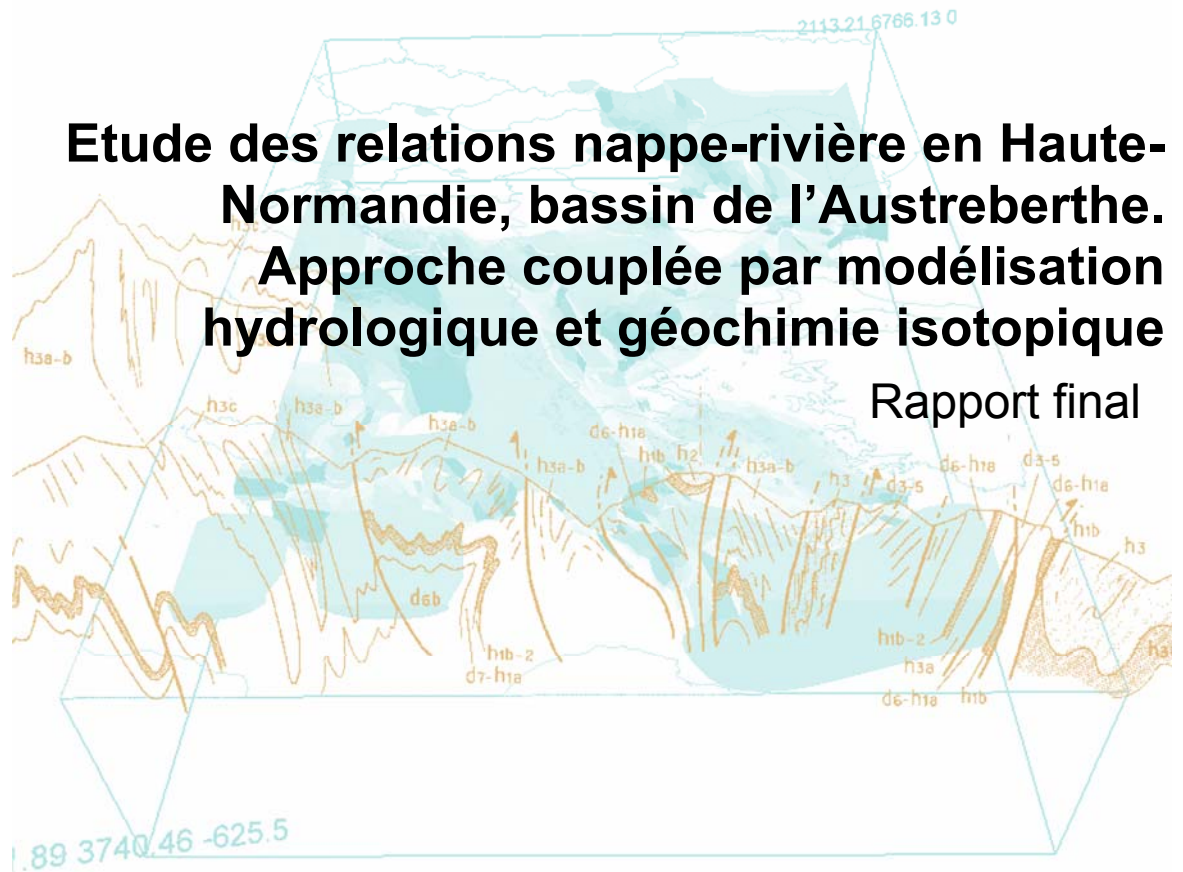




Etude des relations nappe-rivière en Haute-Normandie, bassin de l'Austreberthe. Approche couplée par modélisation hydrologique et géochimie isotopique

Rapport final



Etude des relations nappe-rivière en Haute-Normandie, bassin de l'Austreberthe. Approche couplée par modélisation hydrologique et géochimie isotopique

Rapport final

BRGM/RP-55983-FR
Décembre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de recherche du BRGM PDR06EAU12

E. Petelet-Giraud, A. Brenot et L. Arnaud
Avec la collaboration de
M. Branellec et G. Braibant

Vérificateur :

Nom : Ph. NEGREL

Date : 17/12/07

Signature : 

Approbateur :

Nom : D. PENNEQUIN

Date : 3/1/08

Signature : 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

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

Mots clés :

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

Petelet-Giraud, E., Brenot, A., Arnaud, L., Branellec, M. et Braibant G., 2007. Etude des relations nappe-rivière en Haute-Normandie, bassin de l'Austreberthe. Approche couplée par modélisation hydrologique et géochimie isotopique. Rapport final. Rapport BRGM/RP-55983-FR, 56p, 27 ill.

Synthèse

Dans le but d'approfondir la connaissance relative aux relations nappe-rivière en Haute-Normandie, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) et le BRGM se sont associés dans le cadre d'un projet de recherche. La méthodologie proposée par le brgm se décompose en deux approches complémentaires :

- Une approche par modélisation hydrologique globale du bassin versant, qui a fait l'objet d'un rapport détaillé séparé (Arnaud, 2007);
- Une approche par traçages géochimique et isotopique afin d'évaluer la nature des relations entre les nappes, les sources et la rivière (présent rapport).

Le Comité de Pilotage du projet, constitué de l'AESN, de la DIREN Haute-Normandie et du BRGM a, dans un premier temps, décidé de tester la méthodologie sur le bassin versant de l'Austreberthe (Seine-Maritime).

Des modélisations satisfaisantes (pluie-débit et pluie-niveau) ont pu être obtenues. Les différents termes du bilan hydrologique moyen calculé sur la station de jaugeage de Saint-Paër, permettent de tirer les enseignements suivants :

- Les précipitations efficaces annuelles moyennes sont de l'ordre de 375 mm. Cette valeur est cohérente avec la cartographie nationale des pluies efficaces élaborée par le MEDAD sur la période 1946-2001;
- Avec un débit de fuite négligeable (prélèvements non restitués au bassin versant + écoulement souterrain au droit de la station de jaugeage), le bilan hydrologique ne fait apparaître aucun déséquilibre quantitatif du bassin versant;
- La contribution moyenne des écoulements souterrains lents au débit de l'Austreberthe est de l'ordre de 90 %. Cette contribution moyenne est en accord avec les travaux actuellement menés par l'Université de Rouen. En période d'étiage (juillet à octobre), le cours d'eau est quasi-exclusivement alimenté par les eaux souterraines. En période hivernale (décembre à mars), même si la contribution du ruissellement augmente, l'alimentation de l'Austreberthe par les eaux souterraines reste prépondérante (en moyenne entre 86 et 89 %). Des écoulements rapides significatifs ne sont observés sur le bassin versant que lors des hivers exceptionnellement pluvieux où leur contribution peut alors atteindre entre 20 et 30 %.

Pour les deux campagnes de prélèvements réalisées dans le cadre de l'approche géochimique (novembre 2006 et mai 2007), le modèle semble indiquer une contribution des écoulements lents à l'alimentation de l'Austreberthe sensiblement identique : respectivement 98 et 96 %.

