17 mètres impliquant un gradient hydraulique local de $1 \cdot 10^{-2}$ (figure 7.11). La différence piézométrique, le même jour, entre X et Y distants de 7 mètres était de 7 cm, ce qui implique un gradient constant sur l'axe X, Y, Z. Dans ces conditions, les vitesses de Darcy obtenues pour la perméabilité maximale mesurée sur le terrain et la valeur maximale donnée par Zunino (1979) sont respectivement égales à 0,76 m/j et 5,2 m/j. Il est donc tout à fait possible, en période de remontée rapide de la Loire, d'obtenir, à proximité d'un axe karstique (rappelons que X se trouve à 1 mètre de CA2 et que CA2 se situe à proximité d'un axe de circulation karstique – chapitres 6 et 8) des gradients hydrauliques locaux suffisamment importants pour déplacer rapidement des traceurs. Ces gradients hydrauliques très élevés et temporaires, appliqués à des zones très hétérogènes et donc à des perméabilités contrastées induisent obligatoirement des chenaux privilégiés d'écoulement.

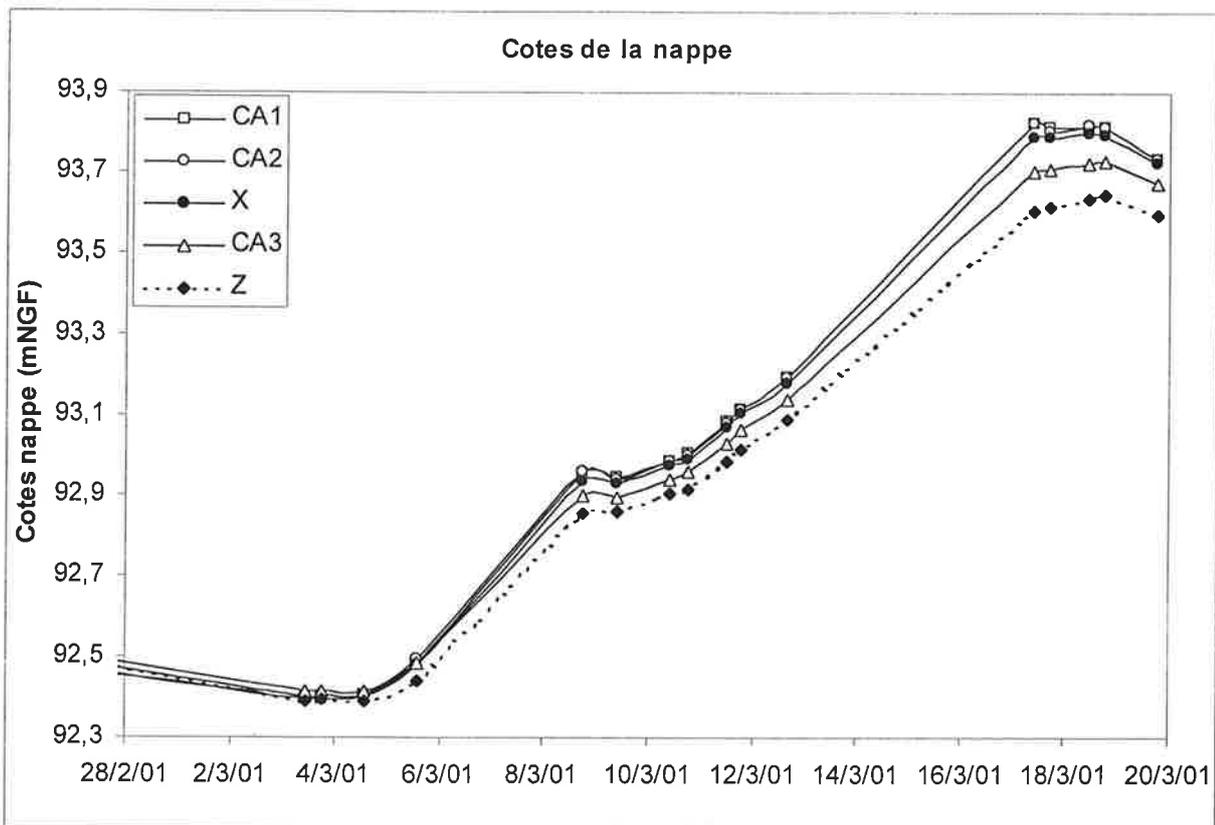
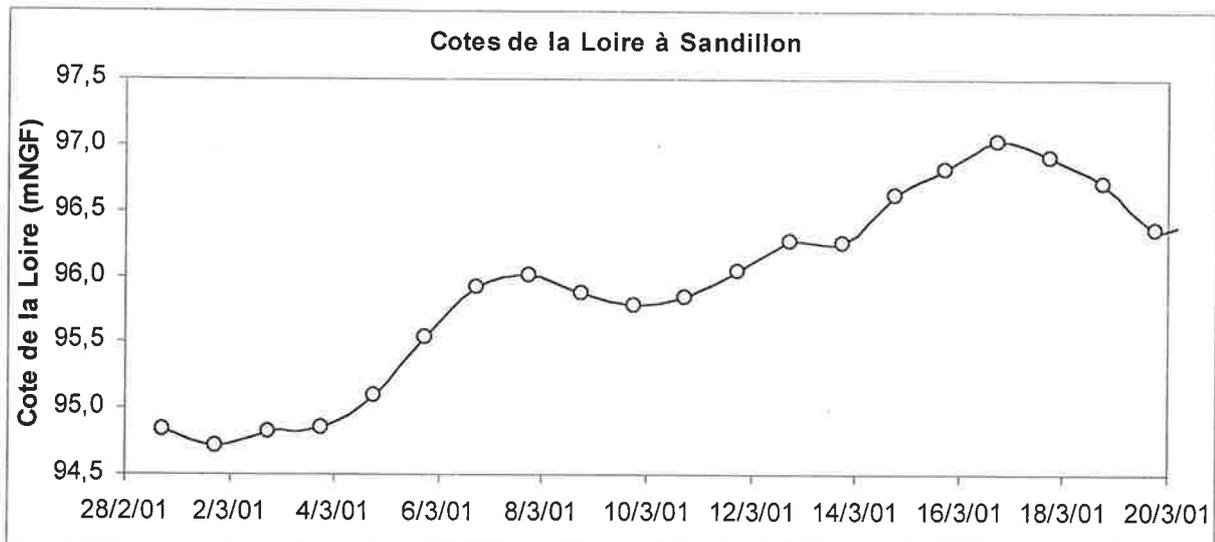


Figure 7.11: Evolution des cotes de la Loire et de la nappe entre la fin d'une période de descente et la fin d'une période de crue de la Loire (2m50 en 15 jours – 28/2-20/3/01). Les cotes de la nappe sont mesurées au niveau des piézomètres calcaires CA1, CA2, CA3 et alluvionnaires X et Z. Après une phase de descente de la Loire, la nappe est quasi plane. Lorsque la Loire remonte, les remontées de nappe les plus rapides sont observées en CA1 qui se situe sur un axe de circulation karstique (mis en évidence par l'étude des profils verticaux de température puis confirmé par traçage), en CA2 et X également voisins d'un axe de circulation karstique. Le piézomètre Z, quant à lui, réagit beaucoup moins vite à la remontée de la Loire. Cela entraîne l'établissement de gradients de charges élevés localement comparés à la période de descente. Par exemple, alors que la différence de cote observée entre X et Z est de l'ordre du cm fin février, l'écart passe à 18 cm au sommet de la crue sur une distance de 17 mètres seulement.

La figure 7.12 illustre, à l'aide du même modèle ASM que précédemment, l'écoulement obtenu au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire dans le cas d'une perméabilité égale à $8,8 \cdot 10^{-4}$ m/s et un gradient hydraulique Sud-Nord constant sur tout le réseau piézométrique alluvionnaire. La position d'un axe kastique Est-Ouest au Sud du réseau se justifie par les observations piézométriques à l'échelle de la carrière (chapitre 6) et la mise en évidence, par traçage d'un axe passant par le piézomètre CA1 (chapitre 8).

7.2.2.3. Passage des traceurs par le calcaire

Enfin, supposons que les traceurs passent par le calcaire sous-jacent. La densité de la solution de traceurs injectée dans le puits I est $d=1,084$. On peut donc envisager que la solution de traceurs descende au fond du piézomètre par gravité, permettant le passage des traceurs par le calcaire sous-jacent. Si l'on considère les transmissivités de la nappe calcaire obtenues par interprétation des courbes de rabattement de la nappe lié au pompage de la carrière (chapitre 6), on obtient une perméabilité de l'ordre de $5 \cdot 10^{-2}$ m/s pour la nappe calcaire. En période d'étiage, on a vu, au chapitre 6 (§6.3.1.3), que le gradient hydraulique de la nappe du calcaire est en moyenne $0,2 \cdot 10^{-3}$. En utilisant la loi de Darcy, on obtient alors des vitesses de déplacement de l'ordre 0,9 mètres par jour. La distance entre I et K étant de 32 mètres, il faut 36 jours aux traceurs pour atteindre K. Les traceurs peuvent donc atteindre les piézomètres J et K, à partir de I, avant la remontée de la nappe début mai 97. Si l'on considère maintenant le gradient maximum rencontré dans la nappe du calcaire, entre le piézomètre CA2 et CA3, en période de crue ($1,6 \cdot 10^{-3}$), la vitesse de déplacement de l'eau dans le calcaire passe à 4 mètres par jour, ce qui est cohérent avec les vitesses de déplacement des traceurs observées entre J et K lors de la deuxième remontée de la nappe, en juillet 1997.

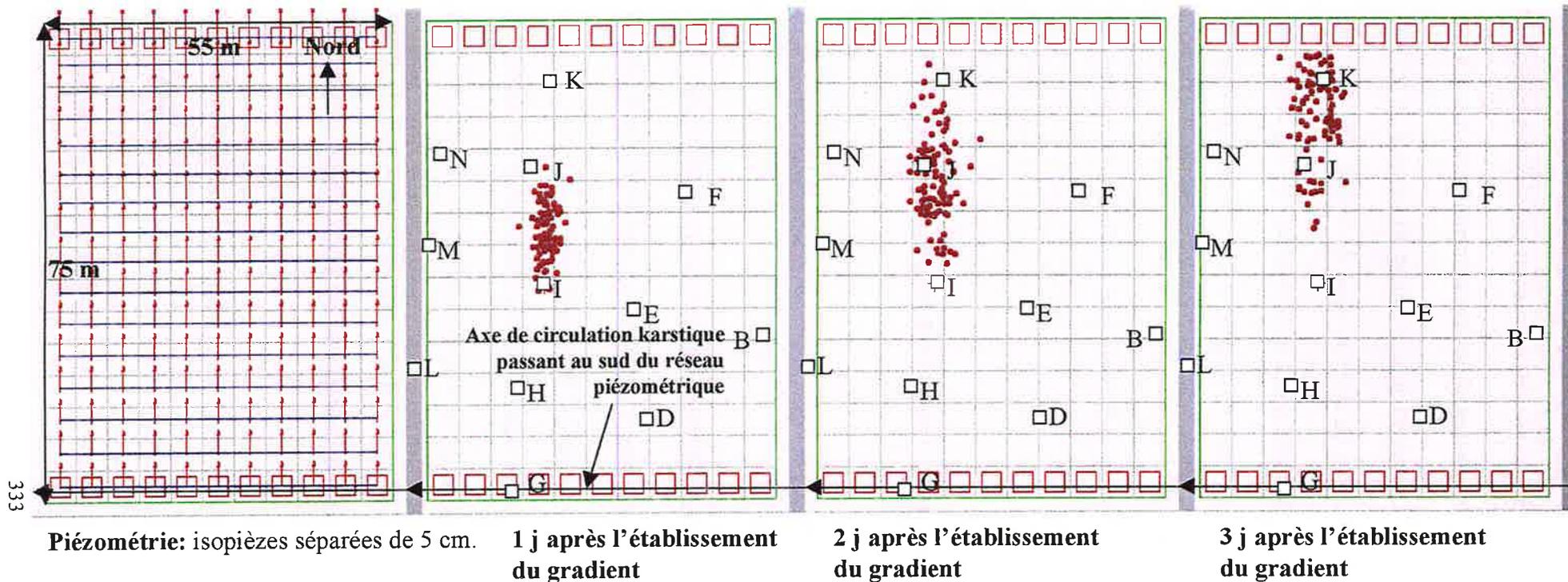


Figure 7.12: Application d'un gradient hydraulique local, imposé sur la nappe alluviale par un axe de circulation karstique, aux migrations des traceurs injectés en I avec les mêmes constantes hydrodynamiques (perméabilité, porosité, dispersivité) que sur la figure 7.10.

La localisation d'un axe de circulation karstique Est-Ouest au sud du réseau alluvionnaire pourrait expliquer les déplacements (direction et vitesse) de traceurs observés. En période de descente de la nappe, la nappe est relativement plane, ce qui n'entraîne pas de déplacements horizontaux importants. On suppose que les traceurs restent en I. En période de remontée de la Loire, la transmission des charges plus rapide au niveau des chenaux karstiques qu'à travers les alluvions, entraîne des différences de charges suffisantes pour déplacer rapidement les traceurs de I vers J et K où ils ont été observés. Ce modèle ne rend pas totalement compte des observations de terrain puisque les teneurs maximales en traceurs se situent au niveau du puits d'injection pendant toute la durée de l'expérience de traçage. L'écoulement modélisé représente plutôt une fuite de traceurs à partir du puits d'injection.

Il se peut donc qu'une partie des traceurs injectés en I puisse migrer par le calcaire sous-jacent pour remonter, lors des crues de la Loire par des ouvertures privilégiées situées à la base des alluvions et conduisant vers les piézomètres où les traceurs sont détectés. Il faut toutefois signaler que les traceurs n'ont pas été observés dans la nappe du calcaire au niveau des piézomètres calcaires Z32, Z34 et Z35 localisés en bordure nord du réseau. De plus, les pics de concentrations en traceurs sont observés au tout début de la remontée de la Loire - cela est évident pour la deuxième impulsion début juillet 97 (figure 7.8a). Le passage dans le calcaire puis la remontée dans la nappe alluviale implique des mouvements verticaux de la nappe de plus grande amplitude étant donné que les préleveurs sont localisés à mi hauteur de la colonne d'eau moyenne.

En conclusion, la restitution brutale des traceurs à l'issue d'une longue période au cours de laquelle rien n'a été observé implique:

- une brutale augmentation du gradient hydraulique en relation avec la remontée de la Loire, comme cela a été observé,
- le passage par un chenal de faible perméabilité dans le calcaire ou les alluvions,
- une durée d'interaction suffisante entre les traceurs et les sédiments (calcaire ou alluvions) pour retenir préférentiellement le lanthane et le samarium (figure 7.9).

Tout se passe comme si les traceurs étaient retenus dans le voisinage du piézomètre I, tant qu'est maintenu le gradient hydraulique régional moyen, puis lors d'une remontée brutale de la Loire, les forts gradients hydrauliques induits provoquent un déplacement d'une partie des traceurs très probablement par des chenaux alluvionnaires de perméabilité élevée mais peut-être aussi par le calcaire sous-jacent.

Etant donnée la faible probabilité, d'après les sondages réalisés dans la zone étudiée (chapitre 2), de rencontrer au niveau du réseau alluvionnaire une limite imperméable entre

alluvions et calcaire, on peut intégrer le calcaire dans la description hétérogène de la nappe, le contraste n'intervenant qu'entre les axes de circulation karstique et le reste de la nappe.

7.2.3. Adsorption d'une partie des traceurs dans le puits d'injection

Sur l'ensemble du réseau piézométrique d'observation, les maxima des concentrations en traceurs sont toujours observés dans le piézomètre d'injection. Cela est cohérent avec les analyses d'éléments majeurs qui montrent également des teneurs très importantes et peu variables au cours du temps, au niveau du piézomètre I. Ces résultats révèlent l'absence de circulations alluviales constantes et importantes au niveau de ce piézomètre.

Les teneurs en traceurs en solution ainsi que dans les sédiments du puits d'injection ont été suivies au cours du temps (figure 7.13). On ne dispose pas d'un grand nombre d'analyses pour les sédiments du puits d'injection mais elles sont suffisamment étalées dans le temps pour pouvoir suivre l'évolution, au cours du temps, des quantités de traceurs adsorbés sur les sédiments du piézomètre I.

Les teneurs en traceurs adsorbés sur les alluvions ont été mesurées par activation neutronique dans les boues décantées au fond du piézomètre d'injection. La normalisation des teneurs au Thorium permet de s'affranchir des effets de dilution liés à la présence de grains de sable siliceux dans les boues (Cf. Chapitre 5). Les teneurs en terres rares des sédiments non contaminés en traceurs sont donc proportionnelles aux teneurs en thorium. La figure 7.14 montre que les sédiments prélevés dans le puits d'injection présentent une forte anomalie en lanthane, samarium et dysprosium liée à l'adsorption de ces lanthanides sur les sédiments du puits d'injection. Les boues prélevées dans les autres piézomètres, y compris ceux ayant vu du traceur, ne présentent pas d'anomalie.

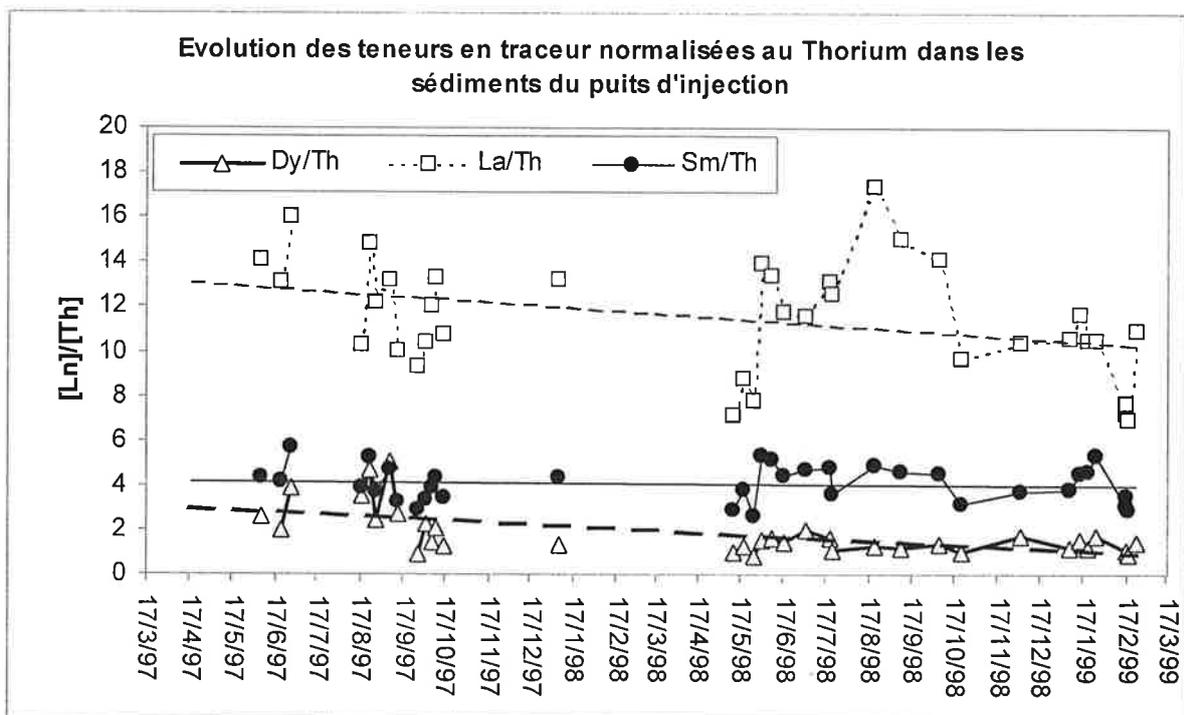
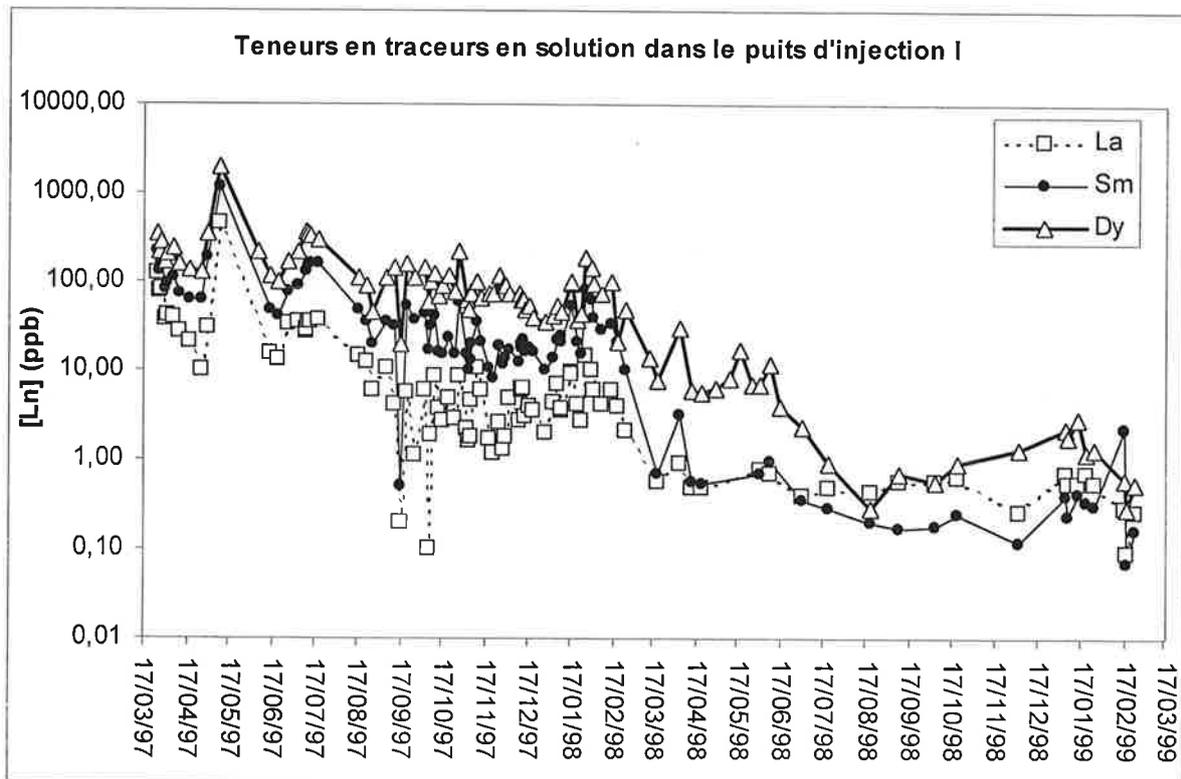


Figure 7.13 : Evolution au cours du temps des teneurs en traceurs (La, Sm, Dy) dans les eaux (graphique du haut) et les sédiments (graphique du bas) du puits d'injection I.

Alors que les trois traceurs ont des teneurs qui diminuent considérablement en solution entre le moment de l'injection, le 17/3/97, et le dernier prélèvement, le 24/2/99, les teneurs sur les sédiments, normalisées au thorium, ne varient pas du tout dans les mêmes proportions. Les courbes de tendance représentées sur la figure du bas, indiquent une légère baisse au cours du temps mais les points sont trop dispersés autour de ces droites pour considérer cette baisse comme significative. Les terres rares adsorbées dans le puits d'injection sont donc retenues de manière irréversible dans les conditions de l'expérience. La rétention des traceurs observée sur les sédiments s'effectue plus fortement pour les terres rares légères que pour les terres rares lourdes. En solution, l'ordre est inversé, puisque l'ordre des concentrations mesurées est $Dy > Sm > La$.

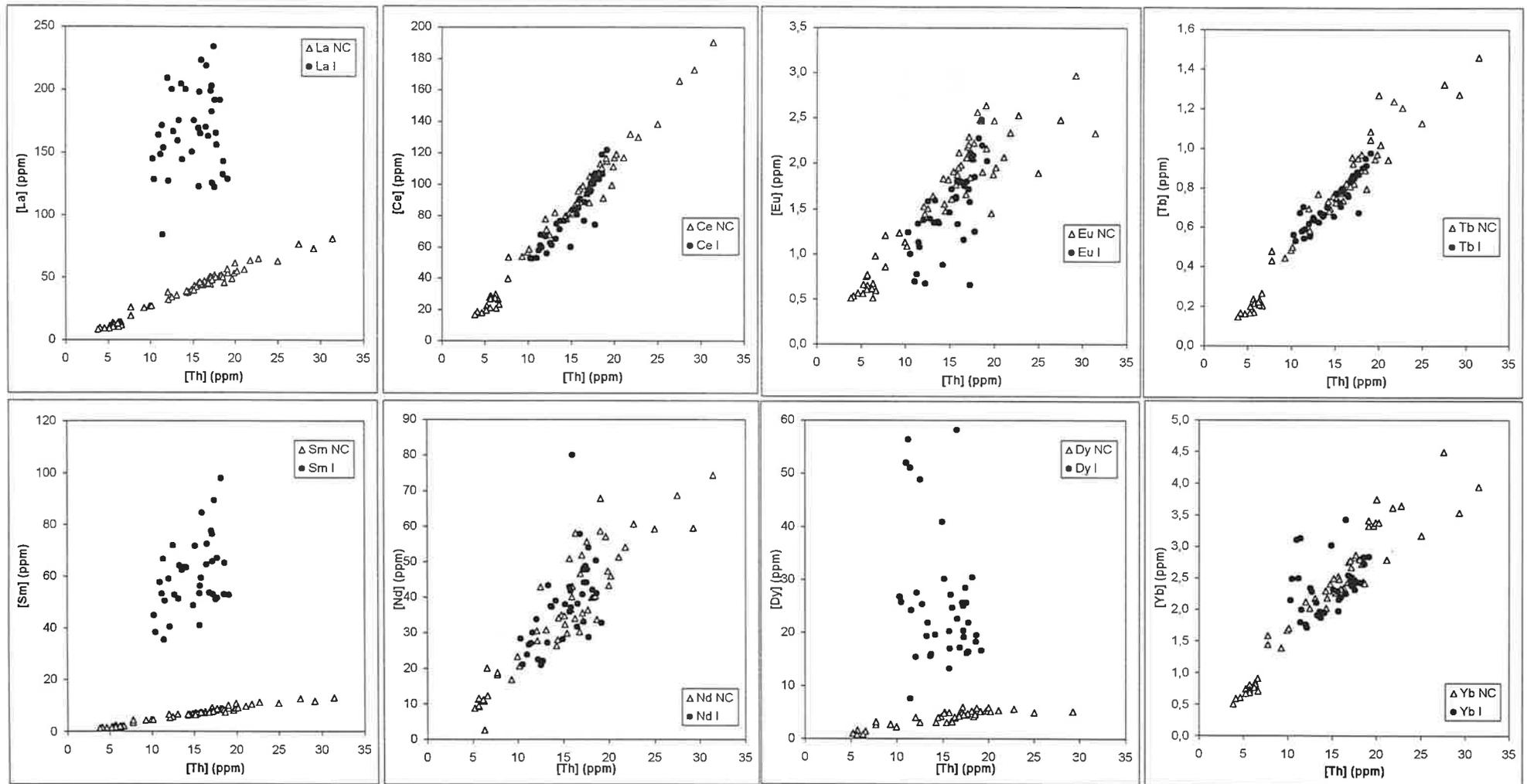


Figure 7.14 : Diagrammes Thorium-Lanthanides pour les sédiments prélevés dans le puits d'injection (I) et pour les sédiments non contaminés (NC) par la présence de traceurs.

Les sédiments non contaminés sont constitués de boues argilo-sablonneuses prélevées au fond des forages du réseau piézométrique alluvionnaire, de tout-venant et d'argile prélevés dans les alluvions de la carrière. Dans les sédiments non contaminés par les traceurs (La, Sm, Dy), les teneurs en lanthanides sont quasiment proportionnelles aux teneurs en thorium. Les variations observées sont liées à la dilution par les grains de silice: les teneurs en thorium varient de 3,8 ppm, pour un échantillon de sable lavé, à 31,4 ppm pour un échantillon de tout-venant fin (<125 μm). Les anomalies en lanthane, samarium et dysprosium se voient nettement sur les sédiments prélevés dans le puits d'injection.

La figure 7.15 montre que, sur les sédiments du puits d'injection, l'excès dû à l'adsorption des lanthanides injectés, par rapport aux lanthanides naturels, est plus important pour le lanthane que pour le samarium, l'excès en samarium étant lui-même supérieur à celui en dysprosium. L'adsorption suit donc l'ordre $La > Sm > Dy$. Cet ordre est conforme à l'ordre de stabilité des complexes EDTA (chapitre 4). Les teneurs en solution suivent l'ordre inverse, ce qui est tout à fait cohérent.

Les teneurs élevées en traceurs dans les sédiments du puits d'injection nous amènent à la réflexion suivante. Imaginons qu'après l'injection, les traceurs se répartissent dans une couche d'un mètre d'épaisseur autour du puits d'injection de manière homogène et isotrope (figure 7.16). En supposant que la totalité des traceurs injectés s'adsorbent de façon irréversible dans les mêmes proportions que dans le puits d'injection, on peut calculer le volume occupé par chaque lanthanide. Dans notre modèle, on considère que tous les traceurs se sont adsorbés de façon homogène dans un cylindre d'alluvions ayant pour axe le piézomètre I, de hauteur égale à 1 m, et de rayon variable en fonction du lanthanide. Ces cylindres emboîtés contiennent 100 g de chaque lanthanide injecté et les concentrations sont constantes dans tout le cylindre. La quantité d'argile dans les boues du puits d'injection étant certainement supérieure à celle des alluvions moyennes, on utilise le thorium comme élément permettant de recalculer les teneurs en traceurs à la composition moyenne du « tout venant ». La concentration en Thorium considérée est celle du « tout venant » moyen soit $[Th]_{TV}=7,5$ ppm.

Les teneurs naturelles du tout venant en La, Sm et Dy sont :

$$[La]_{TV}=15 \text{ ppm} \qquad [Sm]_{TV}=3 \text{ ppm} \qquad [Dy]_{TV}=2 \text{ ppm.}$$

Les rapports mesurés dans le puits d'injection I sont :

$$([La]/[Th])_I=12 \qquad ([Sm]/[Th])_I=4,1 \qquad ([Dy]/[Th])_I=1,95$$

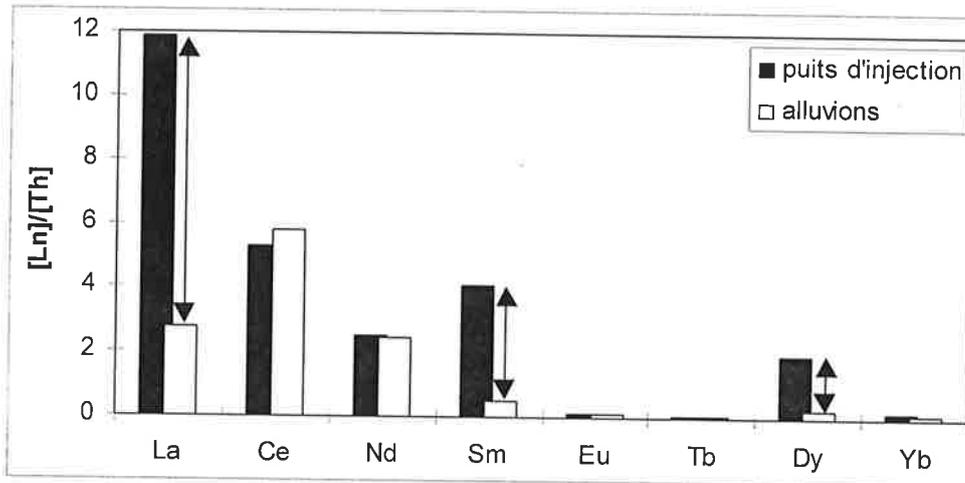


Figure 7.15 : Teneurs en terres rares normalisées au thorium, dans les sédiments du puits d'injection et dans les sédiments des autres piézomètres.

Cette figure ne présente pas tout le spectre des lanthanides mais seulement ceux qui sont analysés par activation neutronique. Les teneurs reportées pour le puits d'injection et les alluvions sont les teneurs moyennes. Les flèches mettent en évidence l'excès en La, Sm et Dy observable sur les sédiments du puits d'injection par rapport au reste des alluvions.

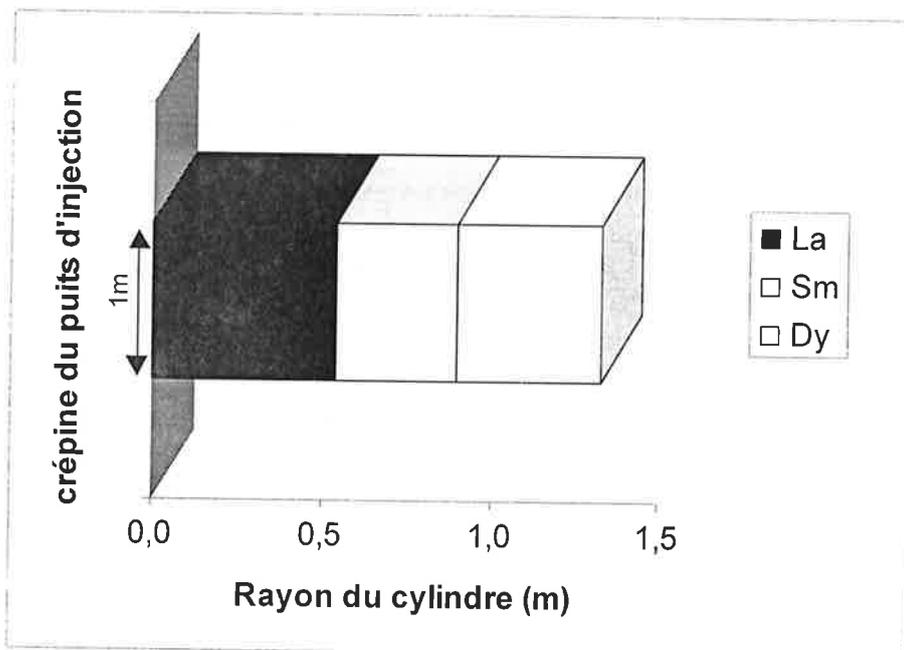


Figure 7.16: Volume occupé par la totalité des traceurs injectés dans un cylindre d'un mètre de hauteur centré sur le piézomètre d'injection.

On se place dans la situation où les alluvions ont une teneur moyenne en argile, celle du "tout venant", et dans le cas où l'adsorption des traceurs s'effectue dans les mêmes proportions que dans le puits d'injection. La quantité de traceurs adsorbé est proportionnelle à la quantité d'argile du tout venant indiquée par sa teneur en thorium. On observe que les rayons contaminés, autour du puits d'injection sont peu importants. Cela montre la forte capacité de rétention des argiles des alluvions de la Loire. Le volume occupé par les traceurs est d'autant plus petit que les lanthanides sont légers : $R_{La} < R_{Sm} < R_{Dy}$

On en déduit les concentrations en traceurs retenus sur les sédiments $[Ln]_{tr}$,

$$[Ln]_{tr} = ([Ln] / [Th])_I \times [Th]_{TV} - [Ln]_{TV}$$

Soient R_{Ln} les rayons des cylindres d'alluvions polluées, m_{Ln} la masse de traceur Ln injectée ($m_{Ln}=100$ g pour les trois lanthanides) et ρ la masse volumique¹ du terrain ($\rho=1,44$ kg/dm³).

$$\rho \times \pi \times R_{Ln}^2 = m_{Ln} / [Ln]_{tr}$$

On obtient: $R_{La}=0,54$ mètre ; $R_{Sm}=0,90$ mètre et $R_{Dy}=1,33$ mètres

Les fortes teneurs rencontrées dans les sédiments du puits d'injection et le calcul effectué ci-dessus laissent penser qu'une grande partie des traceurs s'est fixée autour du puits d'injection. Si des écoulements horizontaux importants et réguliers avaient lieu dans le puits d'injection, on n'observerait pas des teneurs aussi importantes en solution dans ce piézomètre jusqu'à la fin de l'expérience, c'est à dire pendant quasiment deux ans. La diminution des teneurs en solution dans le puits d'injection est liée à l'adsorption progressive des lanthanides injectés sur les alluvions, à des pertes de traceurs dans la nappe du calcaire sous-jacente et dans les alluvions et à une dilution par des apports d'eau nouvelle en période de remontée, dilution confirmée par la décroissance des rapports Na/K et Mg/K en période de remontée de la nappe ou bien au cours de la descente dans la colonne d'eau (figure 7.4).

¹ Méthode de calcul de la masse volumique du tout-venant : du tout venant prélevé dans la zone saturée, est comprimé manuellement dans un bécher de 500 ml rempli d'eau; l'eau contenue dans le volume interstitiel est évaporée par mise à l'étuve (90°C) pendant 24h00. L'échantillon de tout-venant est pesé (m), on en déduit la masse volumique $\rho(\text{kg/dm}^3)=m(\text{kg})/0,5$

7.2.4. Evolution du rapport Dy/Sm

Pour cette étude, on ne considère pas le lanthane dont les teneurs en solution sont le plus souvent au niveau du bruit de fond naturel. Les rapports Dy/Sm ne sont pas constants au cours du temps du fait des processus de fixation et de remobilisation variables selon les lanthanides.

L'évolution du rapport Dy/Sm dans le puits d'injection est présentée sur la figure 7.17. Les évolutions de ce même rapport dans les puits J et K sont présentés figure 7.18.

Au moment de l'injection, le rapport Dy/Sm est égal à 1. D'après les travaux des auteurs précédents (Bigot, 1977; Toulhoat, 1987; Chupeau, 1991), on s'attend à observer un accroissement de ce rapport au cours du temps du fait de la fixation préférentielle des lanthanides légers entraînant des déplacements de traceurs de plus en plus enrichis en lanthanides lourds. Or, ce rapport fluctue de manière importante à la fois dans le puits d'injection et dans les piézomètres J et K.

On observe que:

-dans le puits d'injection, le rapport Dy/Sm montre une tendance à la hausse qui traduit un enrichissement global de la solution en dysprosium,

-les fluctuations du rapport Dy/Sm ne sont pas corrélées à celles des cotes de la Loire (figure 7.17),

-dans les piézomètres J et K, les rapports Dy/Sm sont nettement plus élevés qu'en I (les maxima sont séparées d'un facteur 10) ce qui traduit un appauvrissement en lanthanides légers dans la solution de traceurs qui a migré vers ces deux piézomètres.

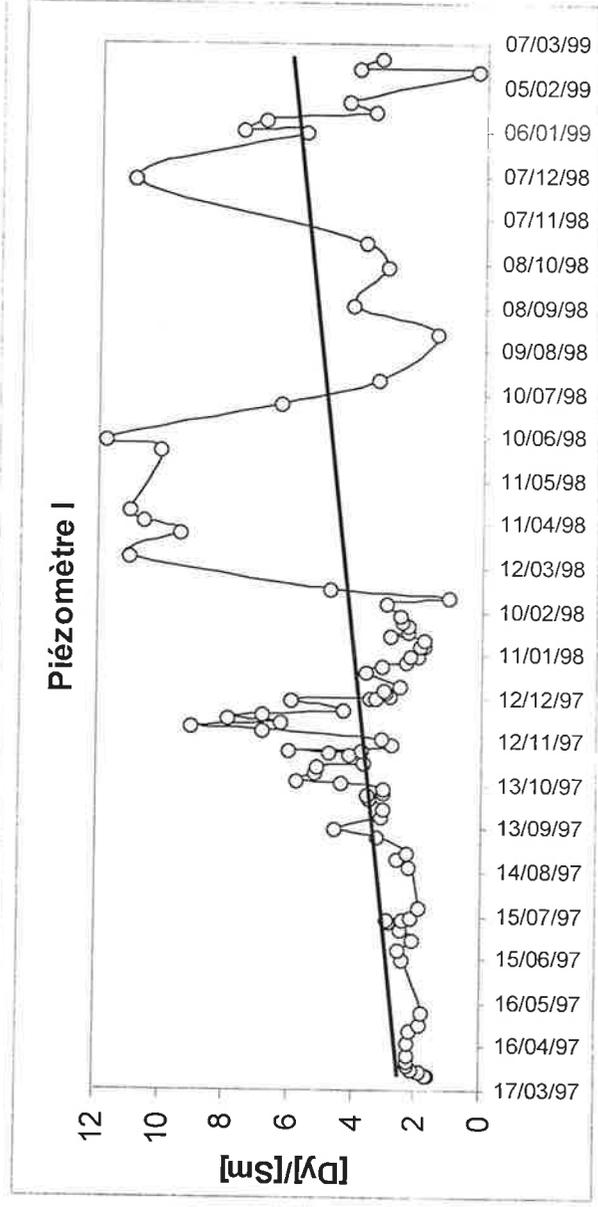
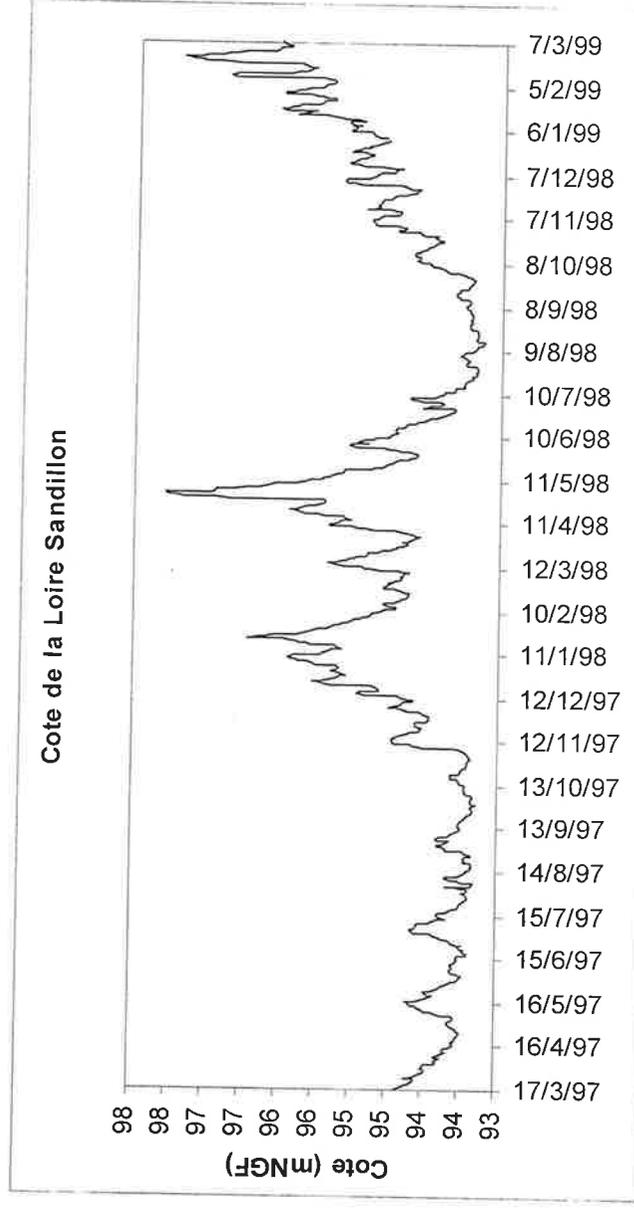


Figure 7.17: Evolution du rapport Dy/Sm dans le puits d'injection au cours du traçage dans la nappe alluviale.

La tendance générale d'évolution du rapport Dy/Sm est un accroissement au cours du temps qui s'explique par l'adsorption plus rapide du samarium que du dysprosium. Cependant, les grandes variations de ce rapport sont remarquables. Celles-ci ne sont pas corrélées aux battements de la Loire (graphique du haut) pendant la même période. Elles peuvent s'expliquer par l'alternance de phases statiques où les traceurs s'équilibrent avec les sédiments (Dy/Sm augmente), et de phases où Dy/Sm diminue ce qui ne s'explique que par la réversibilité de l'adsorption du samarium.

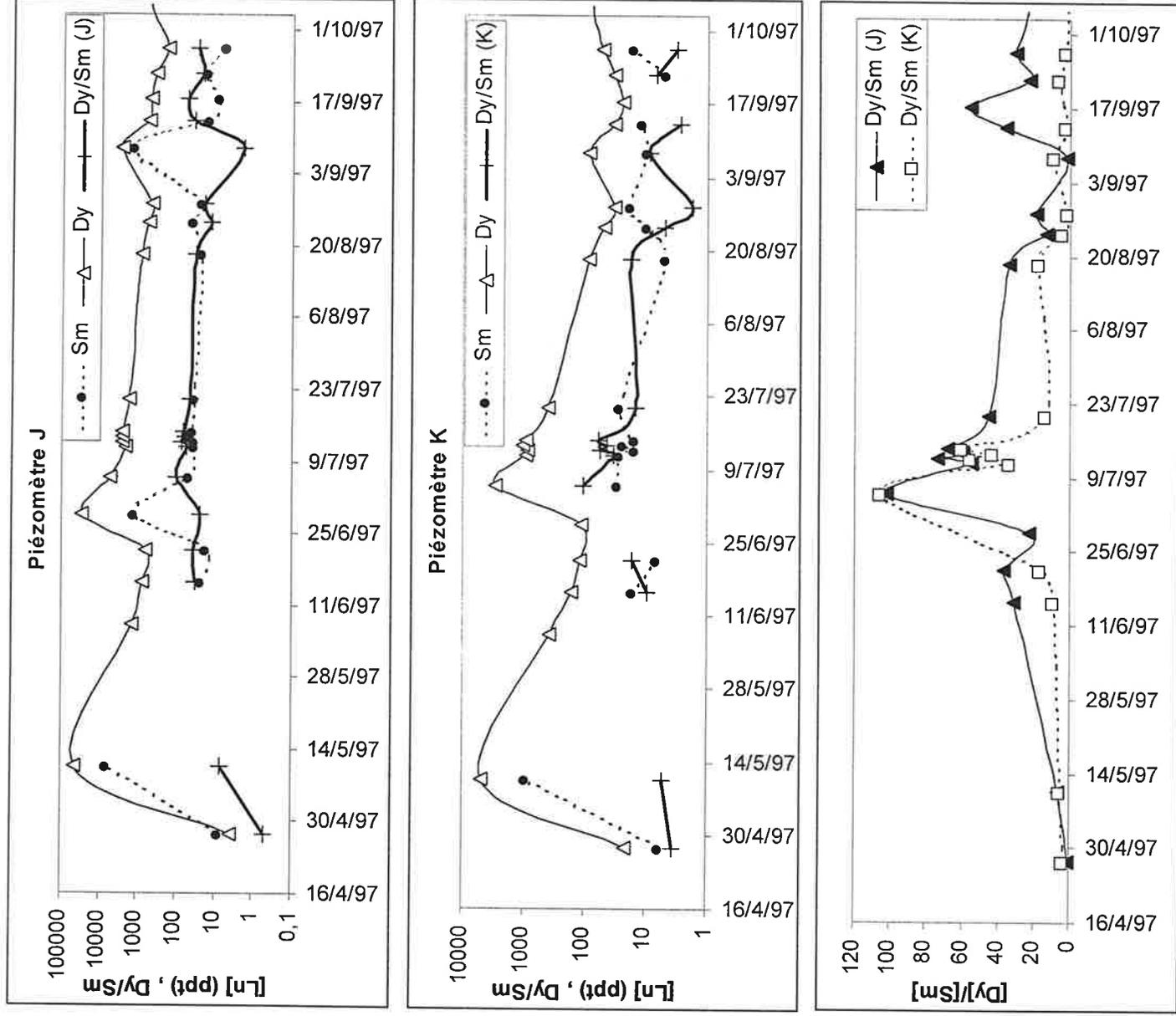


Figure 7.18 : Evolution du rapport $[Dy]/[Sm]$ dans les piézomètres J et K dans les 6 premiers mois du traçage dans la nappe alluviale. Le premier passage des traceurs, début mai 97, se caractérise par des rapports $[Dy]/[Sm]$ assez faibles (respectivement 6,9 et 5,3 pour J et K). Les rapports maximaux (J : 102, K : 106) sont atteints lors du deuxième passage des traceurs en J et K, le 5/7/97. Après ce passage, le rapport Dy/Sm redescend à des valeurs encore nettement supérieures aux rapports naturels ($[La]/[Sm]=0,5-1$). Le piézomètre J présente des rapports globalement supérieurs à ceux du piézomètre K.

L'augmentation des rapports Dy/Sm dans les différents piézomètres s'explique aisément par la fixation préférentielle du samarium ou l'apport d'une solution de traceurs enrichie en dysprosium. Au contraire, il est difficile d'expliquer l'augmentation de ces rapports autrement que par un processus réversible de fixation du samarium. Or, cela est en contradiction avec l'apparente irréversibilité de l'adsorption des traceurs observée sur les sédiments du puits d'injection. L'étude des variations des teneurs en lanthanides naturels ainsi que les expériences en batch qui font l'objet des parties 7.3 et 7.4 permettront d'éclaircir ce point.

Signalons enfin que le rapport Dy/Sm n'est pas constant sur toute la colonne d'eau (figure 7.19). Les couches les plus profondes du piézomètre I sont caractérisées par un rapport Dy/Sm plus faible.

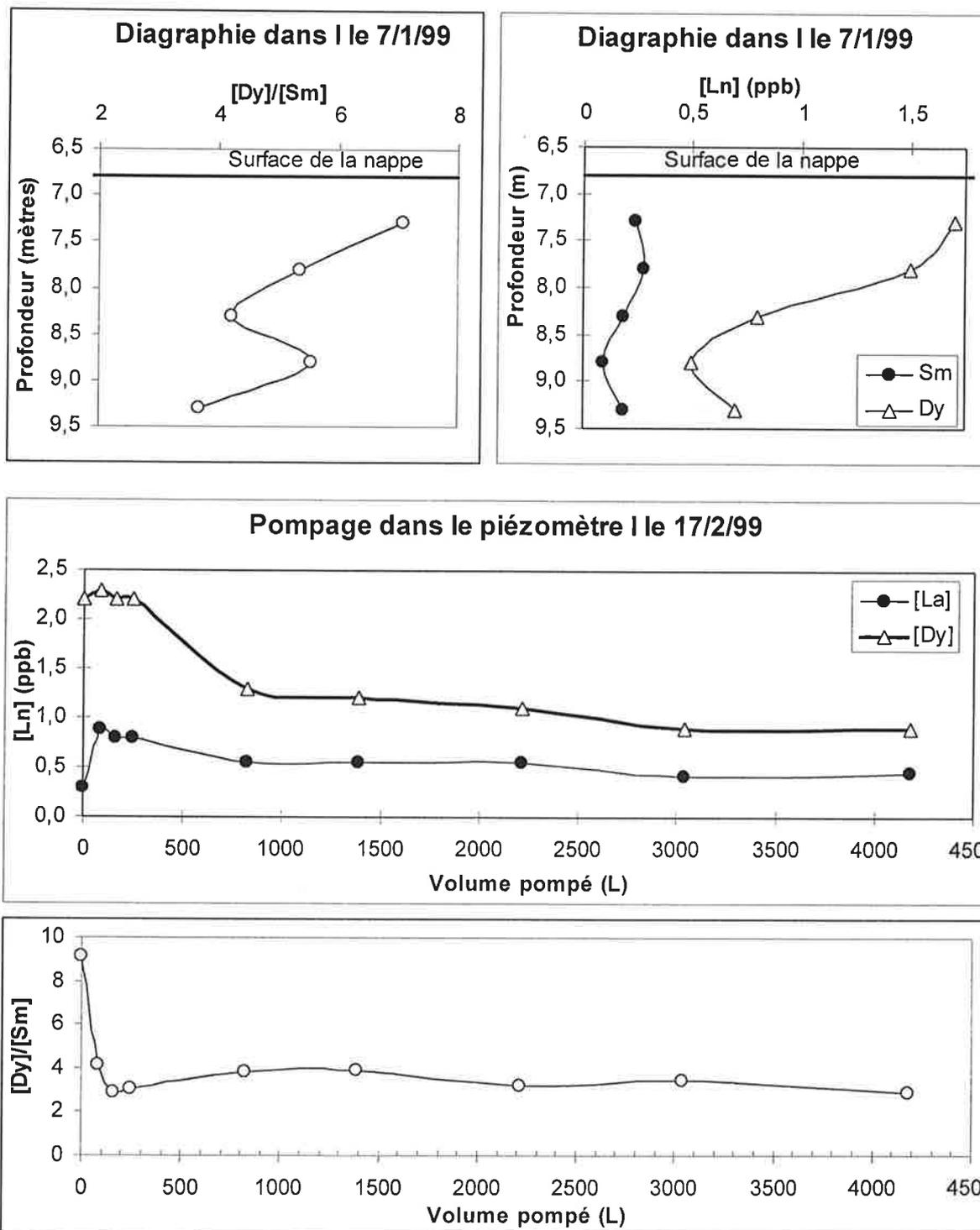


Figure 7.19 : Evolution du rapport $[Dy]/[Sm]$ dans le piézomètre I en fonction de la profondeur et du volume pompé dans le puits d'injection.

Le rapport $[Dy]/[Sm]$ est plus faible ($\approx 3,7$) dans les couches profondes du piézomètre I que dans les couches supérieures (figures du haut). L'eau qui est retirée du piézomètre au cours du pompage (figure du bas) possède un rapport Dy/Sm faible ($2,9-3,9$) caractéristique des couches profondes au niveau du piézomètre I. Ce rapport augmente à nouveau 24 heures après l'arrêt du pompage ($Dy/Sm=5,2$).

7.2.5. Confirmation expérimentale du passage des traceurs des alluvions vers le calcaire

Afin de vérifier l'hypothèse du passage des traceurs, en période de descente, des alluvions aux calcaires, deux expériences de traçage ont été réalisées dans le doublet de piézomètres Pf1-Pf2. Les deux expériences ont consisté en l'injection de traceurs dans le piézomètre alluvionnaire Pf2 en période de descente de la nappe. Les concentrations ont été suivies dans le piézomètre calcaire Pf1. Ces deux piézomètres sont distants de 2,60 mètres et ils possèdent les teneurs les plus importantes en éléments majeurs de l'ensemble du réseau piézométrique étendu (tableau 2.1, chapitre 2). Ils sont donc localisés dans une zone à faibles circulations, comme le piézomètre I également riche en éléments majeurs.

7.2.5.1. Traçage à l'uranine

Le 11/1/00 à 13h15, 500 g d'uranine sont injectés en solution dans 25 litres d'eau avec 2,5 kg d'iodure de potassium, puis 30 litres d'eau, au fond (10,8 m de profondeur) du piézomètre alluvionnaire Pf2. L'injection s'effectue à l'aide d'un tuyau débouchant sur le fond du piézomètre, c'est-à-dire 1 mètre au-dessus du toit calcaire. La lithologie des formations alluvionnaire et calcaire au niveau du doublet Pf1-Pf2 est présentée dans l'annexe 5. La surveillance du passage des traceurs s'effectue à 15 mètres et 17 mètres de profondeur dans la partie crépinée du piézomètre calcaire. Le pas de prélèvement est fixé à 10 mn pendant 1h1/4, puis à 15 mn pendant 2 heures, puis à 30 mn pendant trois heures, etc... Les résultats du traçage sont présentés dans l'annexe 23. En raison de problèmes de matériel d'analyse, l'iode n'a finalement pas été mesuré. Les premières traces d'uranine sont observées simultanément à 15 mètres et 17 mètres de profondeur dans Pf1, à 22h05 soit 8h50 après l'injection. Le maximum de concentration (9,85 mg/L) est obtenu à 17 mètres de profondeur au bout de 3 jours et deux heures. Le maximum de concentration à 15 mètres de profondeur (3,82 mg/L)

est obtenu au bout de 4 jours et deux heures. Les courbes de restitution de l'uranine dans le piézomètre Pf1, à 15 mètres et 17 mètres de profondeur ainsi que l'évolution des teneurs dans le puits d'injection Pf2 sont présentées sur la figure 7.20. Pf2 présente une augmentation des teneurs en uranine lors de la crue du 22/2/00. Cela indique une remontée du traceur des calcaires aux alluvions lors de la remontée de la nappe.

Signalons également qu'à partir du 13^{ème} jour suivant l'injection, un produit (ou mélange de substances) de couleur rouge commence à apparaître dans le puits d'injection. Ce produit est encore présent en avril 2001, au moment de la rédaction de ce mémoire de thèse. Cette substance est certainement un dérivé de l'uranine, car elle possède une longueur d'onde d'absorption de la lumière assez voisine ($\lambda=527$ nm) de celle de l'uranine ($\lambda=490$ nm). L'uranine, quant à elle, disparaît complètement des piézomètres Pf1 et Pf2 un mois après son injection. Cette disparition est très certainement liée à une réaction chimique conduisant à ce produit de couleur rouge. La co-injection d'iodure de potassium en concentration élevée pourrait bien être responsable de l'addition d'iode sur l'uranine. De telles réactions existent puisqu'elles sont utilisées dans la synthèse de colorants dérivés de la l'uranine comme l'érythrosine. Signalons par ailleurs que les longueurs d'onde d'absorption ($\lambda=525$ nm) et d'émission ($\lambda=550$ nm) de l'érythrosine sont quasiment identiques à celles du produit rouge observé en Pf1 et Pf2.

En calculant la vitesse de déplacement du traceur de Pf2 à Pf1, sur le maximum de concentration, on obtient un déplacement vertical des traceurs, en période de descente, égal à 8 cm/h. Or la vitesse de descente de la nappe est bien inférieure (3,5 cm/jour). La vitesse de déplacement de l'uranine est liée à l'existence d'un gradient hydraulique entre les deux nappes, mis en évidence dans le chapitre 6.

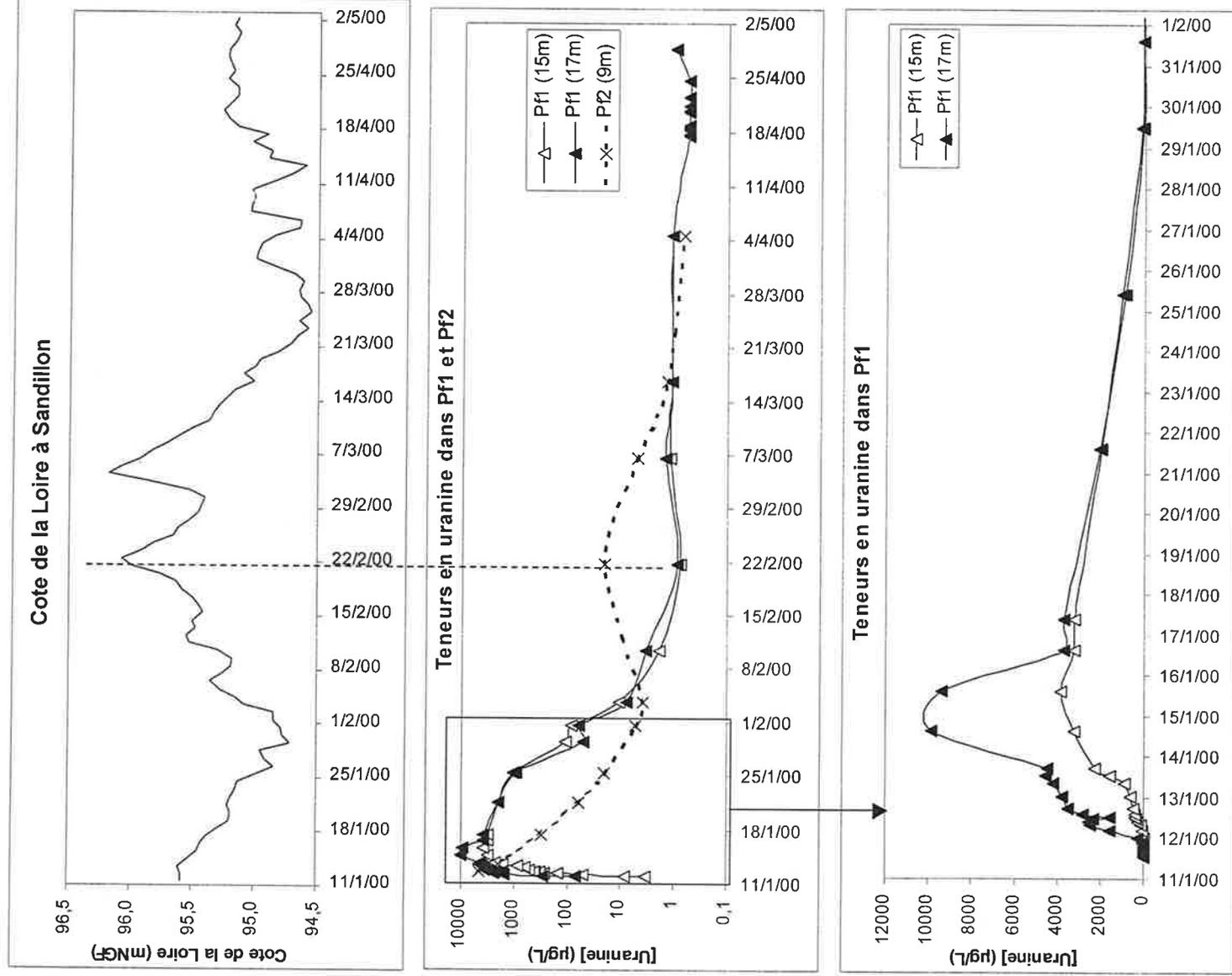


Figure 7.20: Evolution des teneurs en uranium au cours du temps dans les piézomètres

Pf1 (calcaire) et Pf2 (alluvionnaire).

Après l'injection d'uranine dans le piézomètre Pf2, la restitution s'effectue avec des teneurs plus élevées à 17 mètres de profondeur qu'à 15 mètres ce qui écarte la possibilité d'un passage du traceur le long du trou éventuellement présent dans le calcaire autour du forage Pf1. Le traceur accède à Pf1 par un chemin situé vers 17 mètres de profondeur (notons que le calcaire est karstique à partir de 14 mètres d'après les pertes à l'injection lors du forage).

La différence entre les deux nappes au niveau de Pf1 et Pf2 est de 4 cm, le 12/1/00. En utilisant la formule de Darcy ($V=K \cdot \text{grad}h$; K =perméabilité et h =charge), on obtient une perméabilité verticale égale à $5,6 \cdot 10^{-4}$ m/s entre 10,5 mètres et 17 mètres de profondeur. Cette valeur est comparable aux valeurs les plus faibles des perméabilités horizontales du calcaire de Pithiviers calculées à partir des transmissivités (Desprez, 1967 ; Zunino, 1980 ; Martin et Al., 1999). En effet, l'épaisseur du calcaire de Pithiviers étant d'environ 25 mètres à Sandillon et les transmissivités du calcaire non fissuré étant de l'ordre de 10^{-2} m²/s (Martin et Al., 1999), on en déduit la valeur de la perméabilité pour le calcaire non fissuré $K=4 \cdot 10^{-4}$ m/s. Cette valeur est cohérente avec la valeur calculée à partir de la formule de Darcy.

Enfin, signalons que des traces (2 µg/L) d'uranine ont été détectées dans le piézomètre calcaire CB4, le 20/4/00. L'uranine n'ayant pas été utilisée sur le site avant l'injection en Pf1-Pf2, il est certain que ces traces proviennent de ces deux piézomètres, d'autant plus que la piézométrie indique une direction d'écoulement, en période de descente de la nappe, de Pf1 vers le sud. La présence d'uranine a été recherchée également dans le piézomètre CB5, plus proche de Pf1, mais sans succès.

7.2.5.2. Traçage aux complexes EDTA de lanthanides

L'expérience précédente a confirmé le passage rapide, en période de descente, d'un traceur réputé conservatif des alluvions vers le calcaire. Qu'en est-il des complexes EDTA de lanthanides?

7.2.5.2.1. Déroulement du traçage

Pour répondre à cette question, le traçage réalisé en Pf2 avec de l'uranine a été renouvelé avec 4 lanthanides complexés à l'EDTA: La, Sm, Tb et Yb. Les 4 éléments choisis

décrivent bien la famille des lanthanides du plus léger au plus lourd. De plus, les éléments choisis sont quasiment identiques aux lanthanides injectés dans le piézomètre I ce qui permet de comparer les deux traçages. On injecte 10,90 g de La, 12,55 g de Sm, 10,45 g de Tb et 12,6g d'Yb complexés à 1,5 équivalents d'EDTA. L'injection est réalisée le 19/5/00 à 18h, par déversement dans le piézomètre Pf2, à 9 mètres de profondeur, des traceurs dilués dans 5 litres d'eau. Le piézomètre Pf1 est équipé d'un préleveur automatique d'échantillons d'une capacité de 24 échantillons (annexe 14). La profondeur et le pas de prélèvement sont fixés à partir des résultats du traçage à l'uranine. Le prélèvement s'effectue à 17 mètres de profondeur d'après les résultats du traçage à l'uranine. Le pas est fixé à 1h pendant 24h, du 19/5 au 20/5, à 2h du 20/5 au 22/5, à 3h du 22/5 au 25/5, à 5h du 25/5 au 30/5, à 7h du 30/5 au 6/6 et à 10h du 6/6 au 16/6. Les prélèvements suivants sont réalisés manuellement à l'aide d'un préleveur en PVC (annexe 14). Des prélèvements ont encore lieu régulièrement dans le piézomètre Pf1 et Pf2 à l'heure où ce mémoire est rédigé.

Les résultats du traçage sont présentés dans l'annexe 23. Les courbes de restitution en Pf1 obtenues pour chaque lanthanide injecté sont reportées figures 7.21a et b. Les premières traces d'ytterbium sont observées en Pf1 au bout de 14 heures. Les maxima de restitution se situent à 1j 21h pour le lanthane ($[La]_{max} = 4,7 \text{ ppb}$), 2j 21h pour le samarium ($[Sm]_{max} = 63,8 \text{ ppb}$), 5j 7h pour l'ytterbium ($[Yb]_{max} = 917 \text{ ppb}$) et 5 j 16h pour le Terbium ($[Tb]_{max} = 251 \text{ ppb}$). Les courbes de restitution obtenues pour chaque lanthanide indiquent des taux de restitution très différents entre les lanthanides légers et les lanthanides lourds. Ces derniers (Tb et Yb) présentent les concentrations les plus importantes. Comme les traceurs colorés, les lanthanides sont toujours observés en Pf1 et Pf2 au moment de la rédaction de ce mémoire. Cela confirme l'absence de circulations horizontales importantes également mise en évidence par les teneurs élevées en éléments majeurs dans les piézomètres Pf1 et Pf2 (chapitre 2).

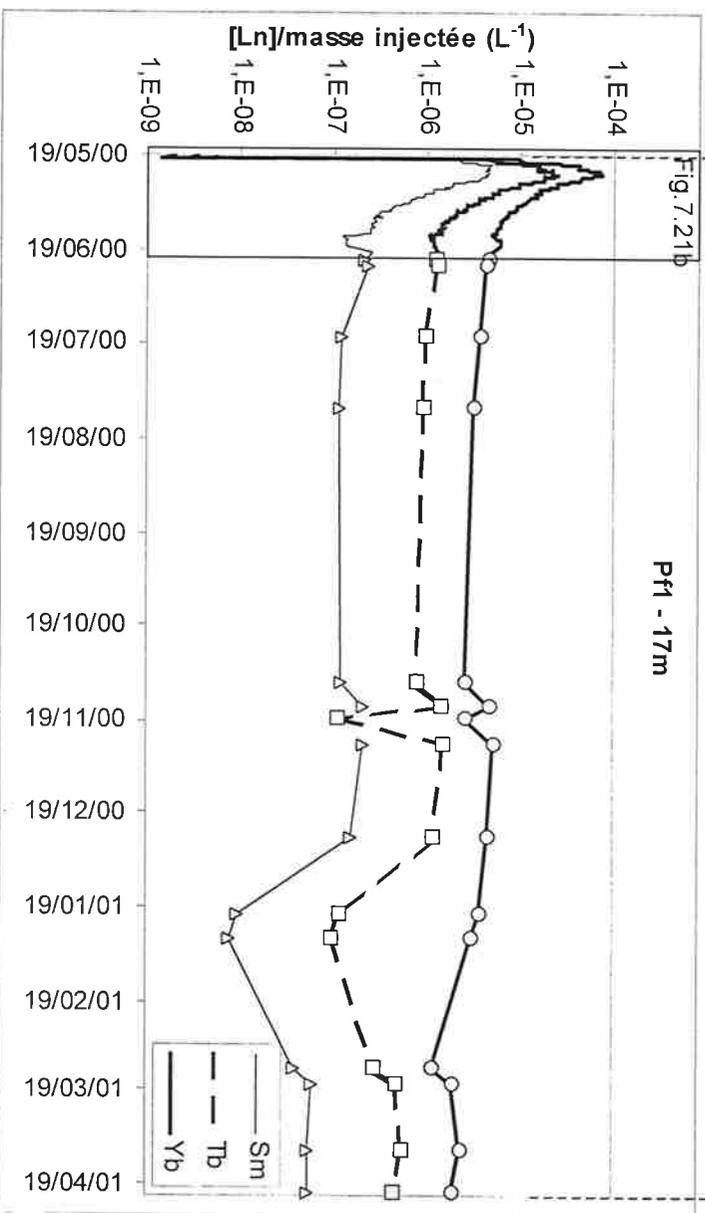
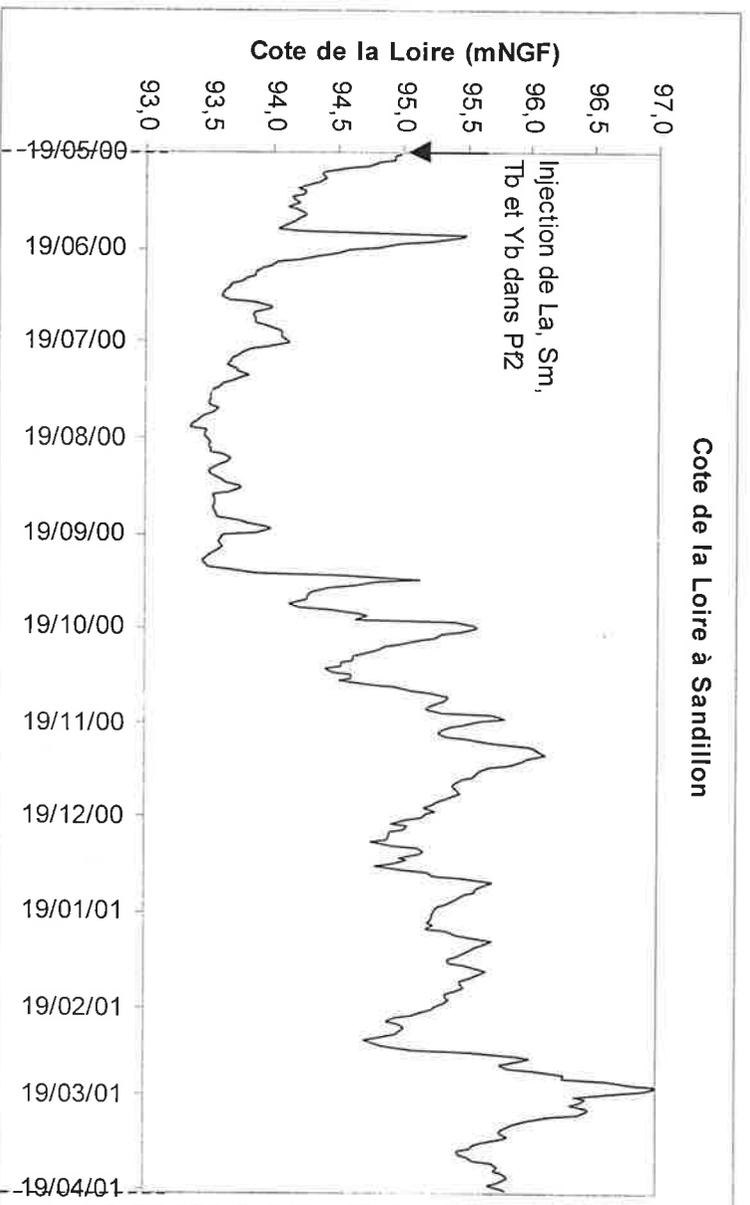


Figure 7.21a: Courbes de restitution de Sm, Tb et Yb dans le piézomètre P11 après leur injection dans P12, le 19/5/00, en période de descente de la Loire (graphique du haut).

On observe très rapidement un fractionnement entre les lanthanides légers et lourds. Le lanthane n'est détecté qu'au début de l'expérience, c'est pourquoi il n'apparaît pas sur la figure.

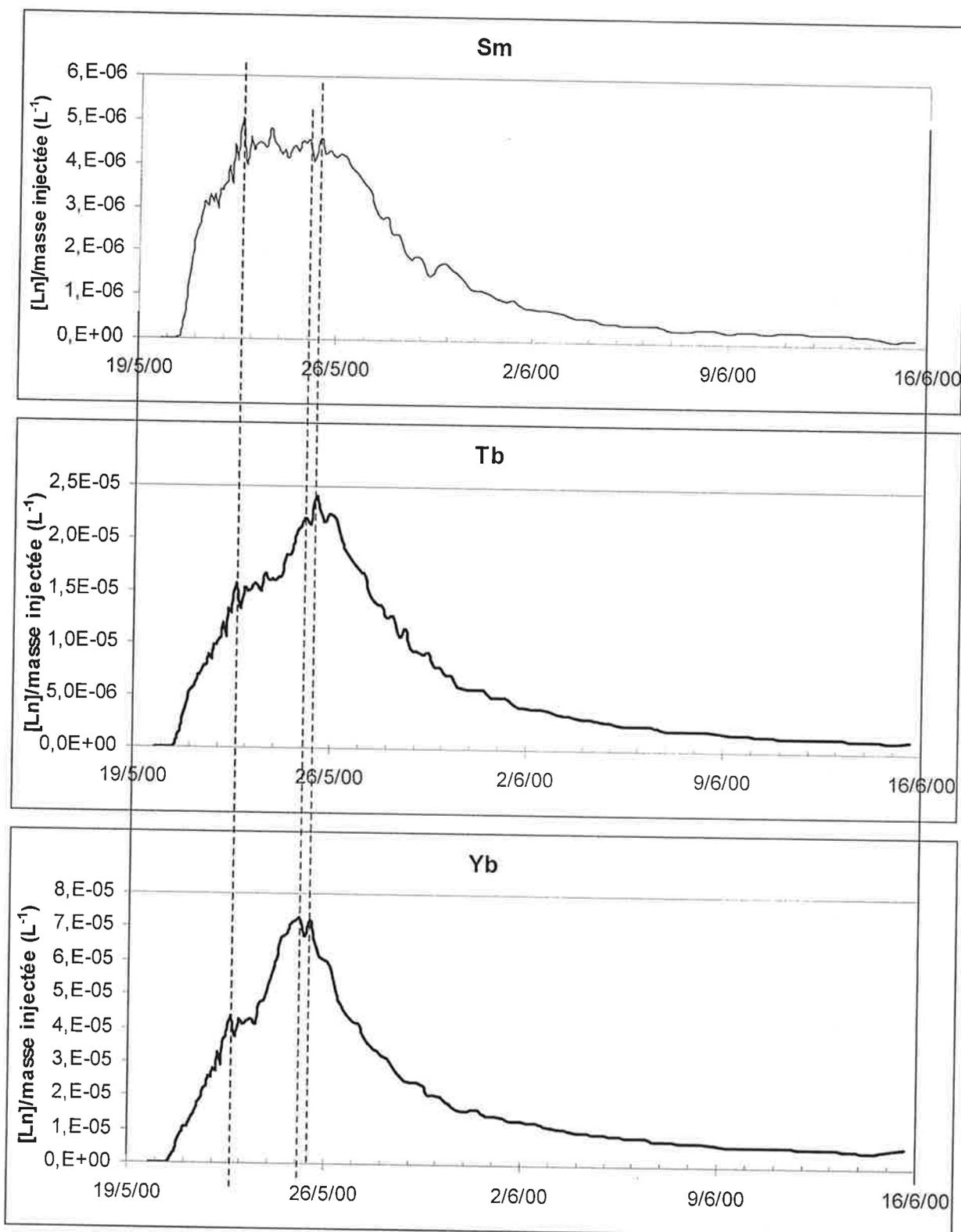


Figure 7.21b: Courbes de restitution de Sm, Tb et Yb dans le piézomètre Pf1 après leur injection dans Pf2, le 19/5/00. Alors que le terbium et l'ytterbium présentent des maxima de restitution quasiment identiques, le samarium atteint rapidement un palier, ce qui place son maximum de concentration plus de 2 jours avant les lanthanides lourds. Ce palier est certainement dû à la fixation plus rapide du samarium sur les alluvions autour du puits d'injection.

Cela confirme également que la disparition de l'uranine dans Pf1 est liée, non pas à l'écoulement, mais à une réaction chimique. Par ailleurs, on observe toujours le traceur coloré dans Pf1 et Pf2.

7.2.5.2.2. Comparaison des traçages à l'uranine et aux lanthanides

Les deux traçages réalisés de Pf2 à Pf1 sont comparés sur la figure 7.22 par normalisation des concentrations à la concentration de la solution injectée. L'uranine présente une vitesse de circulation plus rapide que l'Yb et le Tb. Le samarium et le lanthane atteignent leurs maxima bien avant l'uranine, l'Yb et le Tb. Ces lanthanides présentent également des teneurs beaucoup plus faibles ce qui montre une rétention préférentielle dans le système alluvions-calcaire des lanthanides légers par rapport aux lanthanides lourds. La baisse soudaine des teneurs en lanthane et samarium, alors que les teneurs en Tb et Yb continuent d'augmenter, laisse fortement penser à une précipitation ou adsorption rapide du samarium et du lanthane.

Les deux traçages ont été réalisés à des périodes différentes. Les différences de charges entre les deux nappes varient au cours du temps et on ne peut pas affirmer que si les deux expériences étaient simultanées, l'élution de l'ytterbium et du terbium serait plus lente que celle de l'uranine. Il est plus probable que la vitesse de déplacement du nuage de traceur soit plus rapide lors du premier traçage. Cette explication est renforcée par la différence de charge 10 fois plus faible entre les deux nappes lors du deuxième traçage (4 cm le 11/1/00 contre 4 mm le 18/5/00) impliquant des vitesses de déplacement plus faibles.

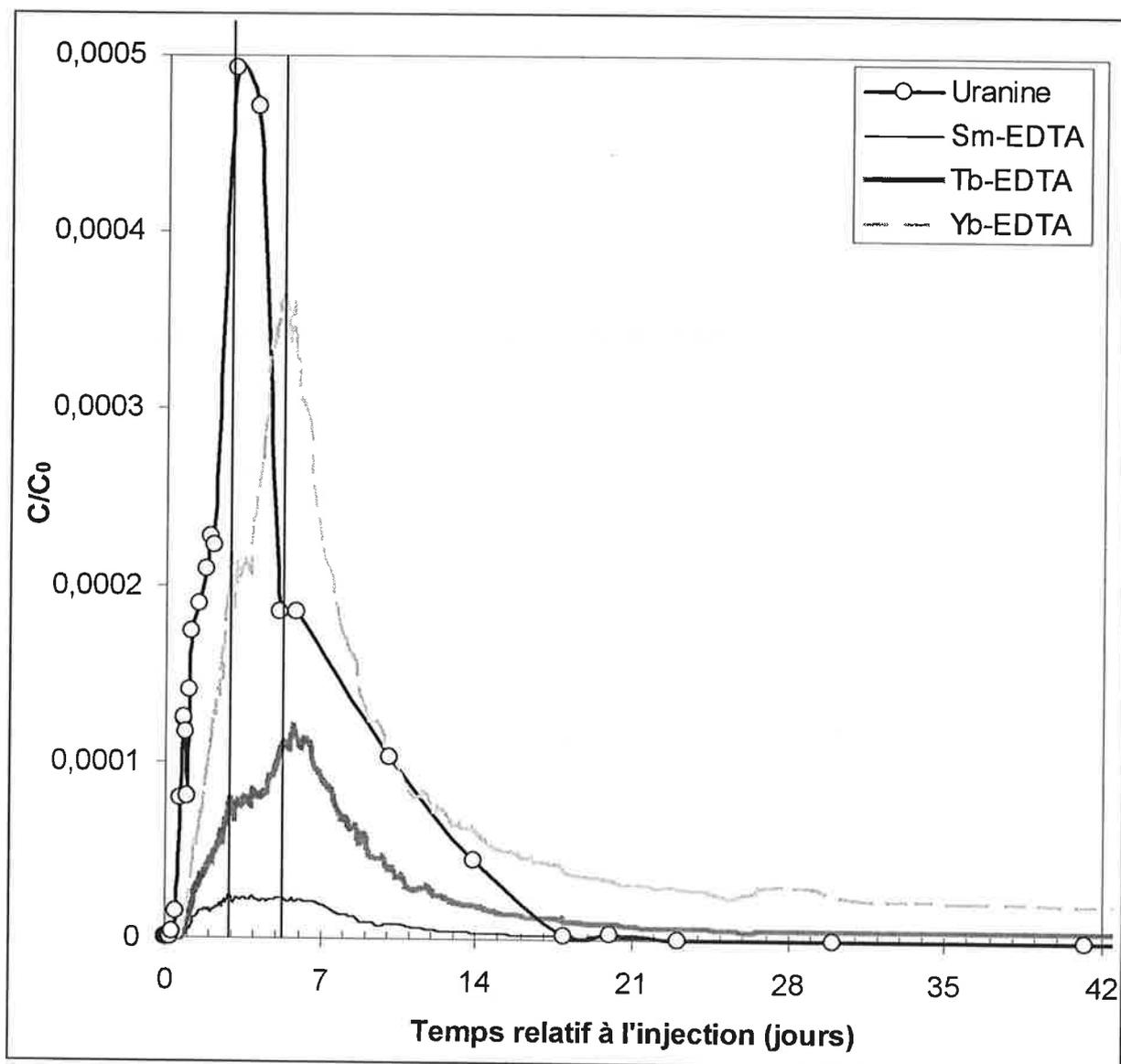


Figure 7.22 : Comparaison des courbes de restitution , dans le piézomètre Pf1 à 17 mètres de profondeur, de l'uranine (traçage du 11/1/00) et des complexes EDTA de Sm, Tb et Yb (traçage du 19/5/00) injectés dans le piézomètre Pf2.

Afin de comparer les courbes, les concentrations ont été normalisées à la concentration initiale de la solution injectée. L'uranine est le traceur qui possède la restitution la plus rapide. Sa disparition complète des piézomètres Pf1 et Pf2 n'est pas liée à l'écoulement mais à une réaction chimique conduisant à la formation d'un produit dérivé de couleur rouge non dosable car non-identifié. C'est pourquoi, si on évalue la qualité de la restitution des traceurs par l'intégration des courbes ci-dessus, c'est l'ytterbium qui présente la meilleure qualité de restitution devant l'uranine, le terbium et le samarium.

7.2.5.2.3. Recherche des traceurs en CB4 et CB5

La présence d'uranine relevée dans le piézomètre CB4 en juin 2000 suggère un déplacement des traceurs du piézomètre Pfl vers CB4 en période de descente de la nappe. Les traceurs injectés en Pf2 le 19/5/00 ont donc été recherchés dans CB4 et également dans CB5 situé dans l'alignement Pfl-CB4.

Des traces d'ytterbium ont été détectées dans CB4 et CB5 dès juin 2000. Au début, la présence d'erbium en plus de l'ytterbium et l'absence de terbium prouve que ces traceurs proviennent de l'injection réalisée dans le piézomètre CA1 le 14/6/00 (Cf chapitre 8). Puis, à partir de novembre 2000, alors que les teneurs en erbium se confondent avec le bruit de fond dans les piézomètres CB4 et CB5, des traces de terbium sont détectées dans le piézomètre CB5 en plus de l'ytterbium. Ces teneurs restent globalement à l'état de traces, cependant un pic a été relevé le 27/12/00 après un mois de descente de la Loire. Les teneurs alors relevées sont les suivantes:

	CB5	CB4
[Tb]	45 ppt	<5 ppt
[Yb]	380 ppt	50 ppt

Comme les traceurs injectés dans l'axe karstique au niveau du piézomètre CA1 sont détectés dans le piézomètre CB4 en juin 2000, il est très probable qu'un axe karstique passe à faible distance de CB4 selon une direction Est-Ouest confirmée par la piézométrie (chapitre 6). La présence de cet axe karstique peut expliquer des va-et-vient de traceurs entre Pfl et CB5, CB4 perpendiculairement à la direction de l'axe. Ces circulations sont expliquées sur la figure 7.23.

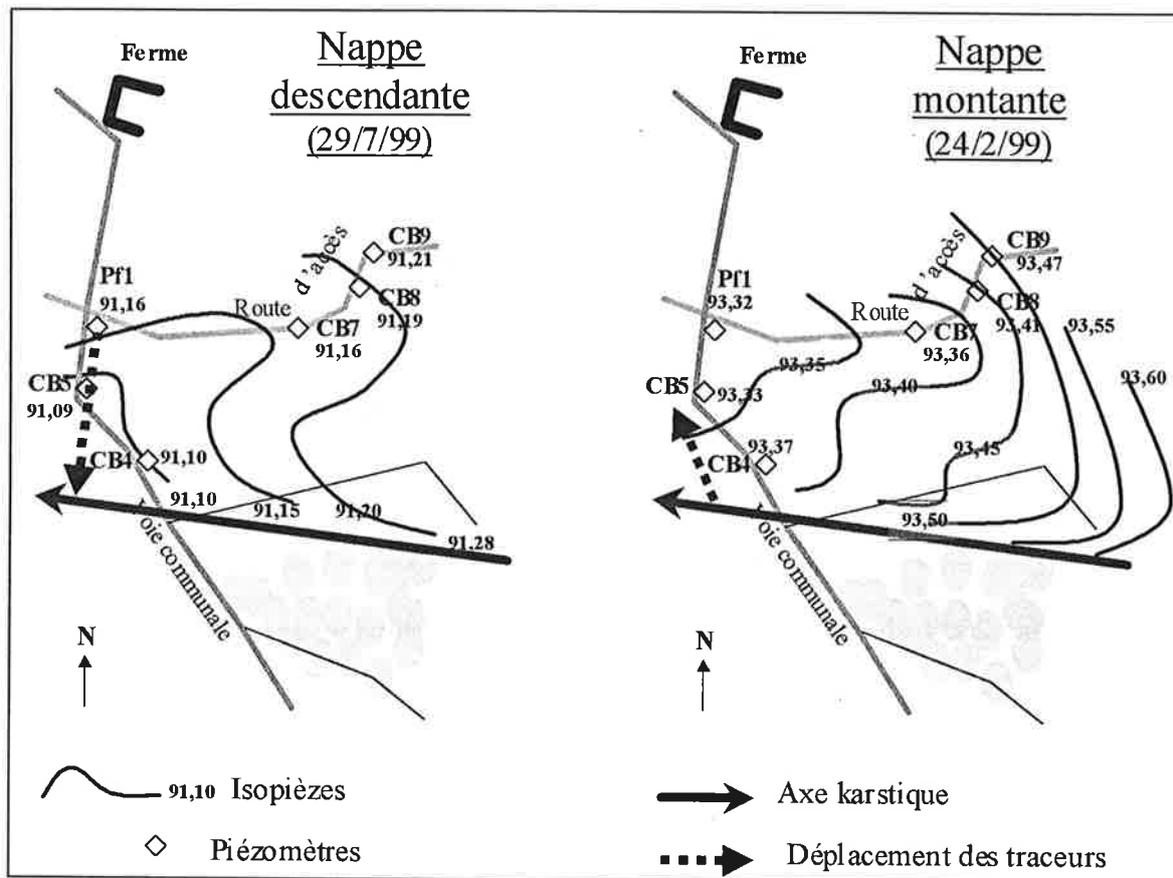


Figure 7.23 : Déplacement des traceurs dans la nappe du calcaire dans l'Ouest de la carrière en période de descente de la nappe (à gauche) et en période de crue (à droite). Afin de montrer les inversions piézométriques pouvant engendrer un va-et-vient de traceur entre Pf1 et CB5-CB4, les cartes piézométriques de deux situations opposées ont été reprises, celle du 29/7/99 en période de descente de la nappe et celle du 24/2/99 en période de remontée de la nappe. En période descendante, la piézométrie indique un écoulement possible de Pf1 vers le sud. De plus, les traçages réalisés à partir du doublet Pf1-Pf2 montrent que cet écoulement atteint le piézomètre CB4. Pour qu'un tel écoulement ait lieu, il faudrait une piézométrie légèrement différente que celle qui est présentée sur la figure. Etant donnée la grande variabilité de la piézométrie sur le site, une situation piézométrique telle que CB4 se retrouve à l'aval hydraulique de CB5 et Pf1 est tout à fait plausible. Le déplacement des traceurs de Pf1 vers CB4 s'explique aisément par la présence d'un axe de drainage karstique passant au sud de Pf1, comme l'indique la piézométrie et les traçages réalisés à partir du piézomètre CA1 (Cf. chapitre 8). En période de remontée de la Loire, la piézométrie s'inverse et le retour des traceurs vers Pf1 est possible.

7.2.5.2.4. Etude des rapports Yb/Tb, Yb/Sm et Tb/Sm

Les rapports lanthanides lourds sur lanthanides légers initialement proches de 1 augmentent rapidement au début du traçage (figure 7.24 ci-dessous) ce qui montre une rétention plus importante des lanthanides légers par rapport aux lanthanides lourds. Les pics observés sur la figure sont liés principalement à une diminution des teneurs en lanthanides légers le 18/11/00, le 21/1/01 et le 29/1/01. Ces augmentations sont certainement liées à des déplacements horizontaux d'eau chargée en lanthanides lourds suivis par un retour à "l'équilibre" caractérisé par des rapports plus faibles. La diminution de ces rapports après chaque pic implique, comme pour le piézomètre I, la réversibilité de la sorption des lanthanides légers. Les pics observés correspondent à des situations de crue le 18/11/00 et le 29/1/01 mais pas le 21/1/01 où le niveau de la nappe est assez stable. Ainsi comme dans le piézomètre I, les variations des rapports lanthanides lourds/ lanthanides légers ne sont pas corrélées aux oscillations de la Loire.

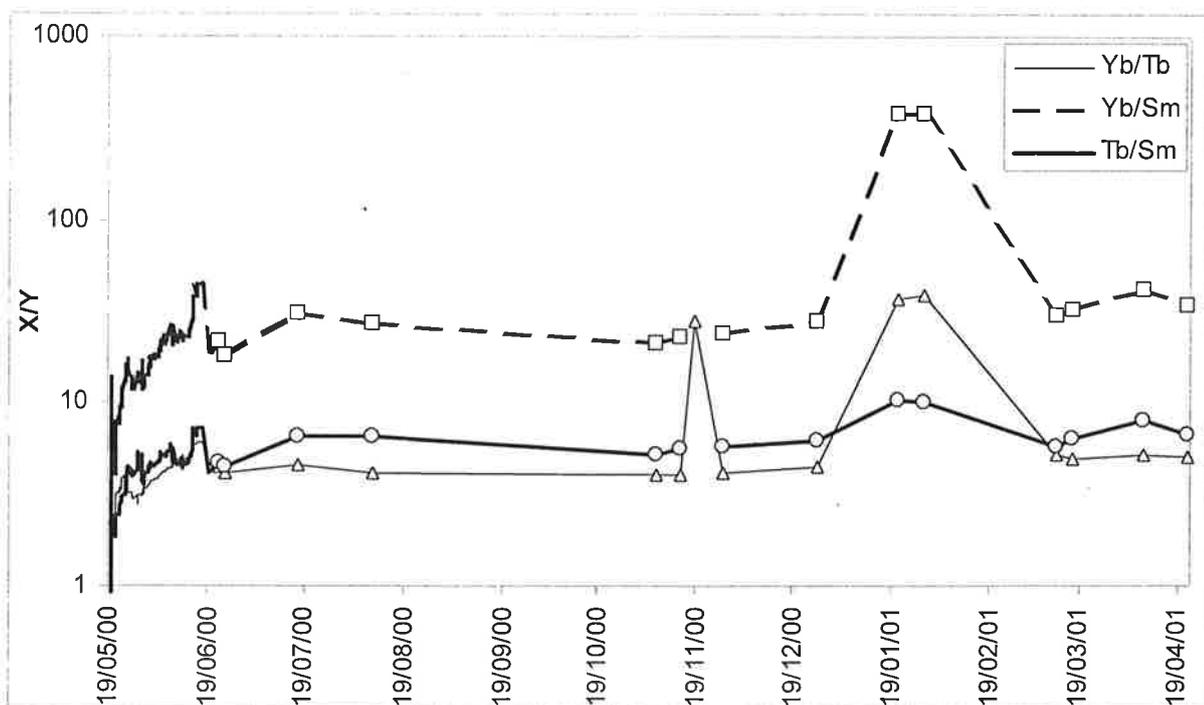


Figure 7.24: Evolution des rapports Yb/Tb, Yb/Sm et Tb/Sm dans le piézomètre calcaire Pf1.

7.2.5.3. Bilan des traçages en Pf1-Pf2

Les expériences réalisées entre Pf1 et Pf2 ainsi que les fortes teneurs en éléments majeurs observées dans ce doublet montrent qu'il est illusoire de vouloir distinguer, dans le contexte de Pf1 et Pf2, nappe alluviale et nappe calcaire. La nature karstique du calcaire au niveau de ces deux piézomètres explique le passage facile de l'un à l'autre, mais ce déplacement est très limité au delà comme en atteste le suivi sur de longues durées. Au niveau de Pf1 et Pf2, ce sont les mécanismes d'échanges qui gouvernent les distributions des lanthanides. Les déséquilibres piézométriques liés aux remontées rapides ou descentes de la Loire provoquent des transferts discontinus à plus longue distance.

Le système de circulation de la nappe au niveau des piézomètres Pf1 et Pf2 est assez semblable à ce que l'on observe au niveau du piézomètre I à savoir que de fortes teneurs en traceurs et en éléments majeurs subsistent sur des temps de l'ordre de quelques années ce qui implique de faibles circulations au niveau du puits d'injection. On observe toutefois des va-et-vient de traceurs sur le plan horizontal perpendiculairement à un axe karstique. Le modèle expliquant la migration rapide des traceurs vers le nord du piézomètre I à partir d'un axe karstique (figure 7.12) se vérifie donc expérimentalement.

7.2.6. Remobilisation des terres rares naturelles

Dans la plupart des piézomètres où l'on observe des passages de traceurs en quantités importantes (I, J, K, Pf1, Pf2), on assiste à une augmentation considérable, en solution, des teneurs en lanthanides naturels dans l'ordre de stabilité des complexes EDTA (figures 7.25 et 7.26).

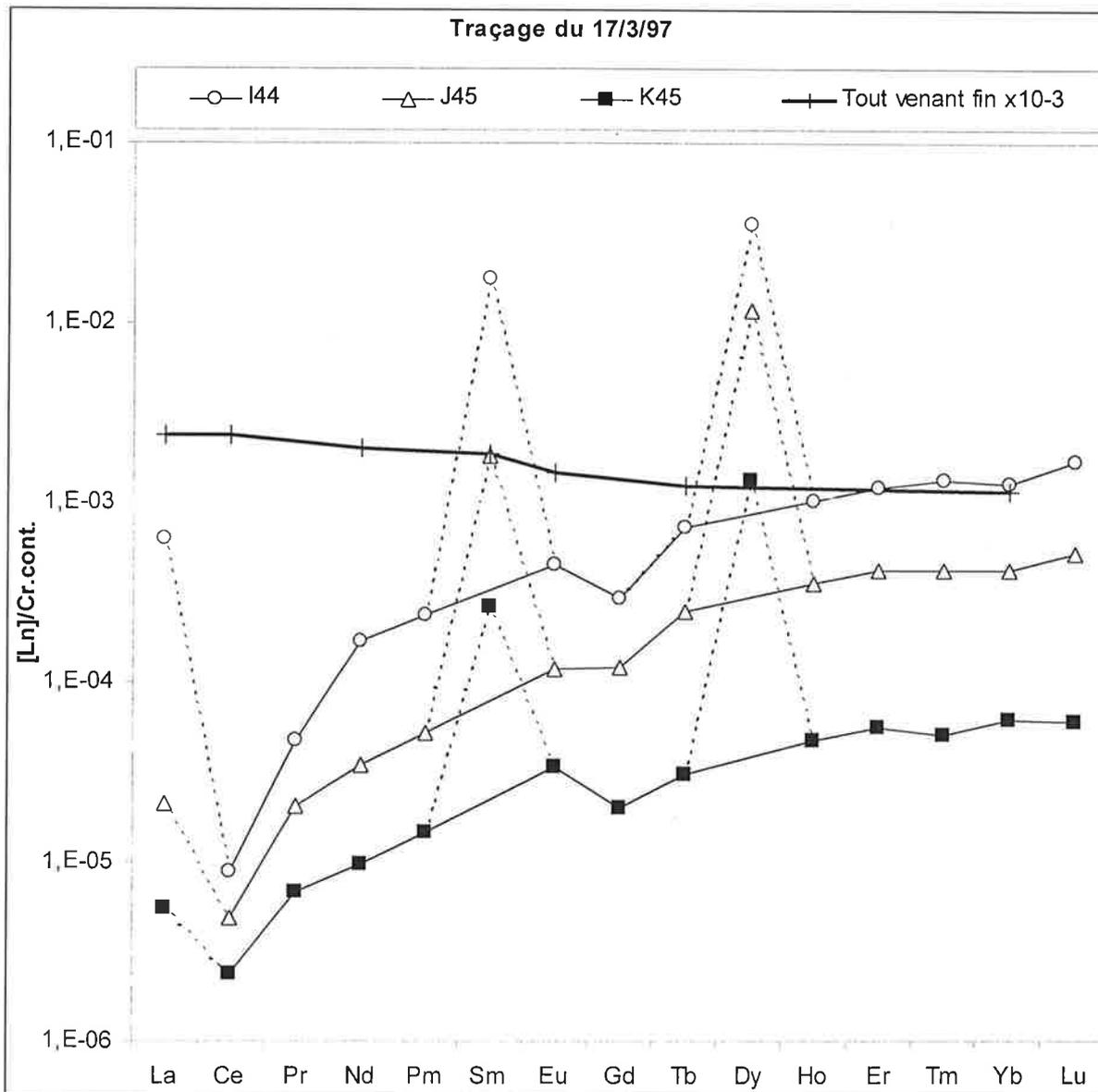


Figure 7.25: Distributions normalisées à la croûte continentale moyenne des lanthanides naturels dans la nappe alluviale au niveau des piézomètres I, J et K lors du passage des traceurs La, Sm et Dy le 10 mai 1997 (série 45).

La courbe des teneurs en terres rares dans les alluvions (tout venant fin, fraction granulométrique $< 125 \mu\text{m}$) a également été reportée sur le graphique. Cela montre que les terres rares mises en solution par l'excès d'EDTA sont enrichies en lanthanides lourds conformément à la plus grande stabilité des complexes EDTA de lanthanides lourds. L'anomalie positive au niveau des terres rares introduites est la preuve du passage des traceurs. On a en effet observé, au niveau du piézomètre X, des augmentations importantes des teneurs en lanthanides non liées à des traceurs injectés mais simplement à des fluctuations des teneurs naturelles.

Cet enrichissement est certainement lié à la remobilisation des lanthanides naturels par l'excès d'EDTA (1,5 équivalents molaires) ajouté avec les complexes de lanthanides.

Les concentrations en traceurs demeurent plus d'un ordre de grandeur supérieures aux teneurs naturelles des lanthanides injectés. Le calcul des concentrations réelles en traceurs s'effectue par soustraction des teneurs naturelles interpolées à partir d'une courbe de normalisation aux chondrites C1 ou à la croûte continentale moyenne (figures 7.25 et 7.26) entre les lanthanides voisins de l'élément injecté. Par exemple, la concentration en terbium naturel se déduit des teneurs en gadolinium et en dysprosium. L'utilisation de la croûte continentale moyenne pour la normalisation des teneurs en lanthanides dans les eaux naturelles se justifie dans la mesure où les sédiments de la Loire possèdent un profil typique de la croûte continentale moyenne (Cf. chapitre 2). Cette normalisation permet ainsi de mettre en évidence les éventuels appauvrissements, enrichissements et anomalies dans les distributions des terres rares dans les eaux de nappe (figures 7.25 et 7.26).

Les lanthanides remobilisés ne peuvent provenir des eaux naturelles dont le bruit de fond en terres rares en solution est généralement très bas. Elles proviennent donc des phases solides. D'après les analyses par activation neutronique (tableau 7.4), les teneurs en terres rares du calcaire de Pithiviers sont extrêmement faibles par rapport aux teneurs des sédiments argileux présents sur la carrière. Les lanthanides remobilisés proviennent donc essentiellement des alluvions. Comme on l'a vu au chapitre 5, l'EDTA ne met pas en solution les phases minérales, la remobilisation des lanthanides est donc une réaction d'échange du type:

$$\text{S-Ln} + \text{EDTA} + \text{H} \leftrightarrow \text{S-H} + \text{Ln-EDTA}$$
 aux coefficients stoechiométriques près.

Tableau 7.4 : Teneurs (ppm) en scandium, lanthanides et thorium des sédiments présents sur la carrière de Sandillon.

Echantillon	Sc	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Dy	Yb	Th
Calcaire CA	0,37	2,47	3,83	1,63	0,49	0,11	0,066	0,573	0,25	0,41
Calcaire CB5	0,72	4,35	9,35	2,88	0,73	0,20	0,074	<LD	0,22	1,76
Marne Blanche MB	2,28	6,12	14,4	7,7	0,74	0,26	0,12	0,58	0,47	2,96
Argile Verte AV	7,00	17,2	32,9	13,1	2,59	0,57	0,27	1,24	0,85	9,78
Argile Noire AN	16,1	53,2	115	68	9,14	2,17	1,04	5,16	3,41	19,0
Argile Grise AG	11,4	48,9	99,4	57,1	8,22	1,45	0,95	5,29	3,33	19,6
Sédiment Loire	14,2	59,2	122	50	10,3	2,08	1,12	5,40	3,43	21,6
Tout Venant fin TV (<125µm)	18,5	78,4	177	70,3	12,8	2,50	1,40	5,18	4,10	29,4

LD : limite de détection.

Calcaire CA est un bloc de calcaire prélevé dans le lit de la Loire et broyé. Calcaire CB5 est constitué de sables calcaires expulsés à la surface lors du forage du piézomètre calcaire CB5. Les marnes blanches, argiles vertes et grises sont présentes à la base des alluvions, elles ont été récoltées lors des sondages de reconnaissance effectués en septembre 1997 par l'entreprise Morillon-Corvol. L'argile noire est présente sous forme de veines ou de lentilles au milieu des alluvions. Les sédiments de la Loire ont été prélevés dans le lit mineur de la Loire. Le tout venant fin est issu du tamisage de tout venant alluvionnaire prélevé dans une zone sableuse.

Cette réaction certainement réversible explique donc aussi le mécanisme de fixation sur les phases solides des traceurs injectés. Elle indique de plus des effets de compétition entre éléments en fonction des constantes de stabilité de leur complexes.

$S-M + LnEDTA \leftrightarrow S-Ln + MEDTA$ où M représente un élément de la famille des lanthanides mais également d'autres éléments dont les complexes EDTA possèdent des constantes de stabilité élevées (Ex: Sc, Cr, Co, Zn, Sb, Fe, Mn, Ca, Mg).

Si l'on compare le profil des teneurs en lanthanides des sédiments de Sandillon au profil des lanthanides remobilisés par l'EDTA (figure 7.25), on constate que la remobilisation des terres rares s'effectue en sens inverse de l'ordre d'abondance dans les sédiments. Les lanthanides les plus lourds sont les mieux mobilisés.

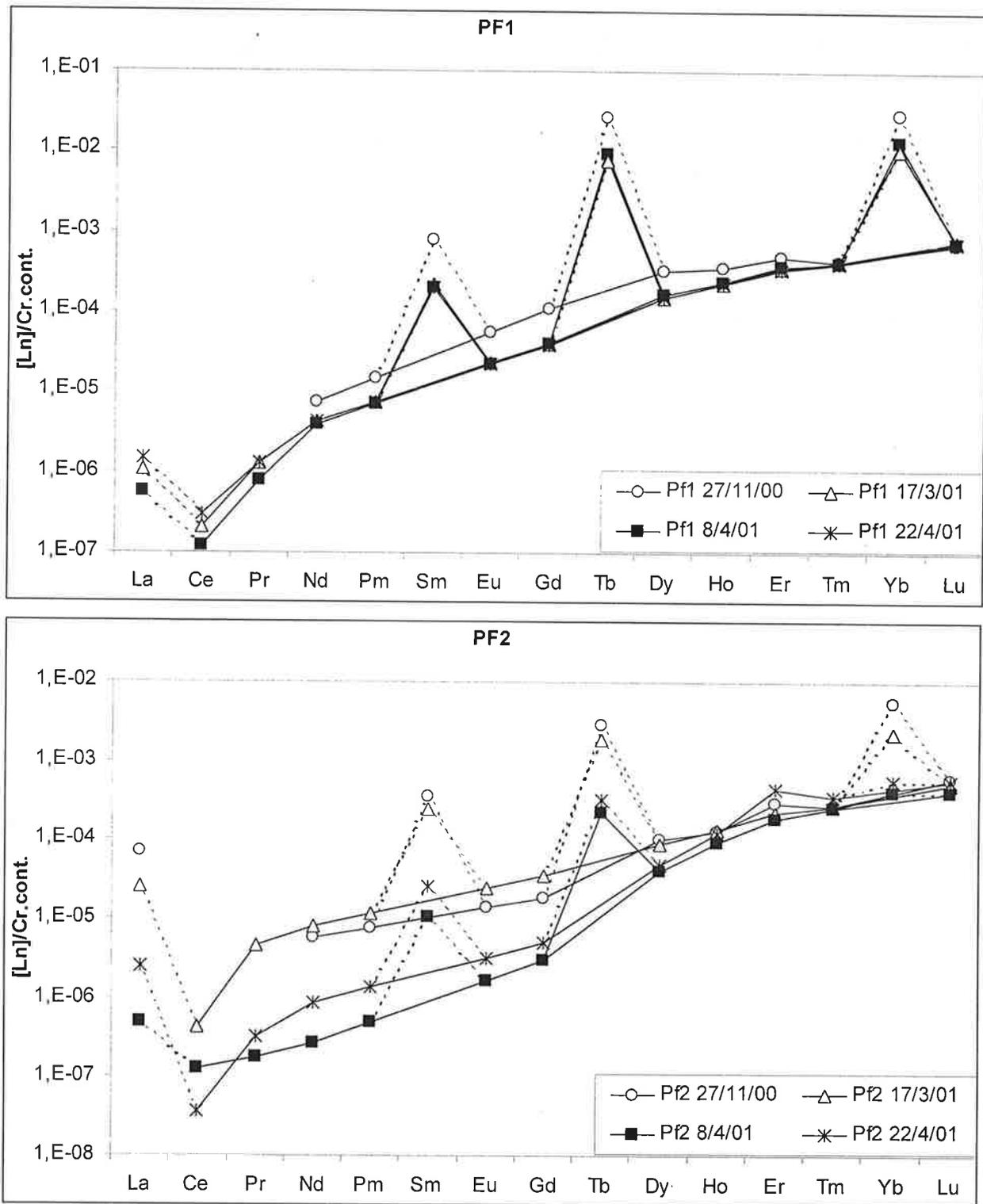


Figure 7.26: Profils des teneurs en lanthanides normalisées à la croûte continentale moyenne (Taylor et Mc Lennan, 1985) dans les piézomètres Pf1 et Pf2. Les anomalies en traceurs (La, Sm, Tb, Yb) sont représentées en pointillés. Les teneurs en Pm et Eu sont interpolées linéairement sur l'échelle logarithmique entre Nd et Gd. Globalement, les teneurs en lanthanides sont plus importantes en Pf1 qu'en Pf2. L'anomalie en La est beaucoup plus prononcée dans Pf2 que dans Pf1. De plus, Pf2 subit des enrichissements en lanthanides légers au moment des crues du 27/11/00 et du 17/3/01 alors qu'en période de descente de la nappe (8/4/01 et 22/4/01) le profil général des terres rares est plus incliné et se rapproche du profil de Pf1. Ce dernier reste relativement constant quel que soit le régime hydrologique.

7.3. Interprétation des observations in situ par les expériences en batch

Rappelons les différentes observations faites au cours des traçages à partir des piézomètres I et Pf2 :

-Les lanthanides se fixent en partie sur les alluvions. Les taux de fixation augmentent dans le sens lanthanides lourds < lanthanides légers. Cette fixation différentielle entraîne une augmentation générale du rapport lanthanide lourd/lanthanide léger. Cependant, des diminutions de ce rapport sont parfois observées. Il semble bien que la seule manière de les expliquer est de tenir compte d'un phénomène de fixation réversible des lanthanides légers.

-Or, en l'absence d'apport d'EDTA supplémentaire, l'adsorption des traceurs sur les alluvions semble irréversible. C'est ce que l'on observe dans le piézomètre I.

-Les lanthanides naturels sont remobilisés par l'EDTA dans le sens lanthanides légers < lanthanides lourds.

Les expériences en batch ont pour objectif d'éclaircir chacun des points ci-dessus. Le protocole expérimental adopté pour l'étude de l'adsorption et de la désorption des lanthanides sur les alluvions a été décrit chapitre 5. Seuls les résultats sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

7.3.1. Adsorption sur les alluvions

7.3.1.1. Résultats

Les résultats de l'adsorption des complexes EDTA de La, Sm et Dy sur du tout venant fin (<125 µm) sont présentés sur la figure 7.27. L'adsorption dure 11 jours et 3 heures. Le pH des solutions est toujours compris dans la gamme des pH mesurés dans la nappe alluviale.

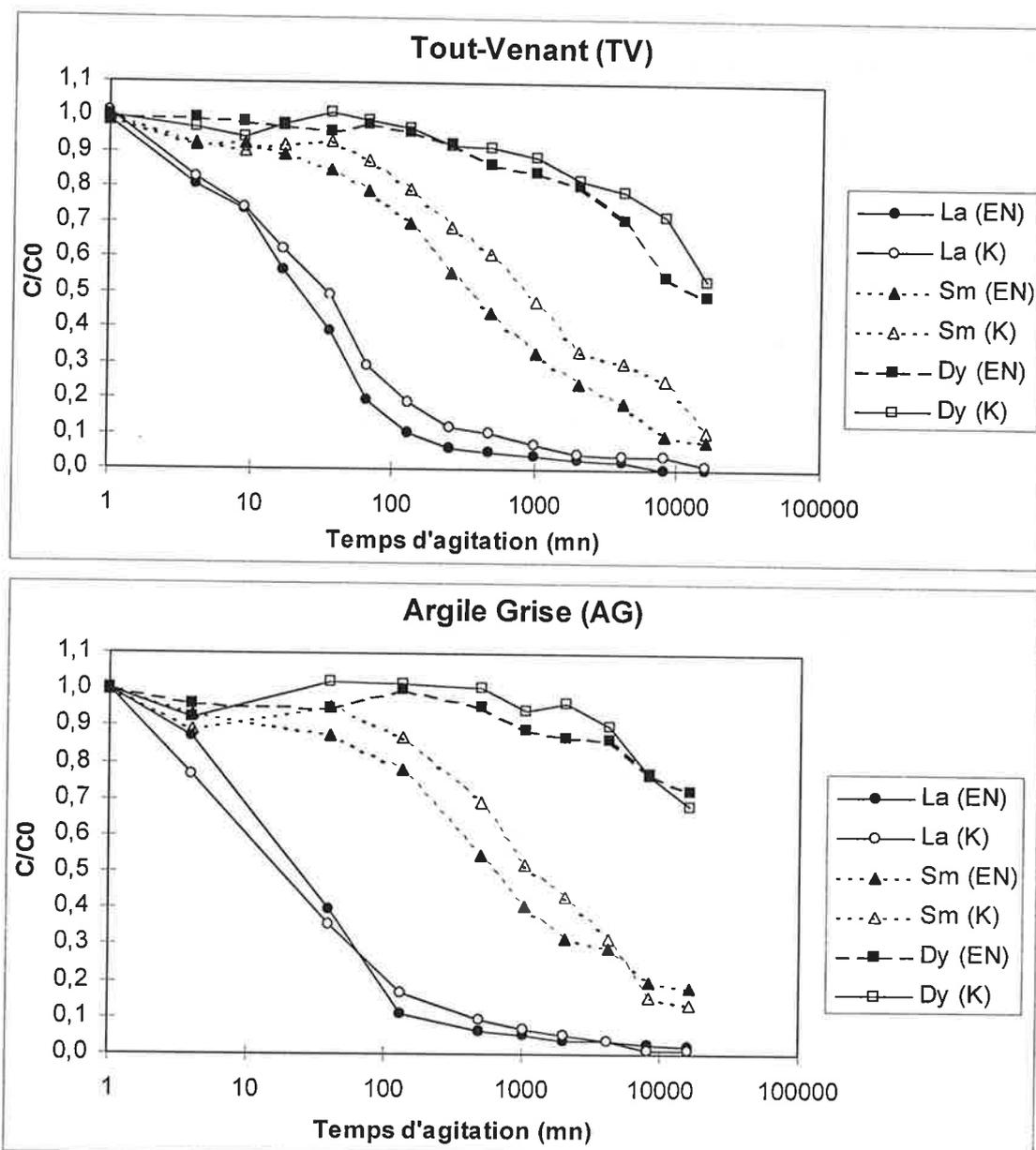


Figure 7.27 : Evolution des teneurs normalisées à la concentration initiale des complexes EDTA de La, Sm et Dy lors de leur adsorption sur du tout venant fin (<125 µm) et sur de l'argile grise prélevés à Sandillon.

Les teneurs initiales en chaque lanthanide sont égales à 1 ppm. Les expériences sont réalisées dans deux solutions différentes, une solution naturelle (EN) d'eau de nappe prélevée dans le piézomètre O puis filtrée, et une solution synthétique KNO_3 0,01 mol/L (K). Le pH des solutions n'est pas tamponné. Dans les flacons contenant du tout-venant, le pH varie de 7,23 à 7,58 dans la solution EN et de 6,84 à 7,19 dans la solution K. Les solutions en équilibre avec l'argile grise ont un pH variant de 7,32 à 7,62 dans la solution EN et de 6,59 à 6,82 dans la solution K. Ces gammes de variations sont en accord avec les pH mesurés dans les alluvions (6,35-7,72). Les différences observées entre les deux types de solution sont très faibles. Les teneurs diminuent tout de même légèrement plus vite dans la solution naturelle EN. Les trois lanthanides étudiés présentent des cinétiques de sorption bien distinctes. Les lanthanides légers s'adsorbent plus rapidement que les lanthanides lourds.

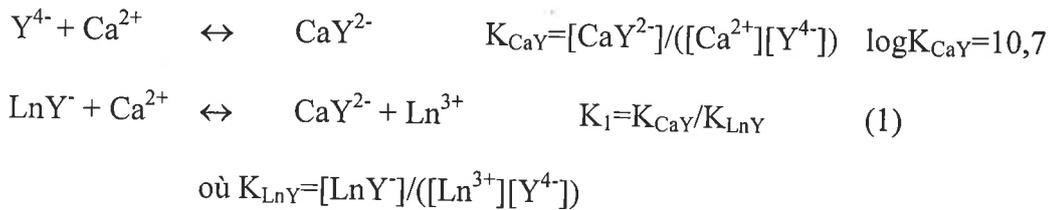
On constate que le lanthane s'adsorbe très rapidement. 50% du lanthane initial est fixé au bout de 20 mn d'agitation. Le samarium se fixe moins vite : il faut attendre 16 heures avant d'en fixer la moitié. Quant au dysprosium, au bout de 11 jours 3 heures, le tout-venant n'en a à peine fixé 50% et l'argile grise à peine 30%. Il y a donc fixation rapide des traceurs sur les alluvions. A l'issue des 11 jours d'expérience, l'équilibre n'est toujours pas atteint. Les traceurs s'adsorbent plus rapidement sur le tout-venant fin que sur l'argile grise. Les pH étant très voisins (du moins pour la solution d'eau naturelle "EN"), cette meilleure rétention est liée à la proportion d'argiles mesurée par les teneurs en thorium plus importantes dans le tout-venant ([Th]=29,4 ppm) que dans l'argile grise ([Th]=19,6 ppm).

Vérifions maintenant que la diminution des teneurs en traceurs dans la solution est due à leur adsorption sur les sédiments argileux et non à leur précipitation. Pour cela, les solutions témoins sont très utiles.

7.3.1.2. Interprétation de la chute des teneurs en lanthane dans la solution témoin TEN

L'agitation de solutions témoins ne contenant pas de sédiments réalisée entre pH= 6,3 et 8,0 ne conduit pas à une diminution des traceurs en solution sauf pour le lanthane dont la concentration chute de 20% dans la solution d'eau naturelle « EN » (pH=7,73-8,03) en fin d'agitation (figure 7.29). Le samarium et le dysprosium sont donc bel et bien adsorbés et non précipités dans les solutions en contact avec les sédiments argileux. Quant au lanthane, on explique la diminution de sa concentration par la formation d'un précipité: le carbonate de lanthane $\text{La}_2(\text{CO}_3)_3$.

Démonstration: La présence d'ions calcium dans la solution naturelle conduit à la consommation de l'excès d'EDTA selon la réaction



L'équilibre (1) permet de calculer les teneurs en ions lanthanides libres en supposant que cet équilibre est peu déplacé c'est à dire que $[LnY^-] \gg [Ln^{3+}]$.

$[Ca^{2+}]_{TOT} = [Ca^{2+}] + [CaY^{2-}]$ a été dosé par chromatographie ionique $[Ca^{2+}]_{TOT} = 4,1 \cdot 10^{-4}$ mol/L.

$[CaY^{2-}] = 1,05 \cdot 10^{-5}$ mol/L (consommation de l'excès d'EDTA)

On trouve $[La^{3+}] = 3,17 \cdot 10^{-8}$ mol/L $[Sm^{3+}] = 7,96 \cdot 10^{-6}$ mol/L et $[Dy^{3+}] = 1,05 \cdot 10^{-9}$ mol/L.

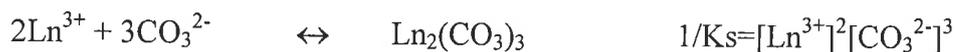
Il faut ensuite vérifier que l'on se trouve en dessous du produit de solubilité des hydroxydes.

A pH=8; on montre que $[Ln^{3+}][OH^-]^3 \ll 1/\beta_3^s$ β_3^s correspond à la réaction :



Donc les hydroxydes ne précipitent pas.

Enfin, calculons le produit de solubilité $[Ln^{3+}]^2[CO_3^{2-}]^3$



Les valeurs β_3^s et $1/K_s$ sont données dans le tableau 4.3, chapitre 4.

Pour calculer $[CO_3^{2-}]$, on ne dispose pas de la mesure de l'alcalinité mais seulement du pH. Il faut donc supposer que la solution est en équilibre avec l'atmosphère. Considérons l'équilibre de dissolution du CO_2 atmosphérique. $3,4 \cdot 10^{-4}$ atm est la valeur habituellement prise (Michard, 1989) pour la pression partielle en CO_2 (PCO_2) dans l'atmosphère au niveau de la mer.



La valeur de $[H_2CO_3]$ est fixée par la loi de Henry $[H_2CO_3] = \alpha PCO_2$ (avec $\alpha = 10^{-1,46}$)
 $= 1,2 \cdot 10^{-5}$ mol/L

Les concentrations $[HCO_3^-]$ et $[CO_3^{2-}]$ sont fixées par le pH et les constantes d'acidité des couples acido-basiques H_2CO_3/HCO_3^- ($pK_{a1} = 6,40$) et HCO_3^-/CO_3^{2-} ($pK_{a2} = 10,3$).

Soit $h = [H_3O^+]$,

$$[HCO_3^-] = K_{a1} [H_2CO_3] / h$$

$$[CO_3^{2-}] = K_{a1} \cdot K_{a2} [H_2CO_3] / h^2$$

Si la solution est en équilibre avec l'atmosphère, le pH fixe la quantité $[CO_3^{2-}]$.