Les principaux résultats de l'approche par traçage géochimique et isotopique sont les suivants :

En comparaison avec l'approche par modélisation hydrologique réalisée à l'exutoire du bassin, l'approche géochimique montre que les eaux de l'Austreberthe en aval (Riv-3) présentent une signature intégratrice de l'ensemble des eaux et des éléments associés à l'échelle du bassin :

- Les traceurs des interactions eaux-roche (isotopes du Sr) montrent que la rivière en aval correspond à un mélange de toutes les eaux souterraines prélevées sur le bassin, traduisant les différentes lithologies drainées.
- Les traceurs des impacts anthropiques (nitrate, chlorure et bore) tracent une déconvolution spatiale des différentes pressions : des apports agricoles en amont du bassin (nitrate essentiellement et chlorure) et des rejets urbains dans la partie aval (chlorure et bore).
- L'approche géochimique permet d'aller plus loin en termes de connaissance de l'alimentation en eau et en éléments dissous de la rivière sur le bassin avec 3 prélèvements d'eau de surface d'amont en aval du bassin. Il a été montré que l'évolution de la composition géochimique de ces eaux suit rigoureusement celle des eaux souterraines qui contribuent à l'écoulement de surface. Le pouvoir intégrateur de la rivière, bien qu'attendu, est clairement mis en évidence en reflétant par tronçon la diversité des apports dissous correspondants à la fois aux apports lithologiques (interaction eau-roche) et aux apports anthropiques (agricole et urbain). Ainsi, compte tenu des conditions hydrologiques lors des deux campagnes, absence de ruissellement de surface significatif, les eaux de surface refléteraient une alimentation quasi exclusive par les eaux souterraines tout au long de la rivière, comme l'indique les compositions chimiques de la rivière.

Par ailleurs, pour les deux campagnes, l'approche géochimique montre clairement le découplage de signature entre les eaux de surface et les eaux souterraines au niveau de Duclair. En effet, la rivière intègre par mélange tous les apports du bassin, ce qui n'est pas le cas des eaux souterraines à Duclair. Ce découplage de signature indique qu'il n'y a pas de réalimentation du forage de Duclair (FC-3) par les eaux de la rivière via les alluvions. On note aussi une nette différence entre la source de Duclair (So-3) et le forage (FC-3) ce qui montre que les réservoirs souterrains sollicités ne sont pas identiques.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Le bassin de l'Austreberthe : géologie, hydrogéologie et localisation des prélèvements	11
2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE	11
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE	12
2.3. RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE	15
2.3.1. L'aquifère crayeux	15
2.3.2. L'exploitation de la ressource	17
2.4. STRATEGIE DES ECHANTILLONNAGES ET LOCALISATION DES PRELEVEMENTS.....	19
2.4.1. Stratégie d'échantillonnage	19
2.4.2. Descriptif des points de prélèvement	19
2.5. PRELEVEMENTS ET METHODES ANALYTIQUES.....	23
2.5.1. Prélèvement et conditionnement des échantillons	23
2.5.2. Analyses des éléments majeurs et traces	24
2.5.3. Analyse des isotopes stables de la molécule d'eau	25
2.5.4. Analyse du tritium	25
2.5.5. Analyse des isotopes du strontium.....	25
2.5.6. Analyse des isotopes du bore	25
3. Caractérisation géochimique du bassin de l'Austreberthe	27
3.1. LA CHIMIE DES EAUX DU BASSIN	27
3.1.1. Validité des analyses chimiques réalisées	27
3.1.2. Diagramme de Piper : faciès chimique des eaux	29
3.1.3. Relation inter-éléments.....	30
3.1.4. Rapports élémentaires	33
3.2. CARACTERISATION DES RESERVOIRS : ISOTOPES DE LA MOLECULE D'EAU ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ et tritium).....	35
3.2.1. Le Tritium : estimation de l'âge des eaux et identification de réservoirs ..	36
3.2.2. Les isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$).....	39
3.3. CARACTERISATION DES APPORTS D'EAU ET D'ELEMENTS DISSOUS	41

3.3.1. Les isotopes du strontium	41
3.3.2. Les isotopes du bore	44
3.4. VARIABILITE TEMPORELLE	46
3.5. VARIABILITE SPATIALE	49
4. Conclusion : couplage des outils géochimiques et de modélisation hydrologique pour l'étude des relations nappe-rivière	51
4.1. CONTEXTE HYDROLOGIQUE DES CAMPAGNES DE PRELEVEMENT : RESULTATS DE LA MODELISATION.....	51
4.2. RESULTATS DE L'APPROCHE GEOCHIMIQUE REPLACES DANS LE CONTEXTE HYDROLOGIQUE	53

Liste des illustrations

Illustration 1 – Carte de localisation du bassin versant de l'Austreberthe (en hachuré)	11
Illustration 2 – Modèle Numérique de Terrain pour le bassin versant de l'Austreberthe (source : IGN)	12
Illustration 3 – Carte géologique au 1/50 000 au droit du bassin versant de l'Austreberthe (carte n°76 – Yvetot, 1974, BRGM ©)	14
Illustration 4 – Extension des terrains créacés (extrait de la notice de la carte n°76 – Yvetot, 1974, BRGM©).....	15
Illustration 5 – Carte piézométrique sur le bassin versant de l'Austreberthe à l'échelle du 1/100000 (brgm, 1990).....	17
Illustration 6 – Evolution des prélèvements en eau sur le bassin versant de l'Austreberthe entre 1994 et 2005 (source AESN).....	18
Illustration 7 – Photographies des points de prélèvement en rivière.....	20
Illustration 8 – Photographies des points de prélèvement sur les sources	21
Illustration 9 – Localisation de l'ensemble des points de prélèvement	22
Illustration 10 – Photographies des points de prélèvement sur les forages et les puits	23
Illustration 11 – Modes opératoires et méthodes d'analyses des éléments majeurs et traces. LQ: limite de quantification.	24
Illustration 12 – Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses isotopiques.....	25
Illustration 13 : Paramètres physico-chimiques et concentrations en éléments majeurs et traces pour les campagnes de hautes eaux et de basses eaux.	28
Illustration 14 : TDS vs. conductivité électrique de l'eau (a), somme des anions (Σ^-) vs. somme des cations (Σ^+) (b), balance ionique (NICB) vs. somme des cations (Σ^+) pour les campagnes de prélèvement de novembre 2006 et mai 2007.	29

Illustration 15 : Diagramme de Piper des prélèvements réalisés en basses eaux (Nov-06), comparées aux données de l'aquifère de la Craie publiées dans la littérature (Négrelet et Petelet-Giraud, 2005).....	30
Illustration 16 : Cl vs. Na (a), Cl vs. NO ₃ (b), Cl vs. Ca (c), Cl vs. SO ₄ (d), NO ₃ vs. Sr (e) pour les campagnes de basses eaux et de hautes eaux.....	32
Illustration 17 : Ca/Na vs. NO ₃ /Na (a), Sr/Na vs. NO ₃ /Na (b)	34
Illustration 18 : Compositions isotopiques en H et O de l'eau, en tritium, en Sr et en B pour les deux campagnes de prélèvements.	35
Illustration 19 : Echelle de datation pour quelques éléments radioactifs et gazeux	36
Illustration 20 : Chroniques de tritium à Ottawa, Canada (plus longue chronique existante) et Orléans (la plus proche du bassin de l'Austreberthe).....	37
Illustration 21 : Résultats des analyses de tritium (3H) exprimés en Unité Tritium (U.T.) pour les points de rivière, sources et forages de la campagne de basses eaux (Nov-06). Seuls quelques points ont été analysés lors de la campagne de hautes eaux (Mai-07, symbols vides).	38
Illustration 22 : Relation $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ des eaux du bassin de l'Austreberthe lors de la campagne de basses eaux (nov-06). Ces données sont comparées aux pluies d'Orléans, ainsi qu'aux eaux souterraines issues du bassin crayeux de la Somme et de rivières de Haute Normandie.	40
Illustration 23 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $1/\text{Sr}$ pour les eaux des deux campagnes de prélèvement.....	43
Illustration 24 : NO ₃ vs. B (a), $\delta^{11}\text{B}$ vs. $1/\text{B}$ (b)	45
Illustration 25 : Comparaison des compositions géochimiques et isotopiques entre la campagne de basses eaux et de hautes eaux pour Ca (a), Sr (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (c), NO ₃ (d) et Cl (e).....	48
Illustration 26 : Evolution des paramètres hydro-climatiques pour le cycle hydrologique 2006-2007 (Arnaud, 2007).....	52
Illustration 27 : Synthèse des données piézométriques et hydrologiques pour les deux campagnes de prélèvements	53

1. Introduction

Dans le but d'approfondir la connaissance relative aux relations nappe-rivière en Haute-Normandie, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) et le BRGM se sont associés dans le cadre d'un projet de recherche intitulé : Programme de recherche appliquée sur les relations nappe - rivière en Haute-Normandie. Premiers tests - analyses des données existantes et mise en œuvre de traçages isotopiques-.