Dans la solution témoin "EN", $pH_{max} = 8,03$ donc $[CO_3^{2-}] = 2,75 \cdot 10^{-6}$ mol/L.

Les produits de solubilité $[Ln^{3+}]^2 [CO_3^{2-}]^3$ sont :

$$[La^{3+}]^2 [CO_3^{2-}]^3 = 2,09 \cdot 10^{-32} > 1/K_{sLa}$$

$$[Sm^{3+}]^2 [CO_3^{2-}]^3 = 1,32 \cdot 10^{-35} \ll 1/K_{sSm}$$

$$[Dy^{3+}]^2 [CO_3^{2-}]^3 = 2,31 \cdot 10^{-35} \ll 1/K_{sDy}$$

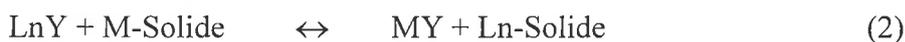
Par conséquent, seul le lanthane peut précipiter dans la solution témoin "EN" à $pH = 8,03$.

7.3.1.3. Interprétation de la cinétique d'adsorption des traceurs sur les alluvions

Byegard et Al. (1999b) expliquent la cinétique d'adsorption des complexes EDTA de lanthanides sur du granite par deux types de réactions d'échange. La première réaction d'échange (1) a lieu avec les cations M en solution ($M = Ca^{2+}, Fe^{3+}, Mn^{3+}$ essentiellement).



La deuxième réaction d'échange (2) a lieu avec les cations adsorbés sur la phase solide ($Ca^{2+}, Fe^{3+}, Mn^{3+}$ mais aussi avec les lanthanides naturels).



Byegard montre de plus que les constantes cinétiques des réactions d'échange avec les cations en solution ou adsorbés sur la phase solide sont plus importantes pour les lanthanides légers que pour les lanthanides lourds qui s'adsorbent donc moins vite.

Sachant que les alluvions de la Loire proviennent en grande partie des formations granitiques du massif central, il n'est guère étonnant d'obtenir des vitesses de fixation des traceurs sur les alluvions relativement voisines de celles que trouvent Byegard et Al (1999b) sur du granite broyé. En effet la mise en contact de 4g de granite broyé entre 0,25 et 0,09 mm avec 8 ml de solution contenant 2 ppm de $Tm-EDTA^-$ conduit à l'adsorption de 30% du Tm au bout de 11 jours. Les résultats que nous obtenons sont donc tout à fait cohérents, du moins en ce qui concerne les lanthanides lourds (Dy).

7.3.1.4. Evolution du rapport Dy/Sm

Comparons maintenant l'évolution du rapport $[Dy]/[Sm]$ dans les flacons (figure 7.28), on observe que les valeurs obtenues au bout de 11 jours sont très proches des valeurs mesurées dans le puits d'injection (figure 7.17). Il y a augmentation progressive de ce rapport en liaison avec la fixation plus rapide du samarium que du dysprosium, observation déjà faite dans les piézomètres J et K (figure 7.18). Il semble également que l'on atteigne un palier à partir de 6 jours d'agitation pour l'argile grise.

7.3.1.5. Interprétation des observations de terrain

En conclusion, les expériences d'adsorption sur le tout venant et l'argile grise confirment, que dans des conditions de pH et de composition chimique de l'eau voisines de celles du terrain, l'adsorption des traceurs sur les alluvions est un phénomène à cinétique rapide pour les lanthanides légers et relativement lente pour les lanthanides lourds.

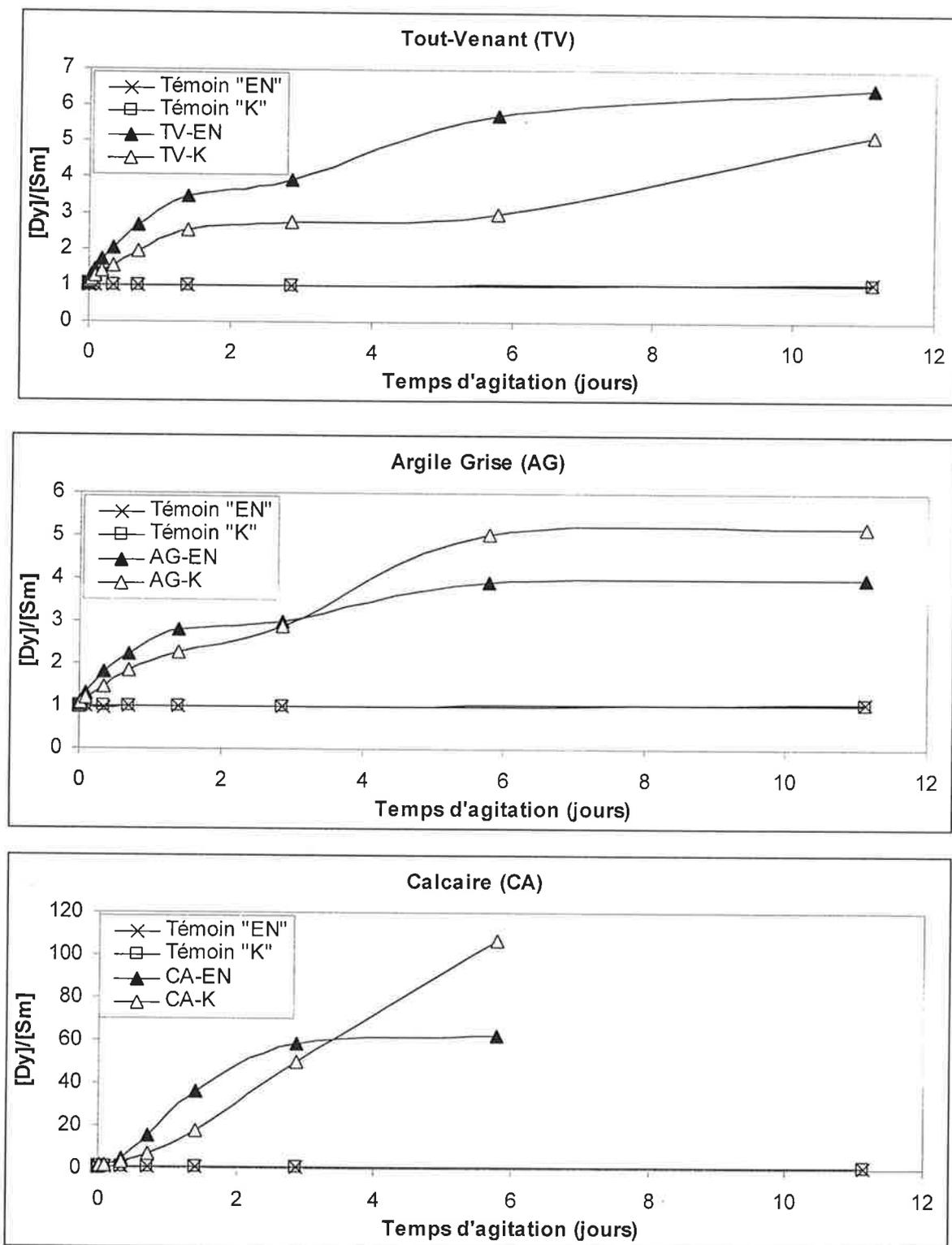


Figure 7.28 : Evolution du rapport $[Dy]/[Sm]$ dans un flacon contenant 2g de sédiment (TV: Tout Venant fin $< 125 \mu m$, AG: Argile Grise, CA: Calcaire de Pithiviers broyé) en contact avec les solutions "K" et "EN" contenant initialement 1 ppm de La, Sm et Dy. Dans les solutions témoins, le rapport Dy/Sm reste constamment égal à 1. Dans les solutions en contact avec les sédiments, le rapport Dy/Sm augmente d'avantage dans la solution contenant du calcaire que dans les solutions contenant des alluvions.

Cela entraîne une augmentation du rapport Dy/Sm. Cette augmentation observée dans les alluvions peut caractériser des périodes où les traceurs sont relativement statiques dans la nappe. A ce moment-là, le comportement des traceurs dans la nappe s'apparente à une expérience en batch. Lorsqu'on observe, au contraire, une diminution de ce rapport dans la nappe, il faut faire intervenir des mouvements de traceurs avec des désorptions des lanthanides légers.

7.3.2. Fixation sur le calcaire

7.3.2.1. Résultats

Les résultats de l'agitation des solutions contenant 1 ppm de La, Sm et Dy avec du calcaire broyé sont présentés figure 7.29. On observe une chute rapide des teneurs en tous les lanthanides injectés dans les flacons. Cette chute a lieu d'abord pour le lanthane, puis pour le samarium, puis pour le dysprosium. La différence avec les alluvions est que l'on parvient plus rapidement à une fixation quasi totale, d'où l'éventualité de deux mécanismes différents: adsorption sur les alluvions et précipitation des carbonates au contact du calcaire.

7.3.2.2. Interprétation

L'éventuelle précipitation des carbonates de lanthanides pourrait être liée à la dissolution de la calcite qui entraîne l'augmentation du pH ainsi que des teneurs en carbonates dans les solutions K et EN.



La dissolution de la calcite est confirmée par l'analyse des éléments majeurs dans la solution K qui ne contient pas de calcium avant sa mise en contact avec le calcaire. Après 5 jours 19h d'agitation, la solution K contient $4,1 \cdot 10^{-4}$ mol/L de calcium.

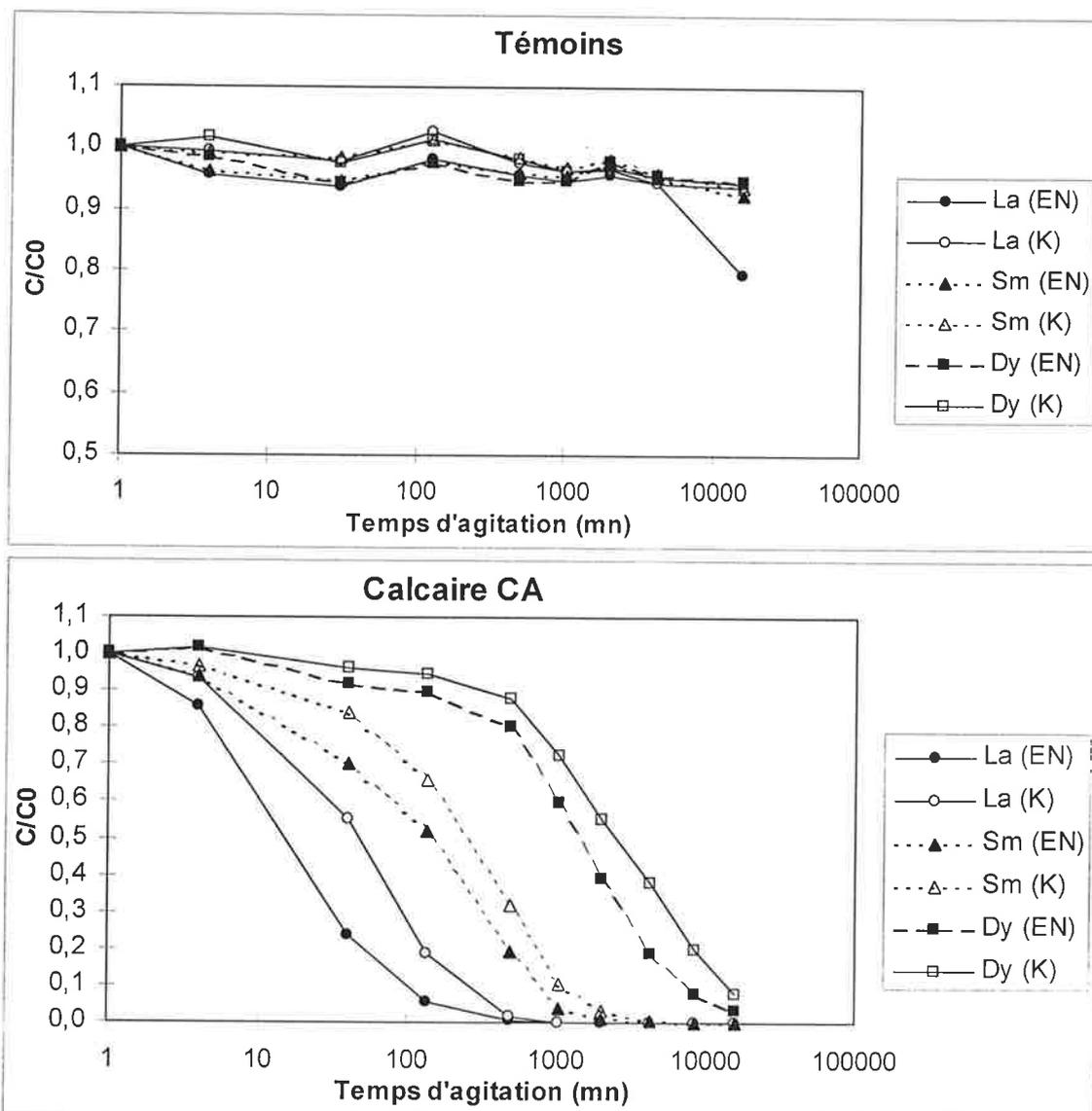
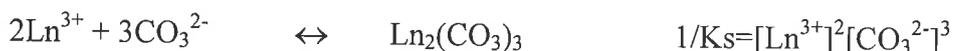


Figure 7.29 : Evolution des teneurs normalisées à la concentration initiale des complexes EDTA de La, Sm et Dy dans les solutions témoins et en solution avec du calcaire de Pithiviers broyé (CA).

Les teneurs initiales en chaque lanthanide sont égales à 1 ppm. Les expériences sont réalisées dans deux solutions différentes, une solution naturelle (EN) d'eau de nappe prélevée dans le piézomètre O puis filtrée, et une solution synthétique KNO_3 0,01 mol/L (K). Le pH des solutions n'est pas tamponné. Dans les solutions témoins, le pH varie de 7,73 à 8,03 dans la solution EN et de 6,31 à 6,48 dans la solution K. Les solutions en équilibre avec le calcaire ont un pH variant de 7,68 à 7,91 dans la solution EN et de 8,48 à 9,08 dans la solution K. La solution EN présente un pH encore réaliste par rapport aux pH observés dans la nappe du calcaire (6,9-7,9). Par contre, le pH de la solution K s'en éloigne beaucoup. Dans la solution témoin EN, les teneurs en lanthane diminuent de 20% à la fin de l'expérience à cause de la précipitation du carbonate de lanthane. Les teneurs en samarium et dysprosium sont quasi constantes. Dans les solutions contenant du calcaire, on observe une chute rapide des trois traceurs. Cette chute s'explique par la précipitation des carbonates de lanthanides.

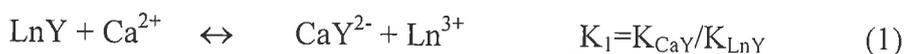
Dans la solution d'eau naturelle qui contient initialement $1,5 \cdot 10^{-3}$ mol/L de calcium, on observe également une augmentation de $3,3 \cdot 10^{-4}$ mol/L de calcium.

La précipitation des carbonates de lanthanides s'effectue selon la réaction:



Vérifions que ces réactions peuvent avoir lieu dans les solutions au contact du calcaire broyé.

Les teneurs en lanthanides sont fixées, à l'équilibre, par la réaction:



$$\text{Où } K_{\text{CaY}} = [\text{CaY}^{2-}] / ([\text{Ca}^{2+}][\text{Y}^{4-}]) \quad \log K_{\text{CaY}} = 10,7$$

$$\text{et } K_{\text{LnY}} = [\text{LnY}^-] / ([\text{Ln}^{3+}][\text{Y}^{4-}])$$

La réaction de précipitation des carbonates de lanthanides dépend étroitement des teneurs en carbonates. Or, ces dernières n'ont pas été mesurées dans les flacons. On ne dispose que du pH.

La première manière d'évaluer $[\text{CO}_3^{2-}]$ est de supposer la solution en équilibre avec l'atmosphère. Comme dans le paragraphe 7.3.1, on calcule:

Dans la solution "CA-EN", $\text{pH}_{\text{max}} = 7,91$ donc $[\text{CO}_3^{2-}] = 1,58 \cdot 10^{-6}$ mol/L

Dans la solution "CA-K", $\text{pH}_{\text{max}} = 9,08$ donc $[\text{CO}_3^{2-}] = 3,46 \cdot 10^{-4}$ mol/L

Les teneurs en lanthanides se calculent à partir de la réaction (1) en tenant compte que l'excès d'EDTA injecté avec les traceurs se trouve intégralement sous la forme CaY^{2-} ($[\text{CaY}^{2-}] = 1,05 \cdot 10^{-5}$ mol/L).

Dans la solution "CA-EN", $[\text{Ca}^{2+}] = 1,8 \cdot 10^{-3}$ mol/L

Dans la solution "CA-K", $[\text{Ca}^{2+}] = 4 \cdot 10^{-4}$ mol/L

En supposant (1) peu déplacée, on calcule $[Ln^{3+}] = K_3 [LnY][Ca^{2+}] / [CaY^{2-}]$

Puis on calcule $[Ln]^2 [CO_3^{2-}]^3$ pour montrer que dans la solution CA-EN, comme dans la solution témoin T-EN (§7.3.1.2), le lanthane précipite. Cependant, ce calcul ne permet pas d'expliquer la précipitation des autres traceurs dans la solution d'eau naturelle. Par ailleurs, le pH de la solution est trop bas pour permettre la précipitation des hydroxydes de lanthanides.

Dans la solution CA-K, la précipitation du lanthane et du samarium s'explique facilement à l'aide du calcul de $[Ln]^2 [CO_3^{2-}]^3$, mais on ne comprend pas pourquoi le dysprosium précipite. En ce qui concerne la formation des hydroxydes, celle-ci n'est pas possible pour les trois lanthanides. Cependant $\log([Dy][OH]^3) = -25,9$ est très proche de $(-\log\beta_3^s) = 25,6^1$.

Il suffit d'une légère hausse de pH pour que l'hydroxyde de dysprosium précipite dans la solution K. Le problème de la précipitation du samarium et du dysprosium reste cependant irrésolu dans la solution CA-EN.

Considérons maintenant que les carbonates ne sont pas en équilibre avec l'atmosphère mais avec la calcite selon l'équilibre suivant:



Recalculons $[CO_3^{2-}]$ selon la réaction ci-dessus:

$$[CO_3^{2-}] = 4,95 \cdot 10^{-6} \text{ mol/L pour la solution CA-EN}$$

$$[CO_3^{2-}] = 2,23 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L pour la solution CA-K}$$

Dans ces conditions, seul le lanthane peut précipiter dans les solutions CA-K et CA-EN.

¹ β_3^s correspond à la réaction : $Ln(OH)_3 \quad \leftrightarrow \quad Ln^{3+} + 3OH^- \quad \beta_3^s = 1 / ([Ln^{3+}][OH^-]^3)$

On peut également expliquer la chute des teneurs en dysprosium en supposant que l'on est en sursaturation vis-à-vis de la calcite et que les teneurs en carbonates sont plus importantes qu'à l'équilibre. D'autre part, l'évolution rapide des teneurs en traceurs montre que l'on est dans une situation hors équilibre avec des teneurs en carbonates non contrôlées. Il est également très probable que les lanthanides aient une forte affinité pour des formes colloïdales se formant au cours de l'agitation. Tout cela montre qu'il est difficile de pouvoir donner une interprétation complète des résultats obtenus dans les expériences d'adsorption sur le calcaire broyé par la seule chimie en solution des lanthanides.

7.3.2.3. Evolution du rapport Dy/Sm

Dans la solution de traceurs au contact du calcaire, le rapport Dy/Sm augmente constamment au cours du temps (figure 7.28) et atteint des valeurs beaucoup plus importantes que dans les alluvions. Les lanthanides légers sont par conséquent beaucoup moins stables dans ce milieu que dans les alluvions.

7.3.2.4. Calcul des produits de solubilité des carbonates dans le piézomètre

Pf1

On observe, dans le piézomètre Pf1, une chute très rapide des teneurs en lanthane qui peut s'expliquer, comme en batch, par la précipitation du carbonate. Etudions la situation d'un peu plus près.

En Pf1, le pH est égal à 7,00 dans la partie crépinée. L'alcalinité est égale à 4,8 mmol/L, $[\text{CO}_3^{2-}] = [\text{HCO}_3^-] \cdot K_{a2} / [\text{H}_3\text{O}^+] = 2,4 \cdot 10^{-6}$ mol/L, $[\text{Ca}^{2+}] = 3 \cdot 10^{-3}$ mol/L. En reprenant le calcul des concentrations en lanthanides à partir de l'équation (1), on montre que seul le lanthane peut précipiter dans le cas où les teneurs en solution sont égales à 1 ppm. Une partie

du lanthane précipite donc dans la nappe au moment de l'injection. C'est pourquoi les teneurs observées en Pfl sont très faibles.

7.3.3. Bilan sur les expériences d'adsorption

Les expériences d'adsorption réalisées sur les sédiments permettent de confirmer les résultats de terrain à savoir le fractionnement entre les lanthanides légers et les lanthanides lourds. Même si plusieurs processus de fixation ont lieu à la fois dans les alluvions et le calcaire (précipitation, adsorption sur les argiles ou la calcite), la rétention des lanthanides est toujours plus importante pour les lanthanides légers que pour les lourds. La précipitation du carbonate de lanthane explique que l'on n'observe jamais longtemps cet élément en solution dans tous les traçages réalisés. Enfin, d'après les expériences en batch, le fractionnement entre terres rares lourdes et terres rares légères est plus important au contact du calcaire que des alluvions.

7.3.4. Désorption des lanthanides naturels

La désorption des lanthanides a fait l'objet de plusieurs expériences. La première a consisté à mettre les traceurs au contact d'une solution de CaCl_2 0,5 mol/L. La deuxième a consisté à acidifier les sédiments à l'eau distillée pH=2. La troisième a consisté à laver les sédiments avec des solutions extractives à l'EDTA. Les conditions expérimentales décrites au chapitre 5 et les résultats de ces expériences sont récapitulés dans le tableau 7.5.

7.3.4.1. Désorption au CaCl_2 0,5 M

Une solution de CaCl_2 0,5 mol/L est mise au contact de deux types de sédiments : des boues argileuses prélevées dans le puits d'injection (Sed I), le 12/5/98, et de l'argile grise (AG) récoltée à la tarière lors des sondages de reconnaissance de septembre 1997.

Tableau 7.5: Extraction des lanthanides des sédiments de Sandillon à l'aide de diverses solutions extractives – Concentrations en solution après agitation.

	CaCl ₂ 0,5M		EDTA 5.10 ⁻³ M			EDTA 5.10 ⁻² M			Eau distillée pH=2
Volume de solvant (ml)	30	30	50	50	50	50	50	50	50
Sédiment	Sed I	AG	TV	AG	CAI	TV	AG	CAI	TV
masse de sédiment (g)	1	1	5	5	5	5	5	5	5
Durée d'agitation (h)	12	12	2	2	2	2	2	2	2
Concentrations en solution (ppb)									
La	1,22	1	153	538	<LD	254	693	1,8	26,35
Ce	0,06	1,3	169	286	<LD	367	718	1,4	33,36
Pr	0,01	<LD	45	144	<LD	88	196	0,16	6,16
Nd	<LD	<LD	210	629	<LD	333	836	1,6	24,32
Sm	0,13	<LD	51	137	<LD	90	188	1	5,47
Eu	<LD	<LD	14	38	<LD	26	53	<LD	1,79
Gd	<LD	<LD	62	158	<LD	87	190	1,7	6,16
Tb	<LD	<LD	10	24	<LD	14	30	<LD	0,95
Dy	0,16	<LD	60	135	<LD	86	162	2,8	5,3
Ho	<LD	<LD	12,5	26,5	<LD	17,1	34	0,3	1,0
Er	<LD	<LD	34,4	73	<LD	47	91	2,1	2,6
Tm	<LD	<LD	4,2	9	<LD	5,5	11	<LD	0,35
Yb	<LD	<LD	27	53	<LD	36	66	2	1,99
Lu	<LD	<LD	3,5	8	<LD	5	9,6	<LD	0,27

LD: Limite de détection

Sed I: Sédiments du puits d'injection contaminés en La, Sm et Dy

AG: Argile Grise

TV: Tout venant fin (fraction tamisée <125µm)

CAI: Calcaire de Pithiviers

NB: Tous les sédiments sont broyés en dessous de 125 µm

Comparativement à l'acidification et au lavage à l'EDTA, les lanthanides naturels ou artificiels ne sont quasiment pas désorbés. Les argiles grises ne libèrent que les lanthanides légers La et Ce alors que les sédiments du puits d'injection ne libèrent que les traceurs adsorbés et sous forme de traces seulement ([La]=1,6 ppb, [Sm]=0,13 ppb et [Dy]=0,16 ppb).

Comparons les concentrations en La, Sm, Dy et Th¹ du sédiment du puits d'injection ([La]=129 ppm, [Sm]=53 ppm, [Dy]=18 ppm et [Th]=19,1 ppm) à celles de l'argile grise non contaminée en traceurs ([La]=49 ppm, [Sm]=8 ppm, [Dy]=5 ppm et [Th]=19,6 ppm).

Si tout le traceur fixé sur le sédiment Sed I était libéré en solution (cas d'une adsorption non spécifique des lanthanides traceurs), on devrait obtenir en solution [La]=2,7 ppm, [Sm]=1,5ppm et [Dy]=0,43 ppm. Or les concentrations des lanthanides libérés en solution sont au moins 2000 fois inférieures. Ce qui prouve que l'adsorption des lanthanides injectés comme des lanthanides naturels est spécifique, c'est-à-dire que la liaison entre les sites d'adsorption et les lanthanides est forte.

7.3.4.2. Désorption à l'EDTA et par acidification

L'acidification du tout venant alluvionnaire libère l'ensemble des lanthanides naturels adsorbés sur les argiles de manière importante (figure 7.30). Le lavage à l'EDTA libère une quantité encore plus importante de lanthanides que la simple acidification. L'augmentation de la concentration en EDTA d'un ordre de grandeur ne fait que multiplier les concentrations en solution par un facteur allant de 1,2 à 2,5 pour les argiles (TV et AG). Par contre, dans le calcaire, seule la solution EDTA la plus concentrée permet de libérer les terres rares présentes

¹ Les teneurs en thorium permettent de s'affranchir de la dilution des sédiments par la silice. Ici, AG et Sed I possèdent des teneurs en Th quasi identiques. Ils présentent donc le même taux de dilution par la silice et peuvent être comparés directement, AG servant de référence de sédiment « non contaminé ».

dans le sédiment CB (Calcaire de Pithiviers broyé). Afin d'étudier si un fractionnement avait lieu entre lanthanides légers et lanthanides lourds, lors des extractions par acidification et à l'EDTA, les teneurs des terres rares en solution ont été normalisées à la croûte continentale moyenne ainsi qu'aux sédiments extraits (figure 7.30).

Les concentrations en terres rares des sédiments extraits sont données dans le tableau 7.4. Les analyses des sédiments par activation neutronique ne fournissant pas les teneurs en toutes les terres rares, les teneurs en terres rares manquantes (Pr, Gd, Ho, Er, Tm et Lu) ont été calculées par interpolation linéaire des teneurs normalisées à la croûte continentale. Cette interpolation se justifie par la régularité du profil normalisé à la croûte.

Les profils de normalisation aux sédiments (figure 7.30) présentent une forte anomalie en cerium s'expliquant par le degré d'oxydation IV de cet élément qui se trouve donc mieux retenu par les argiles et donc moins facilement remobilisable à la fois par acidification et par complexation.

Les profils de normalisation aux sédiments présentent également un enrichissement en terres rares lourdes augmentant du lanthane au dysprosium, puis un appauvrissement léger en terres rares lourdes du dysprosium au lutétium. Cette distribution concave des lanthanides en solution a déjà été rencontrée par Sholkovitz (1995) lors d'expériences similaires d'acidification à l'acide acétique de matière en suspension des sédiments. Cette distribution est très certainement liée à un effet de compétition entre la complexation des lanthanides à l'EDTA (réaction 1) et la rétention des lanthanides à la surface des sédiments (réaction 2).



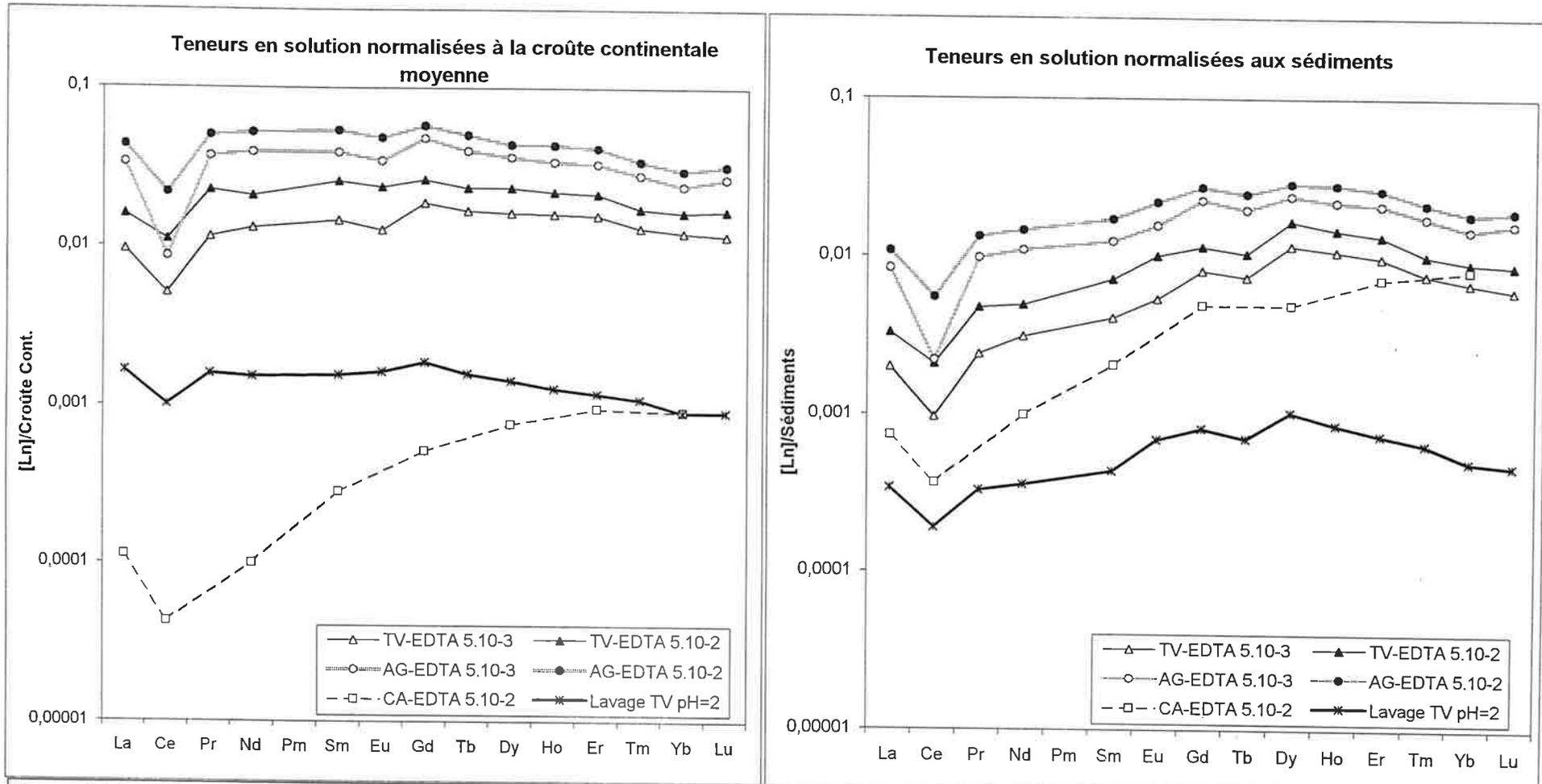


Figure 7.30 : Courbes de normalisation à la croûte continentale et aux sédiments, des lanthanides mis en solution par lavage des sédiments à l'EDTA ou par acidification à pH=2. Deux solutions d'EDTA sont utilisées : une solution 5.10^{-2} mol/L et une solution 5.10^{-3} mol/L. Même si elle est moins efficace, l'acidification du tout venant fin TV provoque le même effet que le lavage à l'EDTA de ce même sédiment TV et de l'argile grise AG à savoir une désorption préférentielle des lanthanides lourds en allant du lanthane au dysprosium et, au delà du dysprosium, un appauvrissement en lanthanides lourds. Les teneurs en terres rares remobilisées par le lavage du calcaire à l'EDTA 5.10^{-3} mol/L ne sont pas détectables. Une quantité plus importante de lanthanides est extraite du calcaire avec la solution concentrée d'EDTA 5.10^{-2} mol/L. Ce dernier profil est différent des autres : par rapport à la croûte continentale, la distribution des lanthanides remobilisés présente un enrichissement constant en lanthanides lourds du lanthane à l'ytterbium. Cet enrichissement est également très prononcé sur la normalisation au calcaire. L'anomalie négative en cérium présente sur toutes les courbes est due à la moins bonne remobilisation de cet élément à cause de son degré d'oxydation IV.

La réaction (2) possède une constante d'équilibre qui augmente des lanthanides légers aux lanthanides lourds. Comme cette discontinuité apparaît à la fois lors de l'extraction à l'eau acidifiée et lors des lavages à l'EDTA, il faut remplacer, dans la réaction (2), le terme Ln^{3+} par H^+ dans le cas de l'acidification. Par contre la cassure est moins franche pour le lavage à l'EDTA du calcaire CA1 ce qui traduit la différence de rétention entre les sédiments argileux et calcaires. Si l'on peut écrire la réaction (2) pour le calcaire, les constantes d'équilibre de ces réactions de surface sont inférieures à celles des sédiments argileux.

L'extraction des terres rares par l'EDTA réalisée en batch confirme que l'augmentation des teneurs en lanthanides naturels, lors des traçages dans les piézomètres I et Pf1-Pf2, provient bien de l'excès d'EDTA introduit dans la nappe alluviale.

Comparons maintenant les résultats des expériences de désorption en batch avec les profils des lanthanides obtenus dans les piézomètres lors des deux traçages réalisés dans la nappe alluviale en I le 17/3/97 et en Pf2 le 19/5/00 (figure 7.31).

Les teneurs obtenues dans les piézomètres sont sans aucun doute possible très enrichies en lanthanides lourds par rapport aux désorptions réalisées en batch. Cette observation est vraie également dans le piézomètre d'injection I où l'on pourrait s'attendre à des différences moins sévères entre lanthanides lourds et lanthanides légers. Cette différence a plusieurs causes qui s'additionnent :

- La première cause est la plus grande stabilité des complexes EDTA de lanthanides lourds qui vont pouvoir rester en solution préférentiellement aux lanthanides légers. Dans les premières heures qui suivent l'injection, il y a d'abord remobilisation des lanthanides naturels par l'excès d'EDTA, puis étalement des traceurs autour du puits d'injection qui entraîne la fixation très rapide des lanthanides légers. (§7.2.3).

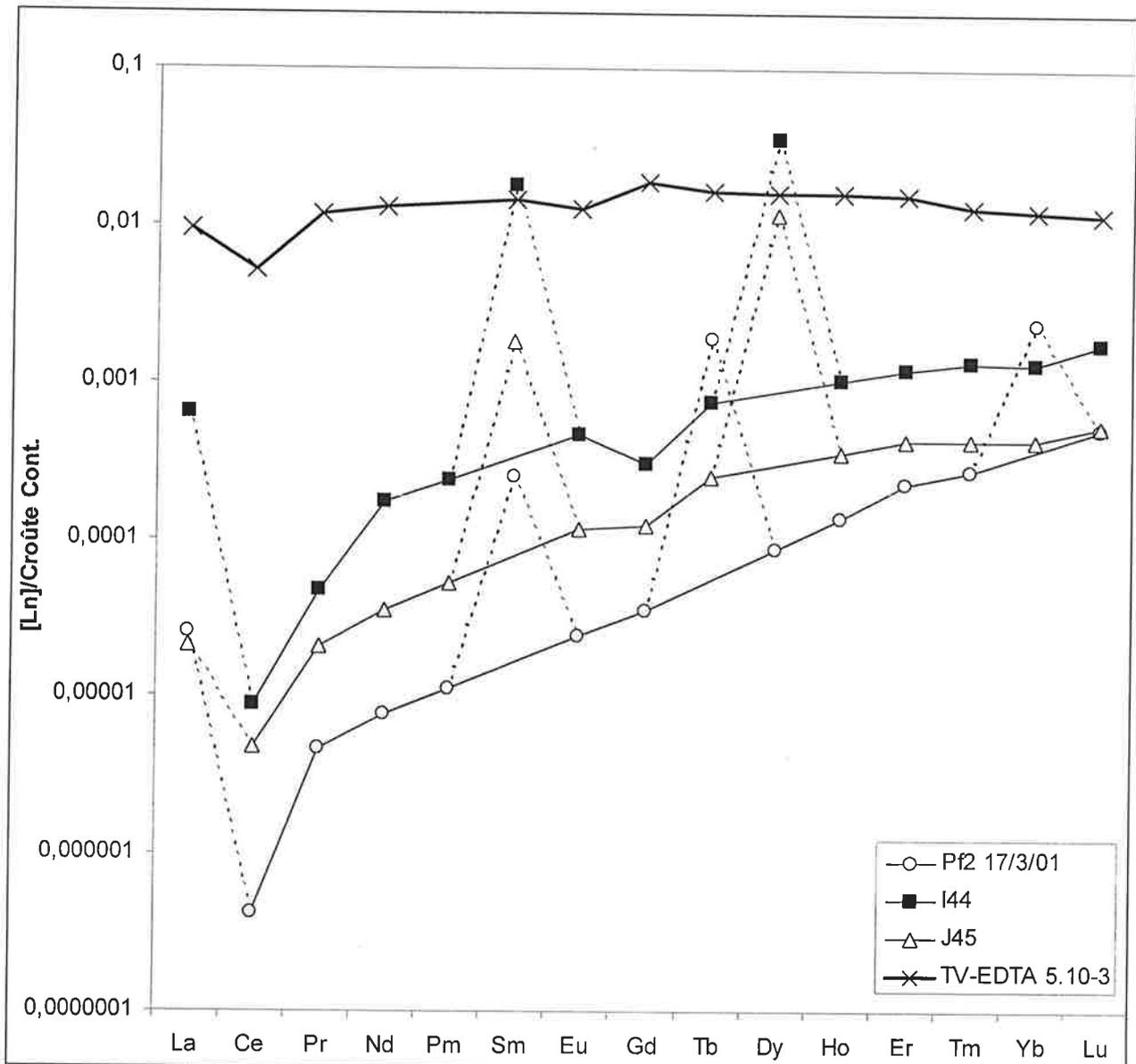


Figure 7.31: Comparaison des distributions normalisées à la croûte continentale moyenne des teneurs en lanthanides dans la nappe alluviale après injection de complexes EDTA et des distributions obtenues après désorption en batch, à l'EDTA $5 \cdot 10^{-3}$ M, des lanthanides naturels fixés sur le tout venant alluvionnaire TV ($<125 \mu\text{m}$).

Dans la nappe, comme en batch, la désorption des lanthanides naturels, par l'excès d'EDTA, se traduit par une anomalie négative en cérium. Dans la nappe, on observe, par rapport au batch, un appauvrissement régulier en lanthanides légers, du lutétium au praseodyme. Cet appauvrissement est lié à la fixation préférentielle des complexes EDTA de lanthanides légers sur les alluvions.

- La seconde cause est la présence d'une phase colloïdale enrichie, par rapport à la solution, en lanthanides légers. Après agitation, en batch, des sédiments argileux, puis filtration à $0,22\ \mu\text{m}$, la quantité de colloïdes est certainement peu négligeable. Il s'en suit certainement une surestimation, dans les expériences batch, de la quantité de lanthanides légers "désorbés". Dans la nappe, les colloïdes ont tendance, dans les périodes statiques, à décanter au fond des piézomètres. Ce sont alors majoritairement les lanthanides en solution sous formes d'ions complexés à l'EDTA qui sont détectés dans la nappe. Cette fraction possède bien un profil incliné favorisant les lanthanides lourds.

Le rôle joué par les colloïdes sera étudié de plus près dans le paragraphe 7.4.

7.3.5. Etude de la réversibilité de l'adsorption des complexes EDTA de lanthanides.

Cette expérience est décrite dans le chapitre 5. Les complexes EDTA de La, Sm, Dy et Yb sont d'abord adsorbés sur du tout-venant fin puis désorbés par remise en contact du tout-venant contaminé avec la solution "EN". La quantité F de traceur adsorbé par gramme de sédiment en fin d'adsorption (F_{ads}) et de désorption (F_{irr}) est tracée figure 7.32 en fonction de la concentration C des traceurs en solution. Cette expérience montre que la réaction d'adsorption des complexes EDTA de lanthanides n'est pas réversible. En effet, la quantité de traceurs fixés ne varie pratiquement pas lors de la « désorption ».

Cette expérience montre, qu'en l'absence de changement de pH ou d'apport supplémentaire de ligands EDTA, les complexes EDTA de lanthanides qui se fixent sur les sédiments argileux sont retenus de manière quasi-irréversible dans les alluvions. C'est bien ce que l'on observe dans le piézomètre I (figure 7.10).

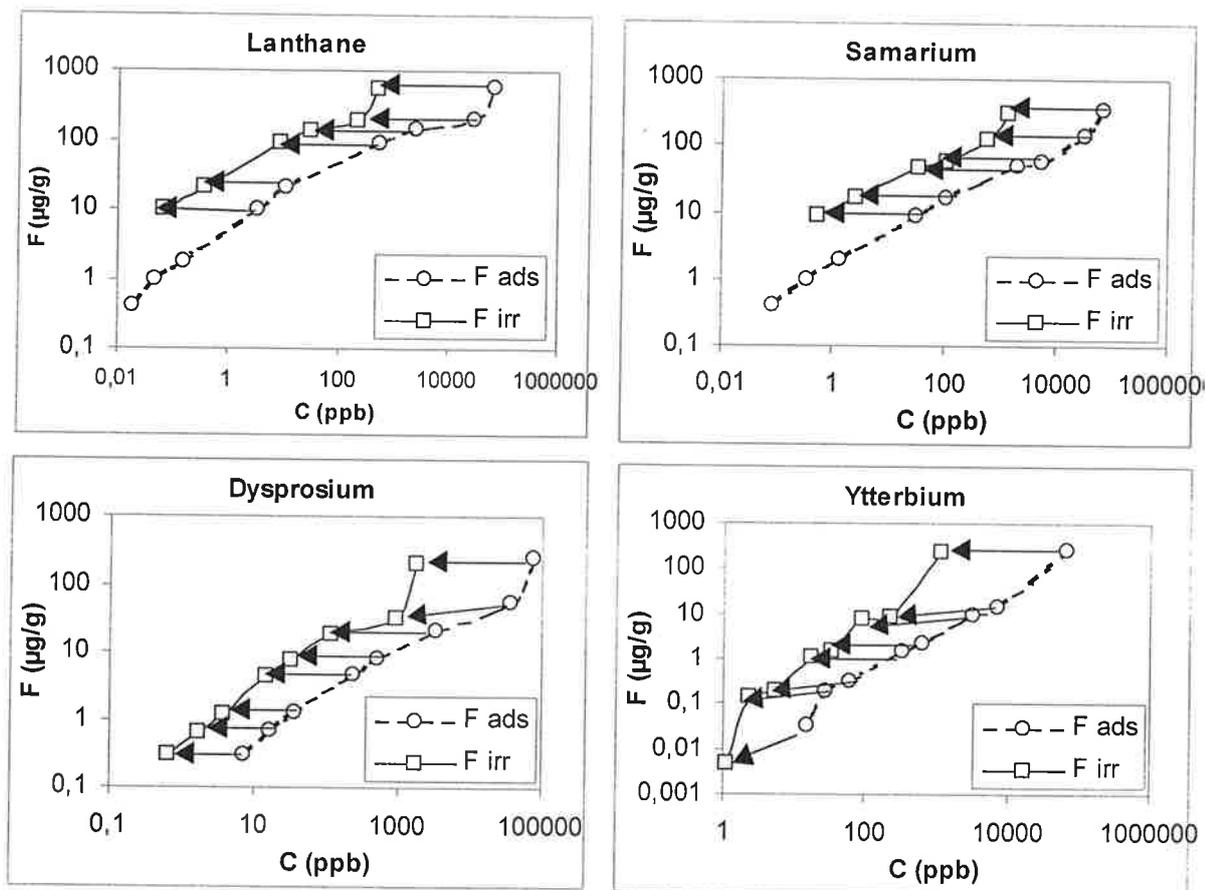


Figure 7.32 : Etude de la réversibilité de l'adsorption des complexes EDTA de lanthanides sur le tout venant.

F est la masse de traceur fixée par gramme de sédiment. Fads représente la masse de traceurs fixée en fin d'adsorption. Firr est la masse de traceurs toujours fixée en fin de désorption. Les flèches représentent la désorption des traceurs. Les faibles teneurs observées en solution en fin de désorption sont certainement en partie issues de la solution obtenue à la fin de l'adsorption et non totalement évacuée des sédiments lors de la filtration.

7.4. Implication des colloïdes dans le transport des lanthanides naturels et des lanthanides injectés sous forme de complexes EDTA

Les expériences décrites dans les paragraphes précédents montrent qu'en l'absence d'un excès d'EDTA, les lanthanides introduits dans la nappe sous forme de complexes EDTA se fixent de manière irréversible sur les alluvions avec des taux de fixation inversement proportionnels aux constantes de stabilité de ces complexes. C'est bien ce que l'on observe sur les sédiments du piézomètre d'injection I (§7.2.3). Or, la diminution des rapports lanthanides lourds/lanthanides légers observée dans tous les piézomètres où des traceurs ont été détectés ne peut s'expliquer que par une remise en "solution" des lanthanides légers.

La prise en compte d'une phase colloïdale sur laquelle se seraient fixés préférentiellement les lanthanides légers pourrait expliquer les variations de ces rapports autour d'une valeur d'équilibre correspondant au rapport des espèces ioniques en solution.

Certaines observations déjà faites précédemment vont dans ce sens:

- la diminution du rapport Dy/Sm en fonction de la profondeur (figure 7.19) peut traduire la décantation de colloïdes ayant fixé préférentiellement le samarium,

- le contraste observé entre Pf1 et Pf2 dans les distributions de lanthanides (figure 7.26). Alors que ces distributions sont constantes dans le piézomètre calcaire Pf1, elles varient de manière importante au cours du temps pour les terres rares légères dans le piézomètre alluvionnaire Pf2. Ces variations en Pf2 peuvent être liées à celles des teneurs en colloïdes. Dans Pf1, ces variations en lanthanides légers sont moins importantes en raison de la filtration probable des colloïdes entre les alluvions et le calcaire. Il est possible aussi de retenir l'hypothèse de la formation, en milieu carbonaté, de complexes mixtes EDTA-carbonates dont la structure et les constantes de stabilité ont été déterminées par Dumonceau et Al. (1980). Ces complexes mixtes seraient responsables d'un meilleur maintien en solution des lanthanides dans la partie calcaire de la nappe, diminuant ainsi l'importance des colloïdes.

Le paragraphe suivant montre comment les variations des teneurs en colloïdes affectent les distributions des lanthanides dans la nappe en l'absence d'un ligand complexant. Le deuxième paragraphe est consacré à l'interprétation des distributions obtenues en présence d'EDTA dans les piézomètres Pf1 et Pf2 à la lumière de ces nouveaux résultats.

7.4.1. Distribution des lanthanides dans la nappe en l'absence de ligand complexant fort

On a recherché, au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire, des variations importantes en lanthanides naturels. La difficulté de filtration de l'eau du piézomètre X durant certaines périodes laissait penser que des espèces de tailles voisines de $0,22\ \mu\text{m}$ pouvaient être présentes en quantités importantes au niveau de ce piézomètre. Il s'est en effet avéré, après l'analyse de l'eau du piézomètre X, que les terres rares naturelles sont exceptionnellement abondantes au niveau de ce forage en particulier en période de crue (figure 7.34). Leur analyse ne nécessite d'ailleurs pas de pré-concentration. De plus, ces teneurs en lanthanides naturels sont souvent largement supérieures à celles rencontrées dans les autres piézomètres comme Z, ou encore dans la Loire (figure 7.33). Les variations de ces teneurs au cours du temps sont par ailleurs corrélées aux fluctuations de la Loire (figure 7.34). Cela indique un passage de colloïdes dont le débit dans X varie en fonction des fluctuations de la Loire comme dans le cas des traceurs injectés en I. Des expériences de filtration réalisées avec des filtres de porosités décroissantes et reportées sur la figure 7.35 prouvent de façon irréfutable que les teneurs exceptionnellement élevées en lanthanides dans X sont proportionnelles à la quantité de colloïdes qui y circulent.

Normalisées à la croûte continentale moyenne (figure 7.33), les distributions des lanthanides dans le piézomètre X présentent un profil relativement horizontal avec un

décrochement à partir du terbium ainsi qu'une anomalie négative en cérium plus prononcée que dans la Loire. Dans le piézomètre Z, les teneurs en lanthanides sont caractérisées par un appauvrissement en lanthanides légers alors que les concentrations en ytterbium et lutétium sont identiques à celles mesurées en X avant le passage des solutions fortement colloïdales. Le rôle combiné de la filtration des colloïdes et de la forte stabilité des complexes de lanthanides lourds rend compte des différences des courbes de distribution des lanthanides dans Z et dans X. Autrement dit, la quantité de colloïdes est moins importante en Z, laissant apparaître le rôle des complexes en solution tels que les carbonates complexes dont les constantes de stabilité augmentent de plusieurs ordres de grandeur en allant du lanthane au lutétium.

La participation de la phase colloïdale au transport des lanthanides qui vient d'être mise en évidence dans ce travail rejoint les conclusions de nombreux auteurs (Sholkovitz, 1992, 1995; Alaux-Négrel, 1991). En l'absence d'un ligand complexant fort, on observe que les lanthanides sont transportés essentiellement par les colloïdes. Ces derniers portent l'ensemble des lanthanides selon une distribution ne fractionnant pas de manière importante les terres rares par rapport aux abondances de la croûte continentale moyenne, préservant ainsi la mémoire héritée de l'altération continentale. Cette conservation de la mémoire implique que lors de cette altération, les lanthanides ne passent pas en solution et que les premières phases colloïdales soient formées directement à partir d'entités structurales appartenant aux phases minérales dégradées lors de l'altération des roches continentales.

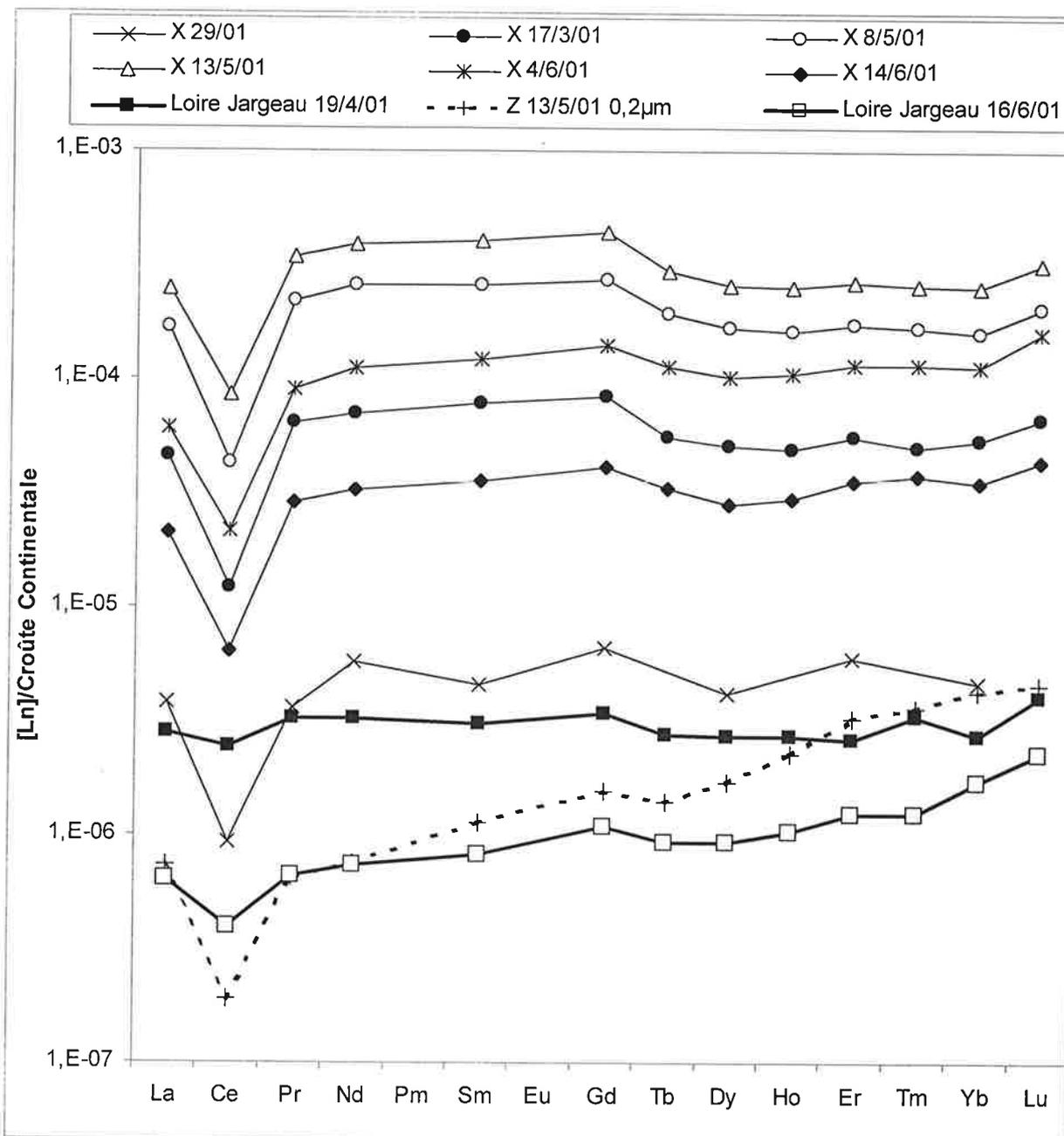


Figure 7.33: Distributions des lanthanides naturels normalisées à la croûte continentale moyenne dans les eaux de nappe (X, Z), et de la Loire à Jargeau.

La normalisation à la croûte continentale fait apparaître que les colloïdes détectés dans X sont significativement enrichis en lanthanides légers et fortement appauvris en cérium. Le décrochement légers/lourds intervient au niveau du terbium traduisant un contraste de stabilité entre l'ensemble des lanthanides légers et lanthanides lourds à partir du terbium (y compris). Lorsque les teneurs en colloïdes augmentent, les concentrations en tous les lanthanides augmentent de manière homogène. Le piézomètre Z représente une eau moins chargée en colloïdes. Il se caractérise par un appauvrissement régulier en lanthanides légers alors que les lanthanides lourds sont préférentiellement maintenus en solution par des ions complexants (carbonates). La distinction entre X et Z se retrouve pour la Loire en période de crue (19/4/01) et en période d'étiage (16/6/01). Le profil horizontal en période de crue s'explique par la présence de colloïdes. A l'étiage, ces derniers ont décanté et/ou coagulé, laissant apparaître le rôle des complexes qui favorisent le maintien en solution des lanthanides lourds. La distinction Loire/nappe est visible sur l'anomalie négative en cérium bien plus prononcée dans la nappe que dans la Loire.

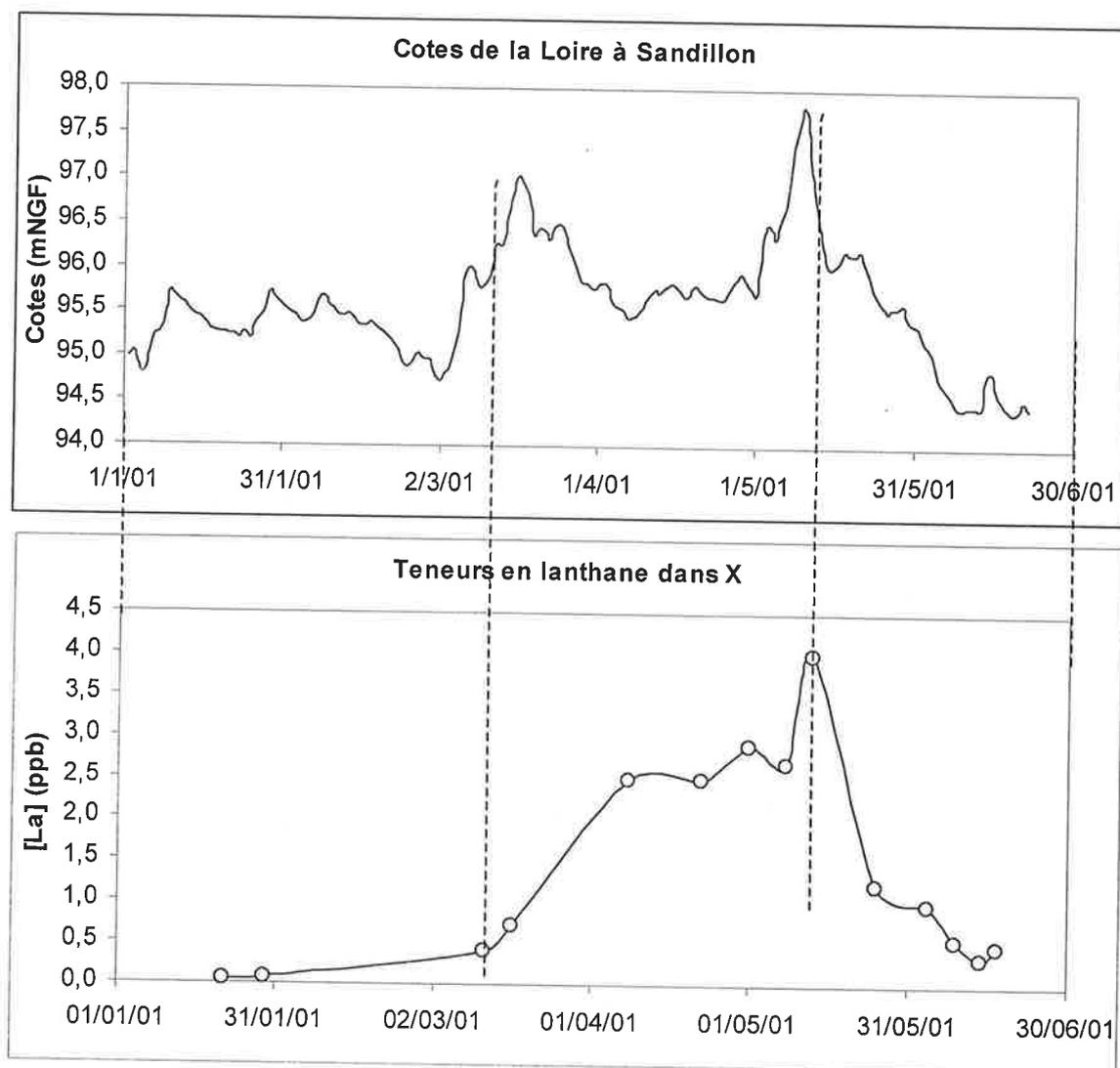


Figure 7.34: Evolution des teneurs en lanthane dans le piézomètre X en fonction des fluctuations des cotes de la Loire.

Les lanthanides légers étant préférentiellement portés par les colloïdes dans la nappe, c'est le lanthane qui a été choisi comme indice des variations des teneurs en colloïdes dans le piézomètre X. L'augmentation des teneurs en colloïdes dans X est liée aux remontées de la Loire, le maximum mesuré étant atteint au moment de la crue de Mai 2001. Les teneurs en colloïdes diminuent à partir du début de la période d'étiage.

Ce résultat confirme aussi le contrôle des transferts d'éléments dans la nappe par la cote et le débit de la Loire.

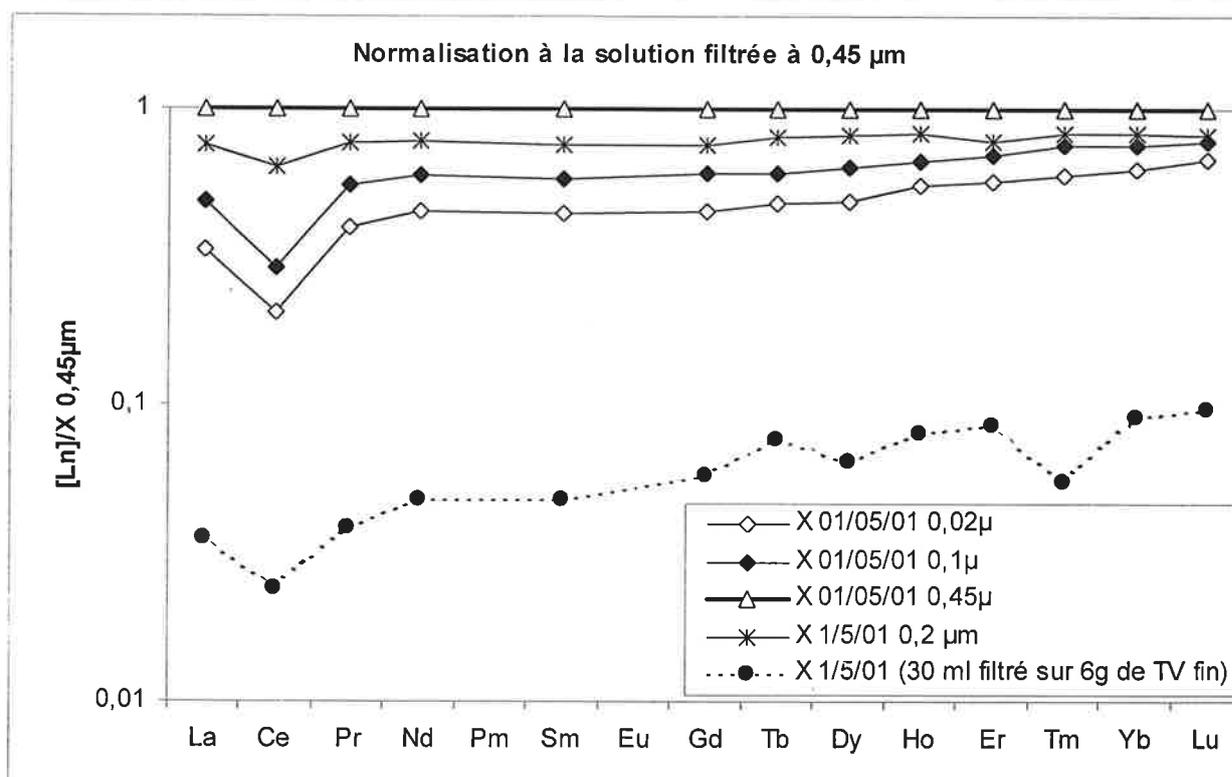
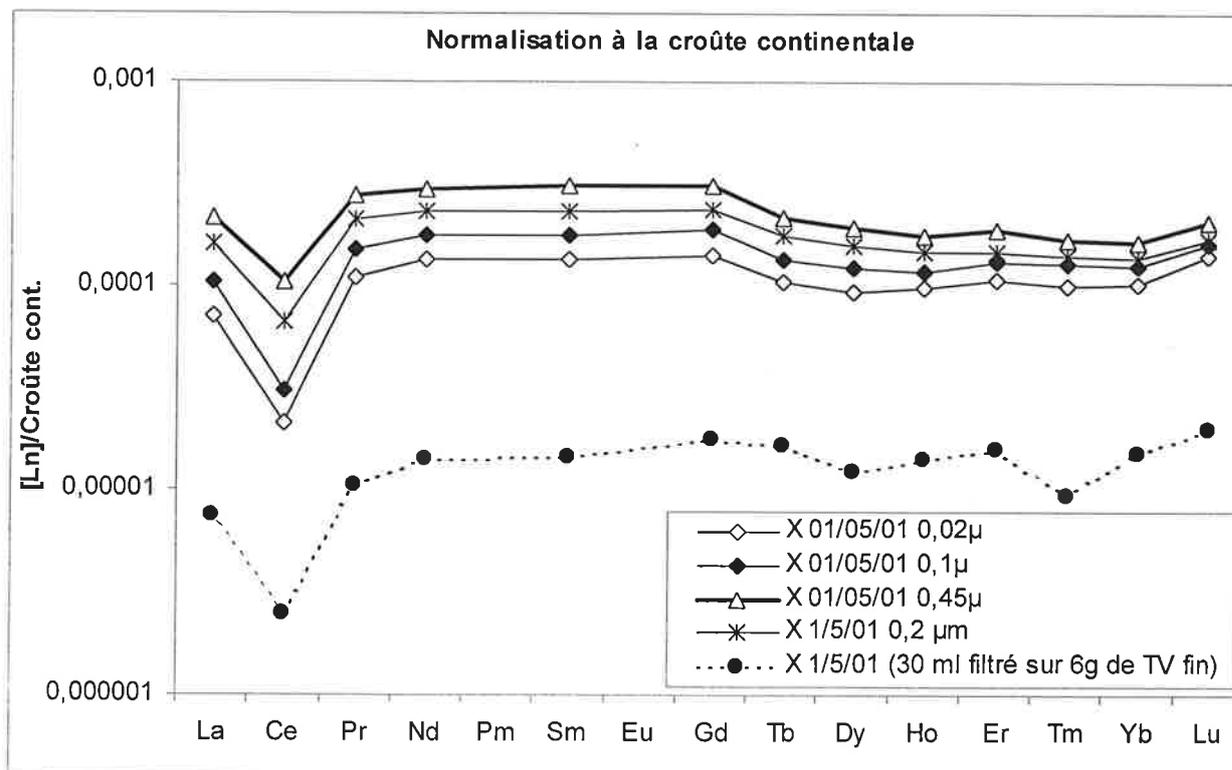


Figure 7.35: Filtration sur des filtres de porosités décroissantes et sur du tout venant alluvionnaire fin (< 125 µm) d'un échantillon d'eau de nappe prélevé dans le piézomètre X le 1/5/01.

La filtration de l'échantillon X sur des filtres de porosité de plus en plus faible conduit à un abaissement des teneurs en tous les lanthanides et à l'amplification de l'anomalie négative en cérium. La normalisation à la solution initiale (filtrée à 0,45 µm) montre que les solutions filtrées présentent une diminution des concentrations de l'ensemble des lanthanides et un faible appauvrissement régulier en lanthanides légers. La filtration sur le tout venant fin (TV fin) est la plus efficace.

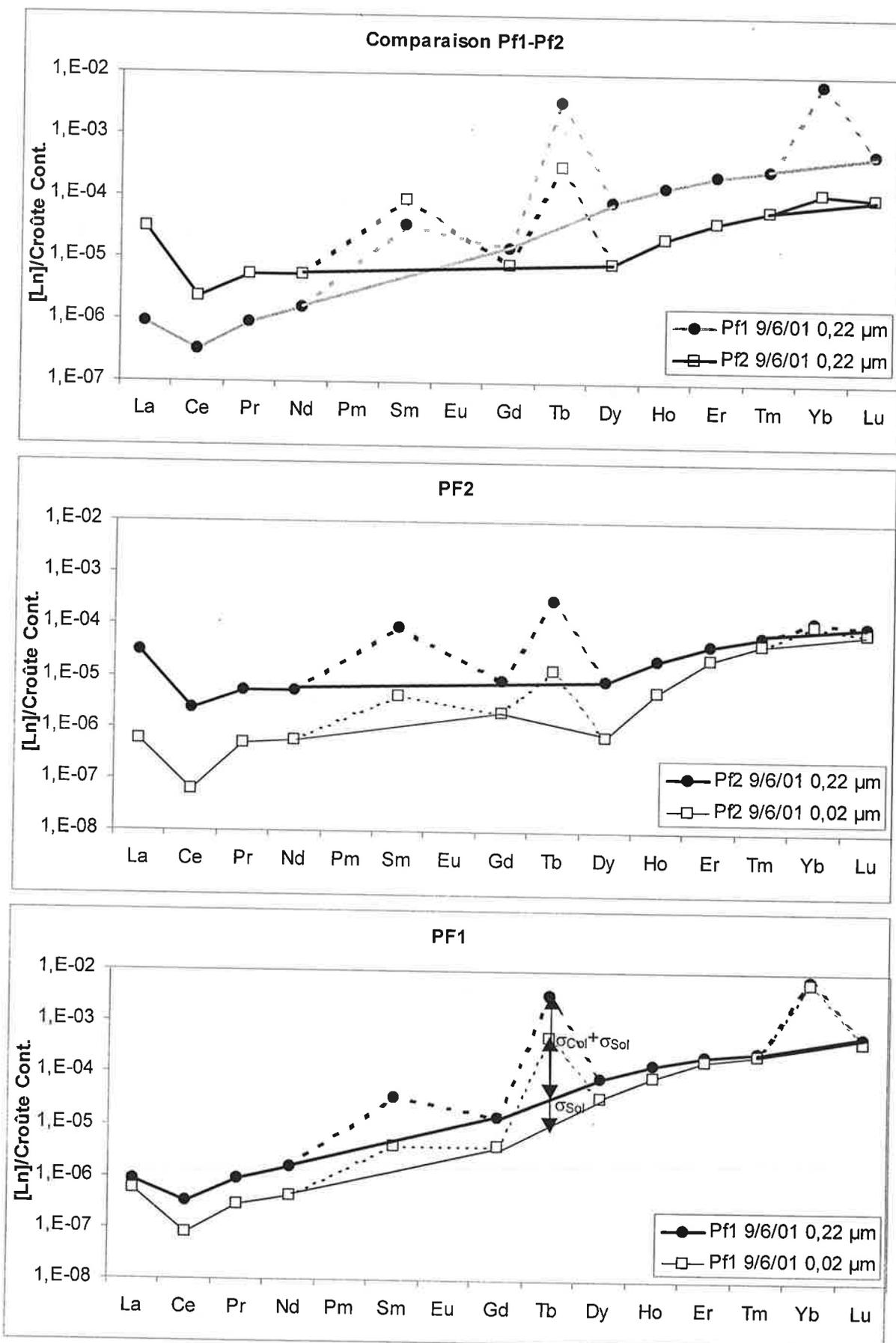


Figure 7.36: Effet de la filtration à $0,02 \mu\text{m}$ sur les distributions des lanthanides en Pf1 et Pf2

7.4.2. Fractionnement des lanthanides dans la nappe en présence d'un ligand complexant fort

Le cas des piézomètres Pf1 et Pf2 montre qu'en présence d'EDTA, les distributions des lanthanides normalisées à la croûte continentale moyenne présentent une allure bien différente de celles obtenues en X. La présence d'EDTA favorise le maintien en solution des lanthanides lourds. Les expériences de filtration à 0,02 μm (figure 7.36) montrent que la filtration appauvrit la solution en lanthanides légers (du La au Gd). L'effet de la filtration diminue progressivement du Tb au Lu, ce dernier élément étant intégralement sous forme de complexe en solution puisque la filtration n'a pas d'effet sur sa concentration.

Les distributions en lanthanides sont différentes entre Pf2 et Pf1. Les profils dans les alluvions sont quasi horizontaux pour les lanthanides légers, en raison de la prédominance des colloïdes, confirmée par un abaissement de la courbe de distribution des éléments légers, lors de la filtration à 0,02 μm , plus important en Pf2 qu'en Pf1. En Pf1, les distributions sont plus régulières. Elles présentent un enrichissement régulier en lanthanides lourds du La au Lu qui montre le rôle prédominant des complexes fractionnant les lanthanides de manière régulière du La au Lu.

Les expériences de filtration en Pf1 et Pf2 permettent de calculer les quantités de traceurs fixés sur les colloïdes. Si σ_{tot} est l'excès lié aux traceurs dans la fraction $<0,22 \mu\text{m}$, $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{col}} + \sigma_{\text{sol}}$, σ_{col} étant l'excès fixé sur les colloïdes et σ_{sol} , l'excès en solution. Après filtration, on mesure σ_{sol} . σ_{col} est donc calculé par différence $\sigma_{\text{col}} = \sigma_{\text{tot}} - \sigma_{\text{sol}}$.

Par simple mesure sur les distributions des lanthanides en Pf1 et Pf2 (figure 7.36), on calcule les pourcentages de traceurs fixés sur les colloïdes:

En Pf1: %col (Sm) = 40% %col (Tb) = 17%, %col (Yb) = 0%

En Pf2, %col (Sm) = 48% %col (Tb) = 36%, %col (Yb) = 0%

Ces expériences confirment que les lanthanides introduits sous forme de complexes EDTA peuvent se fixer sur les colloïdes dans des proportions inverses aux constantes de stabilité des complexes.

7.5. Bilan sur les migrations différentielles des éléments chimiques dans la nappe des alluvions

Les expériences décrites dans ce chapitre montrent qu'au niveau de la carrière de Sandillon les circulations horizontales dans la nappe alluviale et la partie non karstique du calcaire de Pithiviers sont contrôlées par les fluctuations de la Loire et la localisation des axes de circulations karstiques. Ces derniers imposent, en période de remontée de la Loire, des gradients hydrauliques locaux suffisants pour entraîner, sur une courte période, des déplacements horizontaux rapides d'espèces chimiques dans les zones les plus perméables, perpendiculairement aux axes karstiques en s'écartant de ces derniers. Certaines zones sont très peu concernées par ces déplacements, il s'agit de zones de stockage riches en éléments majeurs n'étant en relation avec le reste de la nappe que par des échanges verticaux comme dans le piézomètre I ou les piézomètres Pf1 et Pf2 où ont été réalisées des injections de traceurs. En période de descente de la Loire, les circulations s'effectuent surtout verticalement, les gradients hydrauliques horizontaux étant faibles. On observe cependant, pendant ces périodes de descente, des migrations lentes à courte distance en sens inverse des migrations rapides induites par les brutales remontées des eaux de la Loire (exemple : passage des traceurs de I vers L et de Pf1 à CB5, CB4).

Les migrations d'éléments dans la nappe subissent donc un balancement entre phases de migrations rapides horizontales mais de courtes durées au moment des remontées de la Loire et phases de stagnation ou de migrations lentes vers les axes de drainage en période de descente des eaux. Ce balancement a pour effet de disperser les éléments injectés dans la

nappe alluviale, comme on a pu l'observer autour du piézomètre I et donc de favoriser la rétention par les argiles et les colloïdes des éléments les plus faiblement complexés (ex : lanthane, samarium). Ces éléments fixés temporairement peuvent être remobilisés par l'addition, dans la nappe, d'une molécule complexante. Cet effet a été déclenché artificiellement par l'injection d'EDTA dans les piézomètres I et Pf2. Par ailleurs, il faut noter que le transport des lanthanides peut également être effectué par les colloïdes. Ces espèces migrent moins loin car généralement filtrées efficacement par les roches de la nappe et principalement par les alluvions. Toutefois, nous avons observé en X que des remobilisations massives et à longue distance sont possibles lorsque les pressions hydrauliques sont suffisantes pour réactiver des chenaux de circulation. Enfin, la présence des colloïdes permet de résoudre l'apparente contradiction qu'il y a entre fixation irréversible des lanthanides sur les alluvions observée au niveau du piézomètre I et réversibilité obligatoire pour expliquer la diminution des rapports lanthanides lourds/lanthanides légers au cours de certaines périodes. La diminution de ces rapports s'interprète par le retard lié à la filtration des colloïdes fixant préférentiellement les lanthanides légers et par leur remise en suspension et circulation tardive.

Après avoir étudié les déplacements d'espèces chimiques dans la nappe alluviale et la zone non karstique du calcaire de Pithiviers, nous nous intéressons, dans le chapitre suivant, aux déplacements dans un axe de circulation karstique.

CHAPITRE 8

ETUDE DES MIGRATIONS DIFFERENTIELLES D'ESPECES CHIMIQUES DANS LA NAPPE DU CALCAIRE DE PITHIVIERS

Ce chapitre présente l'ensemble des observations permettant de caractériser les circulations dans la nappe du calcaire. Le chapitre précédent a déjà montré, à l'aide du traçage réalisé en Pf2-Pf1, que le calcaire présentait des zones à faibles circulations, tout comme les alluvions. Le chapitre présent décrit plus particulièrement les contrastes observés entre les parties faiblement perméables du calcaire et les chenaux de circulation karstique. Un de ces chenaux a été identifié et exploré par traçage.

8.1. Recherche des axes de circulation karstique

Dès le forage des piézomètres calcaires début 1999, les axes de circulation karstique ont été recherchés à partir des teneurs en éléments majeurs et de diverses diagraphies (T, pH, débits verticaux). De tels axes avaient été pressentis en bordure sud de l'exploitation d'après les travaux de Desprez (Avril 1967, 1976).

8.1.1. Répartition des éléments majeurs dans la nappe du calcaire

Il a été vu au chapitre 2 que l'on peut trouver, dans la nappe du calcaire de Pithiviers, des concentrations élevées en éléments majeurs et proches de celles de la nappe alluviale (exemple : Pf1). Les teneurs en éléments majeurs de la nappe du calcaire de Pithiviers au niveau de la carrière de Sandillon sont données en annexe 18.

Les diagrammes binaires des concentrations mesurées dans la nappe du calcaire sont présentés sur la figure 8.1. Ils montrent une grande variabilité à la fois dans le temps et dans l'espace. Ces diagrammes font apparaître deux groupes d'éléments corrélés entre eux. Le premier regroupe les chlorures, le sodium et les sulfates. Le calcium et le magnésium forment le second. Le piézomètre Pf1 présente les teneurs les plus importantes en tous les éléments. Pour simplifier la description des répartitions des éléments majeurs dans la nappe du calcaire, on exclue ce piézomètre. Les traçages réalisés entre Pf1 et Pf2 ont montré que les éléments chimiques passaient facilement des alluvions au calcaire au niveau de ces piézomètres et qu'ils s'y concentraient, attestant en ce lieu de l'absence de circulations horizontales importantes, et expliquant les concentrations élevées en éléments majeurs. Dans la nappe du calcaire, les teneurs varient:

- d'un piézomètre à l'autre,
- en fonction de la profondeur,
- en fonction du temps.

Les teneurs en chlorures et nitrates sont plus importantes au niveau des champs exploités (piézomètres Z32, Z34, Z35) qu'en amont des cultures (P1) ou que sur la bordure du bois de Brosseilles où aucune exploitation n'intervient. Ces observations confirment l'impact évident des cultures sur la qualité chimique de la nappe du calcaire. Les teneurs en chlorures varient de 5,4 ppm dans le piézomètre CA2 à 22 ppm dans le piézomètre Z35. Les teneurs en nitrates sont très variables. Elles sont élevées dans les piézomètres situés près des cultures - Z34 : 21-86,8 ppm selon la saison ; Z32 : 78,6-79,7 ppm. Elles sont plus faibles dans les piézomètres situés le long du bois de Brosseilles - CA1 : 0-30 ppm ; CA2 : 0,7-4,3 ppm et CA3 : 14,4 – 17,3 ppm. Les teneurs en nitrates du piézomètre CA1 varient de manière importante selon la saison.

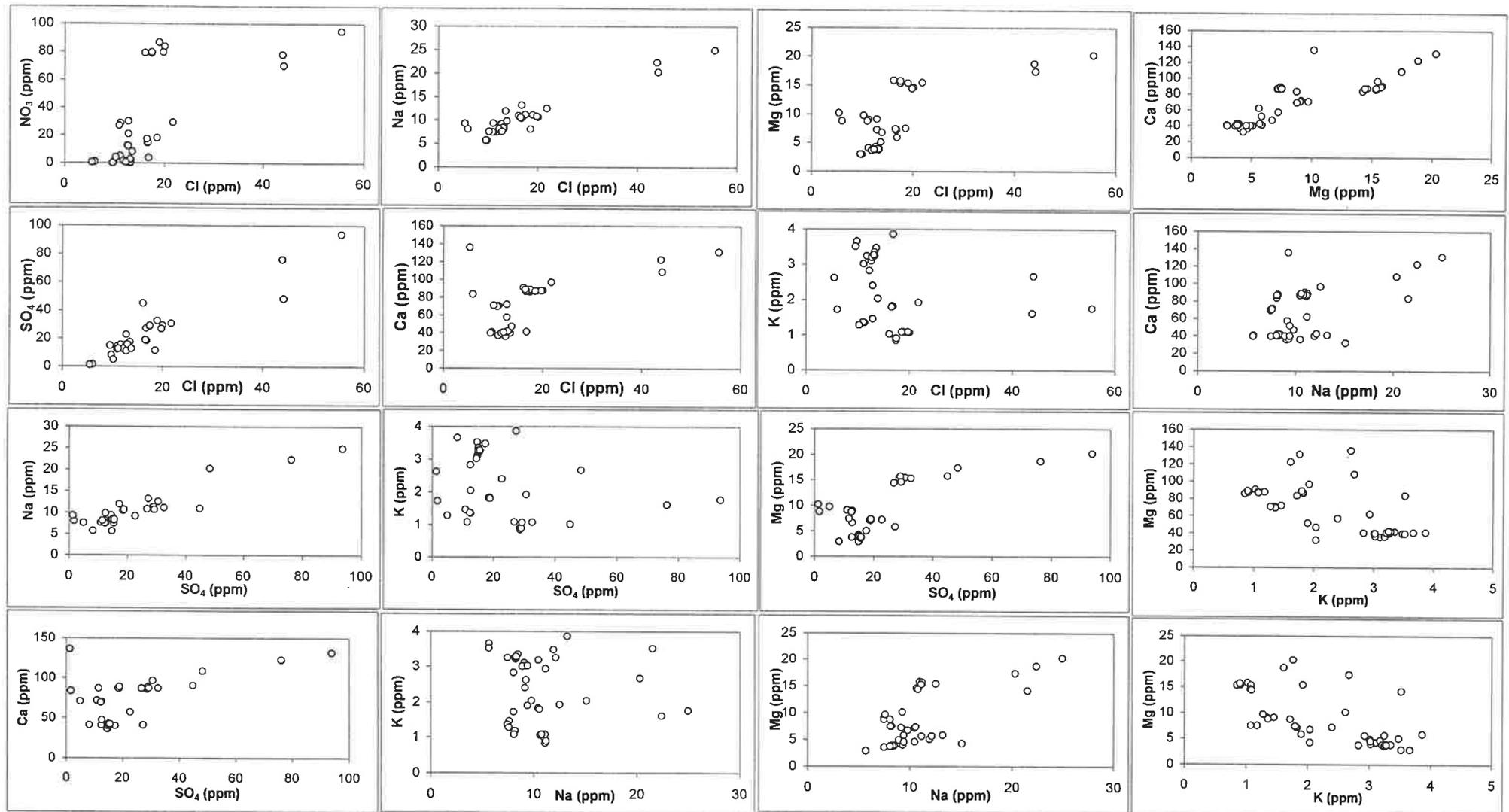


Figure 8.1 : Diagrammes binaires X-Y des éléments majeurs mesurés dans la nappe du calcaire de Pithiviers à Sandillon

En période de remontée de la Loire, le 24/2/99, elles vont de 0 à 12,2 ppm selon la profondeur échantillonnée. En période de descente de la Loire, le 5/5/99, elles atteignent 26,8-30 ppm. L'augmentation des teneurs en nitrates entre le 24/2/99 et le 5/5/99 dans le piézomètre CA1 s'accompagne également d'une augmentation des teneurs en calcium (de 39-42 ppm à 69-72 ppm) et magnésium (de 3-4 ppm à 9 ppm) et d'une baisse des teneurs en potassium (de 3,2-3,7 à 1,35-1,45 ppm). Cela traduit un impact plus important de la nappe alluviale sur la qualité de l'eau qui circule en CA1 en période de descente des eaux.

Au chapitre 1, un pôle de mélange entre les eaux de la nappe et celles de la Loire et du réseau karstique a été défini par les rapports invariants représentatifs du pôle Loire-Axe karstique, assortis de leurs écarts types: $Mg/K=1,39\pm 0,27$; $Na/K=3,13\pm 0,6$. La figure 8.2 représente les mélanges existant entre le pôle « Loire-axe karstique » et le pôle « nappe alluviale » représenté par le piézomètre Z. Tous les prélèvements n'ont pas été réalisés le même jour, cependant les points s'alignent relativement bien sur une droite de mélange. Cela traduit des impacts géochimiques de la Loire, variables dans l'espace de l'ensemble du réseau d'observation et dans le temps. Ce diagramme confirme l'influence très marquée de la Loire dans le piézomètre CA1 en période de remontée des eaux (24/2/99) et une influence plus grande de la nappe alluviale dans ce même piézomètre en période de descente de la nappe (5/5/99). La même remarque est vraie pour le piézomètre CA3 dont le prélèvement réalisé le 27/12/00 le situe au niveau du pôle « Loire axe karstique » alors que les prélèvements réalisés à différentes profondeurs le 5/5/99 présentent une influence plus marquée de la nappe alluviale. Enfin, sur ce diagramme, il faut noter que l'impact de la Loire varie moins en fonction de la profondeur de prélèvement qu'en fonction du temps. En effet, les triplets de points en CA1, CA3, Z34, Z32 datant du 5/5/99 sont très regroupés. Les écarts sont beaucoup plus marqués avec les prélèvements effectués à d'autres périodes.

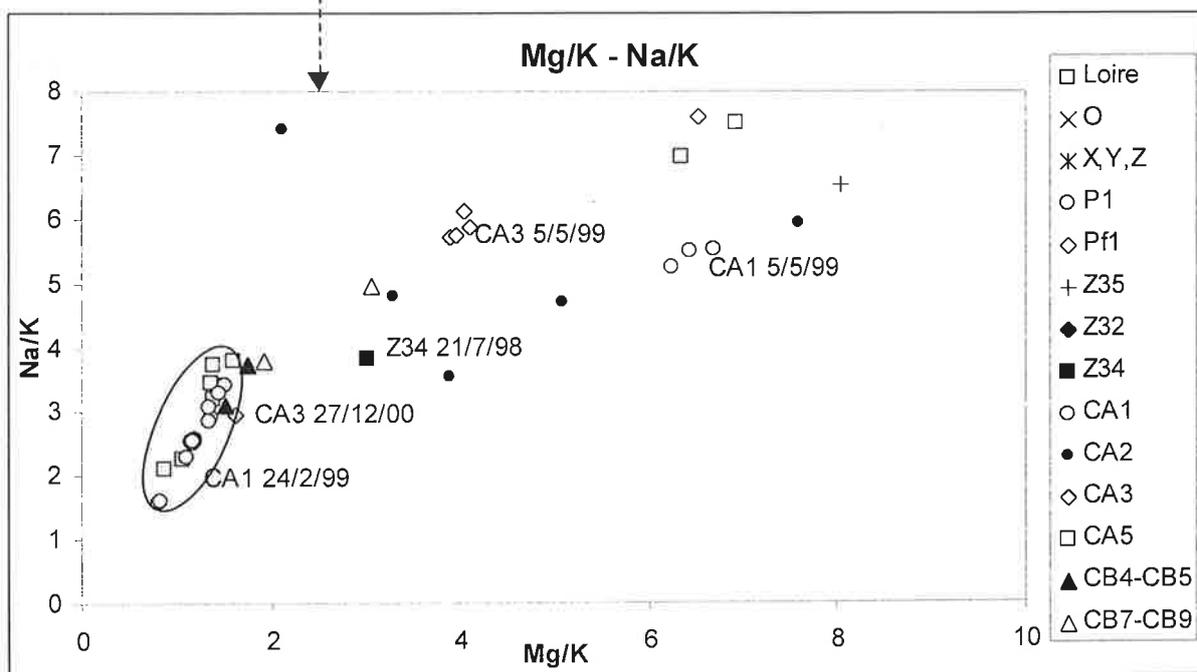
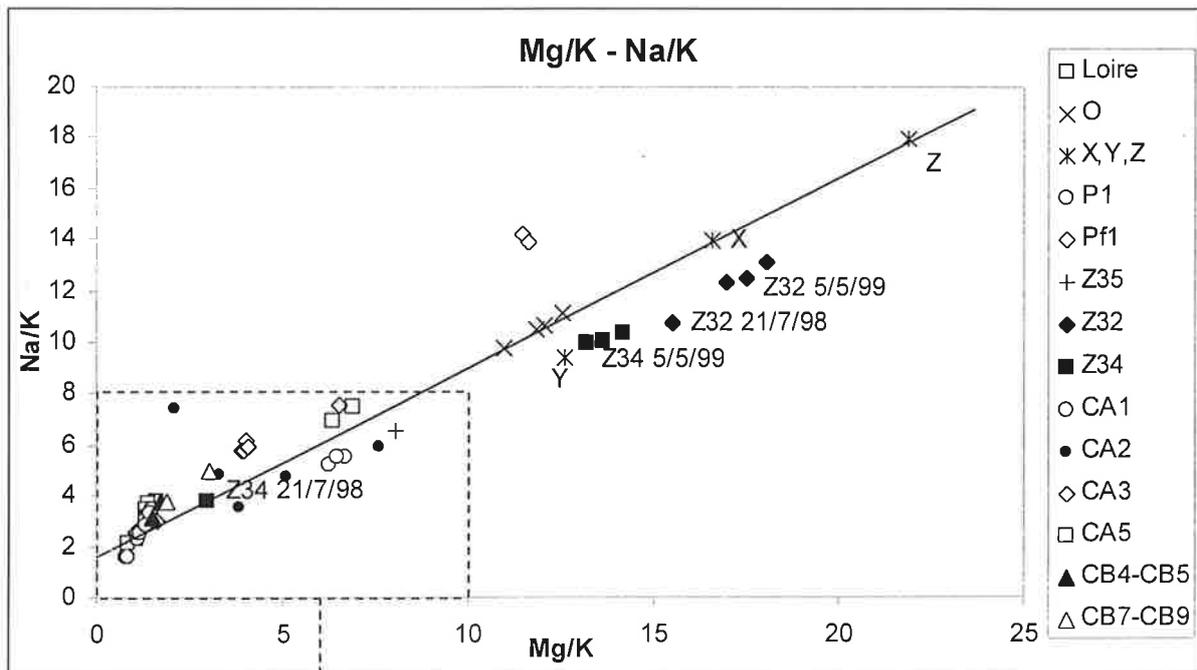


Figure 8.2 : Diagrammes Na/K en fonction de Mg/K des eaux de nappe de Sandillon.

Ces diagrammes représentent le mélange existant dans la nappe calcaire entre l'eau de la Loire et l'eau de la nappe alluviale. Les points s'alignent assez bien sur une droite de mélange passant par le pôle « Loire-axe karstique » ($Mg/K=1,39\pm 0,27$; $Na/K=3,13\pm 0,6$) auquel appartiennent, en certaines périodes, les eaux des piézomètres CA1, CA3, P1, CB4 et CB5. Le mélange existant entre la nappe alluviale et la Loire est plus ou moins prononcé selon les saisons. Les eaux de la nappe du calcaire ont des rapports Mg/K, Na/K plus proches de ceux de la Loire que les alluvions. Cela souligne un impact géochimique de la Loire plus important dans les alluvions que dans le calcaire. Cet impact est plus important en période de remontée des eaux qu'en période de descente de la nappe. Par exemple, CA1 se situe dans le pôle Loire en période de crue, le 24/2/99, alors que le 5/5/99, sa composition chimique se rapproche de celle de la nappe alluviale.

8.1.2. Diagraphies

L'ensemble des diagraphies réalisées dans les piézomètres calcaires au cours de différentes campagnes sur le terrain sont présentées dans l'annexe 24.

8.1.2.1. Les profils de débits verticaux

Les profils de débits verticaux réalisés au micromoulinet sous injection d'eau dans les piézomètres calcaires (chapitre 3 ; §3.2.3), ont été tracés sur la figure 8.3. Les débits d'eau injectés dans les forages étant variables d'un piézomètre à l'autre, les débits mesurés sont normalisés au débit d'eau injecté afin de pouvoir comparer les piézomètres entre eux. Les profils s'arrêtent à la profondeur où le débit mesuré est nul.

On peut d'emblée noter la diversité de la forme des profils. Certains piézomètres comme CA1 et CA5 présentent des profils quasiment droits sur des tronçons de plusieurs mètres de hauteur. Le calcaire traversé sur ces tronçons est très peu perméable. CA1 et CA5 montrent une perte dans les deux derniers mètres, pertes liées à la présence de cavités mises en évidence lors du forage de ces deux piézomètres. CA1 présente une perte supplémentaire à la cote 78 mNFG liée à la traversée d'un niveau perméable. CB5 et CB9 possèdent également une partie de calcaire « dur » peu perméable sur plusieurs mètres en dessous de la limite supérieure de la crépine. A partir d'une certaine profondeur, le calcaire devient plus perméable, ce qui conduit à des pertes de débit relativement régulières. C'est dans cette partie perméable située entre 20 et 25 mètres de profondeur (en dessous de la cote 78 mNGF) qu'il convient de placer les préleveurs d'échantillons lors des expériences de traçages dans le calcaire. Soulignons que les piézomètres CB7 et CB9 montrent une chute brutale de débit à la cote 80-81 mNGF qui localise certainement une zone de circulation préférentielle.

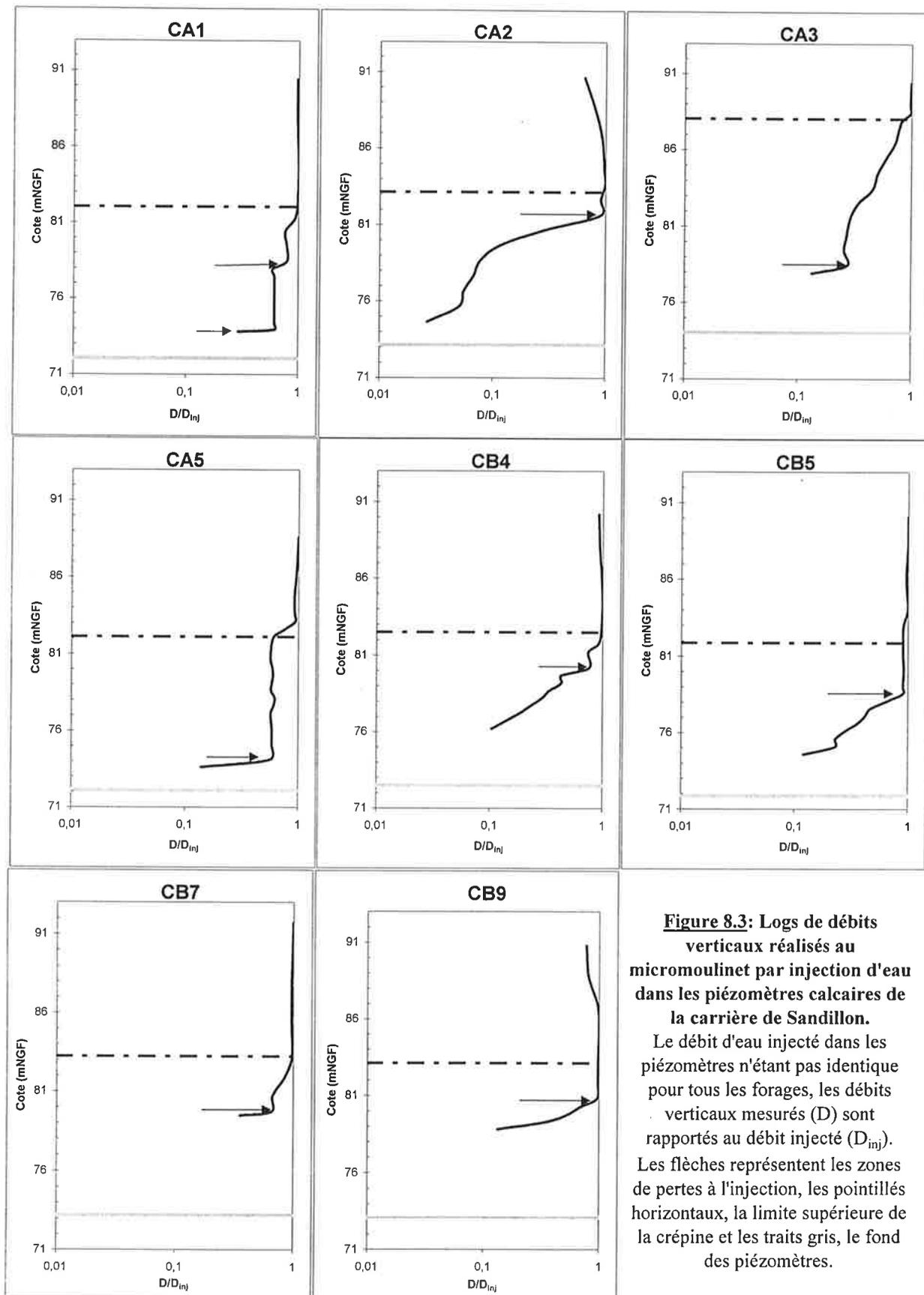


Figure 8.3: Logs de débits verticaux réalisés au micromoulinet par injection d'eau dans les piézomètres calcaires de la carrière de Sandillon.

Le débit d'eau injecté dans les piézomètres n'étant pas identique pour tous les forages, les débits verticaux mesurés (D) sont rapportés au débit injecté (D_{inj}). Les flèches représentent les zones de pertes à l'injection, les pointillés horizontaux, la limite supérieure de la crépine et les traits gris, le fond des piézomètres.

Notons enfin que les différences de perméabilité dont rendent compte les profils de débit entre CA2 et CA3 coïncident bien avec les réponses de ces deux piézomètres aux variations de charges liées aux fluctuations de la Loire : CA2, plus perméable, réagit plus vite que CA3 (chapitre 6).

8.1.2.2. Les logs de température

Les profils verticaux de température (figure 8.4) ont été réalisés sur plusieurs périodes : le 16/2/99, le 4/5/99 et le 4/8/99. Le 16/2/99, la nappe est au sommet d'une remontée liée à une crue de la Loire. Le 4/5/99, la nappe se trouve dans une phase descendante calme. Le 4/8/99 correspond à une période d'étiage.

Les profils de température sont assez différents d'un piézomètre à l'autre. La température à 25 mètres de profondeur est relativement constante (12,3 – 12,7°C) sur l'ensemble du réseau sauf dans les piézomètres CA1 et CA5 qui présentent un refroidissement sur les profils de février et mai. Ce refroidissement est beaucoup plus important dans le piézomètre CA1 le 16/2/99 où la température passe de 12°C en haut de la crépine à 7,8°C au niveau de la cavité karstique. Il est intéressant de noter que le refroidissement observé dans CA1 concerne uniquement la partie du calcaire localisée entre les deux zones de pertes mises en évidence dans les profils de débit verticaux (figures 8.3 et 8.8). Cela correspond très certainement à un courant froid ascendant entre la cavité karstique et le niveau perméable situé à 78 mNGF. En mai, le refroidissement observé en CA1 est beaucoup plus faible. En été, on observe un réchauffement dans CA1 mais pas dans CA5. Le fort refroidissement observé en CA1 a été confirmé par le suivi continu des températures à l'aide de sondes placées à 18 et 25 mètres de profondeur (ce qui correspond aux cotes respectives 80 et 73 mNGF).

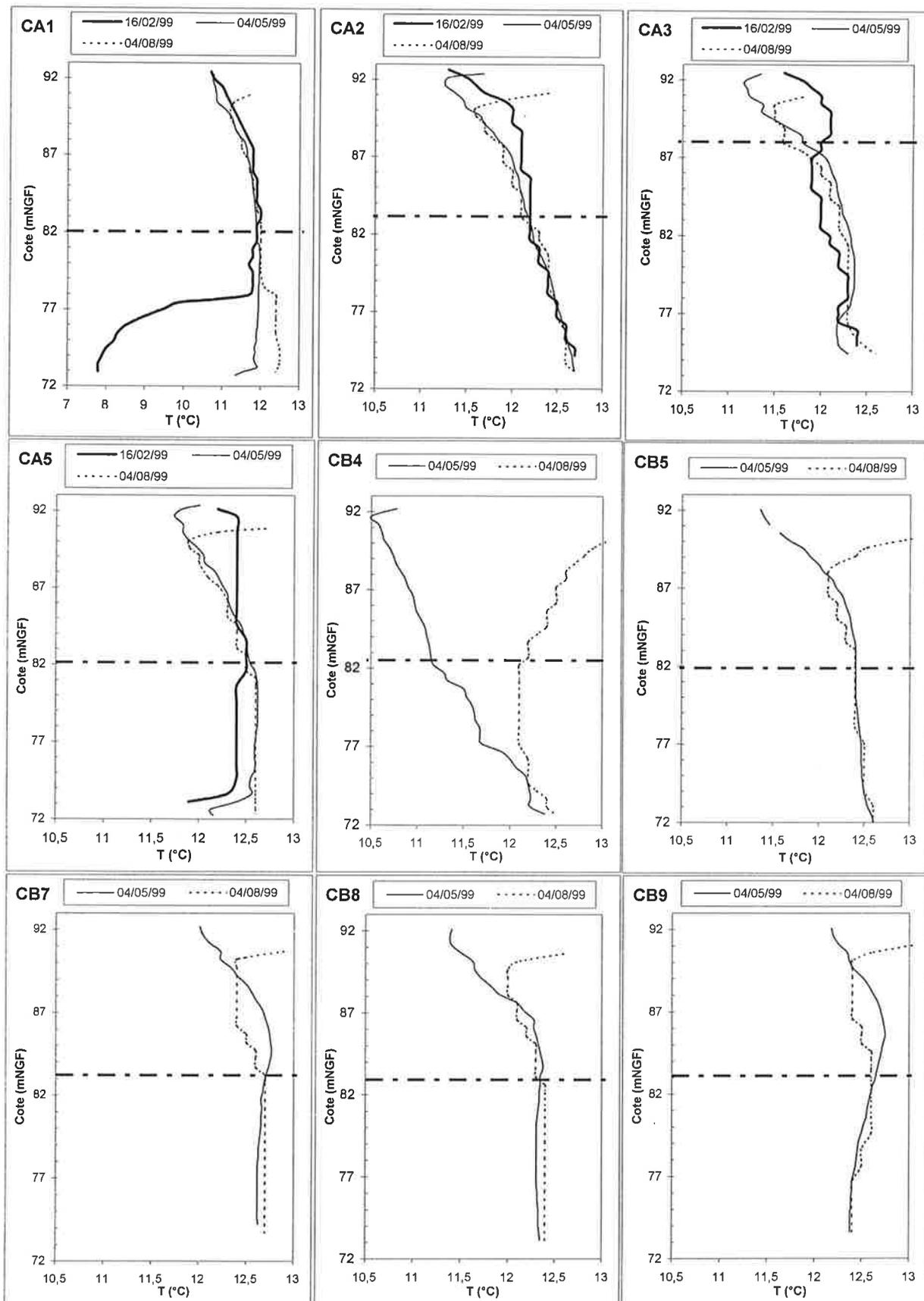


Figure 8.4: Diagraphies des températures dans les piézomètres calcaires de la carrière de Sandillon. Le trait horizontal en pointillé représente la limite supérieure de la crépine.

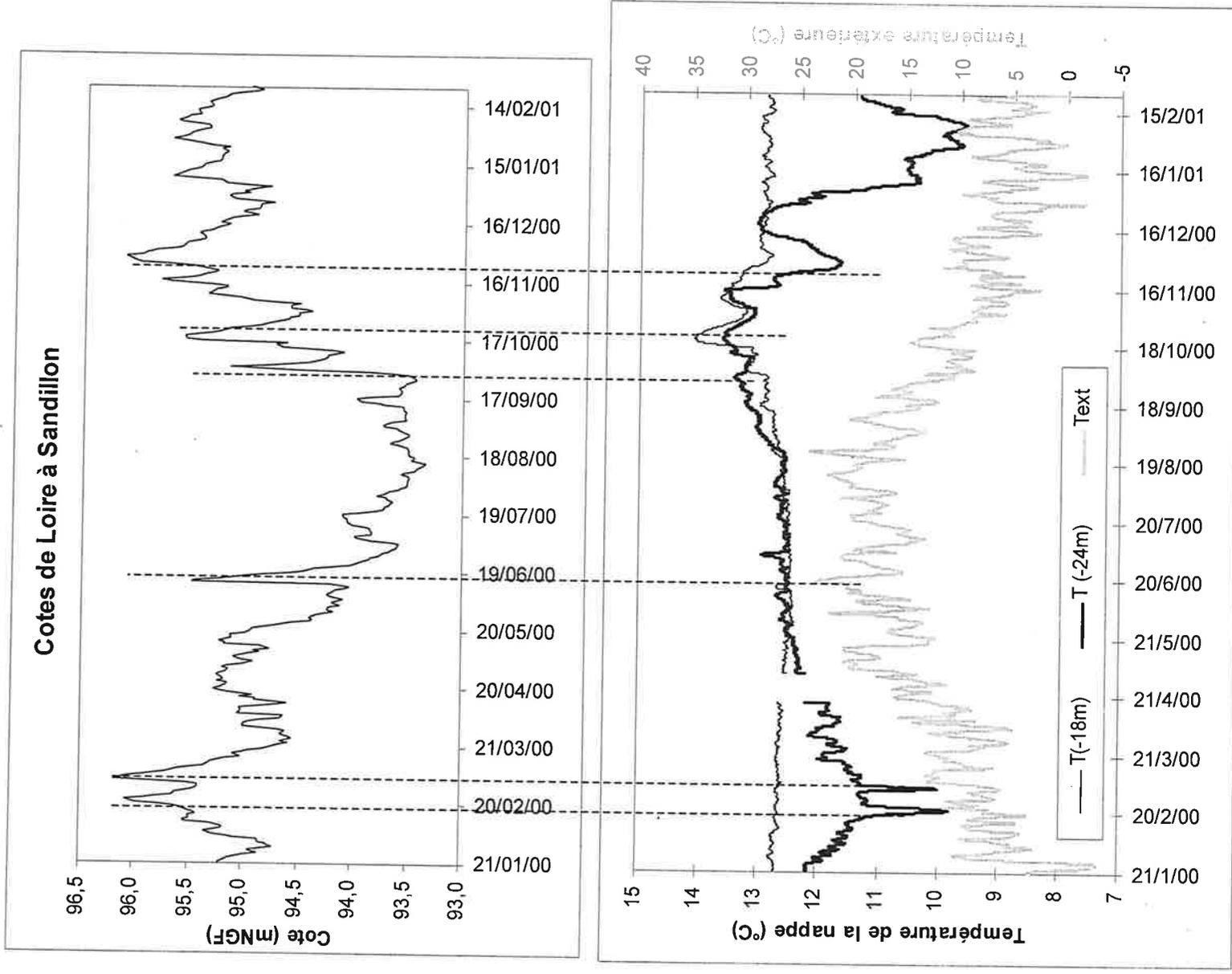


Figure 8.5 : Evolution, au cours du temps, de la température de la nappe dans le piézomètre CA1 à 18 et 24 mètres de profondeur, ainsi que de la température extérieure et des cotes de la Loire à Sandillon.

On considère que la température de la Loire suit globalement la température extérieure. La température de la nappe varie peu à 18 mètres de profondeur (12,4-13°C) sauf au moment de la remontée de la nappe en Octobre 2000, après l'étiage. Les eaux profondes, plus chaudes, remontent alors et la température de la nappe, à 18 m, augmente jusqu'à 14,1°C. Les fluctuations de température sont beaucoup plus importantes (9,6-13,6°C) à 24 mètres, c'est-à-dire à la profondeur de l'axe de circulation karstique. A ce niveau, les chutes brutales de température observées correspondent aux remontées rapides de la Loire en période froide. Quand les températures de la Loire sont voisines de celles de la nappe au moment des crues (ex: Juin 2000), ces dernières ne provoquent pas de variation de température au niveau de CA1.

Ce suivi, décrit sur la figure 8.5, montre qu'à 18 mètres, la température est quasiment constante et très voisine de 12,5°C, sauf en automne, lors de la remontée de la nappe, où on observe un réchauffement lié à la remontée des eaux profondes plus chaudes. Les chutes brutales de température observées à 24 mètres sont directement liées aux crues hivernales. Elles traduisent des remontées d'eau froide dans le piézomètre en raison de l'augmentation de la charge dans le fond du forage lors des remontées de la Loire. La cavité au fond du piézomètre CA1 est donc un axe de circulation karstique alimenté par la Loire. En été, la température de la Loire peut être élevée. 24,5°C est le maximum enregistré entre novembre 1979 et Octobre 1980 (Chéry, 1983). Cela entraîne un réchauffement du fond du piézomètre CA1 (fig.8.5) par rapport aux couches supérieures de la nappe. Au chapitre 1 (§1.3.3.1.3), en reprenant les résultats de J.L. Chéry (thèse, 1983), on a montré que les amplitudes annuelles des températures aux sources du Bouillon et de la Pie diminuent avec la distance qui sépare les pertes de la Loire des exutoires du réseau karstique. Cette distance est une moyenne puisque les eaux des exutoires suivent des chenaux complexes, les pertes se situant à la fois au nord de la Loire (pertes de l'Anche) et dans le lit de la Loire à différents niveaux du tronçon Châteauneuf-Orléans. Dans le piézomètre CA1, les extrema (9,6-13,6°C) mesurés sur l'année 2000 sont moins importants qu'aux sources du Loiret en 1979-1980 (Bouillon : 9-16°C ; La Pie : 10-15°C). Ces écarts sont calculés sur des cycles annuels différents. On ne peut donc pas comparer les écarts de température obtenus en CA1 en 2000 avec les écarts obtenus aux exutoires de la Pie et du Bouillon sur le cycle 1979-1980 dans le but d'évaluer la distance moyenne de CA1 aux alimentations du drain passant par ce forage. Cela est d'autant plus vrai que la température minimale (7,8°C) mesurée en CA1 le 24/2/99 est plus froide que le minimum mesuré en 2000. On peut tout de même affirmer que les extrema de température mesurés au fond du piézomètre CA1 sont de l'ordre de grandeur de ceux mesurés aux exutoires des chenaux karstiques.

Il est très possible, étant donnée la direction de l'axe karstique indiquée par les talwegs piézométriques (chapitre 6), que la perte alimentant l'axe passant par CA1 soit la perte du « Grand Bouge » mise en évidence par Marboutin en 1901 dans le méandre de Sandillon, sur la berge rive droite de la Loire. Une alimentation plus lointaine est moins probable. En effet, la recherche d'uranine dans le piézomètre CA1 s'est révélée infructueuse, après l'injection de ce traceur par M. Lepiller fin mai 2001 dans une perte, rive gauche de la Loire à Jargeau. L'uranine a été restituée à la source du Bouillon. Cela montre que CA1 ne se situe pas dans l'axe de drainage Jargeau-le Loiret abondamment exploré par traçages.

Les profils de température réalisés dans les autres piézomètres (figure 8.4) montrent des gradients de température très faibles en CB5, CB7, CB8 et CB9. Les piézomètres CA2 et CA3 ont des gradients plus importants. CA3 présente un léger refroidissement au niveau de la perte à l'injection (fig.8.3) sur les logs de février et mai 99. Il est étrange, de ne pas observer de refroidissement le 16/2/99 au niveau du piézomètre CA2 dont les fortes amplitudes des variations piézométriques pourraient laisser croire qu'il se trouve sur un axe karstique. Le piézomètre CB4 comporte des variations importantes de températures dans les parties supérieures de la nappe. L'influence du puisard drainant les eaux de surface et localisé à quelques mètres de CB4 (chapitre 2) est certainement responsable de ces écarts importants.

Enfin, on peut regretter de n'avoir réalisé de logs en température que dans les piézomètres situés près du bois de Brosseilles le 16/2/99. C'est en effet ce jour-là que l'on a pu mettre en évidence une circulation karstique d'eau froide dans le piézomètre CA1 à l'aide des profils verticaux. Cela confirme une fois de plus la nécessité d'effectuer des mesures sur différentes périodes et donc l'avantage de disposer d'un observatoire. Il n'est pas évident que ces circulations n'existent pas dans les piézomètres « CB » caractérisés par des pertes à l'injection à faible profondeur (fig.8.3). Il faut cependant rappeler que, contrairement aux

piézomètres CA1 et CA5, aucune cavité n'a été mise en évidence lors du forage de ces piézomètres.

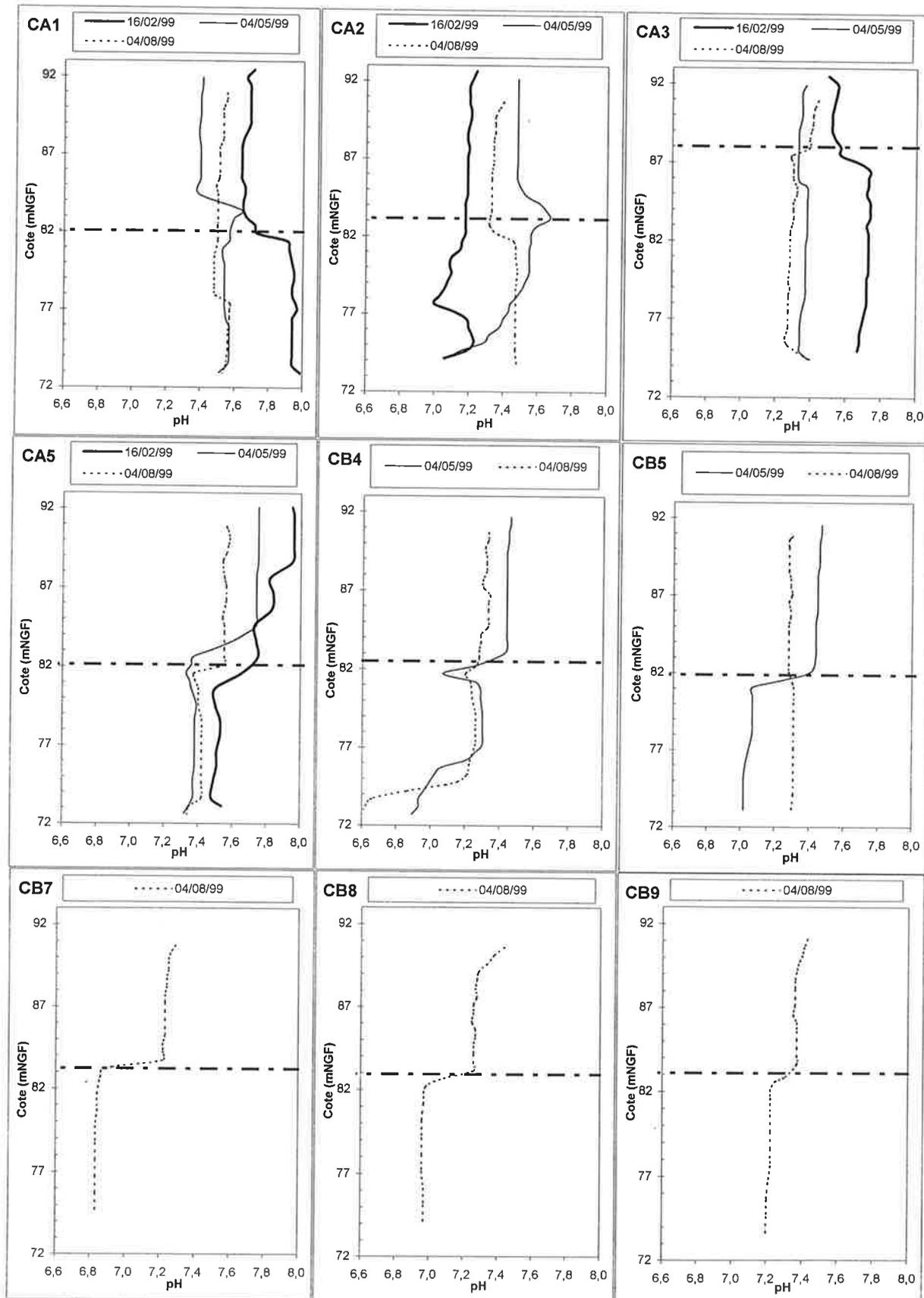


Figure 8.6: Diagraphies des pH dans les piézomètres calcaires de la carrière de Sandillon.
Le trait horizontal en pointillé représente la limite supérieure de la crépine.

8.1.2.3. Les logs de pH

Dans les piézomètres (figure 8.6), les pH se situent entre 6,6 et 8,0. C'est le piézomètre CA1 qui présente le pH le plus élevé (pH=8,0) le 16/2/99. Ce pH se rapproche des pH plus basiques des eaux de la Loire et coïncide avec le refroidissement brutal observé le même jour. En période de descente de la nappe, CA1 présente des pH plus faibles et voisins des pH mesurés dans les autres piézomètres.

L'acidification de l'eau dans les piézomètres calcaires CA2 et CB4 est très certainement liée à l'activité bactérienne (Berner and Berner, 1987). On observe, à ce propos, une diminution des teneurs en nitrates dans la colonne d'eau du piézomètre CA2 sur les prélèvements du 5/5/99 : 4,3 ppm à 18 mètres, 1,1 ppm à 21 mètres et 0,7 ppm à 24 mètres.

Enfin, la diversité des profils de pH observés dans la nappe du calcaire soulignent, comme les teneurs en éléments majeurs, l'hétérogénéité géochimique de la nappe du calcaire de Pithiviers, à l'image de ce qui a été observé dans la nappe alluviale.

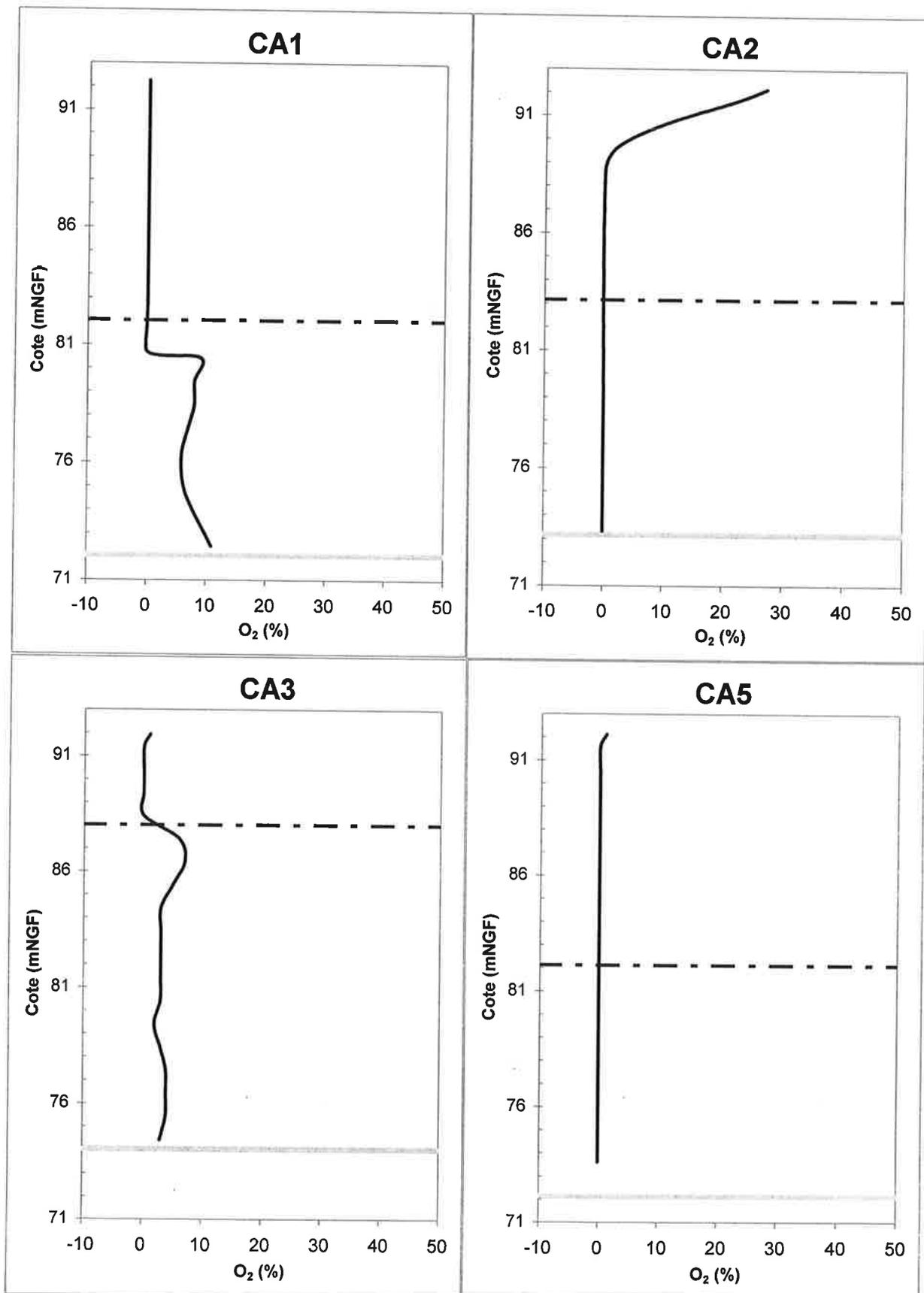


Figure 8.7 : Logs d'oxygène dissous dans les piézomètres calcaires CA1, CA2, CA3 et CA5 le 5/5/99

8.1.2.4. Les logs d'oxygène dissous

Seuls les piézomètres situés près du bois de Brosseilles, en bordure Sud de l'exploitation, ont donné lieu, le 5/5/99, à des profils verticaux d'oxygène dissous mesuré en pourcentage de saturation (figure 8.7).