La méthodologie proposée par le BRGM se décompose en deux approches complémentaires :

- une approche par modélisation hydrologique globale du bassin versant qui fait l'objet d'un rapport indépendant (Arnaud, 2007, BRGM/RP-55813-FR);
- une approche par traçage isotopique qui devrait permettre d'évaluer la nature des relations entre les nappes (aquifère crayeux, nappe d'accompagnement), les sources et la rivière.

Le Comité de Pilotage du projet, constitué de l'AESN, de la DIREN Haute-Normandie et du BRGM a, dans un premier temps, décidé de tester la méthodologie sur le bassin versant de l'Austreberthe (Seine-Maritime).

Le but de ce rapport est de présenter les résultats de l'approche par traçage isotopique en s'appuyant sur les conclusions de la modélisation hydrologique GARDENIA, dont les principaux résultats sont rappelés.

2. Le bassin de l'Austreberthe : géologie, hydrogéologie et localisation des prélèvements

2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

En rive droite de la Seine, le point de confluence de l'Austreberthe et du fleuve est situé sur la commune de Duclair, au sommet de la troisième boucle de la Seine à partir de l'estuaire (Illustration 1).

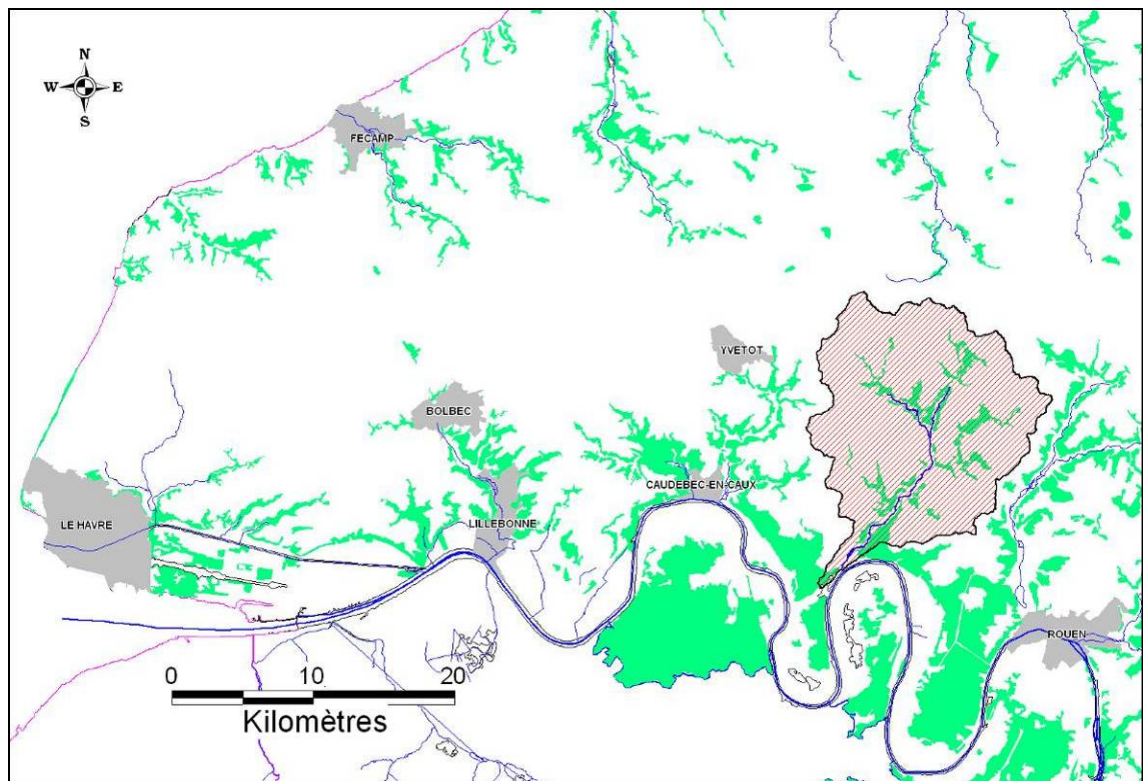


Illustration 1 – Carte de localisation du bassin versant de l'Austreberthe (en hachuré)

L'Austreberthe prend sa source sur la commune de Sainte-Austreberthe. Son seul affluent pérenne est le Saffimbec (rive droite), ce dernier prend naissance au niveau de résurgences karstiques, sur la commune de Limésy. Le point de confluence des deux cours d'eau est situé sur la commune de Pavilly.

La superficie du bassin versant hydrographique de l'Austreberthe est de 215 km².

L'altitude moyenne du bassin versant est de 126 m NGF avec une altitude minimale de 3 m NGF et une altitude maximale de 179 m NGF (Illustration 2).

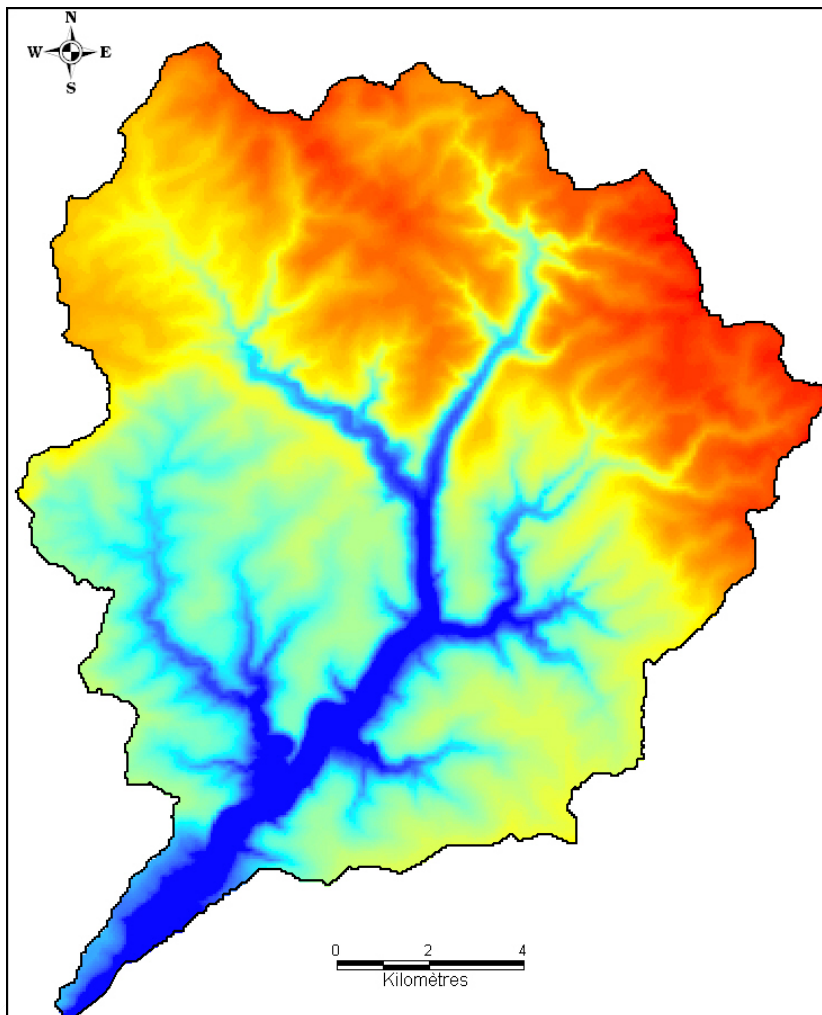


Illustration 2 – Modèle Numérique de Terrain pour le bassin versant de l'Austreberthe
(source : IGN)