Il faut souligner que le piézomètre CA1 présente un taux d'oxygène dissous nul dans la partie non crépinée et augmentant dans la crépine, au fur et à mesure que l'on s'approche de la cavité karstique où le taux d'oxygène atteint 11%. Cela est en accord avec la présence, au fond de ce piézomètre, d'eau provenant de la surface avec des temps de séjour courts dans la nappe. Les teneurs non nulles (2 à 7%) en oxygène dissous observées dans le piézomètre CA3 sont à mettre en relation avec le léger refroidissement observé entre les cotes 76 et 78 mNGF ainsi que la perte à l'injection localisée à la cote 78 mNGF. Ce piézomètre reçoit des eaux légèrement oxygénées en provenance d'une alimentation karstique assez distante. A titre de comparaison, Chéry (1983) mesure à la source du Bouillon des pourcentages de saturation d'oxygène dissous compris entre 0 et 60% sur le cycle 1979-1980. Les teneurs qu'il mesure sont maximales l'hiver et minimales l'été.

Les piézomètres CA2 et CA5 ont des taux d'oxygène dissous nuls.

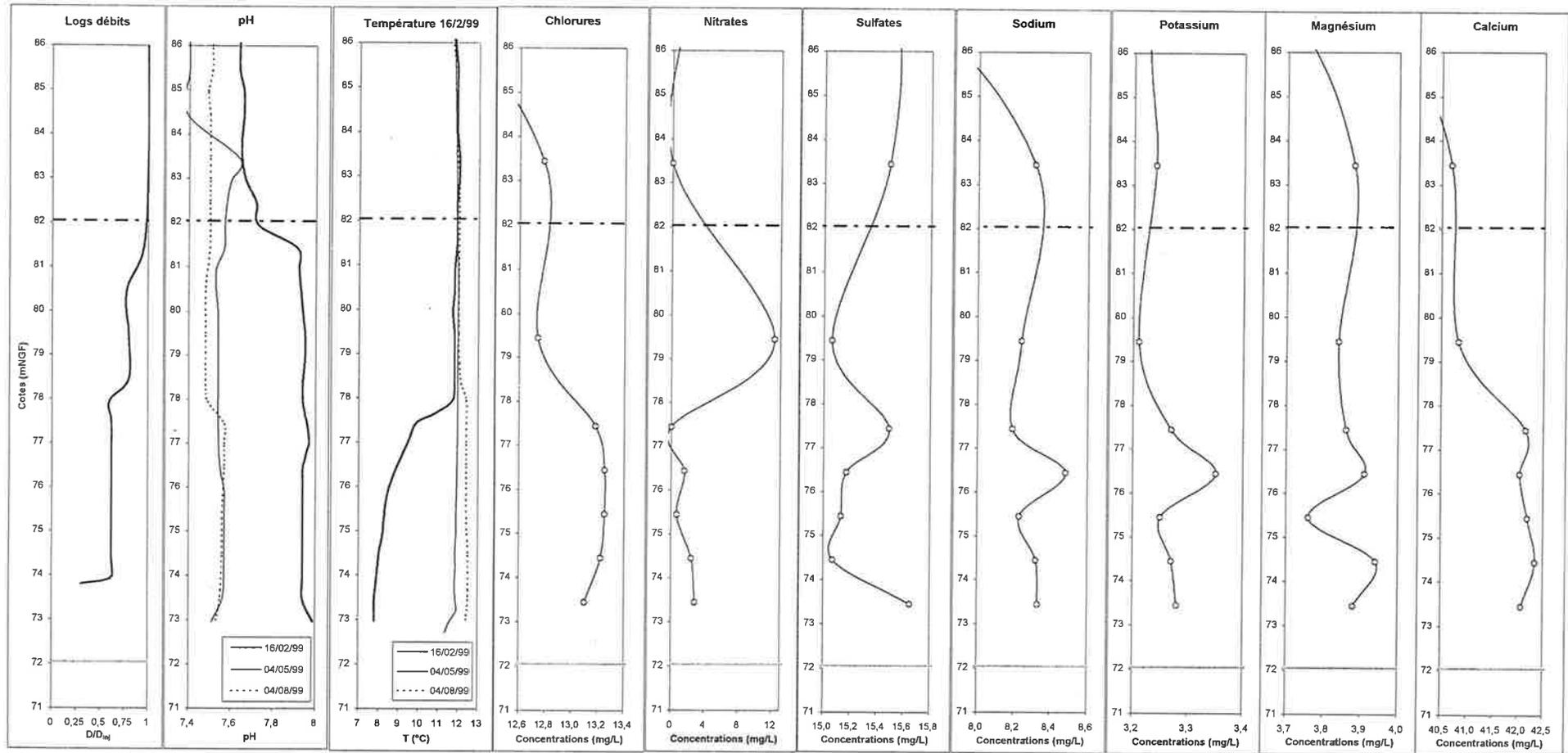


Figure 8.8 : Logs réalisés dans le piézomètre calcaire CA1. Les logs d'éléments majeurs ont été réalisés le 24/2/99, en fin de crue de la Loire. La zone crépinée du piézomètre CA1 présente deux niveaux perméables mis en évidence par les pertes de débit à l'injection d'eau. Le premier niveau se situe à la cote 78 mNGF, le deuxième est une cavité karstique mise en évidence dans le fond du piézomètre lors de son forage. Ces deux niveaux délimitent une zone caractérisée par des teneurs en chlorures, calcium, et un pH constants ainsi que des profils de température particuliers. En période de crue (le 16/2/99), la partie comprise entre la cote 78 mNGF et le fond du piézomètre présente un gradient important de température en raison d'une circulation d'eau froide remontant de la cavité karstique. Cette eau, beaucoup plus froide l'hiver que le reste de la nappe, provient directement et rapidement de la Loire, hypothèse appuyée par des teneurs en éléments majeurs très voisines de celles du fleuve ainsi que les temps de réponse de la nappe aux fluctuations du niveau de la Loire plus courts au piézomètre CA1 que dans la plupart des autres piézomètres.

8.1.2.5. Les logs d'éléments majeurs dans le piézomètre CA1

Comme cela a été souligné dans le paragraphe 8.1.1, les variations en éléments majeurs en fonction de la profondeur sont négligeables devant les variations dans le temps. Cela n'est cependant pas tout à fait vrai pour les éléments non conservatifs, comme les nitrates dont les teneurs fluctuent fortement en fonction de l'activité microbienne qui n'est pas la même sur toute la hauteur de la crépine.

A la suite des résultats obtenus dans le piézomètre CA1, des prélèvements ont été effectués dans ce forage à différentes profondeurs le 24/2/99, en fin de crue de la Loire. Ces logs sont reportés en parallèle avec les autres diagraphies sur la figure 8.8.

Remarquons que le tronçon du piézomètre situé entre la cote 78 mNGF et le fond, se caractérise par des teneurs en calcium et en chlorures constantes et plus importantes que dans la partie supérieure de la crépine. Cela n'est pas vrai pour les autres éléments.

Les différentes diagraphies réalisées sur le réseau de piézomètres calcaires de la carrière de Sandillon ont apporté une information essentielle : l'existence d'un axe karstique passant par CA1. Ces chenaux de circulation rapide ne sont pas détectables en toute saison. L'hiver, les circulations d'eau froide et les débits plus importants liés aux crues de la Loire favorisent leur détection à l'aide des logs de température principalement. Pendant ces périodes, ces arrivées d'eau froide sont transmises plus ou moins bien au reste de la nappe par les niveaux perméables détectables sur les logs de débits verticaux. Enfin, dans l'ensemble, les diagraphies réalisées sur le site soulignent le caractère très hétérogène de la nappe du calcaire de Pithiviers, autant sur le plan des perméabilités qu'en composition chimique.

8.2. Traçages des circulations dans la nappe du calcaire

8.2.1. Traçages aux colorants

8.2.1.1. Déroulement des traçages

En avril 2000, trois traceurs fluorescents ont été injectés dans deux piézomètres du réseau piézométrique calcaire installé sur la carrière de Sandillon. L'injection des traceurs s'est faite dans une phase de remontée de la Loire le 17/4/00, et en fin de remontée le 20/4/00 (figure 8.9). Le choix des puits d'injection (CA1 et CA5) s'est fait selon les critères suivants :

- leur situation en amont de l'écoulement supposé par rapport au reste du réseau piézométrique d'observation de la nappe du calcaire,

- la présence d'eau froide l'hiver au fond des piézomètres indiquant l'arrivée d'eau de surface par un axe karstique donc l'assurance d'un écoulement « rapide ».

Les traceurs ont été choisis en fonction de leurs caractéristiques de fluorescence distinctes et en fonction de leur non-toxicité reconnue. Les trois traceurs utilisés sont dosés par spectrofluorimétrie au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Orléans sous la direction de M. Michel Lepiller.

Les points de prélèvement sont situés à l'aval de l'injection par rapport à la direction d'écoulement indiquée par la piézométrie, c'est-à-dire à l'Ouest de l'injection. On distingue les points de prélèvement à courte distance « CA » (CA2 et CA3), et à moyenne distance « CB » (CB4, CB5, CB7 et CB9). La résurgence karstique du Bouillon située à 6,325 km de l'injection, et le pompage AEP du Theuriet situé à 6,49 km de l'injection constituent les points de prélèvement à longue distance. Le nombre de préleveurs étant limité, lors du premier traçage, on choisit d'équiper seulement les piézomètres situés en première ligne (CA2 et CA3), ainsi que ceux qui sont localisés le plus dans l'axe présumé de l'écoulement (CB5 et CB7).

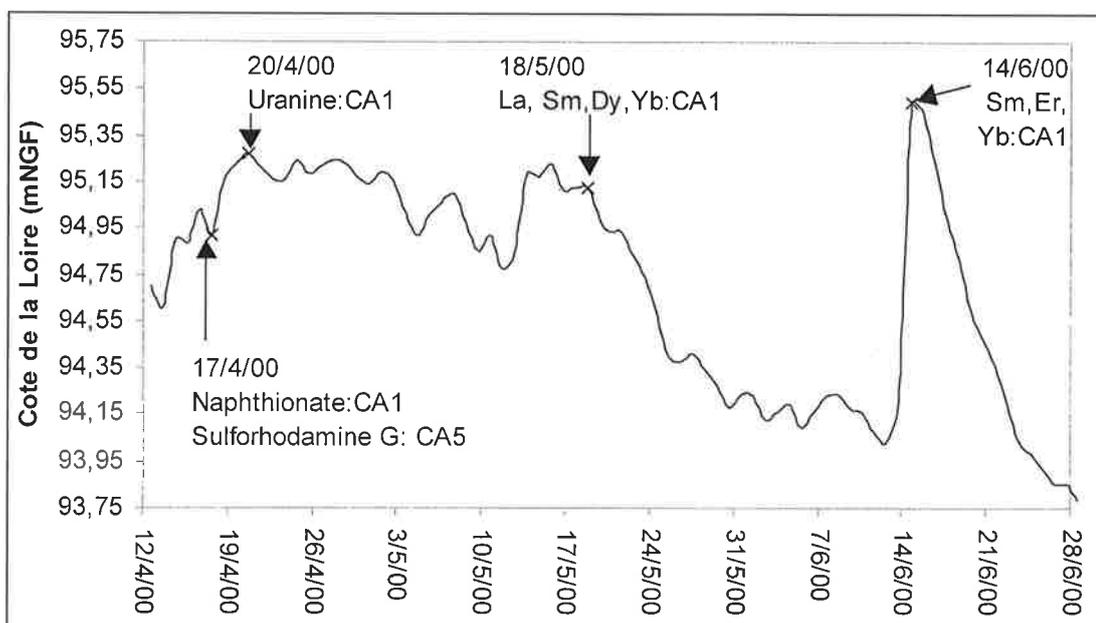


Figure 8.9 : Cotes de la Loire à Sandillon au moment des traçages réalisés à partir de la carrière de Sandillon d'avril à juin 2000.

Les flèches indiquent les dates et puits d'injection ainsi que la nature des traceurs injectés.

Les autres piézomètres sont prélevés manuellement à l'aide de préleveurs à bille à poste à 22 mètres de profondeur. Pour l'ensemble des traçages, les préleveurs automatiques échantillonnent la nappe à 20 mètres de profondeur (cote 78 mNGF). Au captage du Theuriet et à la source du Bouillon, l'échantillonnage s'effectue à 1 mètre en dessous de la surface.

Le tableau 8.1 présente les masses de traceurs injectés ainsi que la date et la localisation des injections. La localisation et la programmation des préleveurs automatiques est indiquée dans le tableau 8.2.

Le premier traçage a lieu le 17/4/00 à 12h25 par l'injection de 3,5 kg de naphthionate de sodium dans le piézomètre CA1 au niveau de la cavité karstique localisée à 25 mètres de profondeur.

30 mn plus tard, c'est 3 kg de sulforhodamine G qui sont injectés dans le piézomètre CA5 à 25 mètres de profondeur au niveau de la cavité karstique.

Les durées d'injections ne dépassent pas 5 mn. Les traceurs sont recherchés dès l'obtention des premières séries de prélèvements.

Aucun traceur n'étant détecté dans les deux premiers jours suivant les injections, les préleveurs situés en première ligne sont remplacés par des préleveurs manuels à partir du 19/4/00. L'un des deux préleveurs est placé à la résurgence du Bouillon le 19/4/00 à 17h00. La première série de prélèvements au Bouillon présente une fin de restitution de naphthionate confirmée par la réalisation de spectres d'émission et d'absorption sur les premiers prélèvements. Par contre, cette première série ne présente pas de traces de sulforhodamine G.

Cette fin de restitution du naphthionate au Bouillon motive le deuxième traçage réalisé le 20/4/00 à 11h50 dans le piézomètre CA1 par l'injection de 500 grammes d'uranine. Cette fois-ci, la résurgence du Bouillon est surveillée de près et le captage AEP du Theuriet est équipé d'un préleveur automatique d'échantillons. Au niveau du réseau piézométrique de la carrière, des traces de naphthionate ayant été aperçues dans le piézomètre CB4, ce dernier est lui aussi équipé d'un préleveur automatique. Cependant, les prélèvements d'eau réalisés avant l'injection de l'uranine en CA1 présentent un bruit de fond élevé en uranine originaire du traçage en Pf2-Pf1 (chapitre 7). Ce bruit de fond était visiblement trop important pour permettre la détection d'une variation éventuelle des teneurs en uranine liée au passage des traceurs injectés en CA1.

8.2.1.2. Résultats et interprétation

La théorie des calculs de distribution des temps de séjour (DTS) des traceurs ainsi que des paramètres extraits des courbes de restitution est expliquée dans le chapitre 4. Pour ces calculs, nous supposons le débit de la source du Bouillon constant et égal à $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$, seule valeur mesurée (le 19/6/00) pendant la période des traçages. La différence de niveau de la Loire à Sandillon n'étant que d'une vingtaine de centimètres au moment de l'injection des traceurs le 20/4/00 et le 14/6/00 (figure 8.9 et tableau 8.3 ci-dessous) on peut considérer que les débits au Bouillon sont très voisins lors des deux traçages. Il faut cependant préciser que lors du traçage réalisé en juin 2000 avec les complexes EDTA de lanthanides, la cote de la Loire varie beaucoup plus qu'en avril 2000. Le débit mesuré le 19/6/00 est peut-être légèrement inférieur au débit du début du traçage.

Tableau 8.3: Variations des cotes (mNGF) de la Loire à Gien, Sandillon et Orléans entre le moment de l'injection des traceurs et la fin de restitution à la source du Bouillon.

	Gien	Sandillon	Orléans
20/04/2000 (date de l'injection)	121,45	95,27	90,66
21/4/00	121,37	95,21	90,67
22/4/00	121,30	95,16	90,60
23/4/00	121,30	95,16	90,61
24/4/00	121,41	95,24	90,71
25/4/2000 (fin du passage du traceur au Bouillon)	121,34	95,19	90,67
<hr/>			
14/6/2000 (date de l'injection)	121,74	95,49	90,33
15/06/00	121,69	95,45	90,85
16/06/00	121,39	95,22	90,74
17/06/00	121,17	94,98	90,52
18/06/00	121,07	94,82	90,41
19/6/2000 (fin du passage des traceurs au Bouillon)	120,93	94,59	90,27

Le débit du Theuriet est supposé être égal au débit du pompage AEP, c'est-à-dire $800\text{m}^3/\text{h}$ ($0,22\text{ m}^3/\text{s}$). Cependant, le Theuriet ne fonctionnant pas en permanence, on choisit de prendre le débit moyen de pompage ($0,11\text{ m}^3/\text{s}$), calculé à partir des heures de fonctionnement du débit données en annexe 6. Cela suppose que le débit naturel du Theuriet est négligeable devant le débit de pompage.

Restitution des traceurs à la Source du Bouillon

L'injection de naphthionate dans CA1, le 17/4/00 conduit à l'observation de la fin du passage du traceur, en très faible concentration, à la source du Bouillon 2 jours après l'injection. Le préleveur ayant été installé trop tard, l'expérience est répétée le 20/4/00 en CA1 par l'injection de 500 g d'uranine. Celle-ci est restituée de manière nette (figure 8.10) à partir de 1870 mn (31h10mn) avec un maximum de concentration situé à 2410 mn (40h10mn). Le calcul de la fonction DTS (distribution des temps de séjour) fournit une vitesse moyenne de 144 m/h, une vitesse maximale de 203 m/h pour les premières arrivées des molécules de traceur. La section du drain calculée à partir de la DTS est de $6,5\text{ m}^2$, ce qui correspond à un tube d'environ 1,4 mètres de rayon. C'est en fait la totalité des drains convergeant vers le Bouillon qui présente une section totale de $1,4\text{ m}^2$. Ce calcul n'intègre que les volumes qui parviennent effectivement au Bouillon, ce traçage montrant qu'une grande partie du débit qui passe par CA1 ne parvient pas au Bouillon. En effet, avec le débit choisi ($Q=0,25\text{ m}^3/\text{s}$) seulement 2,9% de la masse totale injectée est restituée à l'exutoire du Bouillon. Une partie non négligeable des traceurs a donc été évacuée par d'autres exutoires. Lepiller (2001a) évalue à moins de 18% la contribution du Bouillon, dans le débit total évacué par les exutoires du réseau karstique du Val d'Orléans.

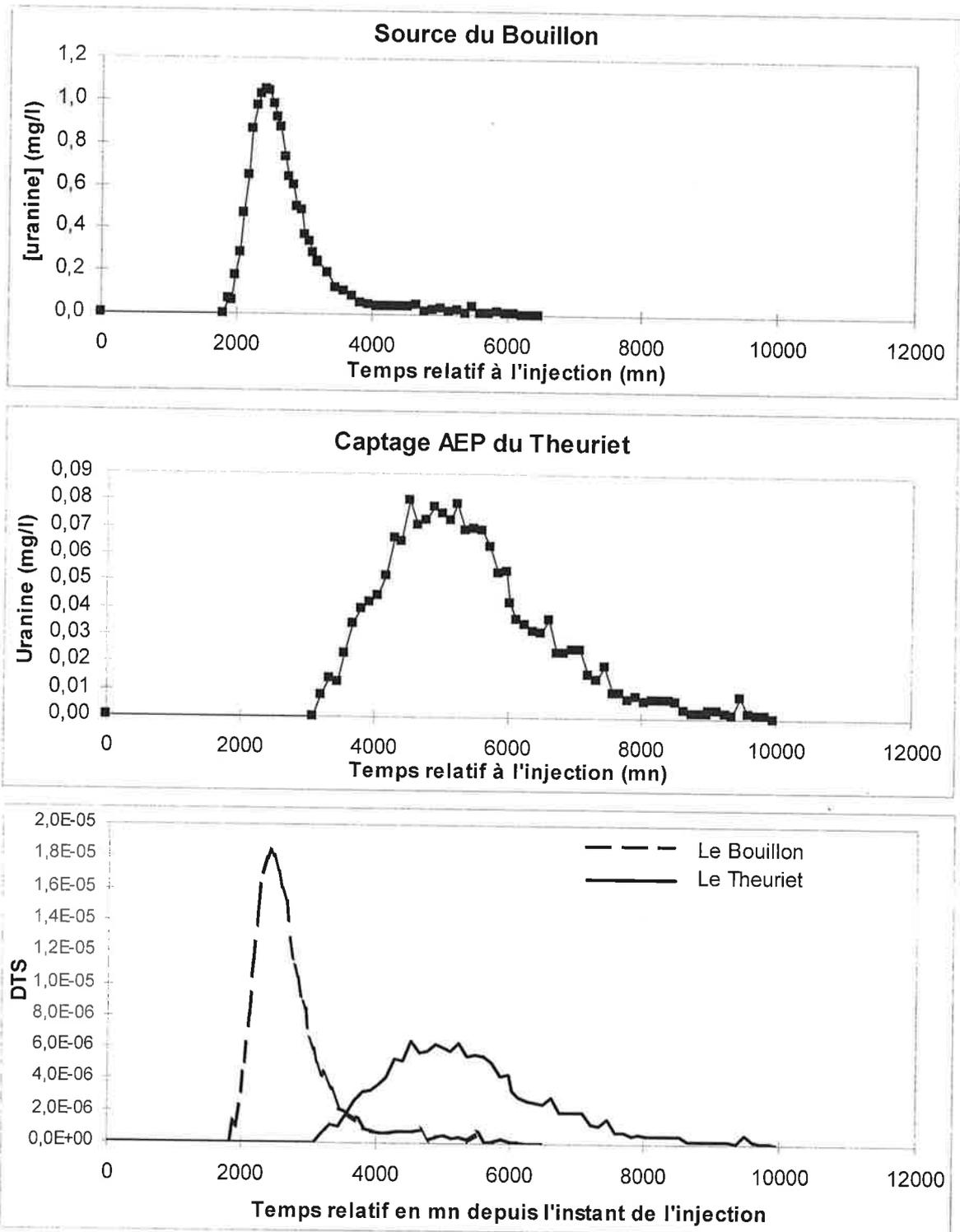


Figure 8.10 : Courbes de restitution, à la source du Bouillon et au captage AEP du Theuriet, de l'uranine injectée dans le piézomètre CA1 le 20/4/00. Comparaison des distributions des temps de séjour (courbes du bas).

Restitution au captage AEP du Theuriet

C'est le seul des trois captages alimentant l'usine de traitement de l'eau de la Lyonnaise des Eaux à Orléans la Source qui est en fonctionnement pendant l'expérience. L'uranine injectée à Sandillon est restituée au captage du Theuriet au bout de 53h25mn (2 jours 5h) avec un maximum de concentration situé à 75h25mn (3 jours 3h).

Le calcul de la fonction DTS fournit une vitesse moyenne de 76 m/h et une vitesse maximale de 121 m/h.

Le premier prélèvement au Theuriet n'a eu lieu que le 21/4/00 à 12h30 soit 96h (4 jours) après l'injection du naphthionate. Etant donnée la forme de la courbe de restitution obtenue pour l'uranine, le naphthionate aurait pu être observé au Theuriet. Mais du fait d'un important bruit de fond naturel, lié à la matière organique dissoute, dans la zone d'émission (419 nm) et d'absorption (319 nm) du naphthionate, les concentrations au captage du Theuriet sont en dessous de la limite de détection de ce traceur.

On constate que le signal obtenu au Theuriet est beaucoup plus étalé qu'à la source du Bouillon (figure 8.10) malgré les distances à CA1 très voisines. Le taux de restitution du traceur est également beaucoup plus faible : 0,27% contre 2,9% au Bouillon. Le Theuriet plus éloigné de l'axe de drainage principal que la source du Bouillon, se trouve dans une zone de gradient hydraulique plus faible, ce qui entraîne des vitesses de circulation plus faibles et donc un étalement plus important du signal.

Les piézomètres moyenne distance

En raison d'un bruit de fond important lié à la matière organique, les traces de naphthionate éventuelles sont assez difficiles à identifier de manière certaine. Il semble que l'on ait perçu des traces dans :

CB4: naphthionate le 3/5/00, et uranine en quantité relativement importante (> 1 mg/L) avant, et après, l'injection d'uranine. Ce bruit de fond provient du traçage réalisé en Pf2 le 11/1/00.

CB5 : des traces de naphthionate dans tous les échantillons de la première série (65-215 mn). Cependant, la forme du signal de restitution est très complexe, ce qui laisse plutôt penser à de la matière organique. Cela est confirmé par l'absence d'uranine dans ce piézomètre lors du deuxième traçage.

CB7 : aucune trace en aucun traceur.

CB9 présente des traces d'uranine dans le premier prélèvement le 17/4/00 à 14h10, probablement une pollution puisque c'est avant l'injection de l'uranine et puisque les échantillons suivants n'en contiennent pas.

Les piézomètres courte distance

Dans le piézomètre CA2, des traces de naphthionate sont observées dans les 3 premières séries, 6 mn après l'injection. ce qui est trop tôt pour affirmer que cela vient de CA1. Lors du deuxième traçage en CA1, on observe des traces d'uranine dans 2 échantillons seulement, l'un au début du traçage (80 mn après l'injection), l'autre 8 jours plus tard, pas dans les autres échantillons.

Le « naphthionate » aperçu lors du premier traçage n'est donc pas du naphthionate mais plutôt un bruit de fond naturel ressemblant à du naphthionate. Sinon, pourquoi l'uranine, beaucoup plus facile à détecter, n'aurait-elle été aperçue qu'une seule fois dans le premier jour suivant la deuxième injection ? Les traces d'uranine observées le premier jour 80 mn après l'injection sont probablement dues à une pollution. Celles observées 8 jours plus tard peuvent provenir de circulations lentes du reste de l'uranine non évacuée par le drain.

Dans CA3, les seules traces de naphthionate sont observées 4 jours après la première injection. Des traces d'uranine sont observées dans un échantillon de la 4^{ème} série, avant l'injection de l'uranine. C'est très vraisemblablement une pollution présente dans un tube ou un flacon.

Il faut donc souligner la limite de la méthode pour de faibles traces. Il convient de confirmer ces "traces" dans les piézomètres calcaires situés sur la carrière de Sandillon. Les teneurs observées sont en effet très proches du bruit de fond, surtout en ce qui concerne le naphthionate dont le bruit de fond naturel est très variable et parfois très important (par exemple dans le piézomètre CB4). Certaines substances organiques présentent en effet des spectres de fluorescence proches du naphthionate, ce qui limite considérablement son utilisation dans la nappe de Sandillon.

Les piézomètres d'injection

Bien qu'elles diminuent progressivement au cours du temps, les teneurs en traceurs dans les puits d'injection CA1 et CA5 (figure 8.11) présentent des variations importantes dans le temps. Ces variations sont en grande partie liées au mode de prélèvement : au cours du temps, le traceur tombe par gravité au fond du piézomètre. Lors du prélèvement à l'aide d'un préleveur à bille, le fond du préleveur se remplit d'eau riche en traceur alors que le haut n'en contient pratiquement pas. Ces quantités respectives dépendent de la fréquence des prélèvements (l'eau est mieux homogénéisée avec une fréquence de prélèvement élevée), de la vitesse de descente et de remontée du préleveur et du temps écoulé depuis l'injection. L'idéal aurait été d'homogénéiser l'eau du piézomètre avant le prélèvement.

On remarque, par ailleurs, qu'un pompage effectué dans le piézomètres CA1 le 17/5/00 remonte des eaux plus riches en traceurs situées dans des zones d'eau « morte » de la partie de

calcaire « dur » autour du piézomètre. Ce pompage ayant eu lieu 1 mois après l'injection du naphthionate et de l'uranine montre le contraste existant entre le fond du piézomètre caractérisé par des circulations rapides et la partie supérieure, faiblement perméable selon les profils de débits verticaux, et donc caractérisée par l'absence de circulations importantes.

Ces quelques observations montrent bien que toute la masse injectée ne s'est pas écoulée dans le drain karstique et que par conséquent, les taux de restitution aux sources du Bouillon et au captage du Theuriet doivent être majorés.

En ce qui concerne le traçage à la sulforhodamine G, aucune trace de sulforhodamine n'a jamais été observée sur le réseau piézométrique d'observation de la carrière en dehors du puits d'injection CA5. De plus, les teneurs importantes mesurées au fond du puits d'injection 7 jours après le début du traçage (figure 8.11) montrent l'absence de circulations importantes dans ce piézomètre malgré la présence d'une cavité à 25 mètres de profondeur.

8.2.1.3. Bilan

Le résultat essentiel des traçages effectués avec les traceurs fluorescents est la confirmation indiscutable de l'existence d'un axe karstique reliant le piézomètre CA1 au captage du Theuriet et à la source du Bouillon. L'existence de cet axe était fortement suggérée par les profils verticaux de température et les fortes amplitudes des fluctuations du niveau de la nappe en ce point. D'autre part, ces traçages confirment les vitesses importantes de circulation observées dans les karsts du Val d'Orléans, en particulier entre les zones profondes de la nappe sous la carrière et la source du Bouillon ainsi que le captage du Theuriet.

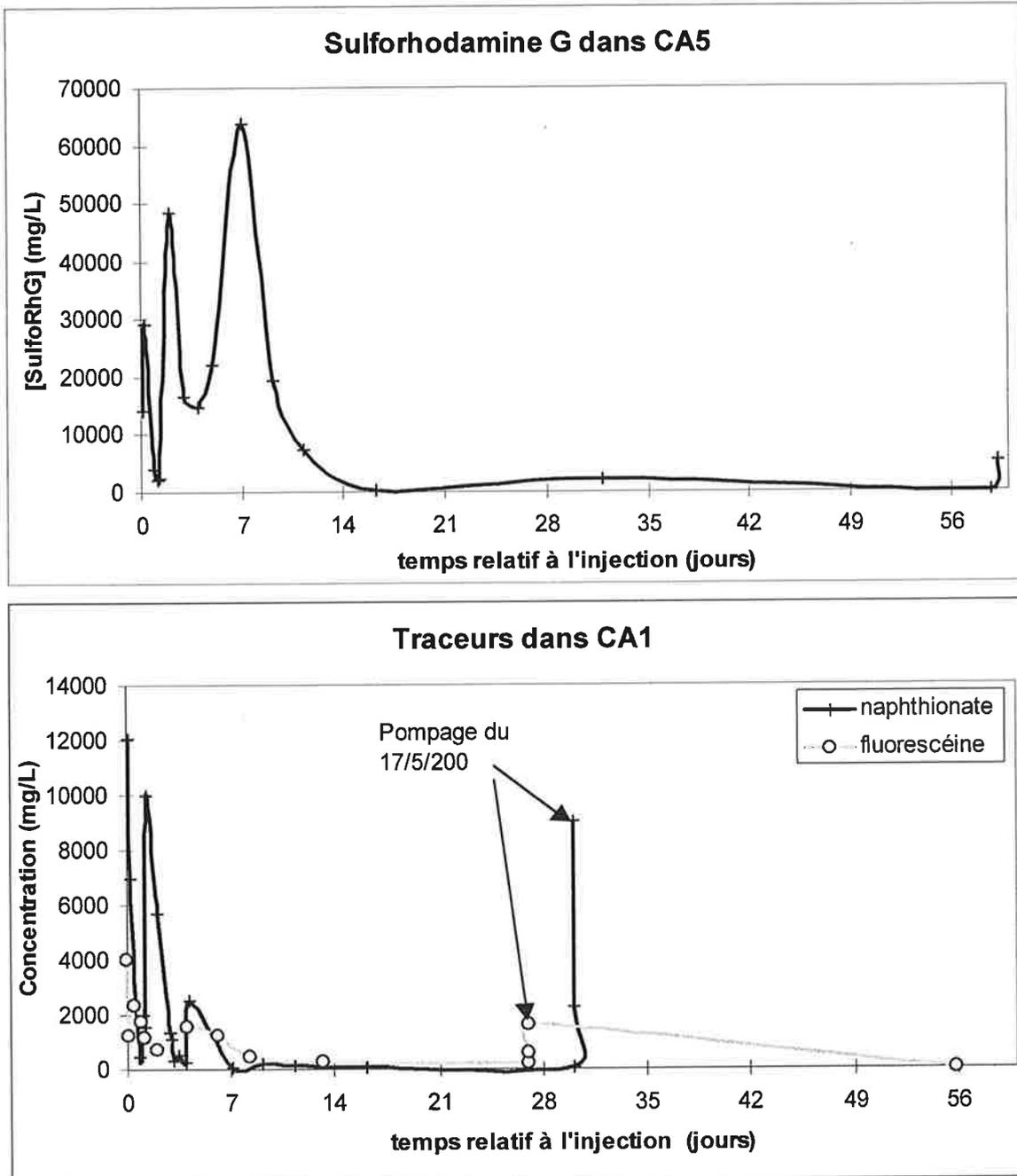


Figure 8.11 : Evolution des teneurs en traceurs dans les puits d'injection CA1 et CA5 pendant les deux mois suivant les traçages réalisés en Avril.

Les fortes variations observées dans les deux piézomètres sont liées au mode de prélèvement ne permettant pas de prélever de manière reproductible la zone où sont accumulés les traceurs. Le pompage réalisé le 17/5/00 dans le piézomètre CA1 montre qu'une partie des traceurs est restée piégée dans la partie non karstique du calcaire au niveau de CA1.

Quant à l'injection de sulforhodamine G dans le piézomètre CA5 le 17/4/00, aucune trace de ce traceur n'a été retrouvée en dehors du puits d'injection. Pourtant, d'après différentes diagraphies (T, pH, micromoulinet) et les observations faites lors de la pose du piézomètre, on aurait pu penser que ce forage interceptait un axe de circulation karstique. La cavité présente au fond du piézomètre CA5 n'est donc pas en relation avec le réseau de drainage principal qui conduit aux sources du Loiret. Peut-être cette cavité est-elle colmatée en aval du point d'injection.

Enfin, la confirmation des traces dans les piézomètres du réseau de la carrière est nécessaire. Pour cela, l'utilisation des traceurs lanthanides, dont le bruit de fond est généralement inférieur à 10 ppt dans la nappe étudiée, va permettre de préciser l'existence de migrations de traceurs à partir et en dehors des chenaux principaux d'écoulement karstique.

8.2.2. Traçages aux lanthanides complexés à l'EDTA

Les injections dans CA1 ont été réitérées à l'aide de traceurs EDTA de lanthanides une première fois le 18/5/00 et une seconde fois le 14/6/00.

Le 18/5/00, la quantité de terres rares injectées était insuffisante et le bruit de fond en lanthanides naturels lié à une pollution en MES était trop important dans les flacons acidifiés pour autoriser la restitution d'un signal correctement interprétable dans les différents points d'observation (réseau piézométrique de la carrière de Sandillon, source du Bouillon et captage du Theuriet). Cependant, la normalisation des lanthanides injectés (La, Sm, Dy, Yb) aux terres rares voisines a permis de reconstituer un signal de restitution confirmant, à la source du Bouillon, le temps de transit obtenu avec l'uranine. Ce point est détaillé dans le chapitre 5.

Le 14/6/00, de 22h20 à 22h30, 373 g de Sm, 500 g d'Er et 404 g d'Yb complexés avec 1,5 équivalents d'EDTA sont injectés dans 50 litres d'eau à 25 mètres de profondeur dans le piézomètre CA1. A ce moment-là, la Loire à Sandillon est au sommet d'un pic de crue (figure 8.9, tableau 8.3).

Les résultats obtenus sur l'ensemble des points surveillés sont donnés dans l'annexe 26. Les courbes de restitution à la source du Bouillon sont tracées figure 8.12, celles obtenues au Theuriet figure 8.13. Les paramètres de transit calculés à partir des DTS sont présentés dans le tableau 8.4.

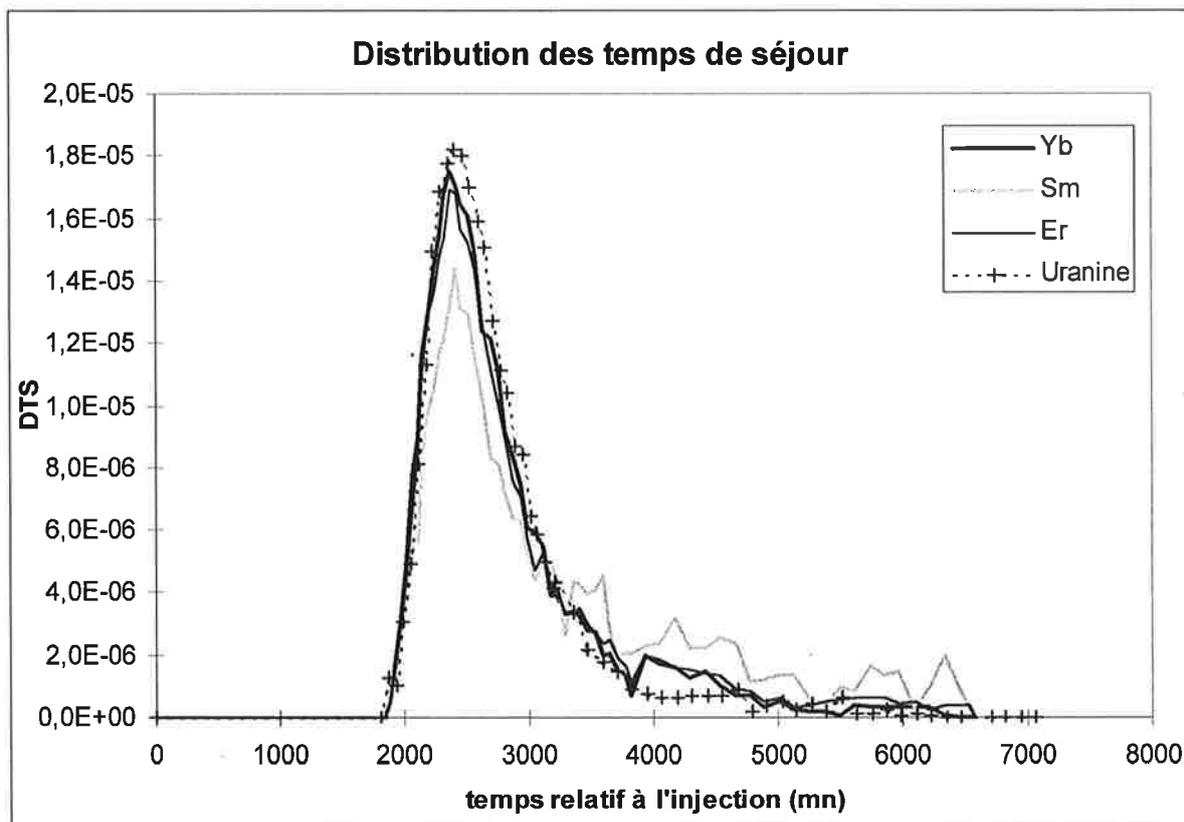
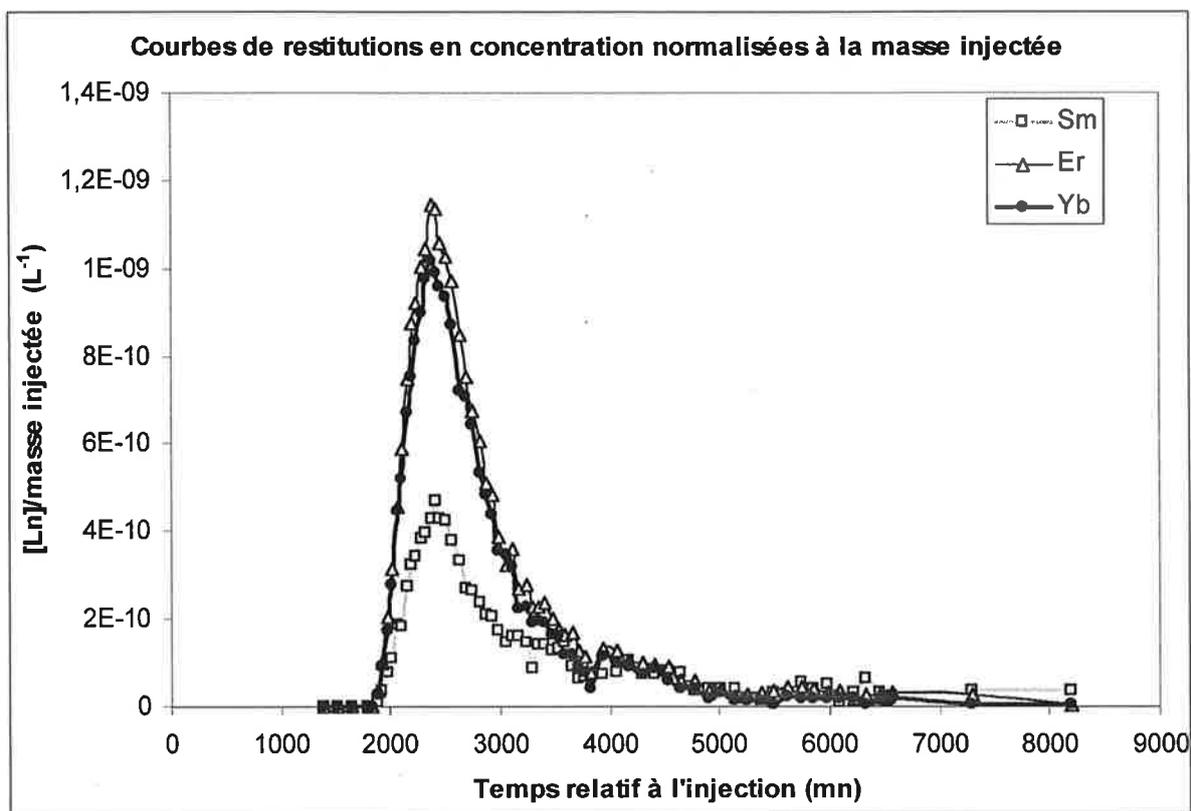


Figure 8.12 : Courbes de restitution des concentrations normalisées à la masse injectée et distributions des temps de séjour (DTS), à la source du Bouillon, des trois lanthanides injectés en CA1 le 14/6/00.

La DTS obtenue pour l'uranine lors de l'injection du 20/4/00 se superpose rigoureusement aux DTS de l'erbium et de l'ytterbium.

8.2.2.1. Restitution des traceurs au Bouillon et au captage AEP du

Theuriet

Pour les calculs nécessitant la valeur des débits (section moyenne du drain et masse restituée), on a choisi de prendre la valeur $Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ mesurée au Bouillon le 19/6/00 trois jours et demi après l'injection. La valeur du débit du Theuriet, $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$, correspond à la moyenne du débit de pompage.

Les restitutions de traceurs obtenues au Bouillon et au Theuriet ressemblent fortement à celles obtenues en avril 2000 avec l'uranine. En d'autres termes, les temps de séjour moyen des traceurs sont quasi identiques et les DTS (figure 8.11 et 8.12) se superposent de manière impressionnante sauf le signal obtenu avec le samarium, plus irrégulier du fait des très faibles concentrations obtenues, en particulier au captage du Theuriet.

Si l'on compare les deux traçages d'avril 2000 et de juin 2000, on remarque que les taux de restitution des traceurs les plus stables, Yb et Er sont comparables à ceux de l'uranine. Ils sont tout de même deux fois inférieurs à celui de l'uranine au Bouillon. Cela est peut-être lié à une variation de débit du Bouillon non prise en compte dans les calculs. Au Theuriet, les taux de restitution sont quasi identiques entre l'uranine, Er et Yb. On peut en conclure que les complexes EDTA d'Ytterbium et d'Erbium se comportent en traceurs conservatifs comme l'uranine.

Comparons maintenant les taux de restitution des trois lanthanides obtenus lors du traçage de juin 2000. Cette fois, les taux de restitution relatifs sont indépendants de la valeur du débit. On constate une bien meilleure restitution des lanthanides lourds Er et Yb que du samarium au Bouillon et au Theuriet. Par ailleurs, Er et Yb ont des taux de restitution équivalents. Cela montre prouve que le samarium est retenu au cours de l'écoulement des traceurs.

Tableau 8.4: Paramètres de transits calculés à partir des traçages réalisés entre le piézomètre CA1 à Sandillon et la source du Bouillon ainsi que le captage AEP du Theuriet.

Point de restitution:	la Source du Bouillon			
Distance au point d'injection CA1:	6325 mètres			
Date et heure de l'injection	20/4/00 11h50	14/6/00 22h25	14/6/00 22h25	14/6/00 22h25
Traceur	Uranine	Samarium	Erbium	Ytterbium
Masse injectée	500 g	373 g	500 g	404 g
Masse restituée*	14,46 g	3,06 g	8,49 g	5,87 g
% restitué	2,89 %	0,82 %	1,7 %	1,45 %
Temps moyen de séjour	45,9 h	54,1 h	48,7 h	47,0 h
Temps (Cmax)	40 h	40,3 h	39,6 h	39,6 h
Vitesse moyenne	143,7 m/h	128,3 m/h	138,8 m/h	141,8 m/h
Vitesse apparente	137,9 m/h	116,8 m/h	129,9 m/h	134,7 m/h
Section moyenne du drain*	6,5 m ²	7,7 m ²	6,9 m ²	6,7 m ²

Point de restitution:	le captage AEP du Theuriet			
Distance au point d'injection CA1:	6490 mètres			
Date et heure de l'injection	20/4/00 11h50	14/6/00 22h25	14/6/00 22h25	14/6/00 22h25
Traceur	Uranine	Samarium	Erbium	Ytterbium
Masse injectée	500g	373 g	500 g	404 g
Masse restituée*	1,37 g	0,11 g	0,97 g	0,94 g
% restitué	0,27%	0,03%	0,19%	0,23%
Temps moyen de séjour	89,6 h	82,1 h	88,2 h	90,2 h
Temps (Cmax)	75,4 h	70,6 h	80,6 h	82,6 h
Vitesse moyenne	75,9 m/h	84,3 m/h	76,8 m/h	75,7 m/h
Vitesse apparente	72,5 m/h	79,0 m/h	73,6 m/h	71,9 m/h
Section moyenne du drain*	5,5 m ²	5 m ²	5,4 m ²	5,5 m ²

(*) Les masses restituées et les sections moyennes des drains sont calculées en appliquant un débit moyen de 250 l/s à la source du Bouillon et de 110 l/s au captage AEP du Theuriet.

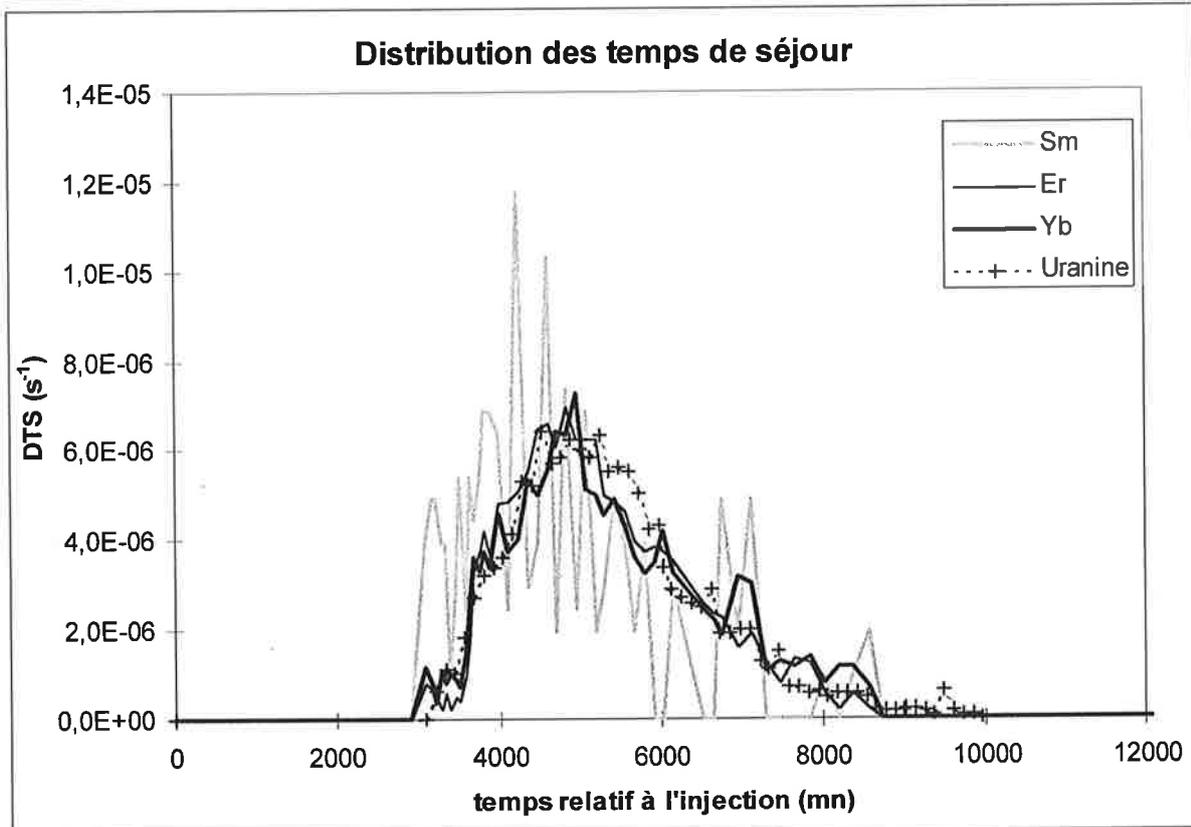
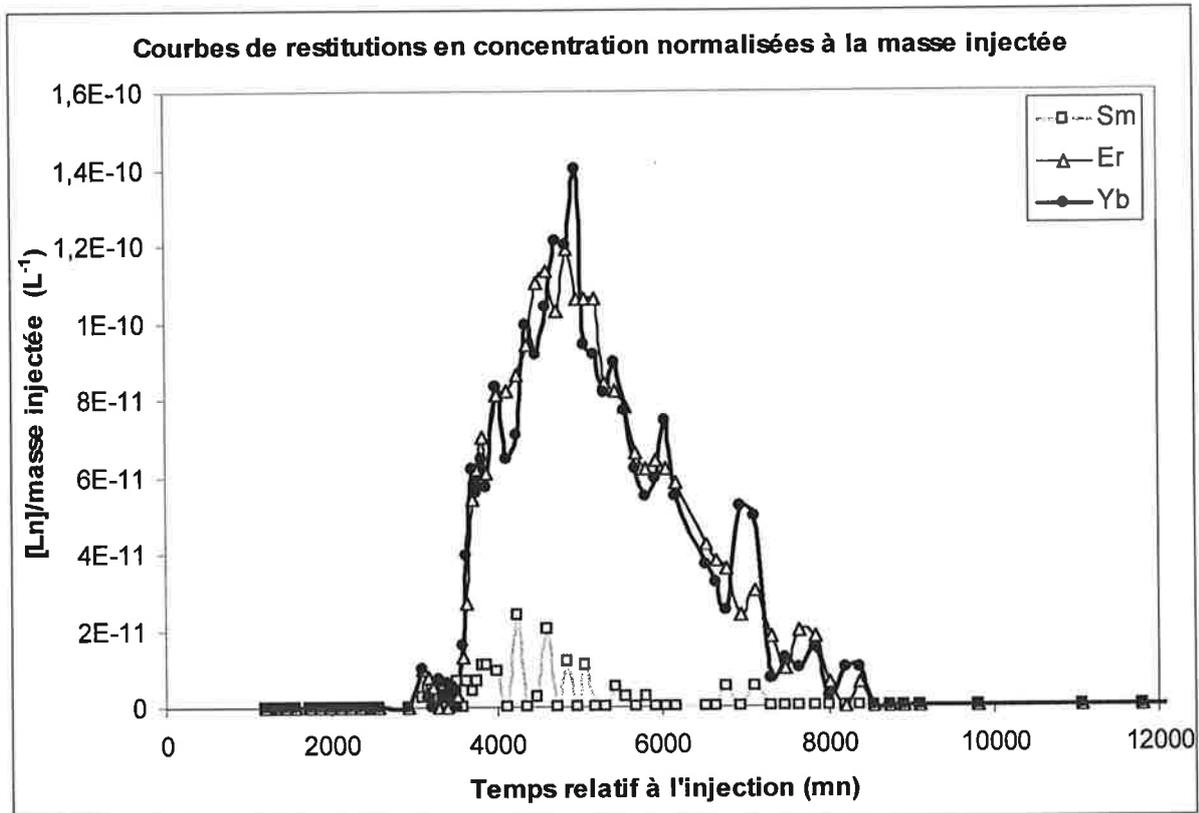


Figure 8.13 : Courbes de restitution $C(t)$ et distribution des temps de séjour (DTS), au captage AEP du Theuriet, des trois lanthanides injectés en CA1 le 14/6/00.
 La DTS obtenue pour l'uranine lors de l'injection du 20/4/00 se superpose très bien aux DTS de l'erbium et de l'ytterbium.

8.2.2.2. Restitution des traceurs au niveau du site de la carrière

Le suivi du traçage réalisé le 14/6/00 par l'injection de Sm, Er et Yb dans le piézomètre CA1 est présenté en annexe 26. Il se prolonge encore actuellement (mai 2001). En effet, dès la première heure suivant l'injection, des teneurs supérieures au bruit de fond naturel ont été observées dans quelques piézomètres calcaires. Les éventuels doutes sur une origine naturelle des terres rares détectées sont systématiquement balayés par l'analyse des autres lanthanides. En effet, les terres rares injectées se détectent correctement alors que les teneurs en lanthanides naturels sont inférieures à la limite de détection lors de l'analyse des échantillons contenant du traceur. Par ailleurs, la distinction des traceurs injectés le 14/6/00 avec ceux qui ont été utilisés lors des traçages précédents s'effectue grâce à l'erbium qui est utilisé pour la première fois sur le site le 14/6/00. Les piézomètres où les traceurs ont été détectés sont présentés sur la figure 8.14.

Les piézomètres qui présentent les teneurs les plus importantes en traceurs sont P1, CA2 et CB4. Le piézomètre CA3 présente également des traces de traceurs ($[Er]_{\max}=25$ ppt; $[Yb]_{\max}=17$ ppt et $[Sm]_{\max}=10$ ppt) dans les 24h qui suivent l'injection. Les courbes d'évolution des teneurs en traceurs sont représentées figure 8.15.

Soulignons que contrairement à ce qui a été observé dans les alluvions, le passage des traceurs ne coïncide pas avec la remontée de la Loire. En effet, la restitution des traceurs s'effectue pendant une période de descente du fleuve (figure 8.9). Lorsque l'on examine les courbes de restitution d'un peu plus près, on constate que le passage des traceurs a d'abord lieu en CA2, puis en CB4. En CB4, on n'observe qu'une seule impulsion dont le maximum se situe 35 heures après le début de l'injection alors qu'en CA2, on observe deux impulsions. La première impulsion a lieu 40 mn après l'injection, c'est à dire lors du premier prélèvement suivant l'injection. La deuxième impulsion a lieu 4 jours et demi après l'injection (figure 8.15). On a donc deux écoulements différents.

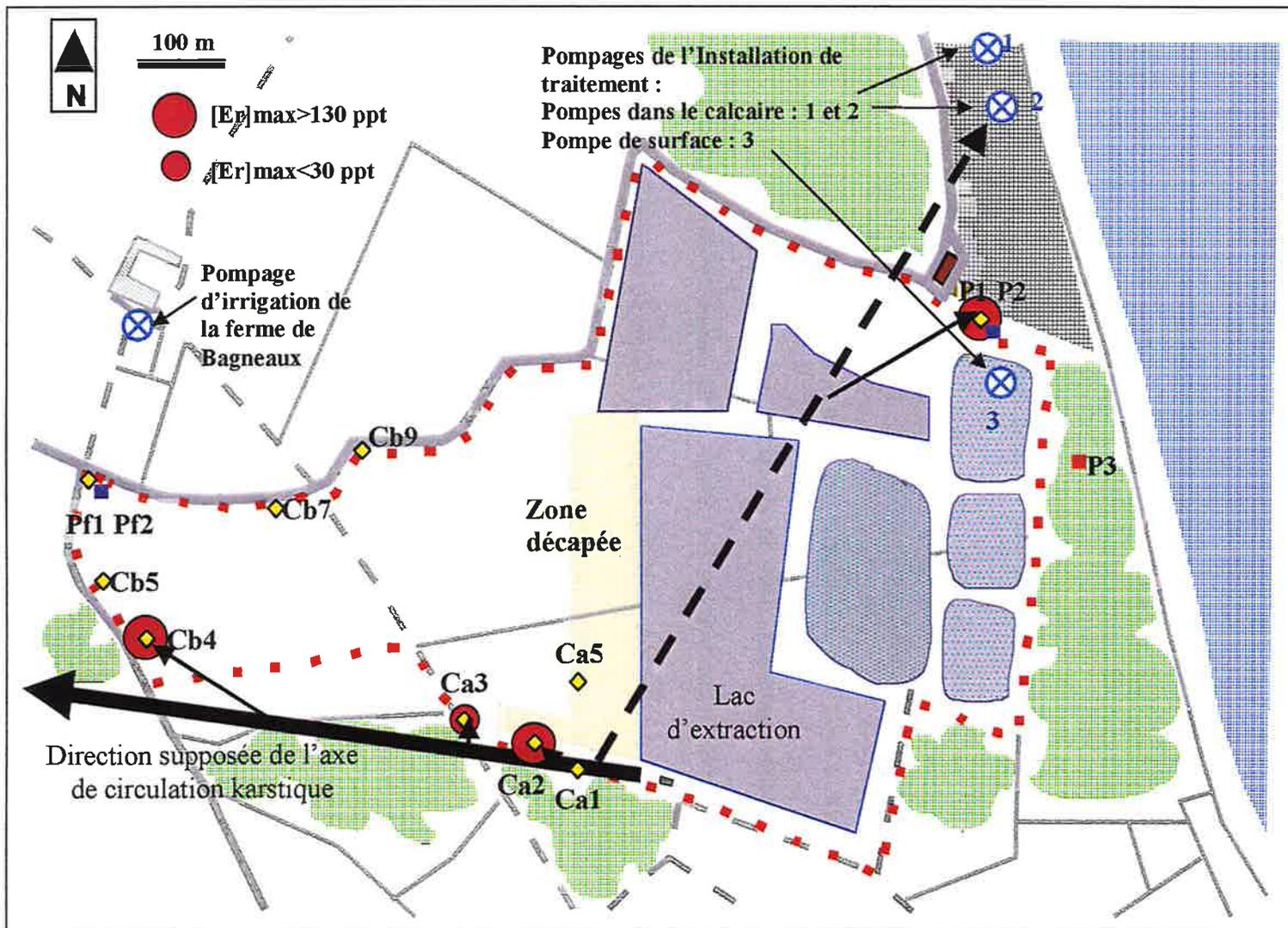


Figure 8.14 : Traçage du 14/6/00 à partir du piézomètre CA1. Déplacements des traceurs dans la nappe du calcaire de Pithiviers.