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

D'après la carte géologique à 1/50 000 n°76 – Yvetot (1974, BRGM ©) et les données BSS (Banque de données du sous-sol gérée par le BRGM et accessible au public), le sous-sol du bassin versant de l'Austreberthe est composé d'une superposition de plusieurs formations, avec du sommet vers la base (Illustration 3) :

- des limons non différenciés (notation LP ; Illustration 3) couvrant le sommet des plateaux ;
- un deuxième ensemble de formations superficielles, constitué d'argiles résiduelles à silex (notation RS ; Illustration 3) provenant de l'altération de la craie sous-

jacente. Ces dépôts semblent présenter une épaisseur variant de quelques mètres à 10 mètres sur le bassin versant étudié. Les argiles à silex affleurent en tête des vallons secs du bassin versant ainsi que sur les différents versants ;

- un substratum composé de craies :
 - la craie blanche du Santonien (notation C5) affleurant sur les versants de l'Austreberthe dans sa partie aval (au Sud de Pavilly). Sa puissance est variable, elle est de 30 à 40 m près de Barentin et Pavilly ;
 - la craie blanche grisâtre du Coniacien (notation C4) affleurant également dans la basse vallée de l'Austreberthe ;
 - la craie grise blanchâtre à rares silex du Turonien (notation C3) affleurant dans les vallées du Saffimbec et de l'Austreberthe en amont de Pavilly. Son épaisseur varie entre 40 et 80 m sur la partie amont du bassin versant ;
 - la craie grise glauconieuse à silex du Cénomaniens moyen et supérieur (notation C2) qui n'affleure que dans la vallée du Saffimbec. L'épaisseur de cet ensemble est de 30 à 35 mètres.

D'un point de vue structural, la partie amont du bassin versant de l'Austreberthe est traversé par un système complexe de failles et de flexures prolongeant la faille de la Seine (Illustrations 3 et 4) : une faille reliant Sainte-Austreberthe et Pavilly (de direction varisque) recoupe la haute vallée de l'Austreberthe et présente un rejet de 70 m.

Trois failles, de direction Armoricaïne, ont été reconnues au nord-ouest de Pavilly, la faille nord recoupe la vallée du Saffimbec et présente un panneau nord-est affaissé et un rejet de 20 à 30 m près de Pavilly et probablement de 70 à 80 m près de Mesnil-Panneville. Les deux failles méridionales présentent au contraire des panneaux sud-ouest affaissés avec un rejet total évalué à environ 200 mètres. Ce dernier secteur est finalement intercalé entre deux régions séparées par la faille de la Seine et son prolongement : une région nord relevée et une région sud abaissée (Cf. Illustration 4).

Relations nappe-rivière du bassin de l'Austreberthe (Haute Normandie).
Synthèse des approches de modélisation et de traçage isotopique

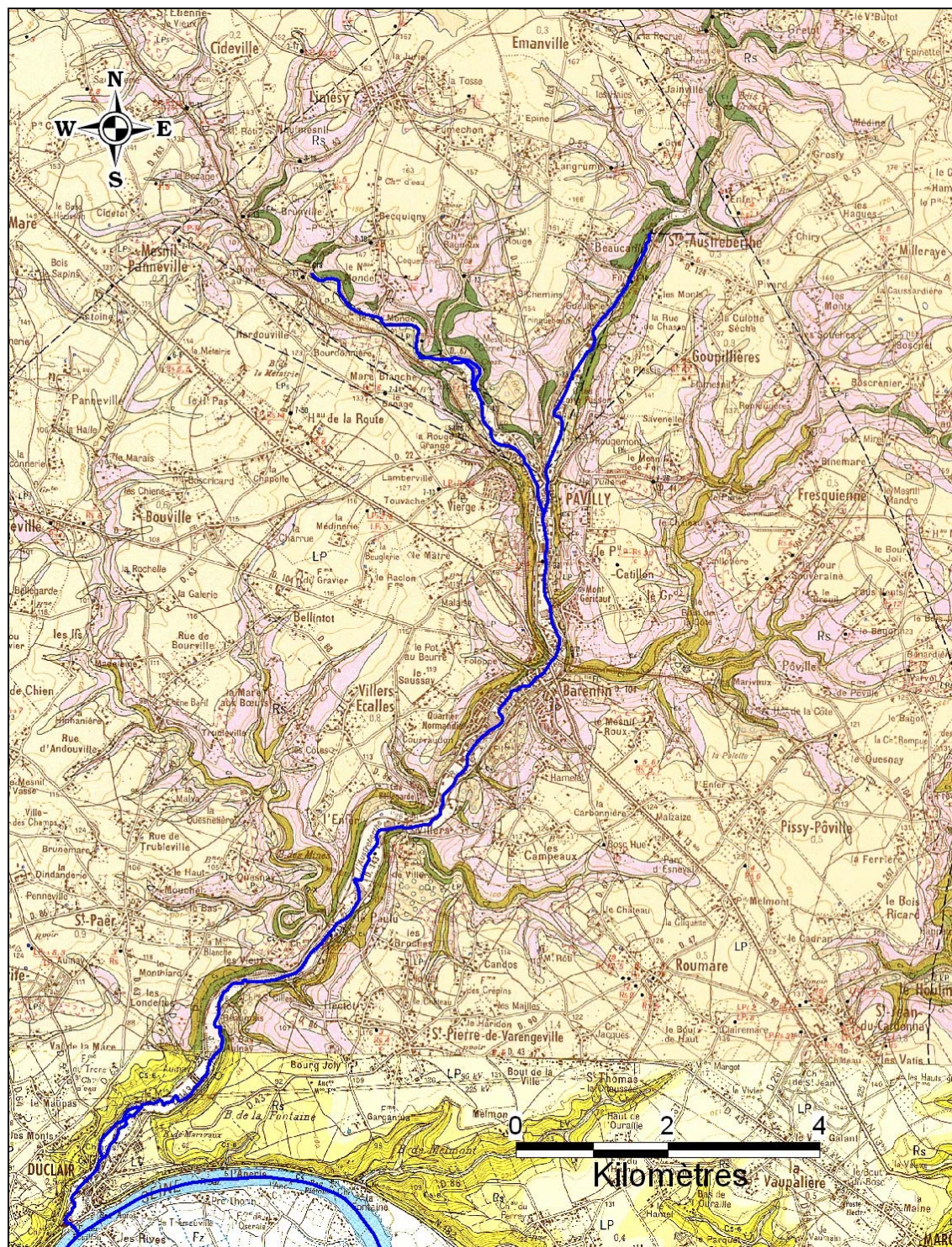


Illustration 3 – Carte géologique au 1/50 000 au droit du bassin versant de l'Austreberthe (carte n°76 – Yvetot, 1974, BRGM ©)

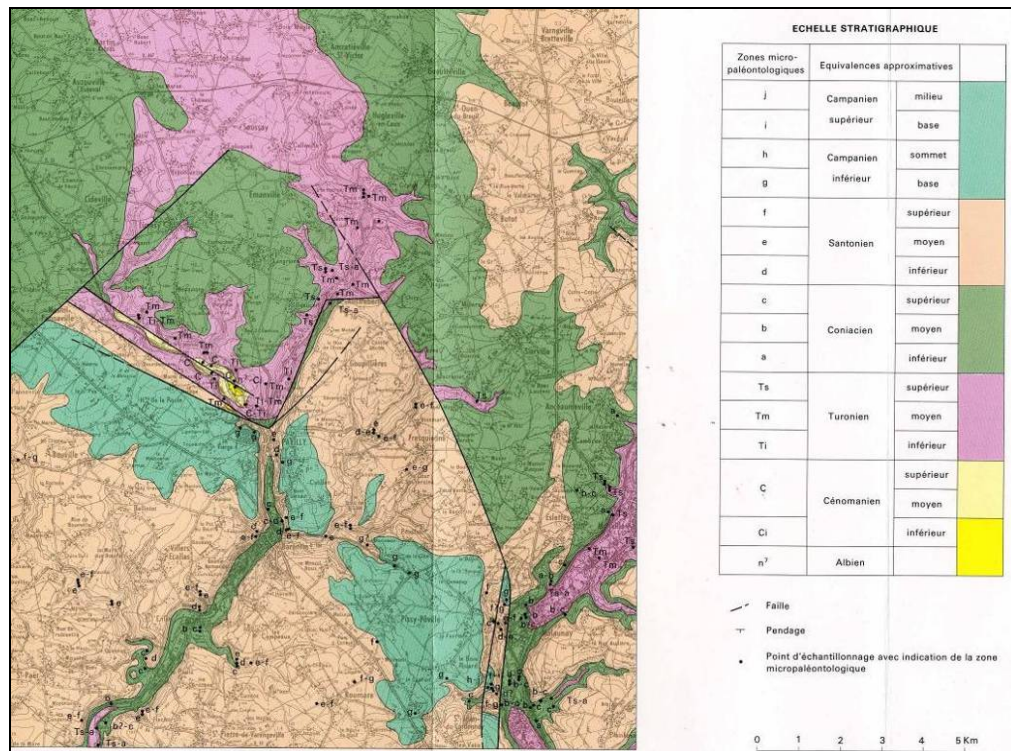


Illustration 4 – Extension des terrains crétacés (extrait de la notice de la carte n°76 – Yvetot, 1974, BRGM©)

2.3. RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

2.3.1. L'aquifère crayeux

La principale ressource en eau souterraine du bassin versant de l'Austreberthe est l'aquifère de la craie. Quelques rares captages de la nappe alluviale sont tout de même à noter.

La craie est une roche carbonatée résultant du dépôt marin de boues et de coquilles de micro-organismes. Pour différentes raisons géologiques (tectoniques, variations climatiques ...), la craie a été affectée par de nombreux accidents (failles, fissures) et soumise à des altérations dont l'un des résultats est le développement de réseaux karstiques. La craie est ainsi un milieu mixte : poreux, fissuré et karstique. Lorsque la craie est compacte (sous les plateaux et à grande profondeur), les eaux s'écoulent dans les pores intergranulaires qui ont des dimensions de l'ordre du micron. Les valeurs de perméabilité sont égales ou inférieures à 1.10^{-6} m/s. Les vitesses de circulation de la nappe sont alors de l'ordre de 1 à 10 mètres par an. Dans les vallées sèches et humides, des fissures d'ouverture millimétrique voire centimétrique affectent ce milieu, mais il est encore assimilable à un milieu poreux car les écoulements ont un

régime laminaire et respectent la loi de Darcy. Les perméabilités ont alors des valeurs comprises entre 1.10^{-5} et 1.10^{-3} m/s. Les vitesses d'écoulement peuvent atteindre plusieurs dizaines et même plusieurs centaines de mètres par an. Lorsque l'ouverture des fissures s'agrandit et que les conditions de charge le permettent, le régime d'écoulement devient turbulent, avec des vitesses atteignant plusieurs centimètres à la seconde. Les écoulements obéissent à d'autres lois que celles de Darcy et parfois à d'autres conditions (flux) que les conditions de pression. Ces réseaux sont connus dans toute la région recouverte par la craie, mais ils n'intéressent que certains talwegs, certaines vallées sèches et humides, et n'occupent qu'une petite partie de l'aquifère.

Des opérations de traçages menées sur le bassin versant de l'Austreberthe et du Saffimbec ont mis en évidence de telles circulations karstiques. Sur l'illustration 5 (carte piézométrique), les flèches vertes représentent les traçages positifs et les points rouges représentent les bétoires (pertes karstiques). Ces données sont issues de l'inventaire pilote bétoires-traçages réalisé par le brgm en 2004 (Equilbey, 2003). Il est rappelé que cet inventaire pilote, préalable à un futur inventaire régional, n'est pas exhaustif.

Sur le bassin versant, la surface piézométrique de la nappe (zone saturée continue) épouse fortement la morphologie du sol (Illustration 5) qui dépend en partie de la répartition de la fissuration de la craie. Elle forme des dômes d'alimentation sous les plateaux où l'aquifère peu fissuré a une fonction capacitive, et des dépressions dans les zones fissurées drainantes à fonction transmissive (vallées humides et sèches, réseaux « karstiques »).

La nappe s'écoule par gravité depuis le sommet des plateaux vers les sources et les cours d'eau du Saffimbec et de l'Austreberthe (Cf. figures de drainance sur la carte piézométrique ; Illustration 5). Ces deux cours d'eau sont donc alimentés en grande partie par l'apport des eaux souterraines, notamment en période d'étiage (règle générale en Haute-Normandie).

L'illustration 5 présente également la délimitation du bassin versant souterrain de l'Austreberthe, tracé à partir de la carte piézométrique départementale (brgm, 1990). Aucun échange souterrain (via le réseau karstique notamment) n'étant reconnu avec les bassins versants souterrains, le bassin versant hydrogéologique reste très proche du bassin versant hydrographique (délimitation plus lissée pour une superficie de 203 km²).