Les flèches noires indiquent les déplacements des traceurs. Les disques de couleur bordeaux indiquent les piézomètres où les traceurs ont été observés. L'essentiel des piézomètres où les traceurs ont été détectés s'alignent sur une direction Sud-Est – Nord-Ouest correspondant à la direction supposée de l'axe de circulation karstique. Les traceurs ont également été détectés dans les piézomètres P1 et P2 probablement en raison de circulations engendrées par les pompes de l'installation technique localisés dans le karst.

Le premier est un écoulement rapide à travers le chenal karstique reliant CA1 au Bouillon et passant non loin de CA2 et CB4. Il semble qu'une partie des traceurs circulant dans cet axe "diffusent" dans les parties de la nappe situées à proximité de l'axe (ex: CA2). Une seconde partie des traceurs emprunte un chemin plus long. C'est la deuxième impulsion observée en CA2, 4,5 j après l'injection.

Il est étonnant de voir passer les traceurs au niveau du piézomètre P1 situé près de l'installation technique. Rappelons cependant que le rabattement de la nappe créé par les pompes de la carrière est ressenti au niveau de tous les piézomètres du réseau d'observation de la nappe du calcaire. Il est donc logique de retrouver des traceurs dans les piézomètres situés à proximité des pompes P1 et P2. Les traceurs sont observés d'abord dans la nappe du calcaire (P1) puis dans les alluvions (P2) ce qui confirme par ailleurs les échanges importants entre nappe du calcaire et nappe alluviale. Dès la détection des traceurs dans P1-P2, des prélèvements ont été effectués régulièrement au niveau de la pompe d'alimentation en eau sanitaire située dans l'un des forages des deux pompages de l'usine de traitement (le plus au nord, figure 8.14). Ces prélèvements n'ont présenté aucun signe d'Er ou Yb. Mais la pompe des eaux sanitaires est localisée dans le forage situé le plus au nord. Les traceurs ont probablement été aspirés par la pompe Sud, localisée à proximité de P1-P2. Les traceurs ont également été recherchés dans les eaux de lavage mais sans succès. La vitesse de déplacement des traceurs observée entre CA1 et P1 est énorme (3,6 m/h) lorsque l'on considère la perméabilité mesurée à partir des courbes de rabattement lié aux pompages ($K=5.10^{-2}$ m/s) ainsi que le gradient hydraulique mesuré entre P1 et CA1 (quasiment nul, voir figure 6.14 chapitre 6). Les modèles d'écoulement en milieu poreux ne s'appliquent pas. Seul un modèle considérant un écoulement par un réseau de chenaux connectés entre eux permettrait de rendre compte de telles vitesses de déplacement dans la nappe du calcaire.

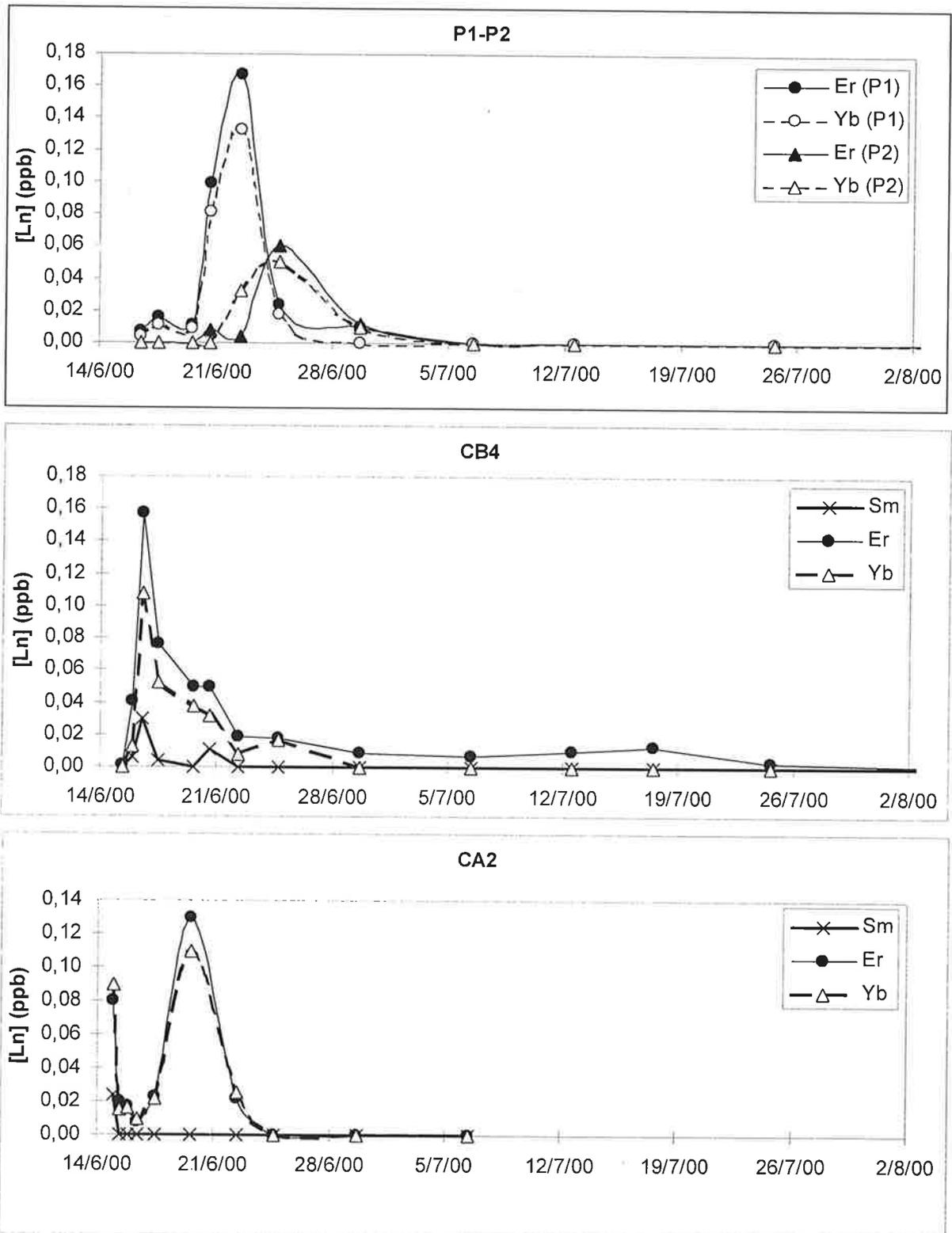


Figure 8.15: Courbes de restitution, dans les piézomètres calcaires P1, CA2, CB4 et alluvionnaire P2, des traceurs (Sm, Er, Yb) injectés en CA1 le 14/6/00.

8.2.3. Traçage du lac

Le chapitre précédent a clairement montré que des échanges faciles et rapides avaient lieu entre les parties alluviale et calcaire de la nappe au niveau du site de la carrière. Il faut en effet une dizaine d'heures pour observer, dans le calcaire, les premiers passages de traceurs injectés dans le piézomètre alluvionnaire Pf2. En injectant un traceur dans le lac nord en cours de remblaiement, on a voulu évaluer la fiabilité du réseau de surveillance mis en place par la carrière. Pour cette expérience, l'uranine n'a pas été utilisée du fait de sa destruction par la lumière. De plus, il était préférable d'utiliser un traceur discret plutôt qu'un colorant étant donnée la surface à couvrir : 150m×250m. Le traceur qui a été choisi est le complexe Dy-DTPA (DTPA=diethylenetriamine pentaacetic acid) dont la constante de stabilité est nettement supérieure à celle du complexe Dy-EDTA. La faible sorption de ce traceur sur le tout-venant a été confirmée en batch (figure 8.16).

8.2.3.1. Déroulement du traçage

Le 15/6/00 de 11h30 à 12h00, 1,5 kg de dysprosium sous la forme Dy-DTPA (1,1 eq de DTPA) est injecté dans le lac en cours de remblaiement situé dans la partie nord de la carrière (figure 8.16). Les traceurs sont contenus dans 4 bidons (2 de 25 litres, 2 de 30 litres). Ils sont déversés à la surface du lac à partir d'une embarcation qui sillonne le lac afin de répartir les traceurs de manière homogène. Des prélèvements réalisés en surface au milieu et aux 4 coins de l'étang, le soir de l'injection, présentent des teneurs en traceurs variant de 20 à 96 ppb. Le lendemain midi, la répartition des traceurs dans le lac s'est homogénéisée puisque les teneurs mesurées aux mêmes endroits varient entre 29 et 34 ppb. Par contre, les traceurs ne se sont pas encore bien répartis sur la colonne d'eau puisque les teneurs mesurées au même moment au fond du lac sont de 12 ppb seulement.

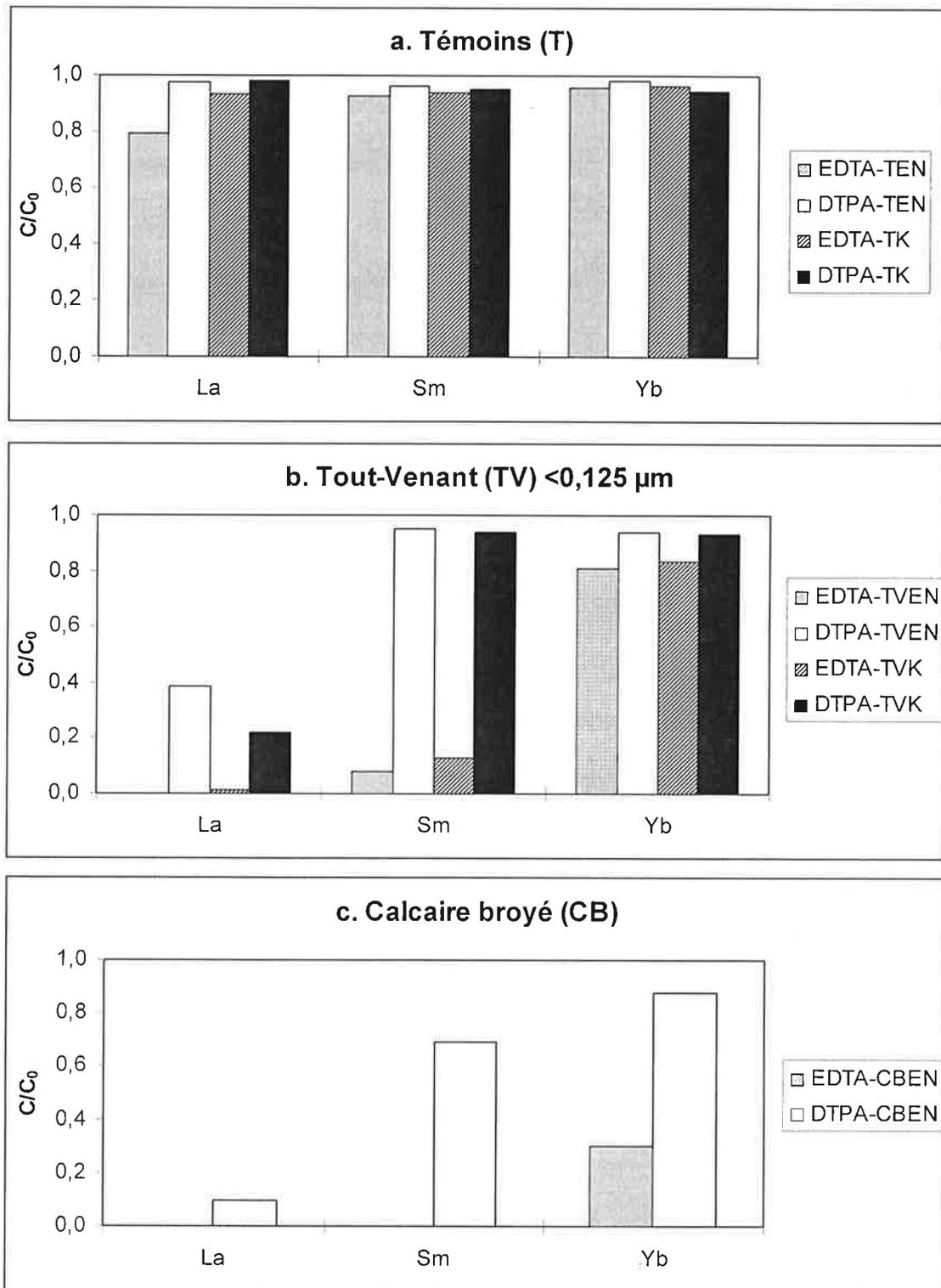


Figure 8.16 : Etude comparée de l'adsorption des complexes DTPA et EDTA de La, Sm et Yb.

Les tests sont réalisés dans deux types de solution (EN et K, voir chapitre 5) contenant 1 ppm de chaque terre rare. Chaque solution est agitée 11 jours au contact de sédiments argileux (b: Tout Venant <125 μm) et de calcaire (CB) de Pithiviers broyé < 125 μm (c). Les solutions témoins (a) ne contiennent pas de sédiments. Les pH mesurés en fin d'agitation sont donnés pour les deux types de solution. Les graphiques représentent la concentration mesurée en solution en fin d'agitation rapportée à la concentration initiale. La supériorité de stabilité du complexe DTPA est indiscutable surtout en milieu calcaire.

L'évolution au cours du temps des teneurs en dysprosium dans le lac tracé est représentée sur la figure 8.18. Lorsque des prélèvements ont été effectués en plusieurs endroits du lac, c'est la moyenne des teneurs en dysprosium qui est représentée.

Ce traçage a lieu en période de descente de la Loire (figure 8.9). Les écoulements de traceurs sont présentés sur la figure 8.17. Les résultats de ce traçage sont présentés en annexe 26.

Le passage du dysprosium est d'abord observé dans le piézomètre CB7 (figure 8.20), le jour de l'injection à 22h. Le maximum des teneurs (31 ppt) est observé le 19/6/00 à 14h30.

C'est en P1 et P2 que les traceurs sont ensuite observés (le 16/6/00 à 12h). Les teneurs maximales dans ces deux piézomètres (P1 : 311 ppt ; P2 : 96 ppt) sont enregistrées lors de ce premier prélèvement.

Le piézomètre CA2 enregistre également des teneurs en dysprosium importantes à partir du 17/6/00 11h, le maximum des teneurs étant de 70 ppt le 19/6/00 à 13h45.

Le 19/6/00 à 14h30, le dysprosium est détecté dans le piézomètre CB9, et le maximum de concentration (20 ppt) est observé le 22/6/00 à 10h40.

Le 10 juillet, le lac tracé est mis en communication, par une buse, avec le lac d'extraction. Cela entraîne un déversement des traceurs dans le lac d'extraction situé à une cote inférieure. A partir de ce moment, on peut s'attendre à observer les traceurs dans la partie sud de la carrière, en particulier dans le piézomètre O. Mais c'est seulement à partir du 14/11/00 que l'on commence à observer le passage des traceurs dans ce piézomètre à des teneurs très voisines de celles du lac d'extraction (figure 8.19). Des traces de dysprosium sont également détectées le 12/7/00 dans le lac situé à l'Est du lac tracé ainsi que dans le lac d'eau claire le 29/8/00 (figure 8.17).

Pendant l'expérience de traçage du lac, la source du Bouillon a été surveillée ainsi que le Theuriet mais aucune trace de dysprosium n'a été détectée.

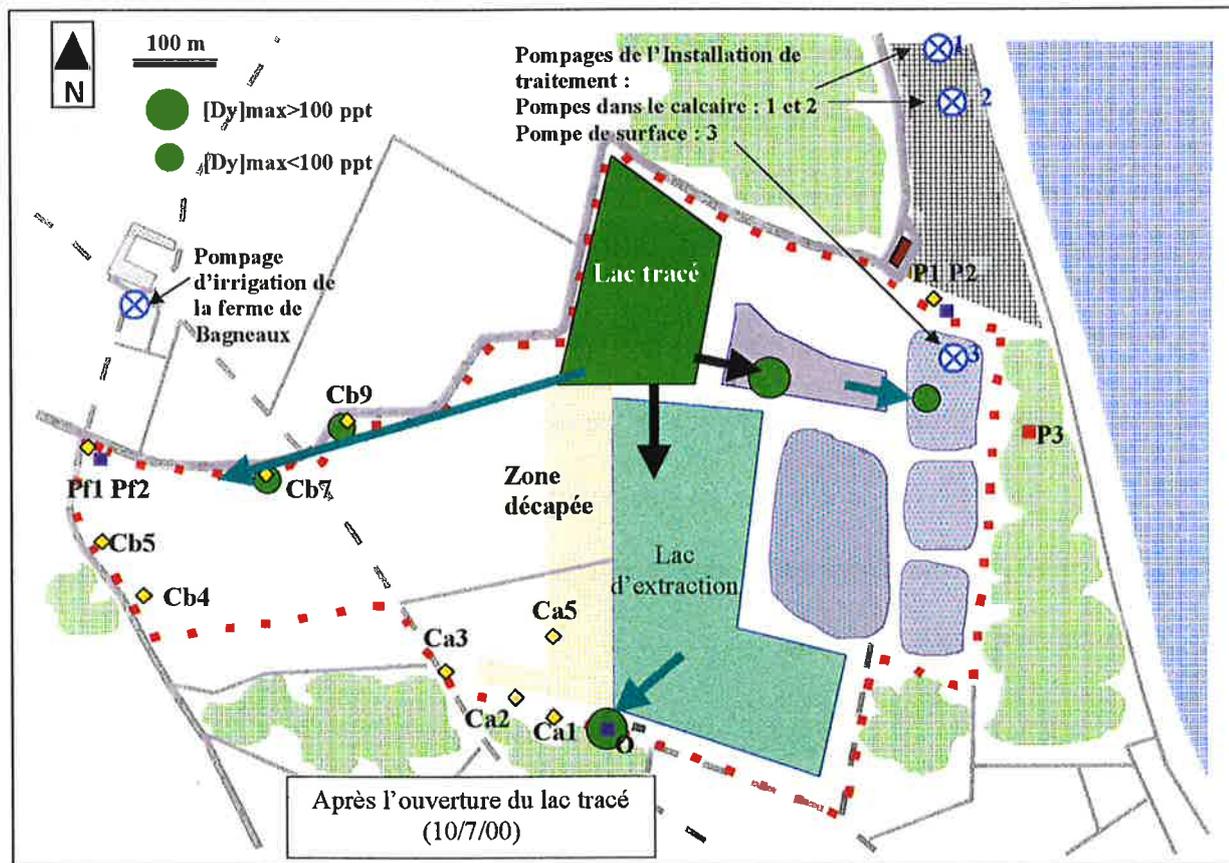
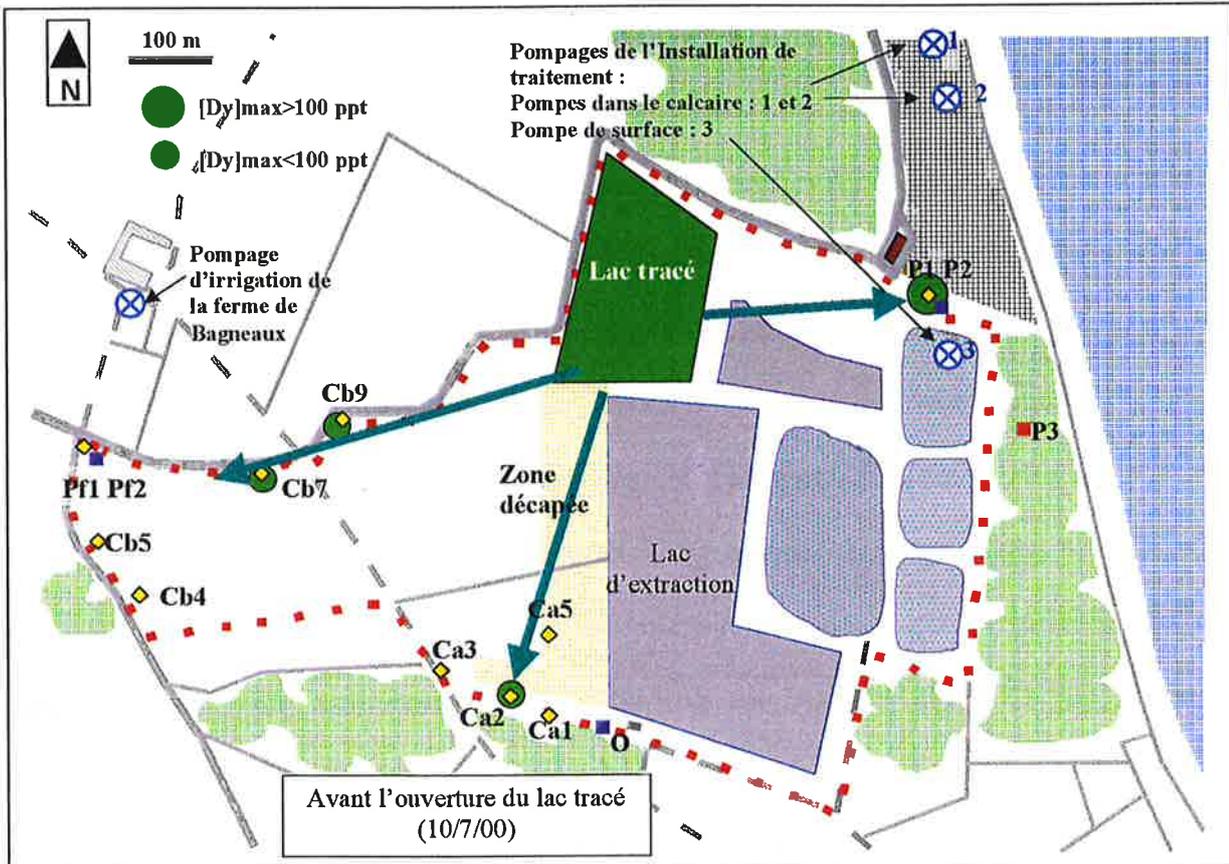


Figure 8.17 : Répartition du dysprosium injecté dans le lac nord de la carrière le 15/6/00 avant, puis après, la mise en communication du lac tracé avec le lac d'extraction le 10/7/00.

Les flèches bleu-vert indiquent les circulations souterraines. Les flèches noires montrent les communications artificielles inter-lacs.

8.2.3.2. Interprétation du traçage du lac Nord

Il faut remarquer que le niveau perméable mis en évidence à l'aide des profils de débits verticaux en CB7 et CB9 (figure 8.3) correspond bien à une zone d'écoulement rapide. La restitution des traceurs observée dans ces deux piézomètres (figure 8.20) est conforme à une injection continue dans le temps. En effet, le signal s'étale dans le temps en diminuant progressivement pendant que le signal d'entrée (lac nord) baisse en intensité parallèlement. On observe une injection continue du dysprosium dans la nappe du calcaire alors que le niveau de la nappe baisse. L'écoulement observé est Est-Ouest, c'est-à-dire conforme à la piézométrie. Les teneurs en dysprosium étant plus importantes en CB7 qu'en CB9, on peut en conclure que CB7 est localisé plus près d'un axe d'écoulement que CB9. La vitesse d'écoulement mesurée sur le maximum de concentration est de 100 mètres par jour entre le lac et CB7. Il est certainement possible de décomposer cet écoulement en deux phases : transfert des alluvions vers les zones d'écoulements rapides puis circulation dans les drains karstiques. La première étape expliquerait les faibles teneurs observées en CB7 et CB9. L'augmentation des teneurs à la mi-juillet en CB7 coïncide avec l'ouverture du lac nord. Cette augmentation peut donc s'expliquer par la mise en relation du traceur avec une entrée supplémentaire dans le réseau de drainage localisée au niveau du lac d'extraction, entrée qui n'est pas reliée à CB9 où l'on n'observe pas de variation des teneurs en dysprosium. L'effet du lac est donc d'augmenter la surface de contact du traceur avec la nappe du calcaire et d'accroître ainsi le risque de passage dans le réseau de drainage par des fenêtres privilégiées en période de descente de la nappe.

Les passages de traceurs observés en CA2 et P1-P2 sont de courtes durées et dans des directions d'écoulement opposées ou perpendiculaires à la direction indiquée par la piézométrie (Est-Ouest). Il serait bon de confirmer ces résultats.

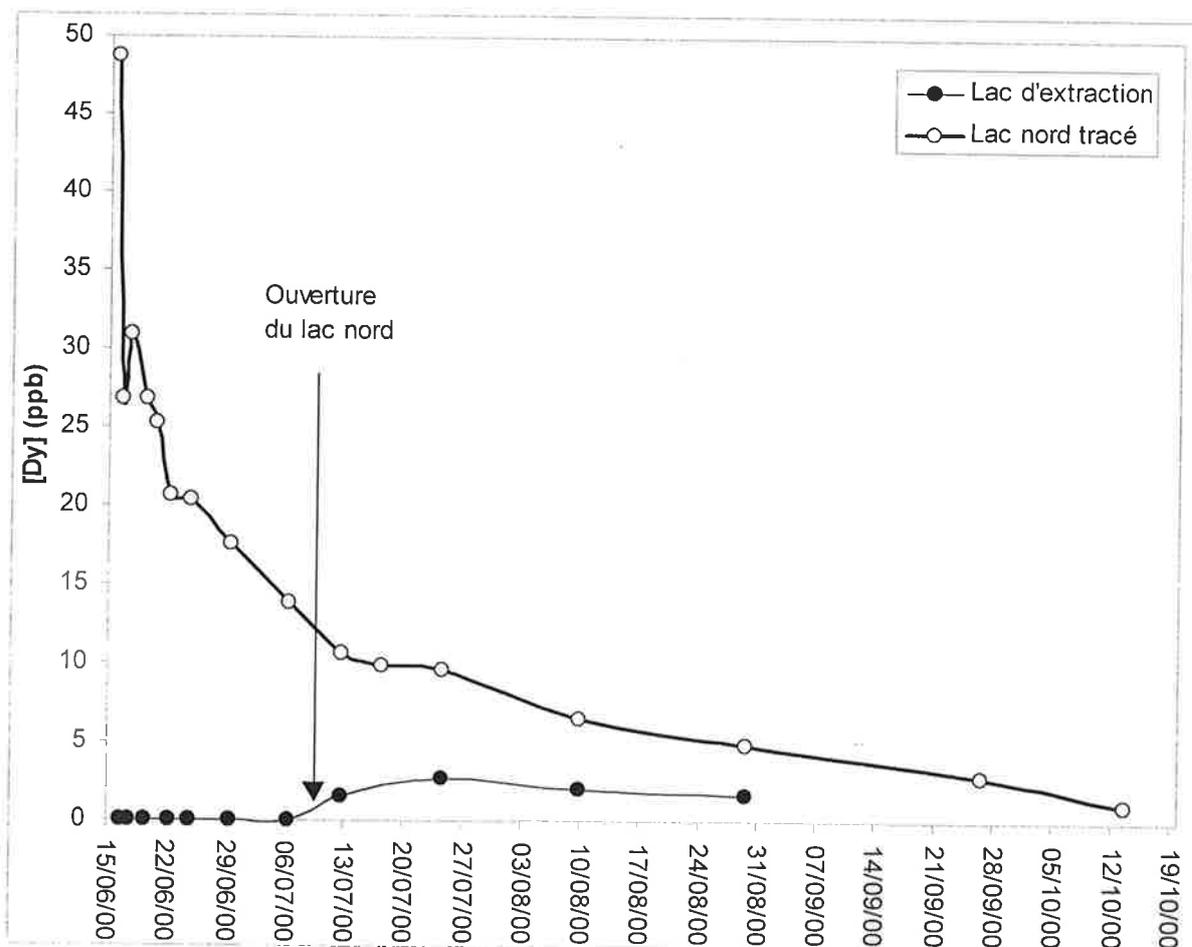


Figure 8.18 : Evolution des teneurs en dysprosium dans le lac Nord où s'est faite l'injection de 1,5 kg de dysprosium complexé à 1,1 équivalents de DTPA et dans le lac d'extraction avant et après l'ouverture du lac tracé le 10/07/00.

Malgré sa cote piézométrique inférieure à celle du lac tracé et la faible épaisseur d'alluvions qui sépare les deux lacs, le lac d'extraction ne présente aucune trace de dysprosium avant l'ouverture du lac nord. Ce point confirme l'absence de communications horizontales importantes dans les alluvions. Au contraire, les communications verticales avec la nappe calcaire sous-jacente ont lieu rapidement puisque le dysprosium est observé 10h seulement après l'injection, dans le piézomètre calcaire CB7.

Même si les précautions maximales ont été prises lors des prélèvements, l'éventualité d'une pollution n'est pas à exclure totalement. On peut cependant interpréter ces déplacements comme des impulsions rapides de courtes durées à l'exemple de ce qui a été observé dans les alluvions. En effet, ces déplacements ont lieu en fin d'un pic de crue de la Loire, période où les déséquilibres de charges dans la nappe sont les plus importants.

Il est frappant de constater que le passage rapide des traceurs du lac nord vers le calcaire n'est pas accompagné d'un étalement horizontal, dans les alluvions, de la masse d'eau « contaminée » en dysprosium. En effet, malgré une différence de charge de plusieurs dizaines de centimètres sur la dizaine de mètres d'alluvions qui les sépare (NB : ces chiffres sont approximatifs et basés sur l'observation simplement), le lac nord et le lac d'extraction restent isolés l'un de l'autre jusqu'à l'ouverture du lac nord par la mise en place d'une buse le 10/7/00. A partir de ce moment, le lac nord alimente le lac d'extraction jusqu'à ce que les charges s'équilibrent. De même, le piézomètre O n'est pas atteint par l'eau du lac d'extraction avant une longue période (au moins deux mois – la fréquence des prélèvements réalisés dans cette période ne permet pas d'être plus précis !).

L'expérience du lac permet de confirmer les points suivants :

- L'absence de circulations dans les alluvions en période de descente de la nappe.
- La nappe alluviale et le réseau de drainage du calcaire sous-jacent sont mis en communication en période de descente de la nappe.

Les points nouveaux apportés par cette expérience sont les suivants :

- Les échanges sont rapides localement (quelques jours) entre le lac et les zones d'écoulement rapide du calcaire.

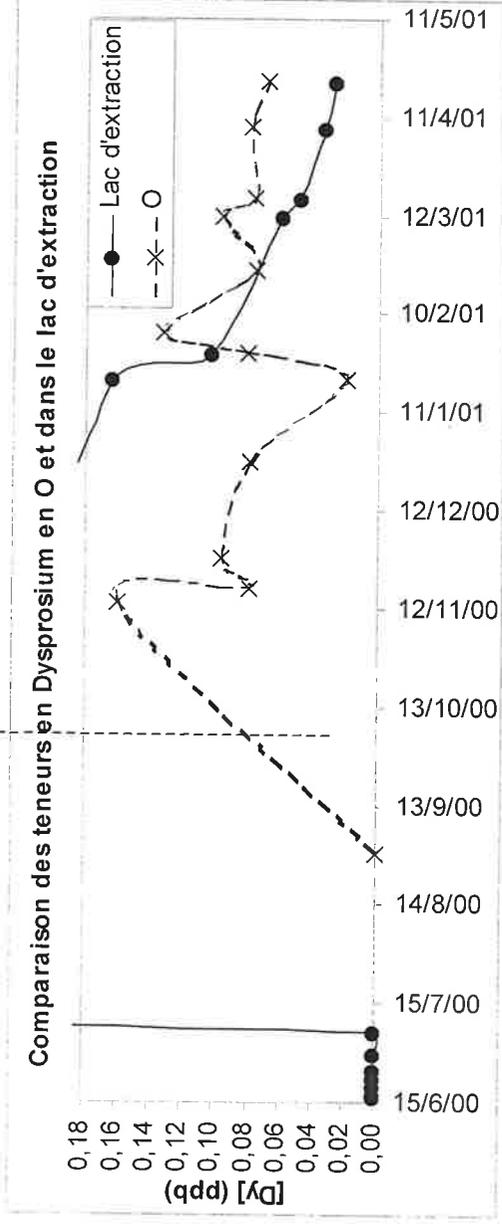
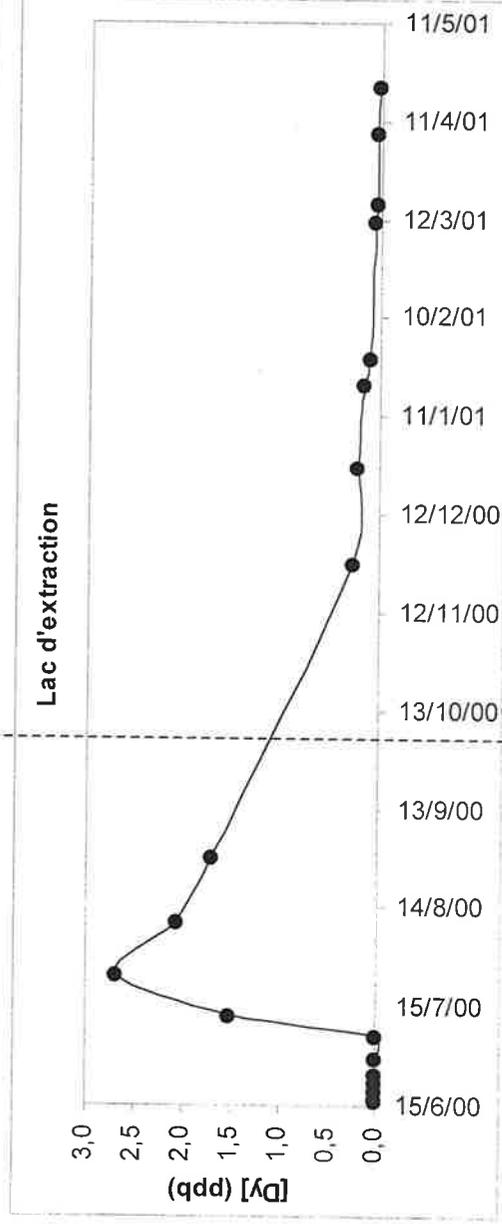
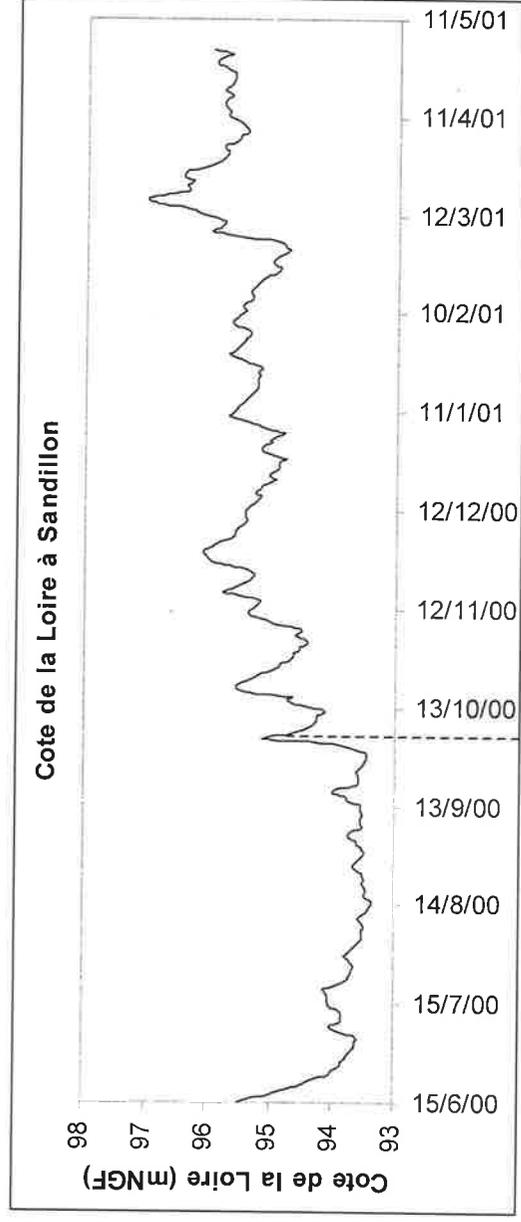


Figure 8.19 : Evolution des teneurs en dysprosium dans le lac d'extraction et dans le piézomètre O en relation avec les fluctuations des cotes de la Loire (courbe du haut).
 L'ouverture du lac tracé le 10/7/00 entraîne l'arrivée du dysprosium dans le lac d'extraction. Malgré la proximité du piézomètre O, à 25 mètres au sud du lac d'extraction, il faut attendre le 14/11/00 pour observer le passage du dysprosium du lac vers ce piézomètre après la remontée de la Loire. Ce fait prouve une fois de plus l'absence de circulations rapides dans les alluvions en période de descente de la nappe.

-Ces écoulements rapides existent même en période d'étiage contrairement aux écoulements observés dans les alluvions qui sont pulsés par les remontées de la Loire induisant des gradients hydrauliques locaux et momentanés. Le réseau karstique draine une partie de l'eau du lac.

-Le réseau de piézomètres implanté autour de la carrière permet un contrôle des transferts ayant lieu entre lacs en cours de remblai et nappe du calcaire.

Le traçage du lac est une expérience très complémentaire du traçage réalisé dans les alluvions. En effet, alors que des traceurs injectés dans les alluvions s'étalent lentement à courte distance et par pulsations successives induites par les remontées de la Loire, les traceurs injectés dans le lac s'homogénéisent rapidement par dilution et convection (mélange des eaux favorisé par le vent, les courants) conduisant à un étalement rapide quel que soit le régime hydrologique de la Loire. Cet étalement favorise la mise en contact avec les entrées du système de drainage du calcaire. Il y a d'abord dilution puis évacuation rapide des traceurs. Au contraire, dans les alluvions, les traceurs sont confinés et peu dispersés.

Par conséquent, plus les compartiments du lac à remblayer sont de petites tailles, moins les chances de voir une pollution éventuelle se propager et atteindre les entrées du système de drainage sont importantes.

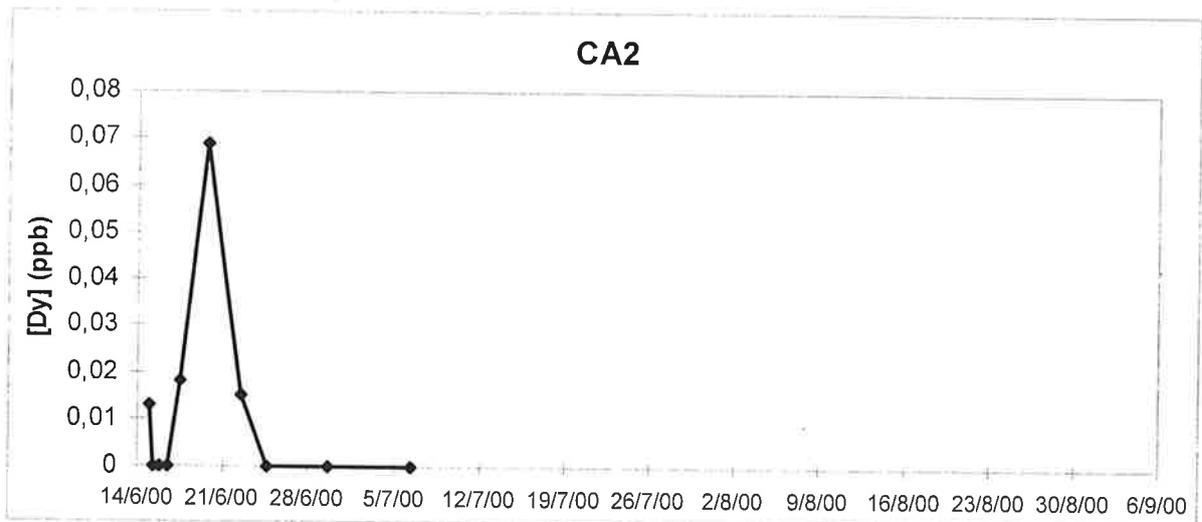
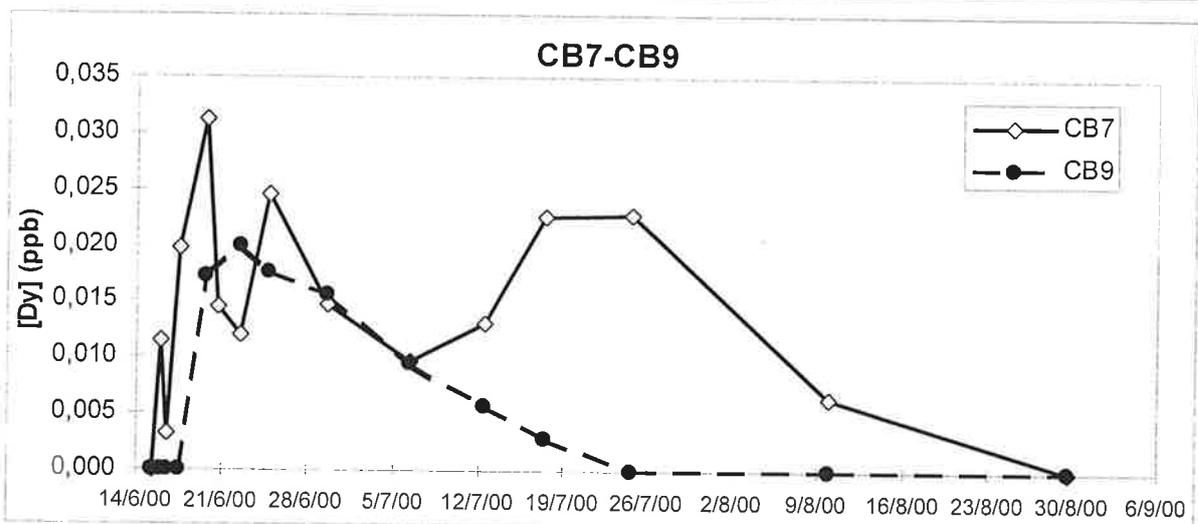
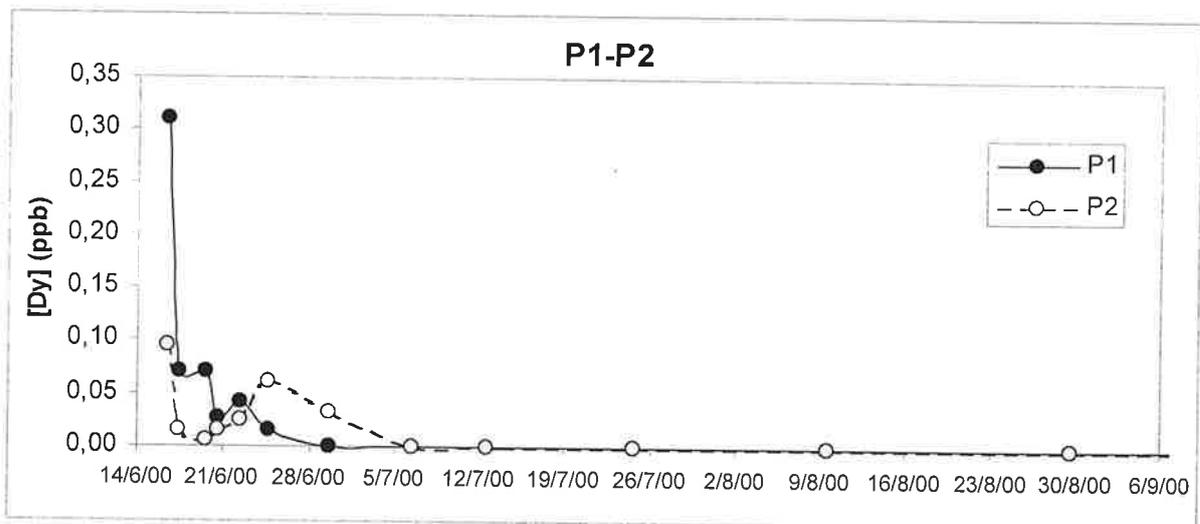


Figure 8.20 : Teneurs en dysprosium détectées dans les piézomètres P1, P2, CB7, CB9 et CA2 lors du traçage du lac nord à partir du 14/6/00.

Alors que les restitutions observées dans les piézomètres P1, P2 et CA2 sont de relativement courtes durées, les restitutions observées en CB7 et CB9 correspondent à une injection continue de dysprosium à partir du lac. Le piézomètre CB7 qui présente des teneurs plus importantes que CB9 semble être situé plus proche d'un axe d'écoulement que CB9.

8.3. Discussion et interprétation des résultats de traçages dans les chenaux karstiques

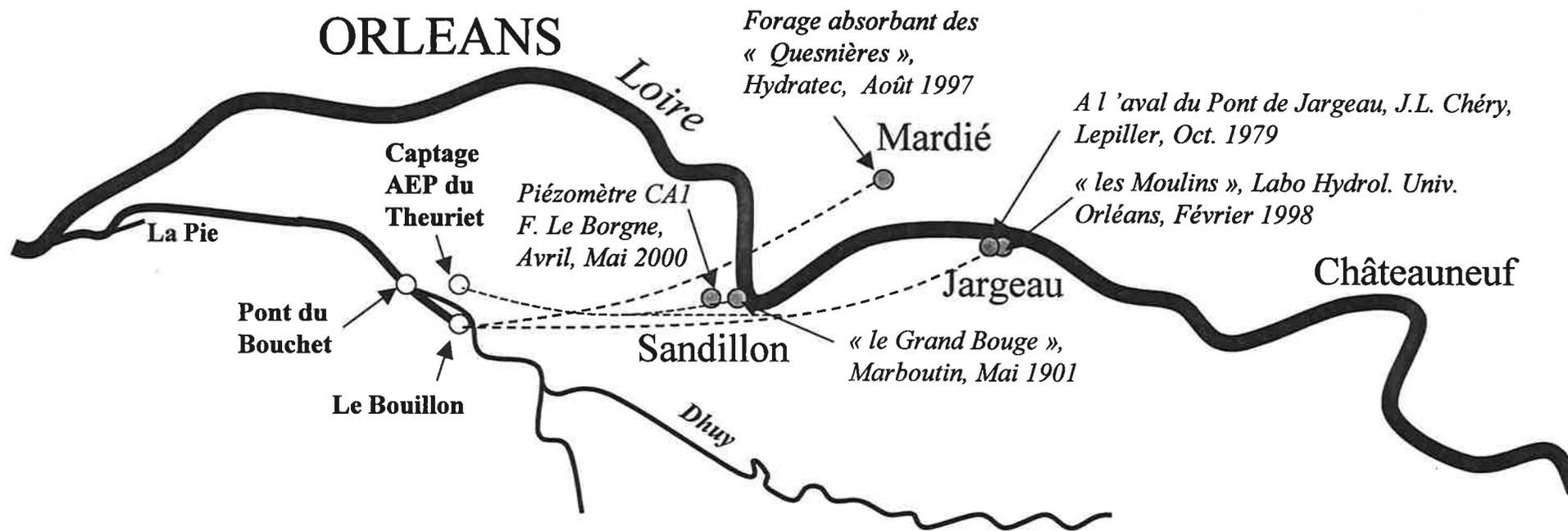
8.3.1. Comparaison avec les traçages réalisés dans le Val d'Orléans et dans d'autres réseaux karstiques de France

Les paramètres du transit (tableau 8.4) obtenus par les traçages entre CA1 et le Bouillon ainsi que le captage du Theuriet sont tout à fait semblables aux valeurs obtenues lors des traçages réalisés par les auteurs précédents selon une trajectoire comparable. Les expériences ne manquent pas. Elles sont répertoriées dans "L'inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en région centre" (Lepiller, 2001b). Les principaux résultats obtenus lors de ces traçages sont présentés brièvement ci-dessous. Le lecteur est invité à repérer les lieux cités sur la figure 8.21.

-L'injection de 1,5 kg d'uranine le 13 Octobre 1979 dans une perte rive gauche de la Loire en aval du pont de Jargeau, donne au Bouillon une vitesse apparente de transit égale à 129,3 m/h. Le même traçage conduit aux captages AEP avec une vitesse apparente de 85,6 m/h.

-Le 20 février 1998, l'injection d'1 kg d'uranine dans une perte en Loire, rive gauche, au pied de la levée, au lieu-dit "les Moulins" à Jargeau conduit, à la source du Bouillon, à 2,1% de restitution, une vitesse apparente de 125 m/h et une section moyenne de drain égale à 8,6 m².

-Le 27 Août 1997, la société Hydratec injecte 5 kg d'uranine dans le forage absorbant des Quesnières à Mardié. Les traceurs sont retrouvés au Bouillon avec une vitesse modale de 57 m/h et au Theuriet avec une vitesse de 42 m/h.



- Lieux, dates et auteurs des injections de traceurs
- Lieux de prélèvement des résurgences du réseau karstique
- Liaison mise en évidence par traçage

Figure 8.21: Localisation de quelques traçages mettant en évidence les chenaux de circulations karstiques du Val d'Orléans dans le secteur de Sandillon.

-Enfin, l'expérience qui se rapproche certainement le plus des traçages réalisés dans ce travail est l'injection par Marboutin le 22 mai 1901 de 15 kg d'uranine dans une perte en Loire située en amont du lieu-dit "le Grand-Bouge" à Sandillon. Marboutin (1901) retrouve l'uranine 55 heures plus tard au pont du Bouchet, sur le Loiret.

Les vitesses de transit, les taux de restitution et les sections moyennes des drains calculés à partir de ces traçages correspondent tout à fait aux résultats du travail présent.

Les vitesses de transit élevées obtenues ne sont pas exceptionnelles puisque les vitesses obtenues par traçage dans le réseau karstique du Châtillonnais, par exemple, sont exactement du même ordre. En juin 1986, Cadic et Al. (1990) mesurent des vitesses comprises entre 140 et 180 m/h entre les pertes de Lucenay-le-Duc (21) et des sources situées 8 km à l'aval.

8.3.2. Comparaison des restitutions obtenues pour les complexes EDTA de lanthanides dans le karst

En décembre 1982, Gauthier et Al. (1982) constatent, dans un chenal souterrain du karst de la Touvre, près d'Angoulême, qu'à l'issue d'un trajet particulièrement long (16,5 km), les complexes EDTA d'euprotium sont presque totalement retenus dans le karst alors que 20% des complexes de dysprotium sont restitués. Les taux de restitution obtenus au Bouillon et au Theuriet suivent bien cet ordre lanthanide légers < lanthanides lourds.

8.3.3. Interprétation des différences de restitution entre les complexes EDTA de lanthanides

Si l'on trace la variation au cours du temps des rapports Yb/Sm, Er/Sm et Yb/Er obtenus au Bouillon (figure 8.22), on constate un enrichissement relatif de la solution en samarium tout au long de la restitution au Bouillon. Les mêmes rapports très irréguliers obtenus au Theuriet ne sont pas interprétables du fait de l'imprécision des teneurs en samarium proches du bruit de fond naturel. Au moment de l'injection, $Yb/Sm = 1,08$; $Er/Sm = 1,34$ et $Yb/Er = 0,81$.

Au début de la restitution au Bouillon, ces rapports sont maximaux et égaux à $Yb/Sm = 3$; $Er/Sm = 4$ et $Yb/Er = 1,8$.

Les premières eaux contenant les traceurs sont donc enrichies en lanthanides lourds par rapport à la solution injectée. Puis les rapports diminuent progressivement au cours de la restitution montrant un enrichissement relatif en samarium. D'après les DTS (figure 8.12), cet élément "traîne" en fin de restitution. Cela se traduit par un temps moyen de séjour plus important pour le samarium que pour les autres traceurs.

Si l'on compare l'évolution des rapports obtenus au Bouillon avec celle que l'on obtient en batch (figure 8.22), on obtient des résultats très différents. En effet, le rapport Dy/Sm augmente régulièrement en batch dans les temps caractéristiques du traçage (temps du début de la restitution, temps du pic de restitution, fin de la restitution).

On peut expliquer que la solution s'écoulant au Bouillon pendant le traçage s'enrichisse en samarium par rapport à Er et Yb de diverses manières:

-Supposons que la rétention du samarium dans le chenal karstique soit irréversible.

Lors de traçages effectués au Mayet de Montagne, P.Toulhoat (1987) montre qu'en cas de

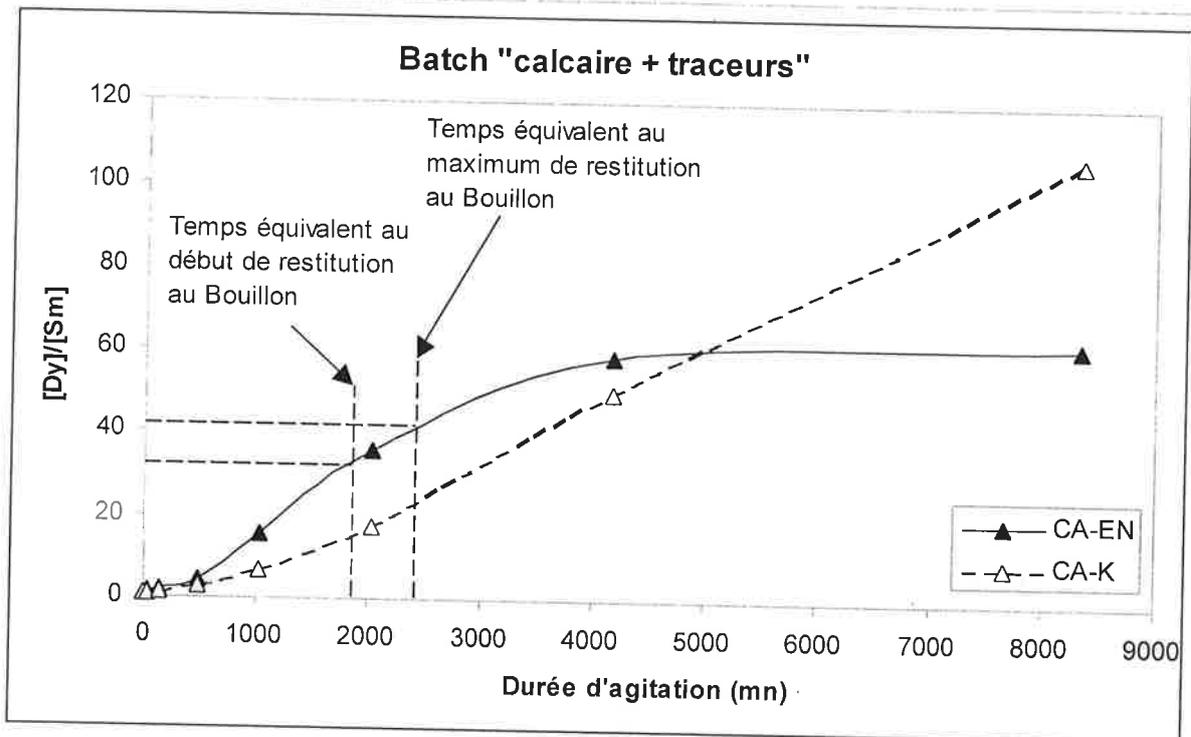
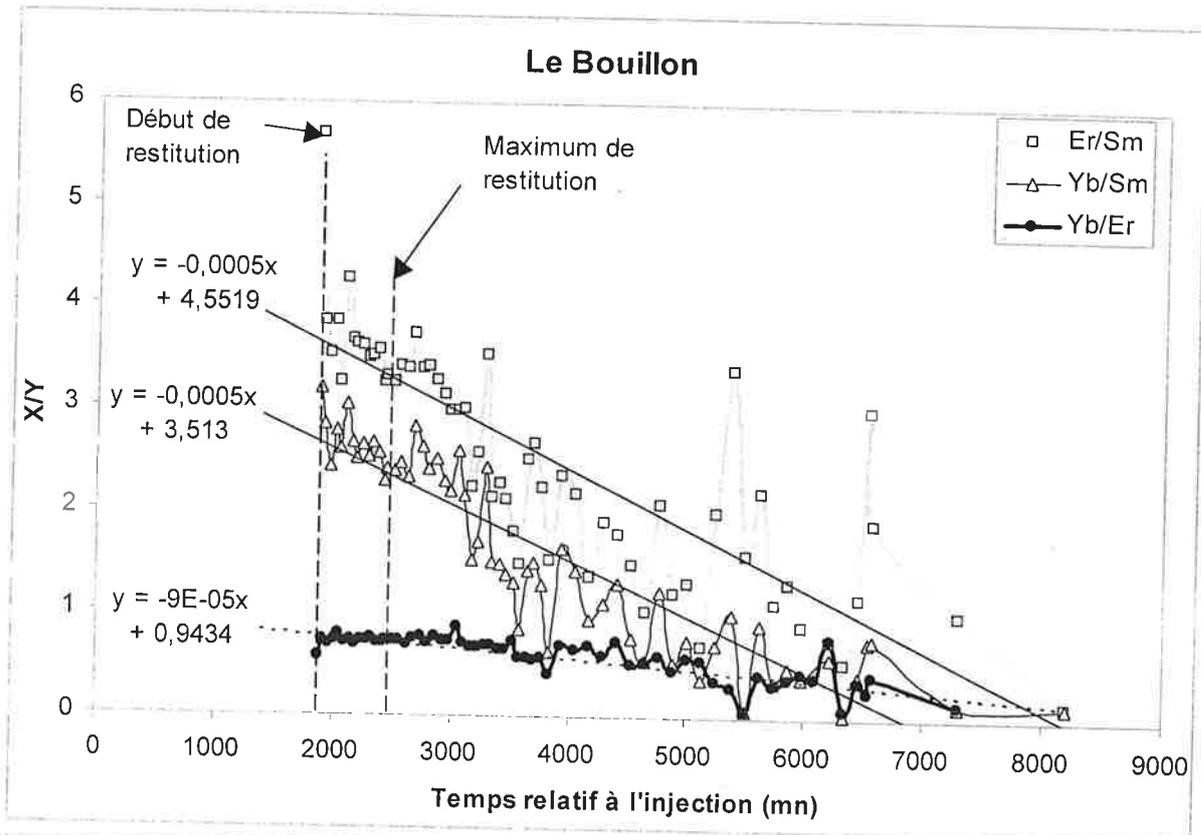


Figure 8.22: Evolution des rapports Yb/Sm, Er/Sm et Yb/Er lors de la restitution à la source du Bouillon des traceurs injectés le 14/6/00 dans le piézomètre CA1 (graphique du haut). Evolution du rapport Dy/Sm dans les solutions d'eau naturelle "EN" et KNO_3 0,01 M "K" contenant initialement 1 ppm de chaque lanthanide en contact avec du calcaire de Pithiviers broyé (graphique du bas). Alors qu'en batch, les rapports lanthanide lourds/lanthanide léger augmentent au cours du temps, ces mêmes rapports diminuent au cours de la restitution des traceurs au Bouillon, indiquant un processus de rétention réversible des lanthanides légers.

sorption irréversible des complexes EDTA de lanthanides, les traînes des courbes de restitution obtenues dans une faille granitique ne se croisent pas entre lanthanides lourds et lanthanides légers (figure 8.23). Ce n'est pas ce que l'on observe au Bouillon. Au contraire, dans le cas d'une sorption réversible, Toulhoat (1987) montre que la traîne des lanthanides légers est plus importante que celle des lanthanides lourds. C'est bien ce que l'on observe au Bouillon. Il pourrait donc y avoir une sorption réversible du samarium sur les parois des drains karstiques ou bien sur la matière en suspension sédimentée dans les chenaux d'écoulement. Les chenaux de circulation karstique seraient tapissés de matière en suspension. Il n'est pas rare, en effet, de rencontrer, par sondage dans le calcaire de Pithiviers, des niveaux d'alluvions fins correspondant à des chenaux de circulation karstique. Par ailleurs, certains de ces chenaux sont totalement colmatés. Le cas récent du colmatage puis du décolmatage, par des spéléologues plongeurs (communication personnelle de M. Lepiller), de la source de l'Abîme, non loin du Bouillon, en est un exemple frappant. (Remarque: le colmatage de ce karst comporte aussi des niveaux riches en matière organique - cf. témoignages des foreurs et observations faites au Bouillon : plusieurs niveaux de feuilles intercalés avec les argiles). Le samarium aurait donc pu se fixer de manière semi-réversible sur les matériaux argileux. La mention "semi-réversibilité" repose sur le faible taux de restitution du samarium.

-Supposons maintenant que le samarium se fixe par adsorption ou précipitation sur la MES fine véhiculée par les chenaux d'écoulement. Une grande partie de cette MES décante entre la Loire et le Bouillon puisque les eaux qui sont restituées au Bouillon sont limpides. Helsens (1981) puis Alberic et Lepiller (1998) ont mesuré les valeurs de MES dans la Loire à Jargeau, aux sources du Bouillon et de la Pie ainsi que dans le Duy. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau 8.5.