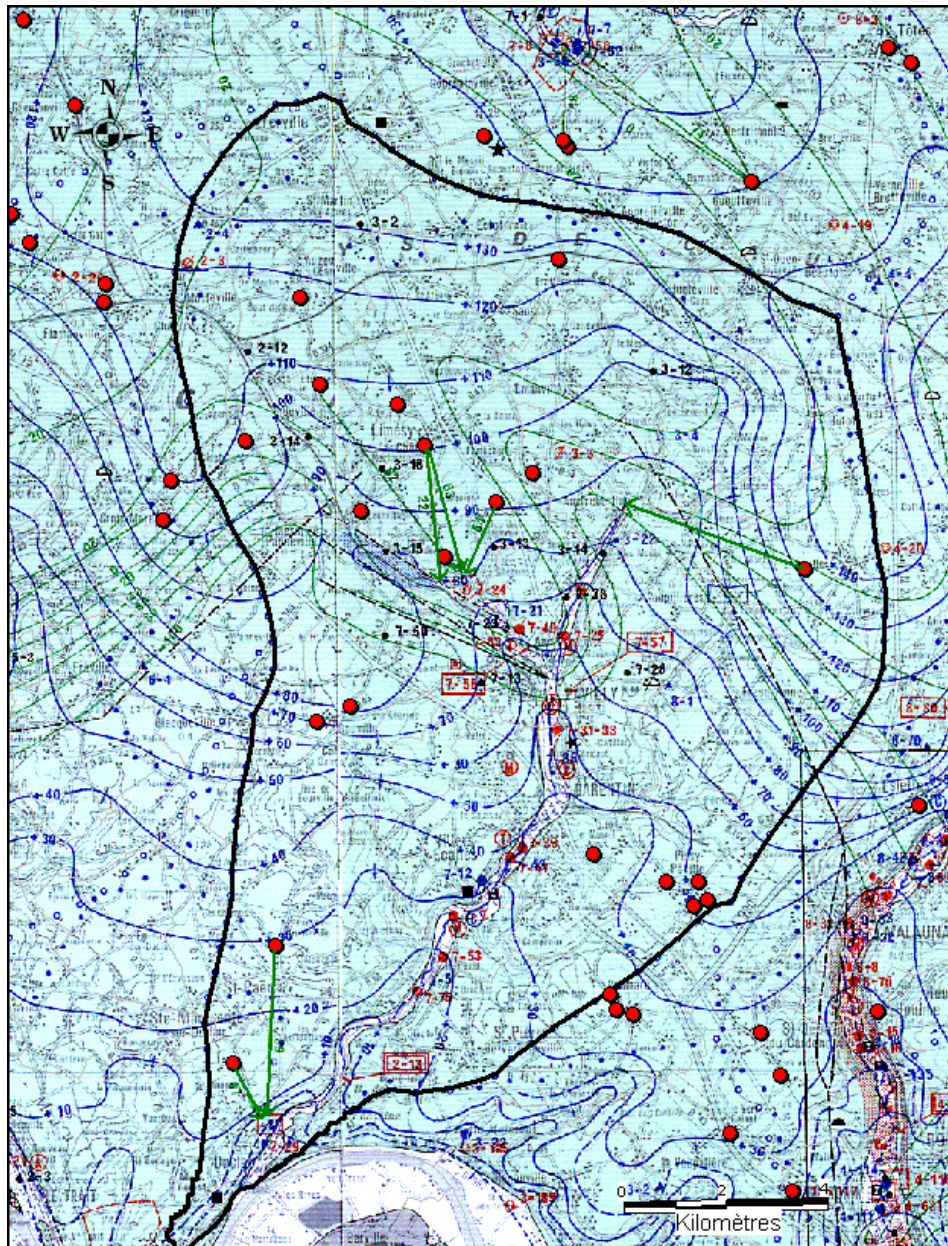


Illustration 5 – Carte piézométrique sur le bassin versant de l'Austreberthe à l'échelle du 1/100000 (brgm, 1990)

2.3.2. L'exploitation de la ressource

La ressource en eau souterraine concernait 99 % des prélèvements sur le bassin versant de l'Austreberthe en 2005 (Illustration 6). Aujourd'hui, il ne subsiste qu'un seul captage en rivière : celui de la société Gailliard à Barentin.

Après une décroissance des prélèvements entre 1994 et 1998, on constate une nette augmentation en 1999/2000, à attribuer aux prélèvements industriels. En 2005, les prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable représentaient de l'ordre de 60 % des prélèvements du bassin. Ils se font par l'intermédiaire de 3 forages :

- le forage de Limesy (indice BSS n° 00767X0021) ;
- le forage de Duclair (indice BSS n° 00992X0197) ;
- le forage de Sierville (indice BSS n° 00767X0020).

Certains des ouvrages industriels exploitent la nappe alluviale (ex. de la société BADIN).

Enfin, aucun prélèvement agricole n'est connu par l'AESN dans l'emprise du bassin versant de l'Austreberthe.

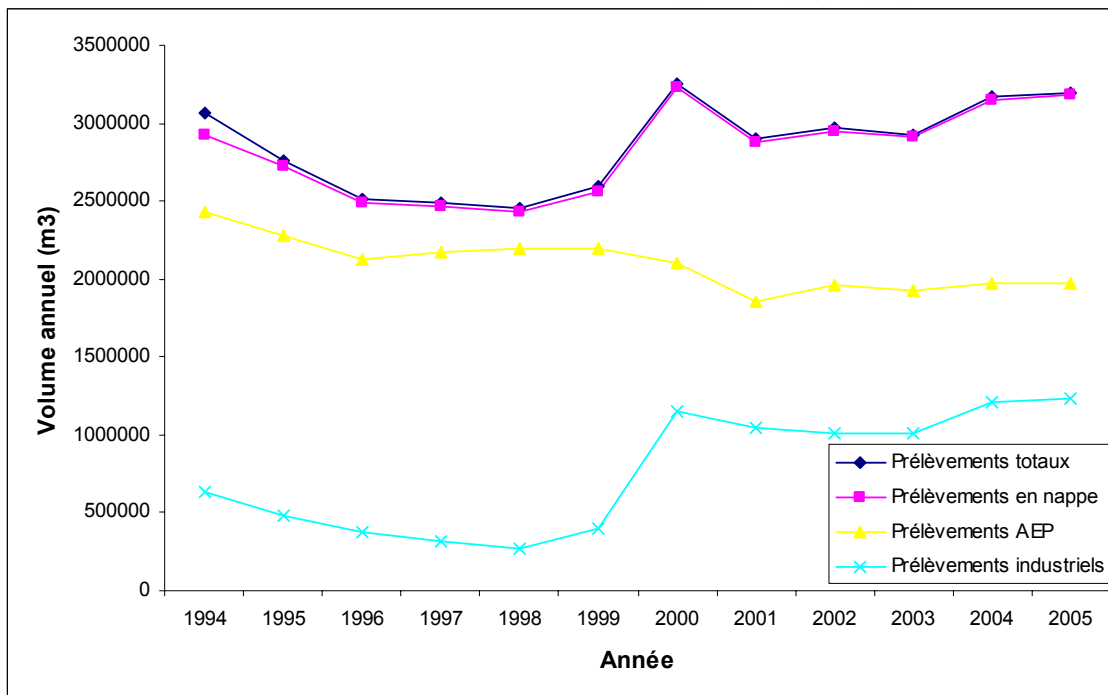


Illustration 6 – Evolution des prélèvements en eau sur le bassin versant de l'Austreberthe entre 1994 et 2005 (source AESN)

2.4. STRATEGIE DES ECHANTILLONNAGES ET LOCALISATION DES PRELEVEMENTS

2.4.1. Stratégie d'échantillonnage

Cette étude vise à approfondir la connaissance relative aux relations nappe-rivière en Haute-Normandie en s'appuyant sur une zone d'étude test. Compte tenu du contexte géologique complexe en amont de la zone d'étude (diversité lithologique, failles ...), dans un premier temps, l'approche par traçage isotopique s'est concentrée sur la partie basse du bassin, la vallée de l'Austreberthe et la zone du captage AEP de Duclair, présentant un fonctionnement d'alimentation a priori plus simple. En effet, l'émergence de la source de Limésy à la faveur d'un accident majeur et la nature différente (étage différent) de la craie dans la partie amont du bassin (au nord de Limésy) sont des éléments qui rendent l'interprétation des processus d'alimentation de la source et du captage AEP de Limésy et des relations nappe-rivière à première vue plus délicate. Ainsi les prélèvements d'eaux souterraines et d'eaux de surface se sont concentrés sur la partie basse (vallée de l'Austreberthe et la zone du captage AEP de Duclair), tout en intégrant des points de prélèvements dans la partie amont avec pour objectif de caractériser les sources possibles d'eau et d'éléments dissous sur l'ensemble du bassin. La localisation de ces points de prélèvements est détaillée par la suite.