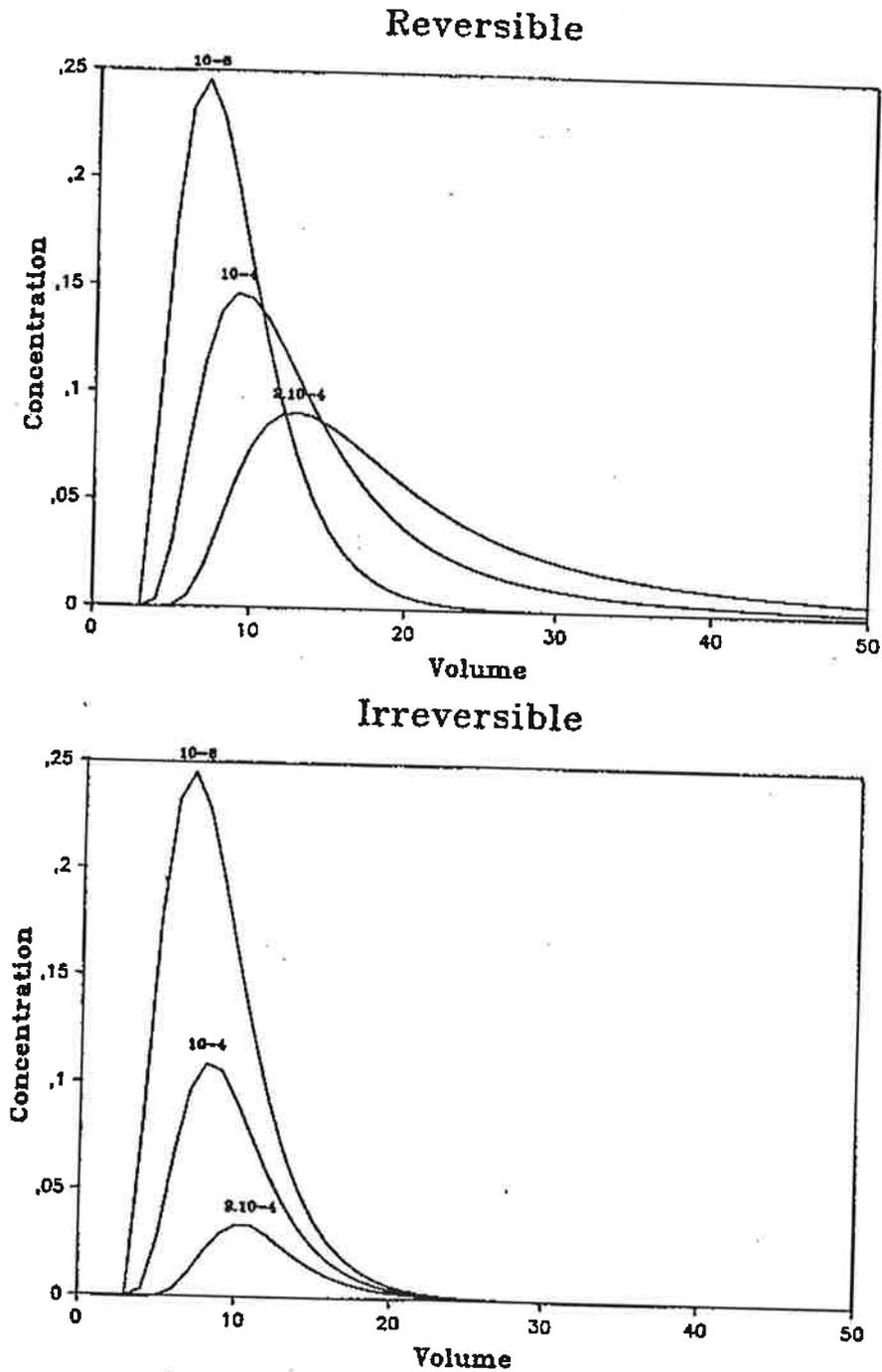


Figure 8.23: Comparaison des courbes de restitution théoriques $[LnY^-]=f(V)$ obtenue pour une sorption non linéaire réversible et non réversible en prenant différentes valeurs de la constante globale de sorption des complexes, K (extrait de la thèse de P. Toulhoat, 1987).

$K=K_{ads}/\beta_{LnY}$ où K_{ads} est la constante d'adsorption dans la relation $F=K_{ads}[Ln^{3+}]$ (F =concentration massique de lanthanide fixé). β_{LnY} est la constante de stabilité des complexes EDTA. Le traînage est bien plus accentué pour des valeurs élevées de la constante globale de sorption K (cas des lanthanides légers) dans le cas d'une sorption réversible.

Tableau 8.5: Matière en suspension mesurée par Helsens (1981) et Alberic&Lepiller (1998) dans les eaux de la Loire, du Duy et des résurgences karstiques (le Bouillon, la Pie)

	Loire (Jargeau)	Le Bouillon	La Pie	Duy
MES (mg/L)	8,9-128	0-9,4	0-3,0	1-137,4
Nombre de mesures	n=47	n=43	n=29	n=35

Les pics de MES observés au Bouillon par Gonzales (1984) sont corrélés à ceux de la Loire avec un retard de quelques jours lié au temps de transit des eaux dans le karst. Ces résultats montrent que les eaux de la Loire perdent environ 90% de leur MES lors de leur passage dans le karst. La quantité de MES perdue est proportionnelle à la distance parcourue (comparaison des sources du Bouillon et de la Pie).

L'effet de rétention de la matière particulaire par les chenaux karstiques a également été mis en évidence par Livrozet (1984) entre la Loire à Jargeau et le Bouillon sur des bactéries résistantes. Il a montré que la quantité de bactéries naturelles était pratiquement divisée par un facteur 10 entre Jargeau et la source du Bouillon. D'autre part, la co-injection de fluorescéine et de bactéries (streptocoques fécaux non pathogènes) dans les pertes de la Loire situées à Jargeau (Châtelain et Al., 1981 ; Livrozet, 1984) conduit à une restitution des bactéries au Bouillon présentant un traînage plus important que pour l'uranine (figure 8.24). Si l'on remplaçait les bactéries par de la matière en suspension de même taille, on obtiendrait certainement le même type de restitution. Lors des prélèvements au Bouillon, les flacons de prélèvements ont été pré-acidifiés ce qui a permis de récupérer en solution le samarium éventuellement fixé sur les particules de MES. Les expériences en batch (chapitre 7) ont en effet montré que l'acidification à pH=2 libère les lanthanides fixés sur les sédiments.

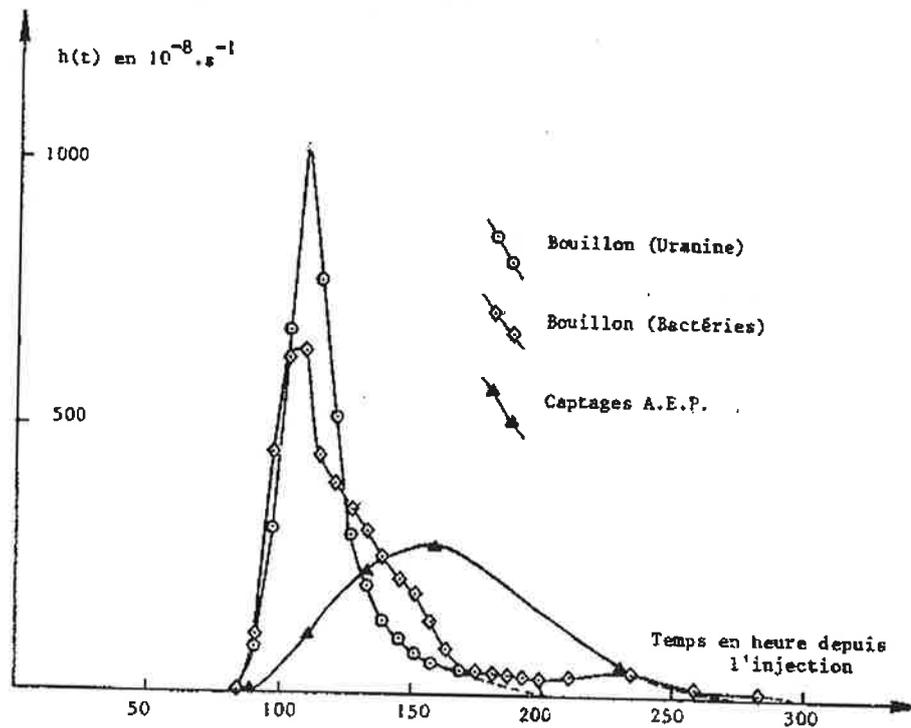


Figure 8.24: Traçage des pertes de Loire à Jargeau du 19/9/80. Distribution des temps de séjour $h(t)$ (extrait de Lepiller et Mondain, 1986, d'après les résultats de Chéry, 1983).

L'injection, le 19/9/1980, de 3 kg d'uranine et de $7,5 \cdot 10^{14}$ streptocoques fécaux sur une perte en Loire, rive gauche, à l'aval du Pont de Jargeau, conduit à une restitution différente de l'uranine et des streptocoques. Ces derniers présentent une traîne plus importante en raison de leur taille. Les streptocoques interagissent avec le milieu comme dans le cas d'une sorption réversible (figure 8.23).

L'effet de traîne que l'on observe sur le samarium peut donc être lié à une fixation sur des microparticules en suspension se déplaçant moins vite que les complexes solubles d'erbium et d'ytterbium et qui, soit relibèrent progressivement le samarium fixé, soit véhiculent elles-mêmes le samarium fixé. La dernière interprétation est plus conforme aux expériences de fixation réalisées en batch qui montrent l'irréversibilité de la sorption du samarium sur les argiles. Elle va également dans le sens des conclusions de Toulhoat qui conclut à une adsorption irréversible des lanthanides lors des expériences de traçage au Mayet de Montagne.

8.3.4. Traçage naturel par les lanthanides de la Loire

Après avoir étudié le transfert des complexes EDTA de lanthanides, étudions celui des lanthanides naturels entre la Loire et la source du Bouillon. Les teneurs en lanthanides mesurées dans les eaux du Bouillon et de la Loire le 19/4/01, filtrées à 0,22 µm, sont présentées dans le tableau 8.6 et sur la figure 8.25.

Tableau 8.6 : Teneurs en lanthanides dans l'eau de la Loire et du Bouillon prélevée les 19 et 20 avril 2001 (filtration < 0,22 µm).

	Loire Jargeau 19/4/01 (ppb)	Loire Orléans 19/4/01 (ppb)	Bouillon 20/4/01 (ppb)	Croûte continentale moyenne ("Bulk")* (ppm)
La	0,0454	0,0456	0,0137	16
Ce	0,0809	0,0716	0,0229	33
Pr	0,0126	0,0121	0,0039	3,9
Nd	0,0518	0,0538	0,0192	16
(Pm)				
Sm	0,0109	0,0118	0,0043	3,5
Eu	(**)	(**)	(**)	1,1
Gd	0,0114	0,0112	0,0055	3,3
Tb	0,0017	0,0018	0,0005	0,6
Dy	0,0101	0,0106	0,0046	3,7
Ho	0,0021	0,0021	0,0011	0,78
Er	0,0058	0,0070	0,0046	2,2
Tm	0,0011	0,0012	0,0007	0,32
Yb	0,0060	0,0071	0,0053	2,2
Lu	0,0012	0,0014	0,0012	0,3

(*) Données extraites de Taylor S.R. and McLennan S.M., 1985

(**) Europium non dosé pour cause d'interférence avec les oxydes de baryum à l'ICP-MS

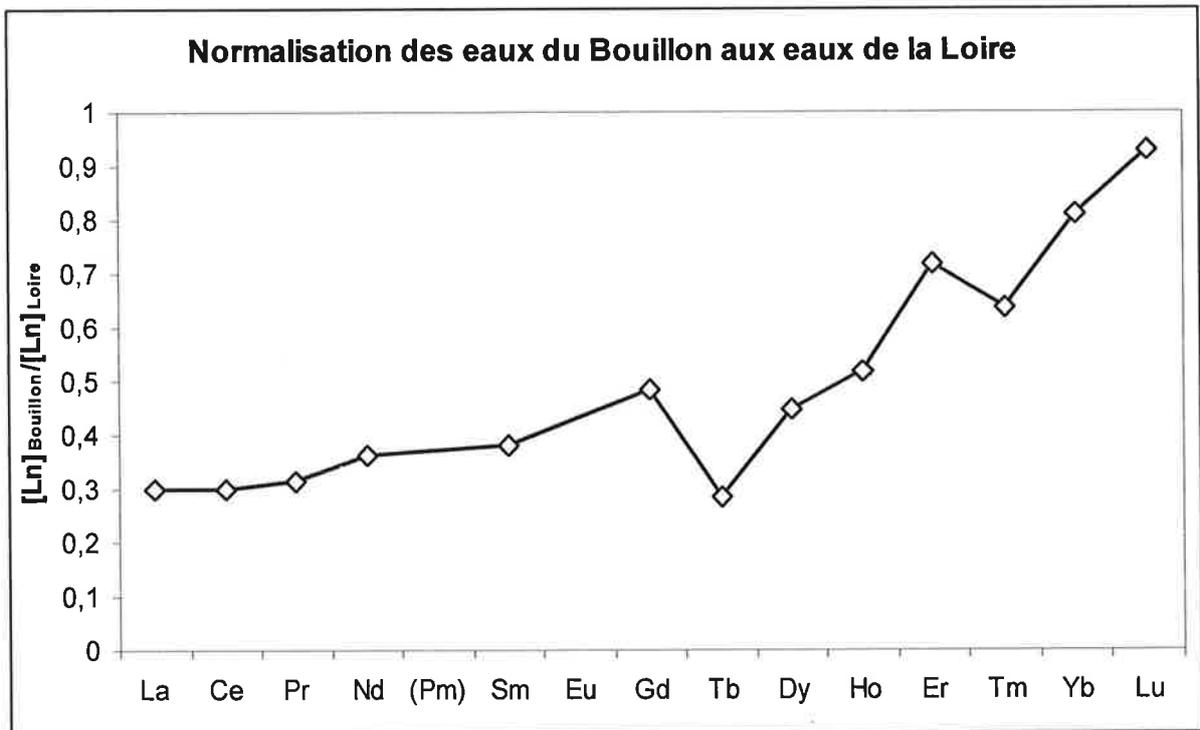
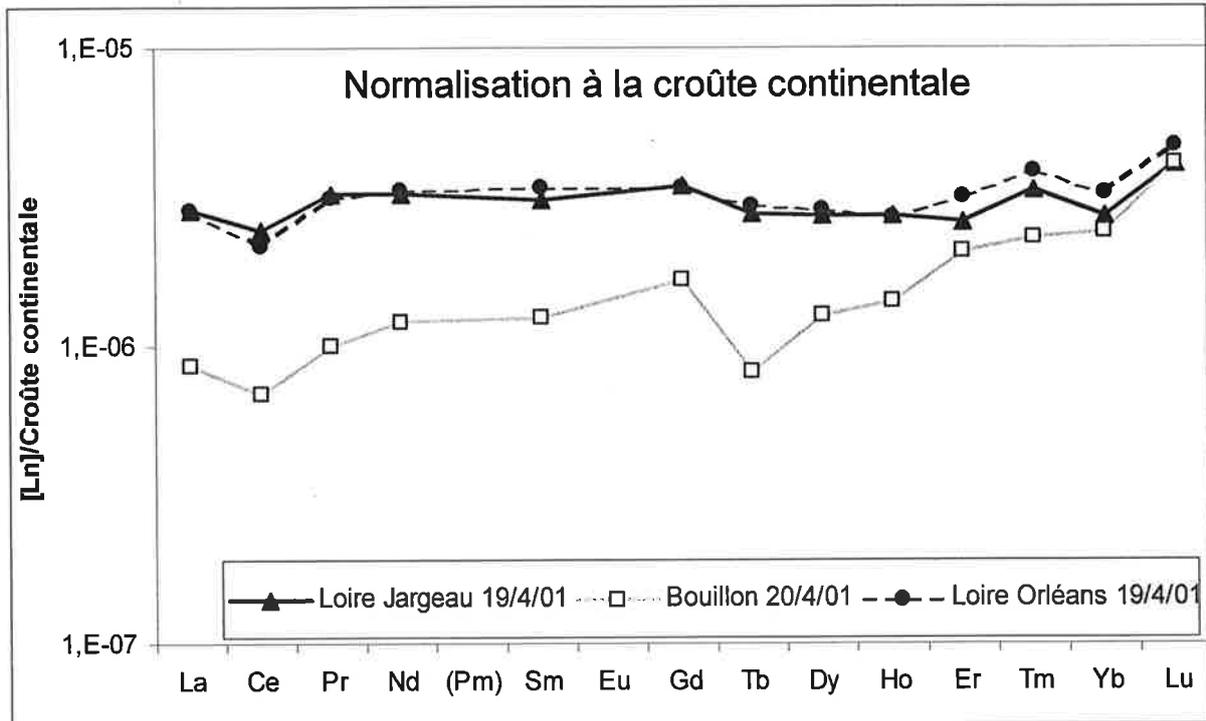
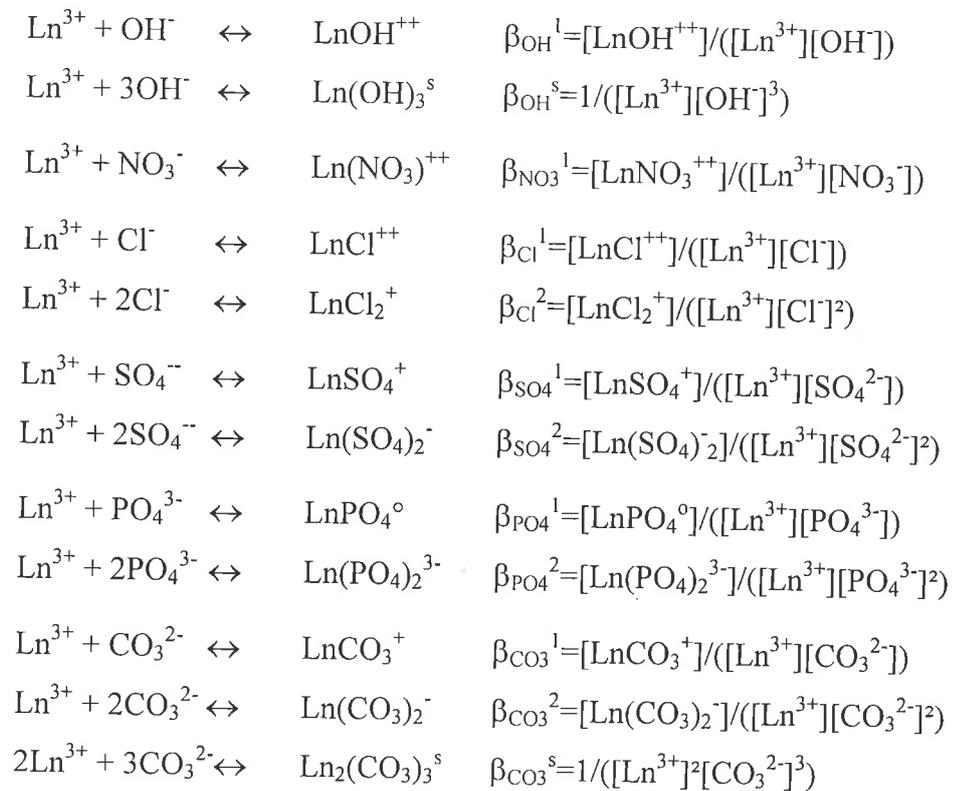


Figure 8.25: Profils des teneurs en lanthanides dans les eaux de la Loire (Orléans et Jargeau) et de la source du Bouillon normalisées à la croûte continentale moyenne (graphique du haut). Le graphique du bas met en évidence l'appauvrissement en terres rares légères de l'eau du Bouillon par rapport à l'eau de la Loire (moyenne Orléans-Jargeau).

La figure 8.25 présente le fractionnement ayant lieu entre l'eau de la Loire et l'eau du Bouillon grâce à la normalisation de l'eau du Bouillon par rapport à l'eau de la Loire (moyenne Jargeau – Orléans). Cette figure montre que l'eau du Bouillon subit un appauvrissement en lanthanides légers par rapport à l'eau de la Loire. Tentons d'expliquer cet appauvrissement par la chimie en solution des lanthanides.

Supposons que les teneurs en lanthanides mesurées dans la Loire soient les teneurs des lanthanides en solution $[Ln]_{Tot}$. Ces teneurs sont la somme de toutes les espèces lanthanidiques en solution, c'est-à-dire ions libres et complexes. Si l'on revient au chapitre 4 où a été décrite la chimie des complexes de terres rares en solution, on peut écrire, dans les conditions de pH des eaux de la Loire et du karst, les réactions principales ayant lieu dans les eaux naturelles:



Supposons qu'il n'y ait pas précipitation des hydroxydes ni des carbonates.

$$[\text{Ln}]_{\text{Tot}} = [\text{Ln}^{3+}] + [\text{LnOH}^{++}] + [\text{LnNO}_3^{++}] + [\text{LnCl}^{++}] + [\text{LnCl}_2^+] + [\text{LnSO}_4^+] + [\text{Ln}(\text{SO}_4)_2^-] \\ + [\text{LnPO}_4^0] + [\text{Ln}(\text{PO}_4)_2^{3-}] + [\text{LnCO}_3^+] + [\text{Ln}(\text{CO}_3)_2^-]$$

Pour chacun des complexes, on calcule $X(L^p) = [\text{LnL}]/[\text{Ln}^{3+}] = \beta_L^p \times [L]^p$. Les valeurs de $[L]$ pour la Loire sont:

$$[\text{OH}^-] = 10^{\text{pH}-14} \text{ avec } \text{pH} = 6,5 - 9,3 \quad (1)$$

$$[\text{NO}_3^-] = 2 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L} \quad (1)$$

$$[\text{Cl}^-] = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L} \quad (1)$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 2 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L} \quad (1)$$

$$[\text{PO}_4^{3-}] = 0 \quad (1)$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = K_{a2} \times [\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_3\text{O}^+] \quad \text{avec } \text{p}K_{a2} = 10,3$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 1,1 - 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ mol/L} \quad (1)$$

$$[\text{Ln}]_{\text{Tot}} = [\text{Ln}^{3+}] \times [1 + \sum X(L^p)] \quad \text{On en déduit } [\text{Ln}^{3+}] = [\text{Ln}]_{\text{Tot}} / [1 + \sum X(L^p)]$$

Les concentrations calculées pour chaque espèce lanthanidique sont présentées figures 8.26a, b et c. De la même manière, on calcule la solubilité apparente S' des hydroxydes et carbonates

de lanthanides selon la formule : $S' = [\text{Ln}^{3+}] \times [1 + \sum (\beta_L^p \times [L]^p)]$

$$\text{avec } [\text{Ln}^{3+}] = 1 / (\beta_{\text{OH}}^s \cdot [\text{OH}^-]^3) \text{ dans le cas des hydroxydes}$$

$$\text{et } [\text{Ln}^{3+}] = \sqrt{1 / (\beta_{\text{CO}_3}^s \cdot [\text{CO}_3^{2-}]^3)} \text{ dans le cas des carbonates.}$$

Les solubilités apparentes des hydroxydes et carbonates de lanthanides sont représentées pour les pH encadrant les eaux de la Loire sur la figure 8.27.

¹ Valeurs extrêmes mesurées dans la Loire à Orléans entre mai 1994 et avril 1996 par C. Grosbois (thèse, 1998)

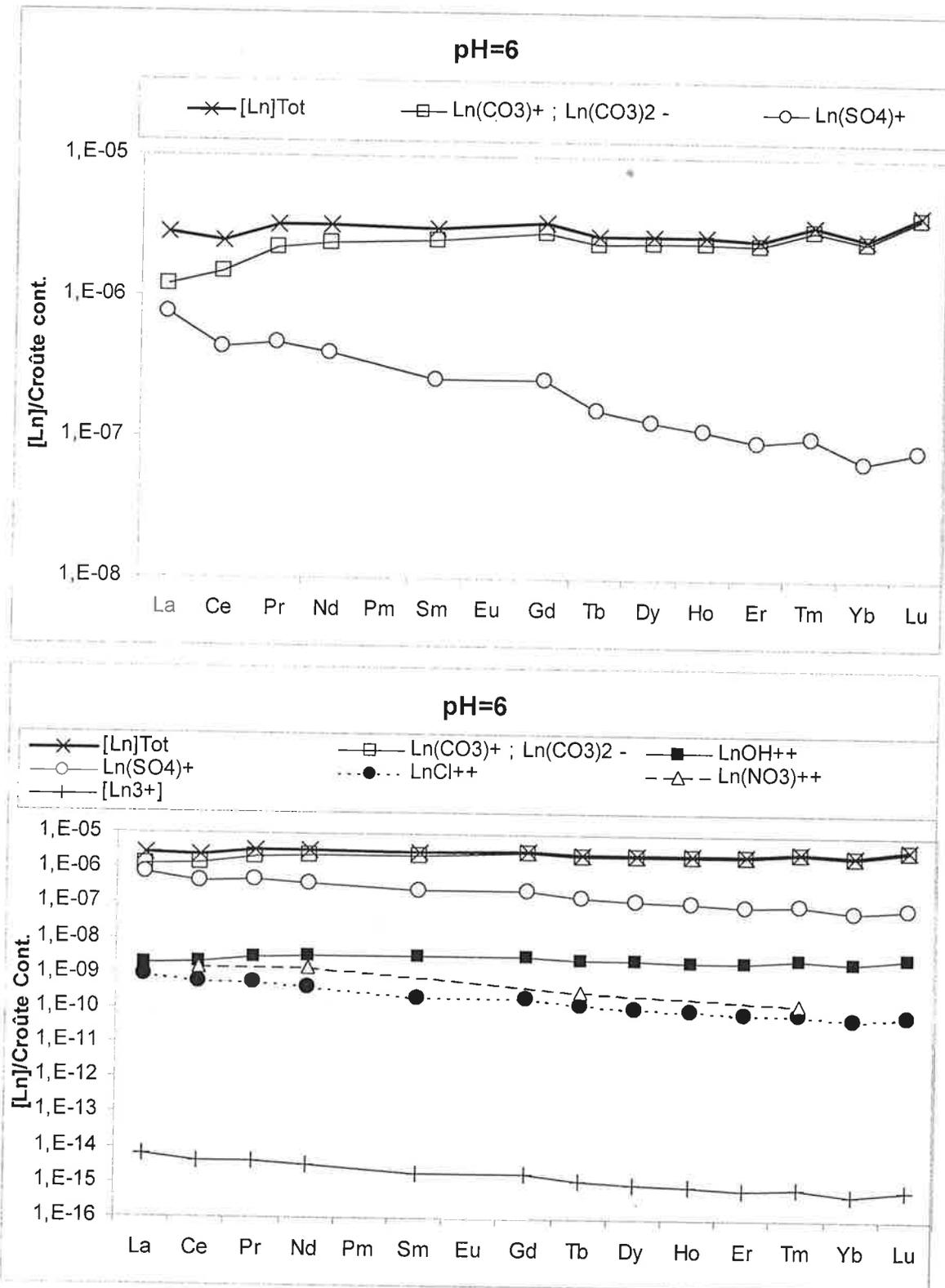


Figure 8.26a : Spéciation calculée des lanthanides en solution dans la Loire, à pH=6; en considérant que toutes les espèces mesurées se trouvent intégralement en solution sous la forme d'ions libres et d'ions complexés avec les ligands inorganiques naturels (CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, OH⁻). Les teneurs sont normalisées à la croûte continentale moyenne. Pour le calcul, on considère la concentration maximale en HCO₃⁻ mesurée dans la Loire (2,1.10⁻³ mol/L). A pH=6, les carbonates constituent l'espèce dominante en solution. La contribution des sulfates n'est pas négligeable pour les lanthanides légers.

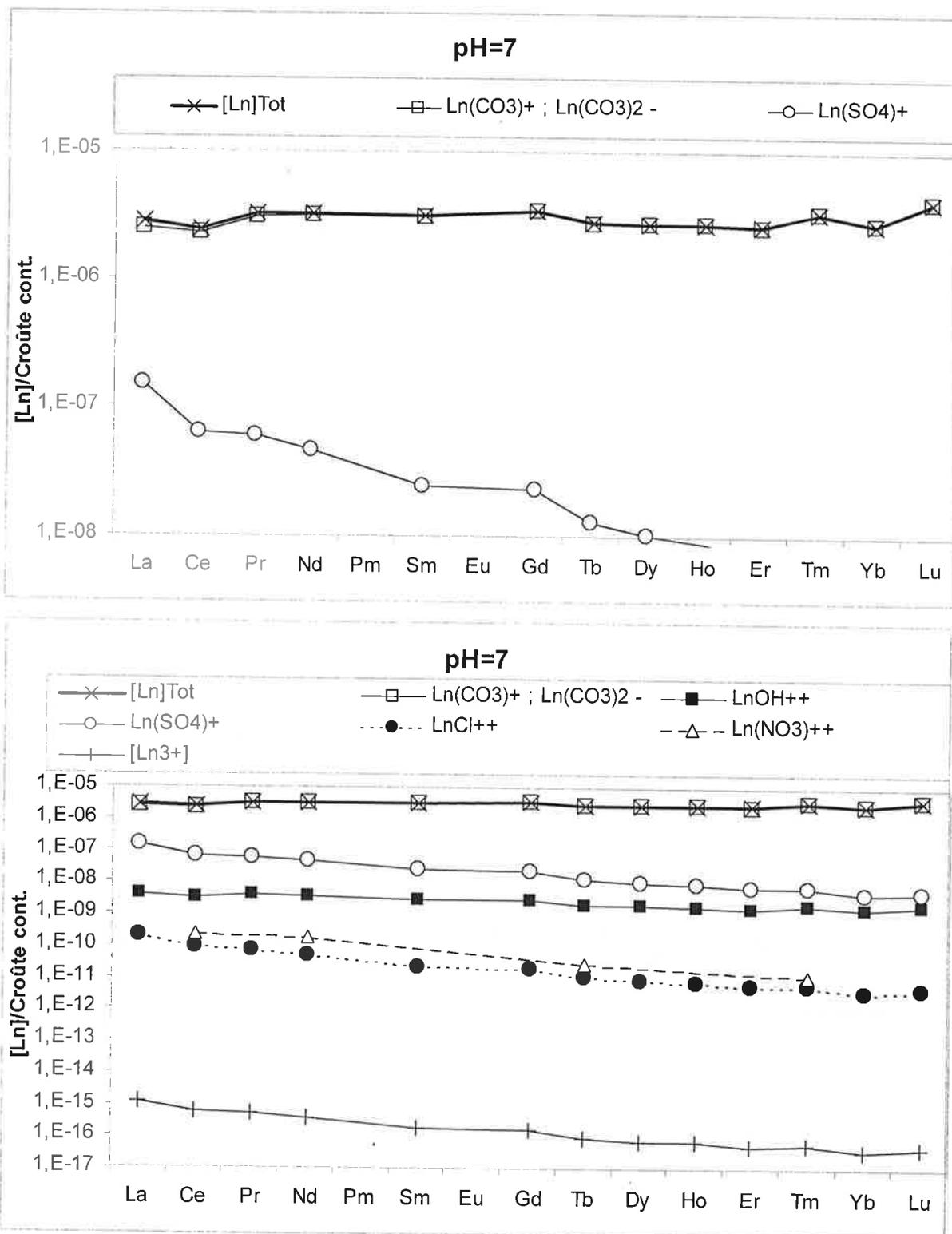


Figure 8.26b : Spéciation calculée des lanthanides en solution dans la Loire, à pH=7; en considérant que toutes les espèces mesurées se trouvent intégralement en solution sous la forme d'ions libres et d'ions complexés avec les ligands inorganiques naturels (CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, OH⁻). Les teneurs sont normalisées à la croûte continentale moyenne. Pour le calcul, on considère la concentration maximale en HCO₃⁻ mesurée dans la Loire (2,1.10⁻³ mol/L). A pH=7, les carbonates constituent l'espèce largement dominante en solution.

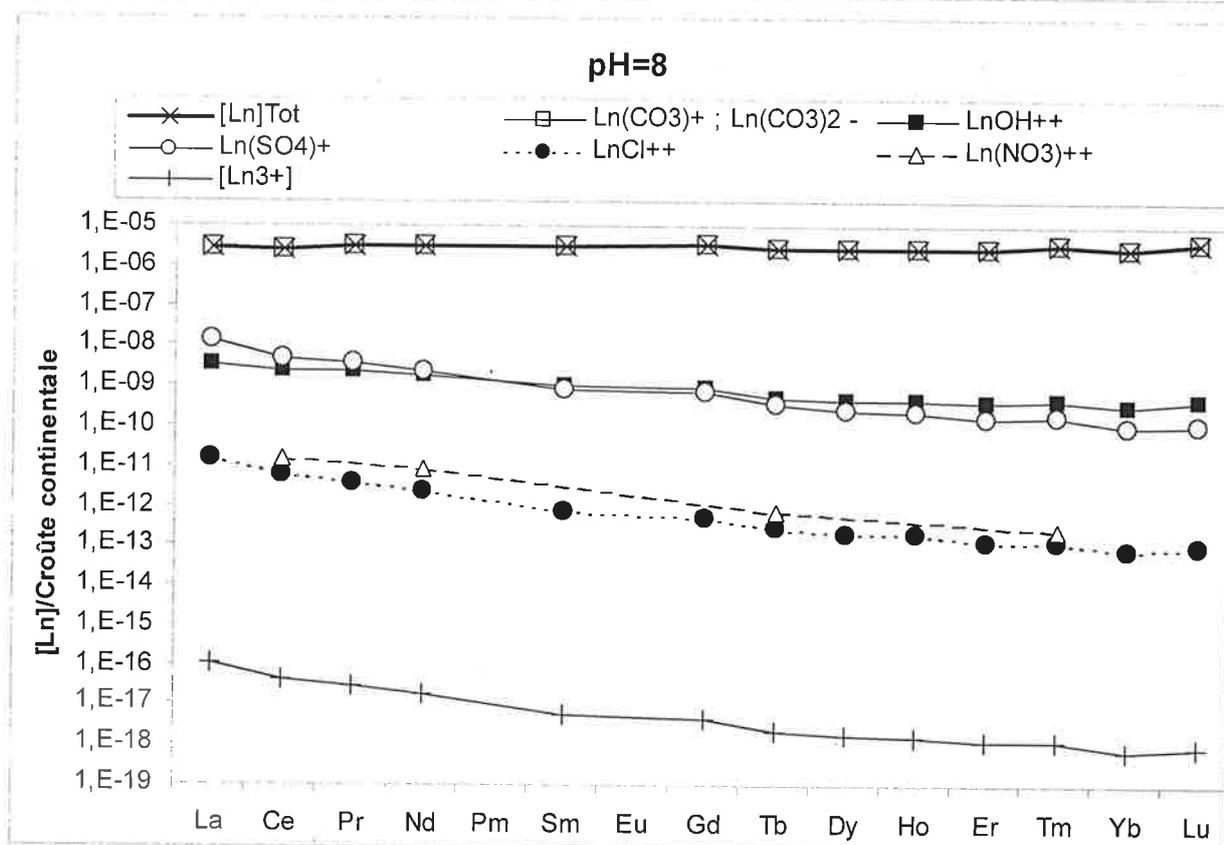
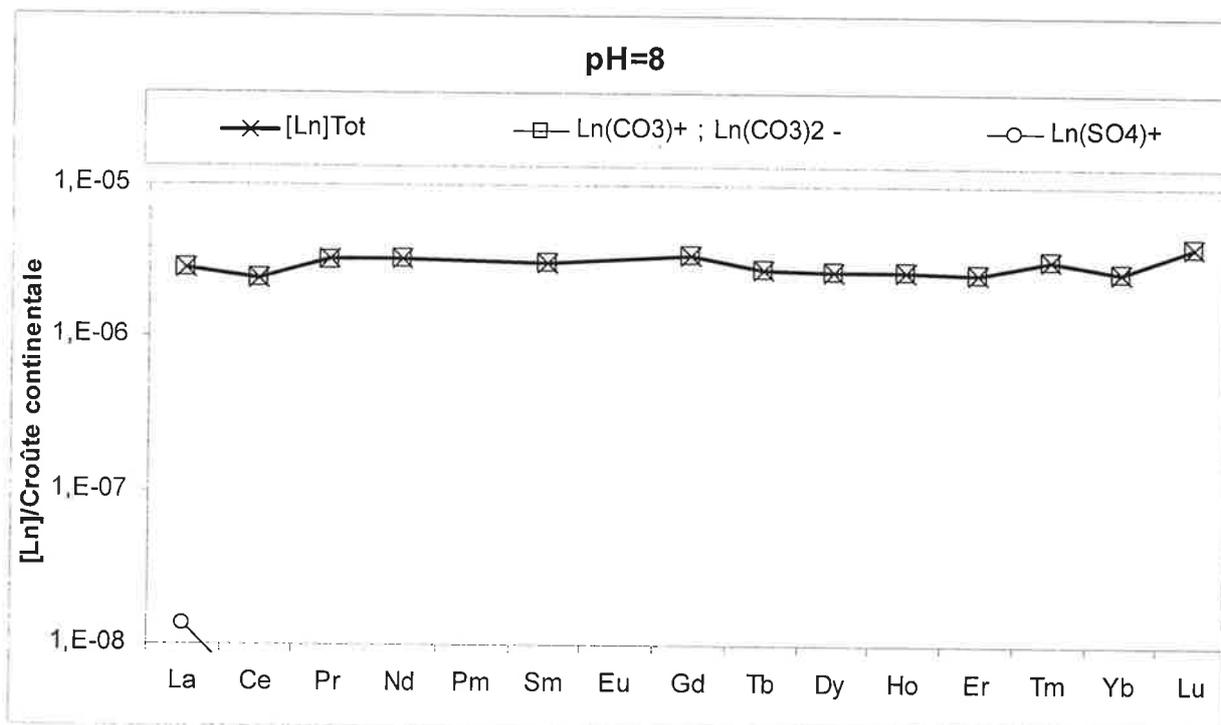


Figure 8.26c : Spéciation calculée des lanthanides en solution dans la Loire, à pH=8; en considérant que toutes les espèces mesurées se trouvent intégralement en solution sous la forme d'ions libres et d'ions complexés avec les ligands inorganiques naturels (CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, OH⁻). Les teneurs sont normalisées à la croûte continentale moyenne. Pour le calcul, on considère la concentration maximale en HCO₃⁻ mesurée dans la Loire (2,1.10⁻³ mol/L). A pH=8, les carbonates constituent l'espèce largement dominante en solution.

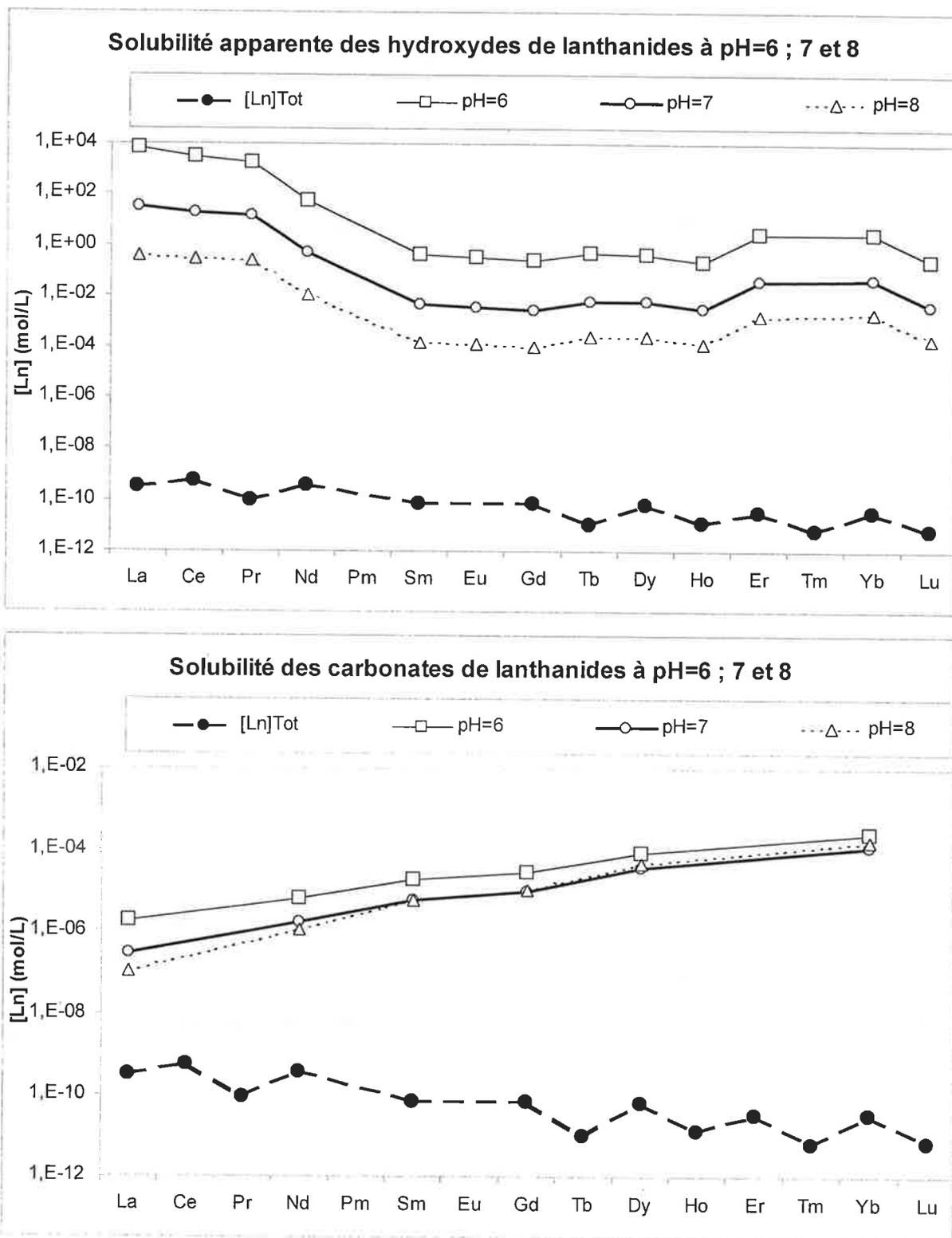


Figure 8.27 : Solubilités apparentes (mol/L) des hydroxydes et carbonates de lanthanides dans les eaux de la Loire pour des pH=6 ; 7 et 8.

Pour le calcul, on considère les teneurs maximales en ligands inorganiques mesurées dans les eaux de la Loire. En particulier, $[\text{HCO}_3^-] = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ mol/L}$. Si les lanthanides étaient essentiellement sous la forme d'ions libres et complexes en solution, il ne pourrait y avoir précipitation puisque $[\text{Ln}]_{\text{tot}} < S'$.

Ces calculs montrent que quels que soient le pH et les teneurs en carbonates considérés dans les gammes mesurées dans la Loire, les teneurs des lanthanides mesurées dans les eaux de la Loire, sont inférieures à la solubilité apparente des hydroxydes et carbonates. Ces phases ne peuvent donc précipiter et les teneurs en lanthanides dans la Loire ne sont donc pas en équilibre avec les carbonates et les hydroxydes solides de lanthanides. Ce calcul reste valable dans le cas où une partie des lanthanides se trouve sous forme colloïdale, les teneurs réelles en solution se trouvant *a fortiori* inférieures aux limites de solubilité des hydroxydes et carbonates. Ces résultats rejoignent les observations de Alaux-Négrel (1991) et de Magonthier et Beaucaire (1993) qui n'ont observé aucune phase néoformée contenant des lanthanides telles que carbonates et hydroxydes dans les eaux naturelles. Ainsi, dans "Introduction à la géochimie et ses applications" (Hagemann et Treuil, 1998), G. Négrel et P. Toulhoat classent les lanthanides dans la famille des éléments traces non contrôlés par un équilibre solide-solution.

On recommence le calcul précédent en prenant, cette fois-ci, les teneurs en éléments majeurs au Bouillon (thèse J.L. Chéry; 1983). Il y a très peu de changement avec la Loire. Les pH au Bouillon varient entre 7,46 et 7,90. L'alcalinité varie entre 1,7 et $2,1 \cdot 10^{-3}$ mol/L. Ces valeurs ont déjà été prises en compte dans le calcul précédent. Il n'y a donc pas précipitation des hydroxydes ou carbonates de lanthanides lors du passage dans le réseau karstique compte tenu des faibles concentrations en lanthanides à l'entrée du karst. La chimie en solution des lanthanides n'explique pas le fractionnement observé lors du passage des eaux de la Loire dans le réseau de karsts du Val d'Orléans.

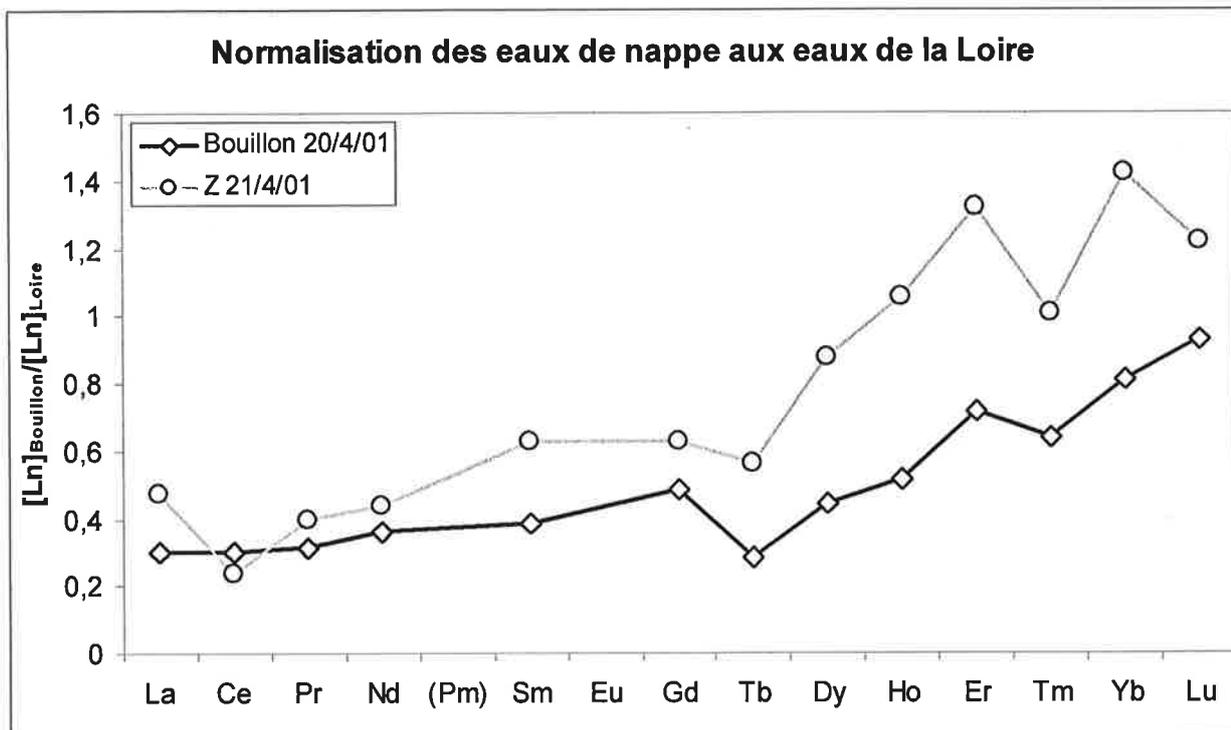


Figure 8.28: Teneurs en lanthanides dans l'eau de la nappe au piézomètre Z et à la source du Bouillon normalisées à l'eau de la Loire (moyenne Jargeau-Orléans).

Les deux types d'eau possèdent indiscutablement un appauvrissement en lanthanides légers par rapport à la Loire dans la fraction filtrée à 0,22 μm . Cependant, Z présente une anomalie en cérium qui n'existe pas dans l'eau du Bouillon. Cela signifie qu'il y a peu de chance pour que l'eau du Bouillon soit le résultat d'un mélange de l'eau de la Loire avec l'eau de la nappe alluviale dans les proportions nécessaires à l'observation d'un appauvrissement en lanthanides légers.

La première idée est que l'eau de la Loire se mélange à celle d'un autre réservoir appauvri en terres rares légères. Les eaux de la nappe alluviale prélevées dans le piézomètre X présentent également un appauvrissement en terres rares légères par rapport à la Loire (figure 8.28). Cependant, l'eau de la nappe alluviale présente une anomalie négative en cérium, anomalie qui devrait se retrouver dans l'eau du Bouillon en cas de mélange. De plus, les analyses d'éléments majeurs entre la Loire et le Bouillon ont montré que l'enrichissement des eaux au cours de leur passage dans le karst était faible (chapitre 1) alors que les teneurs en éléments majeurs sont nettement plus importantes dans la nappe alluviale que dans la Loire. Cela montre que la part d'eau provenant de la partie superficielle et se mélangeant à l'eau des chenaux karstiques est faible. L'hypothèse d'un mélange des eaux transitant dans le karst avec une partie importante des eaux de la partie alluviale de la nappe est peu plausible.

La deuxième idée est que les lanthanides que l'on mesure au Bouillon se trouvent en partie sous forme de matière en suspension très fine (colloïdes). Lors du passage dans le karst, ces particules sont retenues dans le système par simple décantation liée à la perte de vitesse entre la Loire et le karst ou bien par floculation des colloïdes puis sédimentation, phénomène observé à l'embouchure des rivières et démontré en laboratoire par Sholkovitz (1995). On observe alors au Bouillon, des eaux appauvries en matière colloïdale. Ce point a été très étudié dans les rivières où les auteurs distinguent la matière en suspension (fraction supérieure à 0,22 ou 0,45 μm), la phase colloïdale (comprise entre 0,22 ou 0,45 μm et 0,01 μm) et la partie en solution ($<0,01 \mu\text{m}$). De nombreux auteurs dont Goldstein et Jacobsen (1988), Sholkovitz (1992, 1995) ont montré que dans la plupart des rivières, une grande partie des terres rares contenues dans la fraction filtrée à 0,22 ou 0,45 μm se trouve sous forme colloïdale. Cela permet tout à fait d'expliquer l'appauvrissement en terres rares légères des eaux du Bouillon par rapport à la Loire. Seule la partie soluble ($<0,01 \mu\text{m}$) est transférée aux

exutoires du réseau karstique, la majorité des colloïdes étant retenus au cours du transfert des eaux souterraines. Au chapitre 7 (§ 7.4.1), il a été démontré qu'en l'absence d'un ligand complexant, la simple filtration des colloïdes conduit à un abaissement homogène des teneurs en tous les lanthanides. Or, la courbe de distribution des lanthanides au Bouillon (figure 8.25) présente, par rapport à la Loire, un net appauvrissement en tous les lanthanides légers mais cet appauvrissement diminue du Tb au Lu, ce dernier élément n'étant pas du tout retenu dans le karst. La filtration/décantation des colloïdes dans les chenaux karstiques s'accompagne donc du maintien en solution des lanthanides lourds par l'apport d'un ligand complexant fort des lanthanides dont les constantes de stabilité varient dans le sens lanthanides légers < lanthanides lourds. Les carbonates naturels apportés par la dissolution du calcaire peuvent tout à fait jouer ce rôle de fournisseurs de ligands complexants CO_3^{2-} et HCO_3^- . La forte variation des constantes de stabilité de ces complexes est conforme aux observations que nous venons de rappeler ci-dessus.

8.3.5. Bilan sur les expériences de traçage aux complexes EDTA de lanthanides

L'étude des transferts des lanthanides naturels à travers le réseau karstique fournit des résultats conformes à ceux que l'on rencontre dans la littérature à savoir qu'une partie importante des lanthanides se trouve transportée sous forme colloïdale. La diminution des quantités de colloïdes au cours du passage des eaux de la Loire dans le karst, peut s'expliquer par une augmentation légère de la salinité, une chute des vitesses de transport ou bien la rétention des colloïdes par les sédiments argileux qui tapissent les parois des chenaux d'écoulement. La chute des teneurs en colloïdes permet aussi d'interpréter la restitution du samarium à la source du Bouillon.

Les expériences de filtration à 0,02 μm réalisées en Pf1 et Pf2 (§7.4.2) ont en effet montré qu'entre 40 et 50% du samarium injecté comme traceur et contenu dans la fraction $<0,22 \mu\text{m}$ se trouve fixé sur les colloïdes alors que l'ytterbium injecté reste entièrement sous forme d'ion complexé. Ces résultats rejoignent les travaux de Sholkovitz (1995) qui a montré que les proportions et les fractionnements des lanthanides entre parties colloïdales et dissoutes ($<0,01 \mu\text{m}$) étaient réglés par des réactions de surface avec les colloïdes. Le bilan des interactions entre espèces complexes en solution et colloïdes rend compte à la fois des courbes de restitution des lanthanides obtenues lors de nos expériences de traçage sur le site de Sandillon et dans le système phréatique du Val d'Orléans et des variations des courbes de distribution des lanthanides naturels lors des transferts entre la Loire et le système phréatique.

Globalement, on peut raisonnablement conclure que le transport des lanthanides est contrôlé par les interactions entre complexes en solution et colloïdes mais qu'en terme de bilan, ce sont les espèces colloïdales qui transportent massivement les lanthanides hérités de l'altération de la croûte continentale. Le rôle des complexes et notamment des carbonates intervient essentiellement pour maintenir en solution les lanthanides lourds. Les expériences de traçage montrent que seuls les ligands complexants forts sont susceptibles de modifier d'une manière significative ce contrôle par les colloïdes et les carbonates complexes.

QUATRIEME PARTIE

SYNTHESE

ET

CONCLUSIONS

CHAPITRE 9

BILAN DES PROCESSUS DE MIGRATION D'ELEMENTS DANS LE SYSTEME AQUIFERE DU VAL D'ORLEANS

Ce chapitre est consacré à la synthèse et à la discussion des résultats obtenus ainsi qu'aux conclusions qui en découlent sur le plan scientifique et sur le plan de la gestion de l'exploitation de Sandillon.

9.1. Les processus hydrogéologiques

9.1.1. Discussion du modèle initial

Le modèle disponible au départ de ce travail était celui utilisé par le BRGM pour l'étude d'impact de la carrière (Impacts sur les écoulements et impact d'une pollution accidentelle sur les captages de la ville d'Orléans ; Chigot et Al, 1994).

Dans ce modèle mathématique développé en 1992 pour connaître le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère du Val de Loire, la nappe est découpée en deux compartiments, l'un calcaire, l'autre alluvionnaire. Les deux nappes se distinguent par des paramètres hydrodynamiques différents. L'étude précise que : *"Les porosités introduites dans l'aquifère calcaire ont été choisies de manière à rendre compte des vitesses maximales connues de l'ordre de 300 m/h dans les chenaux, ce qui est également pessimiste d'un point de vue propagation de pollution"*.

Après simulation d'une injection dans les alluvions, puis dans le calcaire, les résultats sont les suivants: *"Si la pollution se produit dans les alluvions, celle-ci circulera au sein de la nappe alluviale et se fixera dans celle-ci et dans le niveau argileux intermédiaire. Quelques particules transitent dans le calcaire par l'intermédiaire de fenêtres créées par l'absence*

d'écran imperméable, sans risque pour les captages d'eau potable. Dans les conditions définies précédemment, aucune particule n'atteint le captage malgré une simulation sur 730 jours. Si la pollution se produit dans les calcaires, par l'intermédiaire d'une zone karstique, celle-ci se propage au sein de l'aquifère. Au bout de deux ans, celle-ci n'est toujours pas arrivée aux captages."

Les auteurs de l'étude d'impact firent preuve de prudence en nuancant leurs conclusions par "*dans les conditions définies précédemment*", c'est à dire compte tenu des valeurs des paramètres hydrodynamiques utilisés dans le modèle. C'est la critique de ce modèle et des conclusions qui en découlent qui sont à l'origine de ce travail de thèse. Le grand nombre d'expériences réalisées in situ au cours de cette thèse, nous permet de corriger ou préciser chacun des aspects suivants du modèle:

- les intercommunications de nappes,
- le choix d'une représentation homogène,
- le choix du régime permanent.

a. Les intercommunications de nappes

Au cours de sa thèse, S. Bigot avait montré que des traceurs injectés dans les alluvions pouvaient migrer puis se déplacer rapidement dans la nappe du calcaire de Pithiviers en l'absence du substratum burdigalien entre les alluvions et le calcaire. Le modèle utilisé dans l'étude d'impact est réaliste dans la mesure où il tient compte de l'existence de ces échanges entre les deux nappes, ce qui a été démontré au cours de ce travail de thèse par les traçages dans le lac nord et entre les piézomètres Pf1-Pf2, par la comparaison des variations piézométriques des deux nappes et par l'étude des rapports Na/K et Mg/K.

b. La variabilité spatiale des aquifères

Le modèle utilisé dans l'étude d'impact échoue dans la représentation des axes karstiques par une porosité élevée. En effet, l'affectation d'une porosité conduit à considérer la nappe du calcaire homogène alors que les traçages, les analyses d'éléments majeurs et les différentes diagraphies réalisées dans la partie calcaire de la nappe montrent indiscutablement que le milieu est fortement hétérogène. Le contraste est important entre les zones d'écoulement rapide où l'on observe des temps de transit de 3-4 jours entre le sud de la carrière et le captage AEP du Theuriet, et les zones stagnantes où les temps de résidence dans la nappe sont de plusieurs années (exemple de Pf1). Ce contraste ne peut en aucun cas être "moyenné" par des porosités et des perméabilités moyennes.

De même, les alluvions sont caractérisées par une forte hétérogénéité, comme l'avait déjà montré Bigot à Darvoy (1977) par l'obtention de différentes vitesses de déplacement des traceurs au sein de la nappe alluviale. Le réseau de piézomètres alluvionnaires implantés sur la carrière ainsi que les nombreux sondages de reconnaissance (45 sondages) réalisés en 1991 et en 1997 par l'entreprise Morillon-Corvol ont montré la grande hétérogénéité lithologique des alluvions confirmée par les différentes mesures physico-chimiques (température, éléments majeurs, teneurs en lanthanides naturels, piézométrie). L'hétérogénéité lithologique est, de toute façon, le propre de la plupart des plaines alluviales. Les différences importantes de perméabilité à courte distance (10 mètres) rendent difficile la définition du champ de perméabilité dans de tels milieux. Si l'on désire représenter les alluvions comme un milieu homogène, quelle valeur moyenne prendre? Faut-il considérer une loi de distribution de type lognormal à partir d'une valeur moyenne et d'un écart-type puis créer un champ de perméabilité aléatoire dont certaines combinaisons permettent de rendre compte de résultats de traçages (Courtois, 1999)? Comment modéliser les chenaux? Autant de questions sur

lesquelles les hydrogéologues continuent de plancher. Il faut avouer que dans ce travail, nous n'avons fait que constater et confirmer l'hétérogénéité des alluvions sans toutefois la représenter par un modèle. Pour cela, la densification du réseau alluvionnaire aurait été nécessaire ainsi que la connaissance de la distribution verticale des perméabilités au niveau de chaque piézomètre comme cela a été fait par Courtois (1999). La discussion sur la possibilité de modéliser est reprise dans un paragraphe suivant. Quant au résultat de l'étude d'impact mentionnant la fixation des particules sur les alluvions, elle va à l'encontre de l'hypothèse de base utilisée dans le modèle à savoir que le traceur est parfait. C'est à dire qu'il ne se fixe pas, à moins que par "fixation", l'auteur entende "immobilisation". La quasi immobilisation des éléments majeurs et des traceurs dans la nappe des alluvions a en effet été montrée par le traçage dans le piézomètre I où à la fois les éléments majeurs et les traceurs demeurent quasi-statiques ce qui explique les teneurs élevées en chacune de ces espèces. De plus, le "déplacement" des traceurs obtenu dans les alluvions ressemble plus à de la macrodispersion autour du puits d'injection qu'à un déplacement des traceurs, à proprement parler. Ces observations rejoignent les conclusions de l'étude d'impact. Une nuance y est apportée: l'existence, en parallèle de ces zones stagnantes, de circulations rapides dans des chenaux perméables. L'existence de tels chenaux est prouvée par les passages rapides de traceurs observés entre J et K ainsi que les variations temporelles importantes en éléments majeurs dans le piézomètre B. Mais ces circulations rapides sont exceptionnelles et engendrées par les remontées brutales de la Loire.

c. La variabilité temporelle

La variabilité temporelle du modèle utilisé pour l'étude d'impact est inexistante. Et c'est par ailleurs un des apports les plus importants de ce travail de thèse. En effet, le premier traçage a montré que les circulations principales n'avaient pas lieu la majeure partie du temps

dominée par la descente de la Loire mais lors de courts intervalles de temps pendant lesquels s'effectuent les montées rapides du niveau de la Loire. Le régime n'est jamais permanent et les termes "dominant" et "exceptionnel" sont préférés aux termes de régimes "permanent" et "transitoire", le régime dans le Val étant transitoire en permanence. Le régime dominant de la Loire descendante ne permet donc pas de rendre compte de l'essentiel des circulations dans les alluvions. Celles-ci sont engendrées par des déséquilibres exceptionnels de charge, importants mais de courte durée. Lors des travaux de Bigot (1977) à Darvoy, 6 km en amont de Sandillon, la variation des écoulements dans le temps n'avait pas été abordée. Il faut dire que les restitutions obtenues par Bigot avaient eu lieu quelques heures après l'injection ce qui ne l'obligeait pas à prolonger les observations. Les vitesses d'écoulement rencontrées par Bigot dans les alluvions étaient par ailleurs voisines de celles que l'on a obtenues dans les alluvions en période de crue (quelques mètres par jour). On peut expliquer les résultats de Bigot par un gradient hydraulique moyen plus important à Darvoy qu'à Sandillon ou alors par la réalisation du traçage en période de crue de la Loire. Soulignons que c'est à Sandillon que les gradients hydrauliques moyens sont les plus faibles du Val d'Orléans. Il n'est donc pas surprenant d'obtenir des circulations horizontales très limitées dans les alluvions de Sandillon.