Par ailleurs, afin d'avoir une vision sur 2 situations hydrologiques extrêmes, deux campagnes de prélèvements ont été réalisées, une en période de basses eaux (novembre 2006) et une en période de hautes eaux (mai 2007).

Les outils géochimiques mis en œuvre sont la mesure des paramètres physico-chimiques de terrain, l'analyse des éléments majeurs et des éléments traces Rb et Sr, les isotopes stables de la molécule d'eau, les isotopes du tritium, du strontium et du bore. Ces analyses n'ont pas été réalisées de manière systématique sur tous les points. A la lumière des résultats obtenus sur la première campagne, et sur validation du comité de pilotage, de nouveaux outils ont été proposés (notamment les isotopes du bore) et de nouveaux points de prélèvement ont été considérés afin de répondre au mieux à la problématique des relations nappe-rivière.

2.4.2. Descriptif des points de prélèvement

a) *Eaux de surface*

Trois points de prélèvement ont été considérés pour les eaux de rivière : Riv-1, le Saffimbec, affluent de la rivière Austreberthe, prélevé au niveau de Limésy ; Riv-2, l'Austreberthe prélevée au niveau de Le Paulu et Riv-3, l'Austreberthe prélevée au niveau de Duclair. Riv-1, situé en amont du bassin, permet de caractériser la signature géochimique des eaux de surface en dehors de l'influence anthropique de la commune de Barentin (Illustration 7 ; Illustration 9). Riv-2 permet de contraindre la possible modification de la géochimie des eaux de rivière en aval de Barentin avec la contribution possible d'apports anthropiques urbains. Riv-3 correspond à la signature géochimique des eaux de surface au droit du forage AEP de Duclair.



Illustration 7 – Photographies des points de prélèvement en rivière

b) Eaux souterraines

Les eaux souterraines de deux niveaux aquifères ont été considérées, l'aquifère de la craie pour les points de prélèvements notés FC (forages) et So (sources) et l'aquifère des alluvions notés All (puits) (Illustration 8 ; Illustration 9; Illustration 10).

Les prélèvements de l'aquifère de la craie en amont du bassin sont les forages de Limésy (FC-1), et de Sierville (FC-2) et les sources de Limésy (So-1) et de Ste Austreberthe (So-2). En aval du bassin l'aquifère de la craie a été prélevé au niveau des sources de Duclair (So-3), Barentin (So-4), Villers Ecalles (So-5) et Le Paulu (So-6) et des forages de Duclair (FC-3), de Bouville (FC-5) et de Blacqueville (FC-6). Le forage de Duclair est exploité conjointement par la Lyonnaise des eaux et Véolia. Les deux exploitants ont accepté de suspendre temporairement la chloration des eaux qui se fait au niveau de la crépine du forage. Ainsi, pendant 3 heures le forage a été rincé des traces de chlore avec un débit de 200 m³/h. Les analyses chimiques ont montré que la teneur en chlorure est tout a fait comparable aux valeurs mesurées dans la zone d'étude.

Les eaux souterraines des alluvions ont été prélevées sur deux puits, All-1 correspondant au puits de la pépinière de Duclair et All-2 correspondant au puits Barentin.



Illustration 8 – Photographies des points de prélèvement sur les sources

Relations nappe-rivière du bassin de l'Austreberthe (Haute Normandie).
Synthèse des approches de modélisation et de traçage isotopique

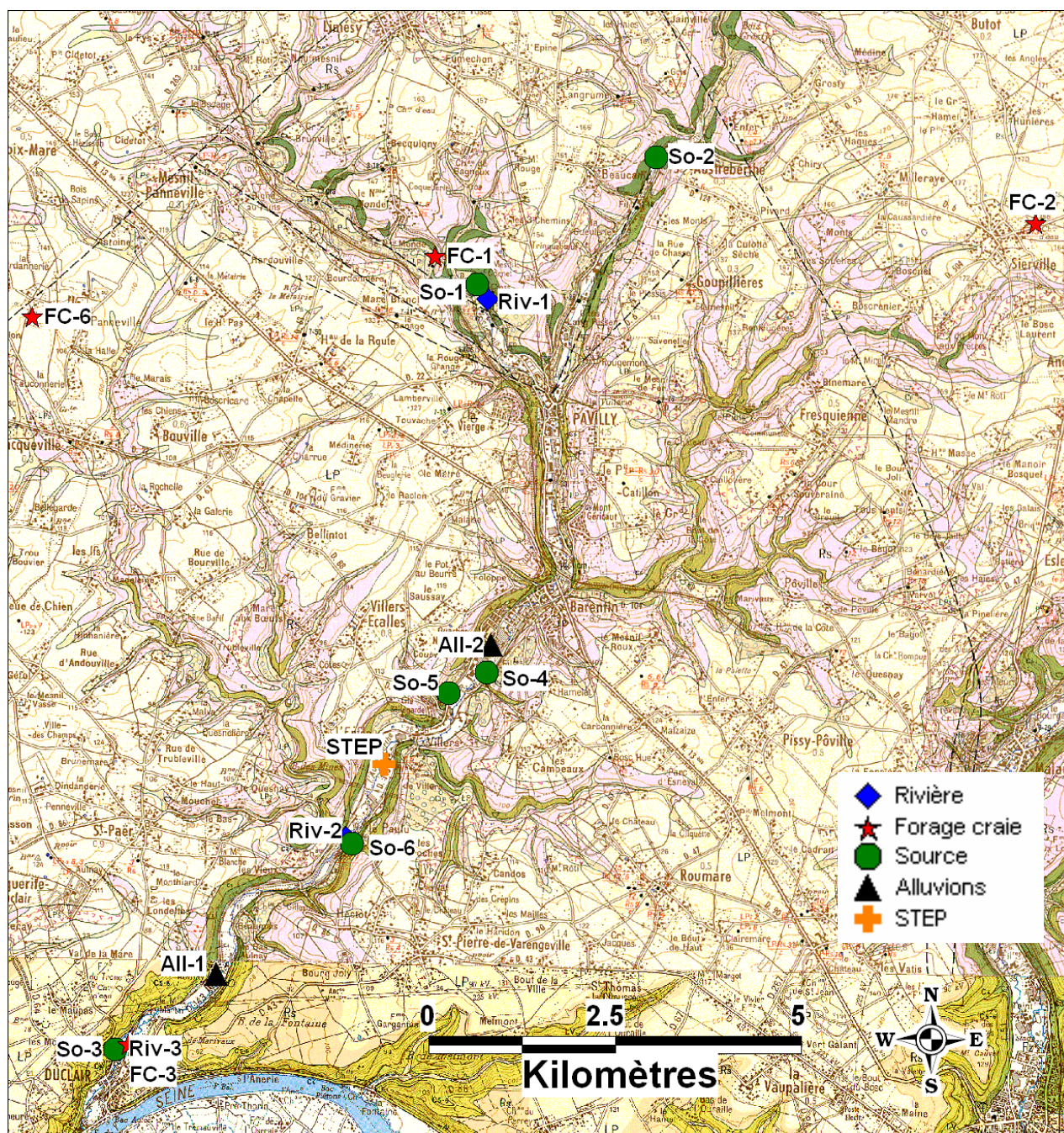


Illustration 9 – Localisation de l'ensemble des points de prélèvement
(fond géologique, source BRGM)



Illustration 10 – Photographies des points de prélèvement sur les forages et les puits

2.5. PRELEVEMENTS ET METHODES ANALYTIQUES

2.5.1. Prélèvement et conditionnement des échantillons

Toutes les techniques de prélèvement, d'échantillonnage et de conservation ont été validées au BRGM afin de répondre à trois objectifs, représentativité du milieu,

caractérisation des phénomènes et limitation des transformations et font l'objet d'un mode opératoire spécifique qui permet de garantir la non contamination des échantillons.