9.1.2. Le choix de l'observation sur la modélisation

Dans ce travail, la modélisation des écoulements dans les alluvions a été abandonnée en cours de thèse après discussion avec plusieurs hydrogéologues. Les données disponibles sur le champ de perméabilité horizontal et vertical étaient insuffisantes. On disposait, certes, de valeurs ponctuelles de perméabilité mais aucune connaissance sur la distribution verticale. Lorsque la question d'approfondir le champ des données disponibles sur les alluvions s'est posée, le réseau alluvionnaire était en partie détruit par l'avancée des travaux d'extraction et les quelques logs réalisés n'ont pas permis d'en savoir beaucoup plus sur la stratification de

l'aquifère. Toutefois quelques tentatives de modélisation ont été réalisées: par exemple, la représentation à l'aide du logiciel ASM des écoulements au niveau du réseau piézométrique alluvionnaire à partir des cotes de la nappe, mesurées en période de remontée et en période de descente de la nappe, n'a pas permis d'expliquer les directions d'écoulement obtenues sur le terrain à partir de la piézométrie. Le maillage du réseau de piézomètres est sans doute trop grand et la précision des cotes absolues des têtes de piézomètres est discutable.

Plutôt que de s'efforcer à "modéliser", la notion d'observatoire de terrain a été poussée jusqu'au bout avec l'extension du réseau piézométrique à la nappe du calcaire et la poursuite des observations dans les trois nouveaux piézomètres alluvionnaires X, Y et Z implantés début 2000. Les traçages réalisés en CA1 confirmèrent les données en température et la piézométrie à savoir l'existence d'un axe karstique passant par CA1. Le traçage montra que cet axe débouchait aux sources du Loiret. Ce travail prolongé d'observation a donc porté ses fruits. L'observation de gradients importants dans les alluvions au niveau des piézomètres X, Y et Z en période de crue au printemps 2001 permit enfin d'expliquer les vitesses importantes mesurées dans les alluvions lors du traçage de 1997. La prolongation des observations plutôt que la modélisation d'un tel système à partir des données disponibles fin 1999 est donc tout à fait justifiée a posteriori.

9.1.3. Proposition d'un schéma de fonctionnement hydrodynamique du système aquifère du Val d'Orléans au niveau de Sandillon.

A l'issue de ce travail, les observations disponibles sont suffisantes pour pouvoir proposer un schéma de fonctionnement du système nappe alluviale – nappe calcaire – axes karstiques – Loire et du transfert des éléments dans la nappe.

1/ La distinction nappe alluviale-nappe calcaire est subtile puisqu'on a montré, par l'étude des piézométries comparées et la mise en évidence des échanges chimiques rapides entre alluvions et calcaire (traçage Pf1-Pf2, traçage du lac nord), qu'il n'y a véritablement qu'une seule nappe d'eau qui traverse les deux formations. La composition chimique des eaux ne permet d'ailleurs pas de distinguer, le plus souvent, ces deux nappes qui sont toutes deux caractérisées par de forts impacts anthropiques d'origine agricole. L'exemple le plus frappant est le doublet de piézomètres Pf1-Pf2 où l'on retrouve des concentrations très voisines en éléments majeurs et en traceurs. La distinction se situe plutôt entre les zones d'écoulement et les zones stagnantes. Dans la nappe du calcaire, Pf1 se situe dans une zone stagnante puisque les teneurs en éléments majeurs qui y sont observées sont importantes et les teneurs en traceurs ne diminuent que lentement. De même, la partie de calcaire "dur" sous laquelle passe l'axe karstique en CA1 est peu lessivée puisqu'on y retrouve des traceurs en quantités importantes un mois après l'injection. Au contraire, certaines zones de la partie calcaire sont le siège d'écoulements rapides. Par exemple, les traçages réalisés dans le lac et en CA1 montrent que CB7, CB9, CB4 et CA2 interceptent des zones d'écoulement rapides. Ces observations sont également confirmées par les mesures de débits verticaux au micromoulinet. Les alluvions présentent le même contraste entre chenaux de circulation caractérisés par des variations importantes de cotes piézométriques et de teneurs en éléments majeurs (cas des piézomètres B et K) et des zones stagnantes où les teneurs en éléments majeurs restent importantes et constantes (cas des piézomètres I et N). Globalement, les circulations dans les alluvions sont beaucoup plus limitées que dans la nappe du calcaire du fait d'une perméabilité et d'une connectivité plus faible des alluvions. Par exemple, le traçage du lac d'exploitation a montré que le dysprosium ne s'étalait pas à travers les alluvions autour du lac malgré des différences de charges parfois importantes. Au contraire, dans la nappe du calcaire, on

observe des migrations à longue distance. Par exemple, l'uranine et les complexes de terres rares les plus stables injectés en Pf2 sont observés en CB4, 3 mois après l'injection.

2/ Les axes de circulations karstiques jouent un rôle essentiel.

Il y a certes un contraste entre les parties alluviale et calcaire comme on l'a montré ci-dessus mais ce contraste est minimisé par celui qui existe entre chenaux karstiques et zones non karstiques.

Des déplacements de traceurs sont observés dans la nappe du calcaire et dans la nappe alluviale perpendiculairement aux directions des axes karstiques indiquées par la piézométrie. C'est ainsi que lors du traçage de Mars 1997 dans le piézomètre alluvionnaire I, on observe des allers et retours de traceurs entre le nord et le sud du réseau. De même entre Pf1 et CB4, on observe des va-et-vient de traceurs qui s'expliquent bien par les inversions des gradients hydrauliques. La présence d'un axe karstique de direction approximative Est-Ouest passant par CA1 permet tout à fait de justifier ces inversions de gradients. L'étude des corrélations piézométriques Loire-nappe (chapitre 6) a en effet montré que les variations de charges de la Loire se transmettent beaucoup plus rapidement à la nappe par les chenaux karstiques. Cela entraîne, au moment des crues, des remontées de la nappe plus importantes et plus rapides à l'aplomb de ces axes à la fois dans les alluvions et le calcaire (exemples des piézomètres calcaires CA1, CA2 et alluvionnaire X). Des circulations ont alors lieu perpendiculairement à ces axes (figure 9.1). En période de descente de la nappe, ces axes jouent au contraire le rôle de drains vers lesquels convergent les écoulements quand ils existent (figure 9.2). Par exemple, le traçage du lac a permis de montrer qu'en période de descente de la nappe, l'eau du lac s'injecte en partie dans la nappe du calcaire par le biais de chenaux d'écoulements rapides débouchant certainement dans des axes de circulation plus importants.

A ce niveau, il est nécessaire de distinguer les rôles différents joués par la nappe alluviale et le lac d'exploitation. En effet, le lac transmet rapidement les anomalies sur toute sa surface et donc aussi à l'aplomb des axes karstiques. Au contraire, la nappe, alluviale, par ses contrastes de perméabilité et la variabilité spatiale de ses connections au réseau de drainage du calcaire, transmet les fluctuations des charges véhiculées par les axes karstiques de manière hétérogène. Cela conduit à une dispersion beaucoup plus lente des anomalies qui tendent en plus à s'éloigner des axes karstiques (figures 9.1 et 9.2). C'est pourquoi les apports de la nappe alluviale sont très faibles dans le réseau karstique. Les teneurs en éléments majeurs mesurées à la source du Bouillon par J.L. Chéry (1983) et les profils de lanthanides à ce même exutoire normalisés aux eaux de la Loire illustrent clairement ce propos. Cependant, les travaux de Chéry (1983) datent de 20 ans et une mise à jour de ces données apparaît nécessaire. Il serait particulièrement intéressant de signer l'impact de la partie alluviale de la nappe par les teneurs en pesticides ou en Cs et Ba, ces deux derniers éléments étant de bons indicateurs des échanges avec les argiles.

Les axes de circulations karstiques drainent donc les parties les plus perméables de la nappe, en période de descente de la Loire et ils les alimentent en retour en période de crue. Des échanges importants ont donc lieu dans les parties les plus perméables et les mieux connectées aux axes karstiques. Ces zones d'échanges sont caractérisées par des rapports Na/K et Mg/K assez faibles.

Globalement, gradients hydrauliques et gradients des perméabilités, favorisent localement un enrichissement des éléments dans les domaines les moins perméables, ayant les capacités de rétention les plus fortes et qui sont éloignés des axes karstiques.

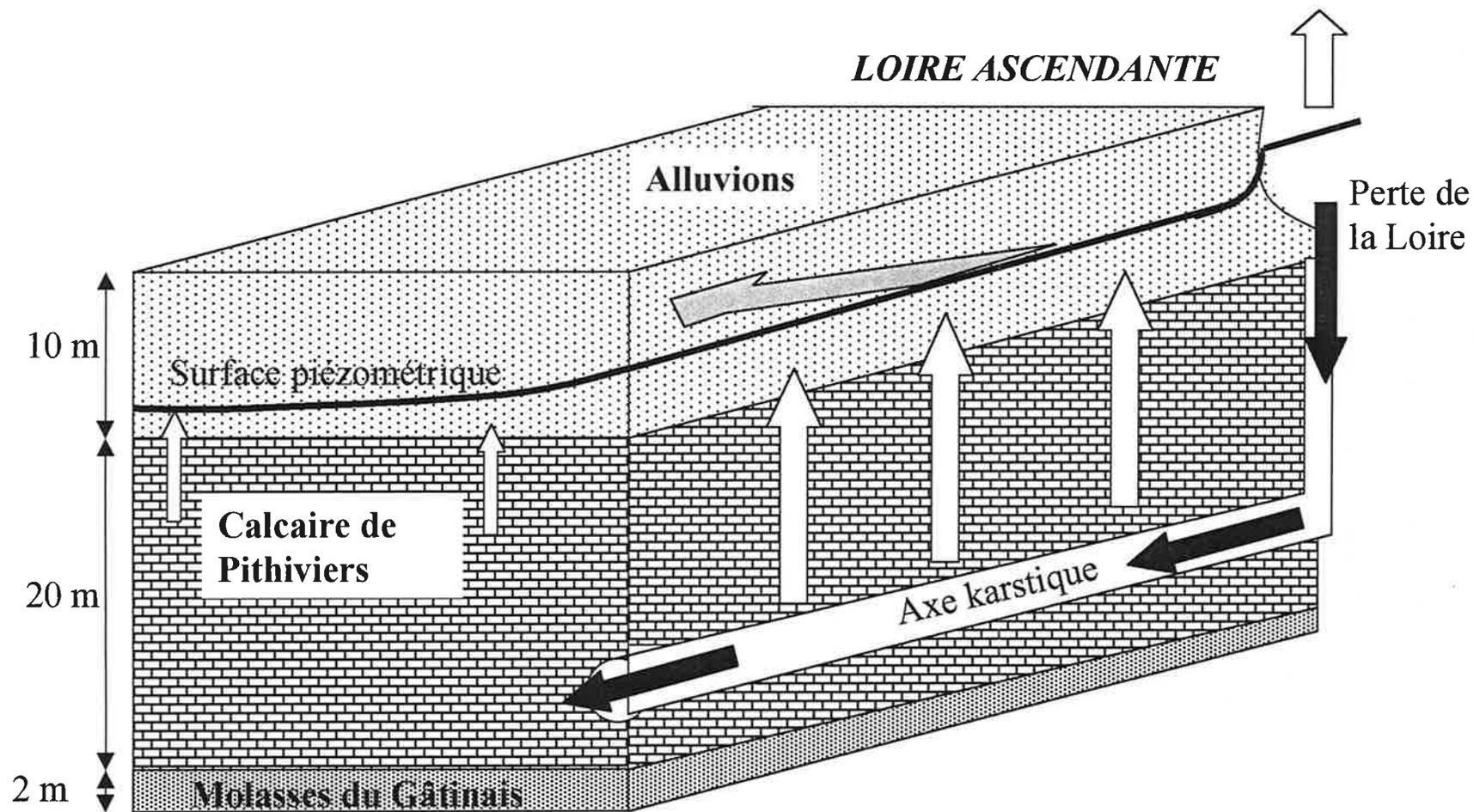


Figure 9.1: Fonctionnement du système nappe-Loire-axes karstiques dans la région de Sandillon en période de remontée de la Loire.

En période de remontée de la Loire, le fleuve impose une surcharge hydraulique à la nappe via les chenaux de circulations karstiques et à l'aplomb de ces derniers. Ces gradients hydrauliques de courte durée entraînent des circulations rapides perpendiculairement à ces axes.

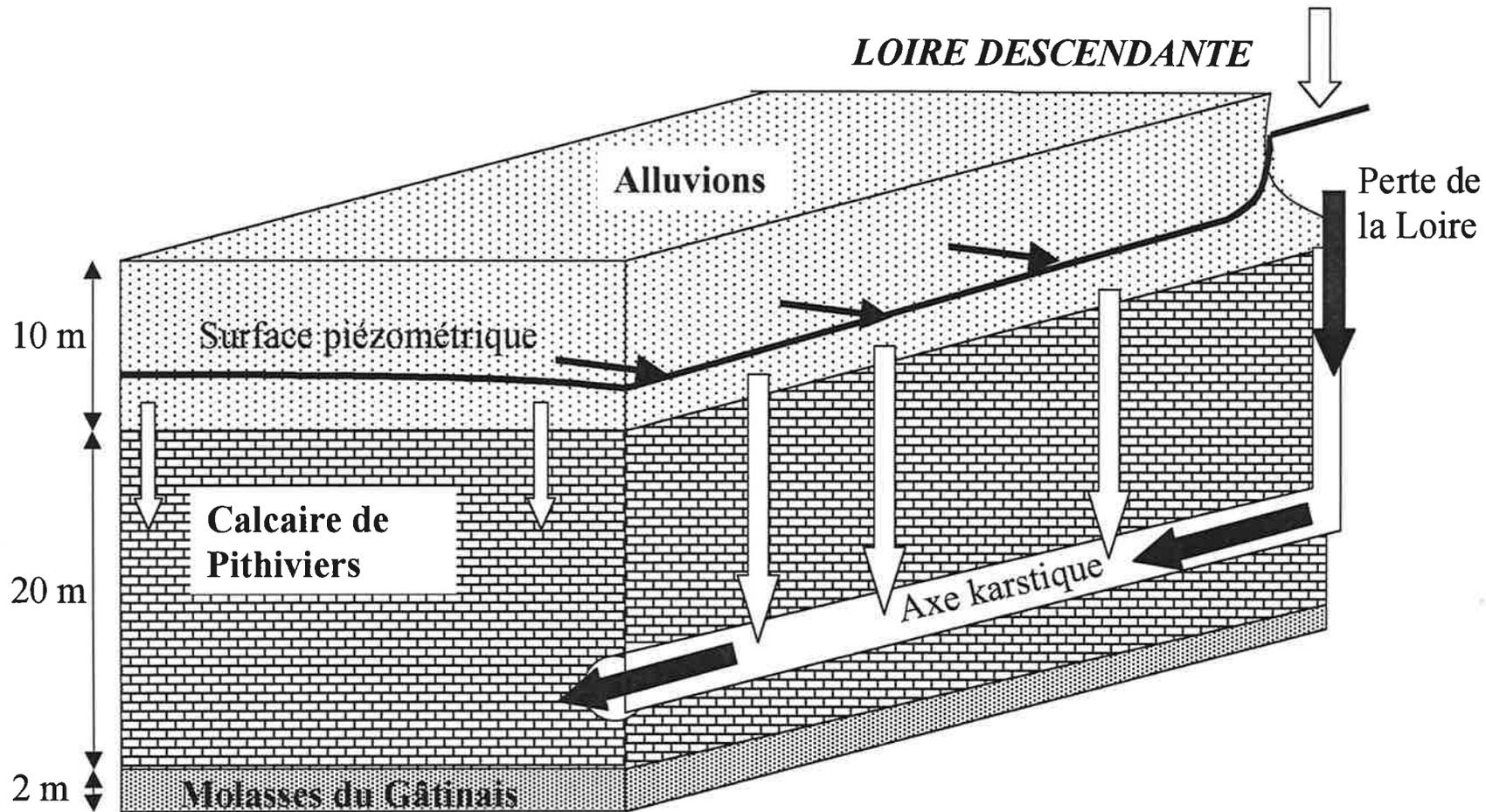


Figure 9.2: Fonctionnement du système nappe-Loire-axes karstiques dans la région de Sandillon en période de descente de la Loire.

En période de descente de la Loire, les chenaux de circulations karstiques jouent le rôle de drains qui collectent les eaux alluviales et calcaires. Les circulations s'effectuent perpendiculairement à ces axes avec des vitesses inférieures à celles que l'on observe lors des périodes de crue. Pendant cette phase, la nappe alluviale se vide progressivement dans la nappe du calcaire traversée par un réseau de drainage naturel.

Ainsi, complexes injectés, et colloïdes naturels sont déplacés par pulsations successives liées aux brutales remontées ou descentes de la Loire. Stockés dans les domaines de faible perméabilité, ils peuvent néanmoins être remis brutalement en mouvement lorsque des modifications fortes des pressions hydrauliques favorisent la « réouverture » d'un chenal privilégié d'écoulement colmaté par des dépôts antérieurs. C'est ce qui a été observé au niveau du piézomètre X. Ces mouvements de va et vient au sein de la nappe déterminent donc un système de "confinement dynamique" en ne facilitant pas l'approche progressive des axes karstiques et en augmentant la dispersion et la capacité de rétention des éléments au niveau des domaines de faible perméabilité et riches en substances argileuses. Cela découle aussi du fait que les réponses de la nappe via les axes karstiques sont plus rapides lors des remontées de la Loire que lors des retours à l'étiage, sans doute à cause d'un débit d'entrée plus grand que le débit de sortie.

La modélisation rigoureuse de ces transferts à l'échelle d'un domaine équivalent à l'exploitation ne peut donc être entreprise sans une cartographie précise des axes karstiques et un suivi détaillé dans l'espace et dans le temps des déformations de la surface piézométrique à petite et à grande échelle.

9.2. Les mécanismes chimiques

Il existe un contraste très net entre les distributions des lanthanides naturels et le fort fractionnement des ces éléments sur des distances courtes et des durées brèves, lorsqu'on les injecte sous la forme de complexes à l'EDTA dans le système. Cela démontre qu'en solution, la présence de complexes forts ne permet pas de préserver la mémoire de la source.

Or, on observe qu'au cours du transport par le fleuve, la courbe de distribution des lanthanides héritée de la croûte continentale est préservée.

Lors du passage dans les différents domaines de l'aquifère, cette courbe de distribution est peu modifiée dans l'ensemble. Cela se traduit essentiellement par un appauvrissement régulier en lanthanides légers lors du transfert rapide dans les chenaux karstiques. Lors du passage dans la nappe calcaire ou alluviale, l'appauvrissement en lanthanides légers est beaucoup moins marqué mais on enregistre l'apparition nette d'une anomalie du cérium.

La réversibilité de ces échanges est attestée par les extractions importantes de lanthanides lourds naturels lorsqu'on injecte en Pf1-Pf2 un léger excès d'EDTA par rapport aux complexes lanthanidiques. Cette réversibilité est attestée aussi par les courbes de restitution des lanthanides lors des traçages effectués dans les chenaux de circulation karstique.

Les expériences d'échanges entre solutions et calcaires ou solutions et argiles, effectuées en batch au laboratoire, confirment le rôle déterminant joué par les constantes de stabilité des complexes lanthanidiques. La cinétique de fixation est en gros inversement proportionnelle aux constantes de stabilité mais il n'y a pas réversibilité entre processus de fixation et processus de désorption. Le rendement de la fixation est régulièrement décroissant en allant des lanthanides légers aux lanthanides lourds. La désorption favorise surtout l'extraction des lanthanides intermédiaires, que ce soit en acidifiant ou en présence d'EDTA, dans le cas des argiles comme du calcaire.

D'après les constantes des espèces lanthanidiques connues, les carbonates complexes sont largement prépondérants dans les eaux de la Loire sur toute la gamme des pH observés. Dans ces conditions, il n'est pas possible de rendre compte des interactions solution/phases solides par la solubilité des hydroxydes et des carbonates, car la concentration en ions simples Ln^{3+} est très éloignée de celle qu'il serait nécessaire d'avoir pour atteindre les produits de solubilité de ces minéraux. D'un autre côté, seul l'ajout de ligands complexants forts (acides

humiques, acides fulviques, cyclodextrines...) est en mesure d'accroître la solubilité de ces éléments, mais toujours dans le sens d'un enrichissement relatif des lanthanides lourds dans la solution. La préservation de la mémoire chimique héritée de l'altération continentale peut donc difficilement être explicable si on fait référence à cette seule chimie en solution et aux interactions entre solution et minéraux argileux notamment qui ont une forte capacité de rétention, comme le prouvent les analyses de la matière en suspension, des sédiments du lit mineur ou des alluvions de la nappe. Il est donc nécessaire de faire intervenir une autre phase porteuse de ces éléments tout au long du transport et dont la capacité de fixation de l'ensemble des lanthanides soit très forte. Cette phase est constituée par des colloïdes dont la mobilité est très grande dans le fleuve. Deux espèces dominent donc le « maintien en solution » des lanthanides : les colloïdes prépondérants et les carbonates complexes. Ces deux espèces permettent de rendre compte des comportements des lanthanides au sein de la nappe.

Dans la partie alluviale de la nappe, les circulations d'eau sont très lentes et très limitées comme nous l'avons démontré. Un équilibre s'établit alors entre colloïdes, carbonates complexes, argiles et éventuellement carbonates. Cela se traduit à la fois par des échanges d'ions et par des fixations de colloïdes à la surface des minéraux solides. Les échanges d'ions sont limités aux lanthanides les plus faiblement complexés et au cérium dont la valence IV le distingue de ses compagnons et favorise son incorporation dans les argiles. Quant aux colloïdes, leur fixation est liée principalement à une interaction électrostatique qui peut expliquer leur facile désorption, par exemple par simple acidification du milieu comme nous l'avons à plusieurs reprises vérifié. Aussi on relève des variations importantes des concentrations des lanthanides dans les forages effectués dans les alluvions en fonction de la quantité de colloïdes désorbés. Lorsque la proportion de colloïdes désorbés est faible on relève des concentrations faibles en lanthanides, un appauvrissement en lanthanides légers et

une anomalie en cérium. Lorsque la proportion de colloïdes est forte on relève des concentrations fortes en lanthanides, sans fractionnement relatif des lanthanides à l'exception de l'anomalie en cérium. Les observations effectuées dans le piézomètre alluvionnaire X sont à ce titre particulièrement démonstratives.

Dans le réseau de circulation karstique au sein duquel la circulation d'eau de la Loire est rapide, on relève une très forte décantation et filtration des matières en suspension et des colloïdes. Les carbonates complexes jouent alors un rôle plus important pour le maintien des lanthanides en solution, expliquant ainsi l'appauvrissement relatif en lanthanides légers à la source du Bouillon.

Lors des expériences de traçage, on introduit un complexant fort (EDTA) en compétition avec colloïdes et carbonates. Les échanges d'ions qui en résultent expliquent en premier lieu l'intérêt des lanthanides comme traceurs par leur maintien en solution sur de longues durées et de longues distances. Si tel n'était pas le cas, la simple dilution de la molécule d'EDTA ferait disparaître rapidement l'anomalie provoquée par fixation sur les minéraux solides. Le transport en solution est contrôlé alors par quatre espèces : les complexes à l'EDTA, les complexes mixtes carbonates-EDTA, les carbonates complexes et les colloïdes.

Dans le réseau karstique, le transport rapide favorise le maintien en solution du complexe injecté, avec toutefois une fixation plus rapide des lanthanides légers, dont les complexes sont moins stables, sur les colloïdes. La filtration partielle des colloïdes explique le transfert plus rapide des lanthanides lourds puis la diminution du rapport lanthanides lourds/lanthanides légers au-delà du pic de restitution, marquant ainsi l'apparente réversibilité du processus de transport.

Dans la partie alluvionnaire de la nappe, les échanges peuvent atteindre un état d'équilibre et la fraction en solution enrichie en lanthanides lourds par les complexes EDTA et les carbonates complexes va migrer d'une manière prépondérante en général.

Dans un état statique de la nappe on se rapproche des expériences en batch effectuées au laboratoire, le rapport lanthanides lourds/lanthanides légers augmente au cours du temps. Lors des transports, les lanthanides lourds migrent plus vite, mais "l'apparente réversibilité" des courbes de restitution disparaît tant que les colloïdes ne sont que très partiellement transportés. Le va et vient observé des traceurs dans la nappe ne s'effectue que lorsque les gradients hydrauliques locaux sont très importants sous l'influence des brutales remontées ou descentes de la Loire. A ce moment, il est possible de déplacer plus fortement ces colloïdes comme le démontrent les observations en X. Alors le rapport lanthanides lourds/lanthanides légers « en solution » peut diminuer puisque les derniers ont été préalablement plus aisément fixés sur les colloïdes.

Remarquons que la fixation des lanthanides par les colloïdes explique aussi la faible importance du processus de diffusion de ces éléments dans le système.

Au sein du fleuve, l'équilibre entre colloïdes et carbonates complexes est maintenu à cause d'une mobilité équivalente lors d'un transport rapide et sans filtre, ce qui permet de préserver l'héritage de l'érosion continentale.

9.3. Les conséquences concernant les impacts à court et à long terme de l'exploitation de la carrière de Sandillon

9.3.1 Plan de conduite de l'exploitation et de remblaiement de la carrière prévu initialement par l'entreprise

Les contraintes imposées à l'exploitation sont décrites dans le document Morillon-Corvol de 1995 établi par Christian Vallier :

« L'extraction sans rabattement de la nappe, évite tout problème. La profondeur d'extraction, limitée à 7,50 mètres sous le niveau du sol (profondeur du toit calcaire : 8 à 11 mètres) laisse une épaisseur d'alluvions plus ou moins importante mais suffisante, entre le substratum (argiles et calcaire le plus souvent) et les fonds de fouilles ». « Par ailleurs, la décantation des eaux de lavage avant rejet dans la zone humide évite le colmatage ».

La présence éventuelle d'un axe karstique est prise en compte:

« Au niveau de l'axe karstique, les précautions suivantes sont prises :

-extraction limitée en profondeur sur une bande de 100 mètres de part et d'autre de l'axe, (localisation carte piézométrique, résultat de l'étude BRGM : Desprez et Martin) : On y laisse 1,50 mètres d'alluvions pour en conserver le pouvoir filtrant.

-remblayage intégral de la zone concernée

-surveillance accrue lors de l'extraction »

Ces mêmes considérations sont prises en compte pour guider les opérations de remblaiement :

« Les stériles de la carrière sont régalez en fond de fouille pour :

-éviter leur stockage prolongé (impact visuel, coût de reprise)

-assurer une assise la plus filtrante possible entre le substratum et les déblais extérieurs.

Les matériaux de remblais sont totalement inertes (gravats de démolition, matériaux issus de terrassement, verres, porcelaines...).

En couche terminale du remblai, on dispose les matériaux les plus fins et on exclue tout élément de grosse taille.

Un nivellement général du soubassement est effectué pour éviter tout effet de cuvette, peu de temps avant le recouvrement par les terres cultivables. La mise à niveau des terrains remblayés à la cote 96 mNGF assure au moins une épaisseur de 3 mètres hors d'eau par rapport à la nappe. De même, cette cote assure la mise hors crues de type annuel. ».

9.3.2 Les conclusions de la thèse sur la conduite de l'exploitation et du remblaiement

De ce travail de thèse et des conclusions que l'on peut en tirer dans les limites qu'autorisait l'extension actuelle du site expérimental, nous retiendrons les observations suivantes :

a) Pendant toute la durée de nos investigations aucune de toutes nos mesures n'a permis de signaler une influence significative de la carrière sur la qualité et sur la circulation à grande distance des eaux de la nappe.

b) Sur le court terme, les risques concernent essentiellement les risques de la contamination directe des eaux cheminant dans les axes karstiques. Les conditions d'exploitation et de remblaiement qui avaient été fixées lors de l'étude d'impact et qui ont été

rappelées dans le paragraphe précédent les excluent presque totalement. Il demeure néanmoins difficile de se prémunir totalement d'un effondrement local ou de la réouverture d'une cavité. Signalons, de plus, que l'extraction à l'aide d'une excavatrice provoque un premier lavage dans le lac des sédiments extraits et une première décantation favorable des particules argileuses en fond de fouille. Il demeure nécessaire d'éviter d'entrer au contact direct du toit calcaire.

c) La qualité du stockage de déchets inertes effectué pour assurer le remblaiement est renforcée par la capacité de confinement du système que nous avons décrite plus haut. Eviter l'aplomb des axes karstiques et envelopper ces déchets d'une épaisseur suffisante de tout venant sont les précautions nécessaires et efficaces à prendre et qui sont parfaitement prévues. Cependant, le traçage réalisé dans le lac nord de la carrière a montré que le lac favorisait l'étalement d'éventuelles anomalies introduites dans le lac et augmentait, par conséquent, les risques de mise en contact avec une entrée dans le système de drainage de la nappe du calcaire. Mais cet étalement s'accompagne d'un effet bénéfique de dilution de l'anomalie dans le système. Etant donné les risques très limités de voir une substance nuisible s'introduire dans les remblais théoriquement inertes, il est préférable, plutôt que d'opter pour la dilution, d'adopter une politique de remblaiement parcellaire c'est à dire de compartimenter le lac à remblayer afin d'éviter la diffusion d'une telle substance. De plus, à cette échelle, la précaution ultime repose sur une solide cartographie des axes karstiques et sur l'implantation judicieuse, en fonction de la distribution de ces axes, d'un réseau de piézomètres qui permet à la fois le contrôle rigoureux et l'approfondissement de la modélisation du système.

d) La qualité à plus long terme du système est limitée par sa propre capacité de confinement. Cela est perceptible par les impacts aujourd'hui mesurables des activités

agricoles. Les apports chimiques (nitrates, sulfates, chlorures) sont distribués d'une manière très hétérogène et maintenus dans les zones de faible perméabilité et de plus forte capacité de rétention. La distribution des lanthanides naturels et les expériences de traçage ont démontré la très faible interaction et les très faibles mélanges entre eaux de la nappe et eaux circulant dans le karst. Toutefois, ces échanges, du fait même des battements de la nappe et de la diffusion dans l'ensemble du système, existent même s'ils sont faibles. Il en découle que la capacité de confinement entraîne elle-même le risque considérable d'une pollution irréversible si les abondances dans les eaux de la nappe devenaient trop élevées. A ce risque s'ajoute celui de l'ajout d'un ligand fortement complexant, quelle que soit son origine et qui, comme dans les expériences de traçage, serait en mesure d'extraire et de transférer progressivement des éléments dans le système karstique, ou de les étaler dans la nappe elle-même. L'impact à long terme de l'exploitation est clairement proportionné à l'éventuelle adjonction aux eaux de la nappe, d'un couple ligands complexants/bactéries entrant en compétition avec le couple carbonates complexes/colloïdes qui gouvernent les transferts naturels dans la nappe. Cet impact est bien simulé par les complexes EDTA de lanthanides. Aussi, l'appréciation d'une capacité de confinement ne doit donc pas se traduire trop vite par un relâchement de la surveillance ou par l'augmentation sans contrôle, en quantité et en qualité, des matériaux utilisés pour le remblaiement. Cela signifie que le risque majeur résulterait avant tout de l'ignorance du fonctionnement du système et du refus de maîtriser les conditions de son exploitation et de sa surveillance.

Références bibliographiques

Bibliographie

- Alaux-Négrel G.** (1991) – Etude de l'évolution des eaux profondes en milieux granitiques et assimilés. Comportement des éléments traces - Thèse de l'Université Paris VII, 216p.
- Alberic P.** (2000) – Le Loiret à contre-courant : quand le Bouillon absorbe les eaux du Dhuy - Etudes de l'association Spéléologie Subaquatique Loiret de l'Université d'Orléans. Le Bulletin de la Rivière le Loiret, 25, juillet 2000, p.2-3.
- Alberic P. et Lepiller M.** (1998) - Oxydation de la matière organique dans un système hydrologique karstique alimenté par des pertes fluviales (Loiret, France), *Wat. Res.* 32, 7, p.2051-2064.
- Albinet M., Brossier G. et al.** (1973) - Expérience de coloration dans le Val d'Orléans-Orléans - Département géologie de l'aménagement, hydrogéologie, Rapport BRGM 73-SGN-095-AME.
- Albinet M. et Treuil M.** (1974) – Application de l'analyse par activation à la détermination rapide de traceurs activables dans les eaux souterraines et à leur utilisation en hydrogéologie – Septembre 1974 - Rapport BRGM 74-SGN-345-AME.
- Albinet M., Bigot S., Brossier G., Treuil M.** (1975) – Application de l'analyse par activation à la détermination rapide de traceurs activables dans les eaux souterraines et à leur utilisation en hydrogéologie – Décembre 1975 – Rapport BRGM 75-SGN-418-AME.
- André J.C. et Molinari J.** (1976) - Mise au point sur les différents facteurs physico-chimiques influant sur la mesure de concentration de traceurs fluorescents et leurs conséquences pratiques en hydrologie - *Journal of Hydrology*, 30, p.257-285.
- Antiguedad I.** (1995) - Karst aquifer regionalization in the Basque country (Northern Spain) - International Symposium and Field Seminar on « Karst Waters and Environmental Impacts », Sept.10-20, 1995 Antalya –Turkey. Report p.25.
- Bakalowicz M.** (1979) - Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification - Thèse de doctorat d'Etat. Université Paris VI, 269p.
- Barrière** (1965) – Essai d'appréciation quantitative des pertes et des résurgences de la Loire entre Gien et Muides – Rapport 4^{ème} Circonscription électrique 8-3-1965.
- Berner E.K. and R.A.** (1987) - *The Global Water Cycle* - Ed. Prentice Hall, 397p.
- Bigot S.** (1977) - Contribution à l'analyse des lanthanides dans les eaux naturelles par activation neutronique : Utilisation des lanthanides comme traceurs dans les nappes d'eaux souterraines - Thèse de 3^{ème} cycle. Université Paris VII, 142p.
- Bigot S., Treuil M., Dumonceau J. et Fromage F.** (1984) - Couplage des équations de transfert de masse et des lois d'interactions solution-solide par l'utilisation des lanthanides comme traceurs – Approche expérimentale – *Journal of Hydrology*, 70, p.133-148.
- Boitel R.J.** (1965) - Le domaine de la Source - *La source du Loiret*, Société Orléanaise d'Histoire et d'Archéologie, Orléans. p.23-27.
- Bourg A. and Kedziorek M.** (1999) – Geochemical filtering of heavy metals by calcareous alluvions in an island of the Seine River – *Environmental Technology*, 20, p.1183-1188.

- Bunzl K. and Schimmack W.** (1988) – Distribution coefficients of radionuclides in the soil : analysis of the field variability – *Radiochim. Acta*, 44/45, p.355-360.
- Byegard J., Skarnemark G. and Skalberg M.** (1999) - The stability of some metal EDTA, DTPA and DOTA complexes : Application as tracers in groundwater studies – *J. Radioan. and Nucl. Chem.*, 241, 2, p.281-290.
- Byegard J., Skarnemark G. and Skalberg M.** (2000) – Transport modelling of tracers influenced by kinetic hindered sorption – applied to laboratory and in situ studies of lanthanide EDTA complexes – *J. Cont. Hydrol.*, 42, p.163-186.
- Cadic R., Longère P., Gauthier C., Borgotti J.C. et Vié P.** (1990) – Expérimentation simultanée de plusieurs traceurs activables dans le réseau karstique du Châtillonnais – *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 166, p.45-53.
- Caudron M., Desprez N. et Peudecerf P.** (1970) - Etude hydrogéologique du Val d'Orléans (Loiret). Observations piézométriques - Février 1968-Mars 1970 - Orléans BRGM, Rapport 70-SGN-101-BDP.
- Châtelain S. et Livrozet E.** (1982) - Impact des apports de la Loire sur la qualité des eaux du système karstique des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans. Aspects bactériologiques - Actes du 8^{ème} colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Neuchâtel.
- Châtelain S., Chery J.L. et Livrozet E.** (1981) – Communication au 26^{ème} Congrès de Limnologie, Orléans. 1-4 juin 1981.
- Chery J.L.** (1983) - Etude hydrochimique d'un aquifère karstique alimenté par perte de cours d'eau (La Loire) : Le système des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans - Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Univ. d'Orléans, 258p.
- Chesterikoff A.** (1980) – Les eaux du lac de Créteil, leur origine, leurs caractéristiques. C.R. XXVe Congrès A.F.L., p.134-146.
- Chigot D., Karimi R. et Ferrand A.** (1994) - Impact Hydrogéologique de la création d'une carrière à Sandillon (Loiret) - BRGM rapport CEN-93-P0213.
- Chupeau J.** (1991) – Contribution à l'étude théorique et expérimentale du transfert des solutés en aquifère : application au traçage chimique d'un réservoir géothermique, apports de la modélisation couplée transport-géochimie - Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie. 186p.
- Courtois N.** (1999) – Caractérisation de la dispersion en aquifère hétérogène par méthodes de traçages et modélisation stochastique. Application à la nappe alluviale du Drac, à Grenoble - Thèse de l'Ecole des Mines de Paris. 260p.
- Cullimore D.R.** (1978) – The identification, cultivation and control of Iron Bacteria in groundwater – *Aquatic Microbiology*, Ed. Skinner and Shewan Acad. Press.
- Dacharry M.** (1996) - Les grandes crues historiques de la Loire - *La Houille Blanche*, 338, p.47-53.
- De Marsily G.** (1994) – Hydrogéologie: comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants – Cours de l'Ecole des Mines de Paris. 243p.
- Desprez N.** (Avril 1967) - Inventaire et étude hydrologique du Val d'Orléans - Rapport BRGM DSGR-67-A21.
- Desprez N.** (Décembre 1967) – Etude hydrogéologique des calcaires de Beauce. Inventaire du bassin versant de la Loire en amont d'Orléans - Rapport BRGM DSGR-67-A86.

- Desprez N.** (1976) - Val d'Orléans à l'Est d'Orléans (Loiret). Etude hydrogéologique - Rapport BRGM 76-SGN-109-BDP.
- Desprez N., Martins C. et Al.** (1976) - Aménagement du Val d'Orléans, Etude hydrogéologique – Rapport BRGM 77-SGN-582-BDP.
- Dieulin A.** (1980) – Propagation de pollution dans un aquifère alluvial. L'effet de parcours - Thèse, Ecole des Mines de Paris- Université Paris 6. 207p.
- Diment W.H., Raspet R., Mayhew M.A. and Werre R.W.** (1965) - Terrestrial Heat Flow near Alberta, Virginia - Journal of Geophysical Research, Vol 70, n°4, p.923-929.
- Drot R.** (1998) – Sorption des ions U(VI) et Eu (III) à l'interface solution – solides phosphatés: Etude structurale et mécanismes – Thèse, Université Paris-Sud Orsay. 222p.
- Dumonceau J., Bigot S., Treuil M., Faucherre J. et Fromage F.** (1980) – Etude des complexes mixtes des lanthanides (III) avec les ions carbonates et l'EDTA – Revue de Chimie minérale, tome 17, pp58-64
- Dupré B., Gaillardet J., Rousseau D. and Allègre C.J.** (1996) – Major and trace elements of river-borne material : The Congo Basin – Geochim. Cosmochim. Acta, 60, p.1301-1321.
- Eberentz P. et Rinck G.** (1987) - Impact qualitatif des carrières en eau sur les nappes souterraines – Rapport de synthèse- BRGM 87-SGN-567-HNO-ALS.
- Fletcher and Driscoll** (1986) - Groundwater and wells - 2^{ème} édition.
- Fredd N.C. and Fogler H.S.** (1998) – The influence of chelating agents on the kinetics of calcite dissolution – Journal of Colloid and Interface Science, 204, p.187-197.
- Gaspar E.** (1987) - Modern Trends in Tracer Hydrology- Vol.I. CRC Press.
- Gauthier C. et J., Dufresne D., Vié Ph. et Cadic R.** (1983) – Etude de mouvements d'eau avec traceurs activables réalisée dans le réseau karstique de la Touvre en décembre 1982 - CR LCPC, Sept.
- Gigout M. et Desprez N.** (1971) - Note explicative de la carte géologique 1/50000 XXII-20 « La Ferté-Saint-Aubin » - 12p.
- Goldberg E.D., Koide M., Schmitt R.A. and Smith R.H.** (1963) – Rare earth distributions in the marine environment – J. Geophys. Res., 68, p.4209-4217.
- Goldstein S.J. and Jacobsen S.B.** (1988) – Rare earth elements in river waters - Earth Planet. Sci. Lett., 89, p.35-47.
- Gonzalez R.** (1984) – Etude du transit des informations hydrodynamiques, thermiques et physico-chimiques dans le système karstique des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans - Rapport de DEA. Université d'Orléans. 127p.
- Gonzalez R. et Lepiller M.** (1984) - Projets de bassins de retenue d'eaux pluviales – Etude de la piézométrie de la nappe des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans - Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Orléans. 15p.
- Gonzalez R. et Lepiller M.** (1987) - Physico-chimie des eaux de la Loire moyenne - Bull. Ann. Nat. Orl. Loire Moy., 6, p.25-36.

- Gorgeon L.** (1994) – Contribution à la modélisation physico-chimique de la rétention de radioéléments à vie longue par des matériaux argileux - Thèse de l'Université Paris VI. 256p.
- Gran G.** (1952) - Determination of the equivalence point in potentiometric titrations - *The Analyst*, 77, p.661-671.
- Grosbois C.** (1998) – Géochimie des eaux de la Loire. Contribution naturelle et anthropique. Quantification de l'érosion. – Thèse de l'Université de Tours. 232p.
- Grosbois C., Negrel P., Fouillac C. and Grimaud D.** (2000) – Dissolved load of the Loire River: chemical and isotopic characterization – *Chemical Geology*, 170, p179-201.
- Hagemann R. et Treuil M.** (1998) – Introduction à la géochimie et ses applications – tome 2: Transferts des éléments. Evolution géochimique des domaines exogènes – Commissariat à l'Energie Atomique et Université Paris 6. Collection Enseignement. 296p.
- Haskin L.A., Haskin M.A., Frey F.A. and Wildman T.R.** (1968) – Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths, in : *Origin and Distribution of the Elements* - L.H.Ahrens ed., Pergamon, Oxford, 30, p.889-912.
- Helmer C. and Labroue L.** (1993) – Denitrification in gravel-pit lakes - *Hydrobiologia*, 252, p.35-44.
- Helmer de Almeida C.** (1994) – Importance de la dénitrification et des relations eaux-sédiments dans le fonctionnement des lacs de gravière. Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse. 261p.
- Helsens T.** (1981) – Le système karstique des calcaires de Beauce sous le Val d'Orléans: Etude physico-chimique et hydrométrique – Rapport de DEA. Université d'Orléans. 56p.
- Ildefonse P., Juillot F., Morin G., Dumat C., Benedetti M. et Calas G.** (1999) - Approche intégrée de la spéciation des métaux dans les sols. In : "Spéciation des métaux dans le sol" - Les Cahiers des clubs CRIN, p.179-205.
- Janet L.** (1901) – Géologie et Hydrologie de la région du Loiret – Préfecture de la Seine – Direction des affaires municipales, Paris, Ed. Chaix.
- Jauffret D. et Rousselot D.** (1988) – Ville d'Orléans (Loiret). Bassin tampon du moulinet. 2^{ème} phase: analyse de son fonctionnement et optimisation - Rapport BRGM 88-SGN-685-CEN, SGR Centre. 13p., 2 annexes.
- Jenkins G.M. and Watts D.G.** (1968) – Spectral analysis and its applications - Holden Day, San Francisco, CA 525p.
- Johannesson K.H., Stetzenbach K.J. and Hodge V.F.** (1997) – Rare earth elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, p.3605-3618.
- Jones P.H. and Skibitzke H.E.** (1956) - Subsurface geophysical methods in groundwater hydrology - *Advances in Geophysics*, p.241-300.
- Joron J.L., Treuil M., Rimbault L.** (1997) – Activation as a geochemical tool: Statement of its capabilities for geochemical trace elements studies – *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 216, 2, p.229-235.

- Kari F.G. and Giger W.** (1995) – Modeling the photochemical degradation of Ethylenediaminetetraacetate in the River Glatt – Environ. Sci. Technol., 29, p.2814-2827.
- Käss W.A.** (1994) - Hydrological tracing practice on underground contaminations, Environmental Geology, 23, p.23-29.
- Käss W. and Löhnert E.P.** (1995) - The latest Paderborn tracing test (Northern Westphalia, FRG) - International Symposium and Field Seminar on «Karst Waters and Environmental Impacts », Sept.10-20, 1995 Antalya –Turkey. Report p.22.
- Kinzelbach W. and Rausch R.** (1989) – Aquifer Simulation Model "ASM". Version 1.0 - Documentation. 48p.
- Klopffer W., Kohl E.G., Kaufmann G.** (1988) – Photodegradation of Fe(III)-, Cu(II)-, Ni(II)-, and Zn(II)-EDTA complexes in water - Batelle-Institut: Frankfurt, Draft report PUG/WK10.
- Labroue L et Helmer de Almeida C.** (1997) – Cycle des nutriments: l'azote et le phosphore. In: Limnologie Générale - Pourriot et Meybeck (Eds). Masson, Paris. p.727-764.
- Lacey W.J. and Laguna W.** (1956) – Method for preparing radioactive cations for tracing groundwater - Science, 124, p.402.
- Lambiase J.J et Al.** (1979) - Detailed temperature logging as useful tool for lithologic interpretation - AAPG Bulletin 63/3, p.484.
- Lauga R.** (1990) - Pratique du forage d'eau et utilisation des crépines en génie civil et en forages profonds - Seesam, Paris.
- Le Borgne F.** (1997) - Mise en place d'un dispositif expérimental pour l'étude géochimique in situ des nappes alluviales. Rapport de DEA de Géochimie Fondamentale et Appliquée. Université Paris VII. 37p.
- Lepiller M. et Mondain P.H.** (1986) - Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. Mise en œuvre et interprétation - Hydrogéologie, 1, p.33-52.
- Lepiller M.** (2001a) – Le Val d'Orléans in: Eaux souterraines de la France – A paraître.
- Lepiller M.** (2001b) - Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en région centre – A paraître.
- Livrozet E.** (1984) - Influence des apports de la Loire sur la qualité bactériologique et chimique de l'aquifère karstique du Val d'Orléans - Thèse, Université d'Orléans. 191p.
- Louvat P.** (1997) – Etude géochimique de l'érosion fluviale d'îles volcaniques à l'aide des bilans d'éléments majeurs et traces. Thèse de doctorat de l'Université ParisVII. Institut de Physique du Globe de Paris. 322p.
- MacGlathery K.J., Marino R. and Howarth R.W.** (1994) – Variable rates of phosphate uptake by shallow marine carbonate sediments: Mechanisms and ecological significance. - Biogeochemistry, 25, p.127-146.
- Mackay D.M., Freyberg D.L., Roberts P.V., Cherry J.A.** (1986) – A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer, 1, Approach and overview of plume movement, Water Resources Research, 22, 13, p.2017-2029.
- Magonthier et Beaucaire C.** (1993) – Migration of heavy elements in granitic waters : nature of inorganic particles - Safewaste 93 Proceedings, 3, p.395-405.

- Mangin A.** (1984) – Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales – *J. Hydrol.*, 67, p.25-43.
- Mangin A., Molinari J. et Paloc H.** (1976) – Les traceurs en hydrogéologie karstique. Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères calcaires - *La Houille Blanche*, numéro spécial consacré à la technique des traceurs en hydrologie et en hydraulique, 3/4, p.261-267.
- Marboutin F.** (1901) - Etudes hydrogéologiques, Mission du Val d'Orléans, Paris, Commission scientifique du perfectionnement et l'Observatoire de Montsouris, campagne d'été 1901.
- Marboutin F.** (1902) - Etudes hydrogéologiques, Mission du Val d'Orléans, Paris, Commission scientifique du perfectionnement et l'Observatoire de Montsouris, campagnes d'hiver 1901-1902 et d'été 1902.
- Marmier N.** (1994) – Etude expérimentale et modélisation de la fixation d'éléments en trace sur des oxydes minéraux. Contribution à l'étude des propriétés adsorbantes des solides naturels – Thèse de doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne. 193p.
- Martin J.C., Giot D. et Le Nindre Y.M.** (1999) - Etudes préalables à la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe de Beauce. Géométrie du réservoir et limites de la nappe de Beauce - Rap. BRGM R-40571, 123p.
- Meus P.** (1996) - Les traçages artificiels, outils de reconnaissance et d'étude des aquifères karstiques - Actes du séminaire national « Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique », 27, 28 et 29 Novembre 1996, Montpellier, p.182-196.
- Michard G.** (1989) - Equilibres chimiques dans les eaux naturelles - Ed.Publisud, 357p.
- Molinari J. et Rochat J.** (1978) - Synthèse bibliographique sur la toxicité des substances fluorescentes utilisées en hydrogéologie - *Int. J. Speleol.*, 10, p.269-277.
- Nagao S., Rao R. R., Killey R. W. D. and Young J. L.** (1998) – Migration behavior of Eu(III) in Sandy Soil in the presence of Dissolved Organic Materials – *Radiochim. Acta*, 82, p.205-211.
- Neuilly M.** (1993) - Modélisation et estimation des erreurs de mesure - CETAMA, Technique et Documentation Lavoisier. 644p.
- Neuilly M.** (1996) - Précision des dosages de traces – CETAMA, Technique et Documentation Lavoisier. 459p.
- Nowack B. and Sigg L.** (1996) – Dissolution of Fe(III)(Hydr)oxides by metal-EDTA complexes – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 5, p.951-963.
- Padilla A. and Pulido-Bosh A.** (1995) – Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis – *J. Hydr.*, 168, p.73-89.
- Panel R.** (1991) – Modélisation hydrodynamique de l'influence des exploitations de granulats sur la plaine du Perthois (Marne) - Rapport BRGM R32543-CHA-4S-91, 18p.
- Parriaux A., Liskay M., Müller I., et Della Valle G.** (1988) - Guide pratique pour l'usage des traceurs artificiels en hydrogéologie - Société Suisse d'Hydrogéologie.
- Peaudecerf P.** (1970) - Calcul automatique de la diffusivité des nappes en relation avec un plan d'eau libre - Orléans BRGM, Rapport 70-SGN-083-HYD.
- Peaudecerf P.** (1975) - Effets des gravières sur le comportement hydrodynamique des nappes d'eau souterraines - *La Houille Blanche*, 2/3. p.133-140.

- Petterson K. and Boström B.** (1986) – Phosphorus exchange between sediment and water in lake Balaton, in: Sediments and water interactions - P.G. Sly Eds., p.427-435.
- Pin C., Briot D., Bassin C. and Poitrasson F.** (1994) – Concomitant separation of strontium and samarium-neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography – *Anal. Chim. Acta*, 298, p.209-217.
- Plummer L.N., Wigley T.M.L. and Parkhurst D.L.** (1978) – The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5° to 60°C and 0.0 to 1.0 Atm CO₂ – *American Journal of Sciences*, 278, p.179-216.
- Quevauviller P., Lachica M., Barahona E., Gomez A., Rauret G., Ure A. et Muntau H.** (1998) – Certified reference material for quality control of EDTA and DTPA extractable trace metal contents in calcareous soil (CRM 600) – *Fresenius J. Anal. Chem.*, 360, p.505-511.
- Rochat J., Alary J. et Fourneaux J.C.** (1981) - Comportement des traceurs fluorescents xanthéniques. Influence des principaux composants du sol sur la rétention de traceurs - *Spelunca*, 3, p.22-26.
- Sainjon H.** (1859) - Etude du régime de la Loire - Ponts et Chaussées. Bibliothèque d'Orléans.
- Sainjon H.** (1888) – La Loire, le Loiret et les courants souterrains du Val d'Orléans – Orléans 1888.
- Sammel E.A.** (1968) - Convective flow and its effect on temperature logging in small-diameter wells - *Geophysics*, 33, 6, p.1004-1012.
- Shakhverdov T.A., Z.N. Turaeva, Nizanov N. and Ermolaev V.L.** (1999) – Luminescent study of association of eosin with rare earth ions in water – *Optics and Spectroscopy*, 87, 2, p.235-239.
- Schanen O.** (1998) - Analyse et modélisation de l'impact hydrodynamique et biogéochimique des lacs de gravières sur la nappe alluviale du Val de Seine – Thèse de doctorat de l'Université Paris VI. 273p.
- Schnebelen N., Ledoux E., Bruand A. et Creuzot G.** (1999) - Stratification hydrogéochimique et écoulements verticaux dans l'aquifère des calcaires de Beauce (France): un système anthropisé a forte variabilité spatiale et temporelle – *C. R. Acad. Sc. Paris. Série II. Sc. Terre Plan. Fasc.A*, 239; 6, p.421-428.
- Sholkovitz E.** (1992) –Chemical evolution of rare earth elements : fractionation between colloidal and solution phases of filtered river water - *Earth Planet. Sci. Lett.*, 114, p.77-84.
- Sholkovitz E.** (1995) – The Aquatic Chemistry of Rare Earth Elements in Rivers and Estuaries – *Aquatic Geochem.*, 1, p.1-34.
- Smart P.L. and Laidlaw I.M.S.** (1977) - An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing - *Water Resources Res.*, 13, 1, p.15-33.
- Smith and Martell** (1976) – Critical stability constants. Vol.4: Inorganic Complexes- Plenum Press. New York and London.
- Smith and Martell** (1989) – Critical stability constants. Vol.6: Second Supplement- Plenum Press. New York and London.

- Sondag F., Soubies F., Fortune J.P., Dupré B., Magat P. and Melfi A.** (1997) – Hydrogeochemistry in soils and sediments in the area of the Lagoa Campestre lake (Salitre, MG, Brazil) : chemical balances of major and trace elements and dynamics of rare earth elements – *Appl. Geochem.*, 12, p.155-162.
- Takahashi Y., Minai Y. and Tominaga T.** (1998) – Complexation of Eu(III) with Humic Substances fractionated by Coagulation – *Radiochim. Acta*, 82, p.97-102.
- Taylor S.R. and McLennan S.M.** (1985) - The Continental Crust : its Composition and Evolution - Blackwell, Oxford. 312p.
- Teles V.** (1999) - Construction de réservoirs aquifères alluviaux par modèle génétique de mise en place des sédiments - Université Pierre et Marie Curie. Paris 6, thèse de doctorat.
- Teles V., de Marsily G. et Perrier E.** (1998) - Sur une nouvelle approche de modélisation de la mise en place des sédiments dans une plaine alluviale pour en représenter l'hétérogénéité - *C.R.Acad.Sci.Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 327, 597-606.
- Toulhoat P.** (1987) – Hydrogéochimie de l'Uranium, de ses descendants et d'éléments associés (lanthanides). Application à la prospection minière – Université Pierre et Marie Curie. Paris 6, thèse d'état. 297p.
- Foreman T.L. and Sharp Jr. J.M.** (1981) - Hydraulic properties of a major alluvial aquifer : an isotropic, inhomogeneous system - *J. Hydrol.*, 53, p.247-268.
- Vanhaeke F., Vanhoe H., Dams R. and Vandecasteele C.** (1992) – The use of internal standards in ICP-MS – *Talanta*, 39, p.737-742.
- Vaughan M.A. and Horlick G.** (1986) – Oxyde, Hydroxyde, and doubly Charged Analyte Species in Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometry – *Applied Spectroscopy*, 40, p.434-444.
- Zunino C.** (1979) - Contribution à l'étude hydrogéologique du Val d'Orléans (Etablissement d'un modèle mathématique de simulation de nappe) - Université d'Orléans, thèse de 3^{ème} cycle.
- Zunino C., Bonnet M. et Lelong F.** (1980) - Le Val d'Orléans : un exemple d'aquifère à alimentation latérale - *C.R.somm. Soc. Géol. Fr.*, 5, p.195-199.

REPONSES HYDROGEOCHIMIQUES DE LA NAPPE PHREATIQUE DU VAL D'ORLEANS AUX SOLLICITATIONS DE SON ENVIRONNEMENT. DEVELOPPEMENT DU SITE EXPERIMENTAL DE LA CARRIERE MORILLON-CORVOL DE SANDILLON (45)

RESUME :

L'implantation d'un réseau d'observation de la nappe phréatique du Val d'Orléans centré sur la carrière Morillon-Corvol de la commune de Sandillon, dans le Loiret (45), a permis d'étudier les échanges entre 3 sous-systèmes de l'aquifère du Val d'Orléans: les alluvions, le calcaire et les axes de drainages karstiques alimentés par la Loire principalement.

Sur le plan hydrodynamique, le suivi de la piézométrie, des températures et des teneurs en éléments majeurs dans la nappe, ainsi que la réalisation d'une série d'expériences de traçage à différentes échelles ont montré que les circulations au sein des alluvions étaient pulsées par les remontées de la Loire induisant des augmentations rapides de gradients de charges à proximité des axes de circulation karstique. En période de descente de la Loire, les circulations dans les alluvions sont essentiellement verticales, la nappe des alluvions se vidant alors dans la partie calcaire traversée par un réseau de drainage.

Sur le plan des processus chimiques de transfert, des lanthanides naturels et artificiels ont été utilisés pour étudier les fractionnements observés entre phases solides, colloïdales et dissoutes. Dans les eaux de nappe, les lanthanides légers sont préférentiellement portés par les colloïdes, le rôle des complexes (vraisemblablement les carbonates) n'étant sensible que pour les lanthanides lourds. L'injection, dans la nappe, de lanthanides complexés à l'EDTA a montré que des échanges avaient lieu entre ces traceurs, l'encaissant et les colloïdes. Les lanthanides légers étant portés par les colloïdes, ils sont retenus lors des processus de transfert. En effet, les colloïdes sont filtrés lors du passage de l'eau des alluvions au calcaire et décantés lors du passage dans les chenaux karstiques. Au contraire, les complexes de lanthanides lourds traversent les différents interfaces et peuvent être véhiculés sur des distances kilométriques.

DISCIPLINE :

Géochimie Fondamentale et Appliquée

MOTS-CLES :

Aquifère - Calcaire de Beauce - Karsts - Alluvions - Val d'Orléans - Lanthanides - Colloïdes - Traçage.

ADRESSE DU LABORATOIRE :

Laboratoire Pierre Süe. Bât 637. CE/Saclay. 91191 Gif-sur-Yvette Cedex.