L'échantillon prélevé est filtré sur un filtre en acétate de cellulose préalablement rincé et conditionné de la façon suivante dans des bouteilles en polypropylène:

- 100 ml pour l'analyse des anions,
- 100 ml acidifié à pH = 2 avec de l'HNO₃ suprapur pour l'analyse des cations,
- 250 ml acidifié à pH = 2 avec de l'HNO₃ suprapur conditionnés dans une bouteille préalablement lavée avec une solution d'HNO₃ à pH = 2, pour l'analyse des teneurs en Rb et Sr et des compositions isotopiques du strontium,
- 1 000 ml non acidifiés pour l'analyse des compositions isotopiques en bore.

Les échantillons sont ensuite stockés à 4°C dans le noir jusqu'à l'analyse.

Les analyses physico-chimiques sont faites au moment du prélèvement selon les normes NF EN ISO/CEI 17025 et NF EN ISO 9001-2000. Les paramètres mesurés sont les suivants : pH, température, teneur en oxygène dissous, conductivité et potentiel d'oxydo-réduction (Eh). Le pH-mètre est préalablement calibré à l'aide de solutions standards à pH = 4, pH = 7 et pH = 10. Le conductivimètre est étalonné avec une solution standard à 1413 µS/cm à 25°C.

Plusieurs prélèvements ont été faits dans des forages utilisés pour l'AEP dont la chloration se fait directement au niveau de la crépine dans le forage. Afin de réaliser des prélèvements des eaux brutes de la nappe, la chloration a été arrêtée au moins deux heures avant le prélèvement en laissant le pompage en route afin de rincer l'ouvrage de toute trace de chlore.

2.5.2. Analyses des éléments majeurs et traces

Les éléments majeurs et traces de la phase dissoute sont analysés suivant les méthodes détaillées Illustration 11.

Élément	Mode opératoire	Commentaire	LQ	Précision analytique
HCO ₃	NF EN ISO 9963-1	Méthode potentiométrique	5 mg.l ⁻¹	5%
CO ₃				
Ca (calcium)	NF en ISO 11885	Analyse ICP	0,5 mg.l ⁻¹	10% (15% pour K)
Mg (magnésium)				
K (potassium)				
Na (sodium)				
Cl (chlorure)	NF en ISO 10304	Méthode par chromatographie ionique (DIONEX) selon NF EN 1034-1 (juin 1995) pour les eaux faiblement contaminées et ISO EN 10304-2 pour les eaux usées.	0,5 mg.l ⁻¹	10%
SO ₄ (sulfates)				
NO ₃ (nitrates exprimés en NO ₃)				
Sr (strontium)	MO002	Analyse d'éléments traces par ICP-MS	1 µg.l ⁻¹	10%
Rb (rubidium)			0,5 µg.l ⁻¹	
B (bore)			1 µg.l ⁻¹	

Illustration 11 – Modes opératoires et méthodes d'analyses des éléments majeurs et traces.
LQ: limite de quantification.

2.5.3. Analyse des isotopes stables de la molécule d'eau

L'analyse des isotopes stables de l'eau, de l'oxygène et de l'hydrogène, est réalisée selon les méthodes détaillées sur Illustration 12. Les signatures isotopiques en hydrogène et en oxygène de la molécule d'eau sont exprimées en unité ‰ de déviation par rapport à un standard de référence. On utilise la notation δ exprimée en parts pour mille selon $\delta = [(R_{\text{échantillon}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$ où R est le rapport isotopique, isotope lourd sur isotope léger (e.g. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$). Le standard de référence est le SMOW (Standard Mean Ocean Water), pris à 0 ‰, qui est une eau de mer moyenne.

Analyses isotopiques	Méthode	Précision analytique
Rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'eau	Equilibration avec un CO_2 de composition connue	$\pm 0,1 \text{ ‰}$
Rapport $^2\text{H}/^1\text{H}$ de l'eau	réduction sur zinc	$\pm 0,8 \text{ ‰}$
Teneur en ^3H	Enrichissement électrolytique et comptage pas scintillation liquide	$\pm 10 \text{ ‰}$
Rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du strontium total dissous dans l'eau	TIMS	$\pm 0,05 \text{ ‰}$
Rapport $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ du bore total dissous dans l'eau	TIMS	$\pm 0,05 \text{ ‰}$

Illustration 12 – Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses isotopiques

2.5.4. Analyse du tritium

Les échantillons subissent un prétraitement électrolytique qui enrichit préférentiellement le liquide en tritium. La radioactivité β se mesure dans un compteur à scintillation liquide (Illustration 12).

2.5.5. Analyse des isotopes du strontium

Les analyses isotopiques du Sr se font par spectrométrie de masse à source solide par méthode TIMS (spectrométrie de masse à thermo-ionisation) après séparation chimique sur résine. Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont normalisés à un rapport $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ de 0.1194. La précision interne de chaque mesure du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est de $\pm 8.10^{-6}$ (2σ). La reproductibilité des mesures des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est testée par l'analyse répétitive du standard international NBS 987, la valeur obtenue durant cette étude est de 0.710233 ± 24.10^{-6} (2σ , $n = 13$). Les valeurs mesurées sont normalisées à la valeur certifiée du standard NBS 987 (0.71024).

2.5.6. Analyse des isotopes du bore

Le bore est un élément en traces possédant deux isotopes stables ^{10}B et ^{11}B extrêmement solubles dans les fluides aqueux. De la même manière que le strontium, l'analyse des isotopes du bore est réalisée par TIMS (spectrométrie de masse à thermo-ionisation) (Illustration 12) après séparation chimique du bore sur résine échangeuse d'ions. De même que pour les isotopes stables de la molécule d'eau, on

utilise la notation δ exprimée en parts pour mille selon $\delta^{11}\text{B} = \left[\frac{({}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B})_{\text{échantillon}}}{({}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B})_{\text{standard}}} - 1 \right] \cdot 10^3$. Le standard de référence est le NBS951.

PROVISOIRE

3. Caractérisation géochimique du bassin de l'Austreberthe

3.1. LA CHIMIE DES EAUX DU BASSIN

Les premiers outils utilisés pour mieux connaître l'origine de l'eau et des éléments dissous et pour caractériser les relations nappe-rivière sont ceux de la géochimie classique. Les concentrations naturelles en éléments chimiques sont acquises majoritairement par les interactions eau-roche et les apports atmosphériques. Les informations fournies par les concentrations en éléments majeurs et traces sont donc primordiales pour répondre aux questions suivantes : d'où vient l'eau souterraine ? Quelles sont les caractéristiques des différents aquifères ? Quelles sont les relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines ?

3.1.1. Validité des analyses chimiques réalisées

Les paramètres physico-chimiques et les concentrations mesurées en éléments majeurs et traces pour les deux campagnes de prélèvement figurent sur l'illustration 13. Le TDS (pour Total Dissolved Solids) est la somme des concentrations en mg.l^{-1} des cations et des anions mesurés en laboratoire, il traduit la minéralisation de l'eau. La conductivité électrique, mesurée sur le terrain est fonction de la salinité de l'eau ; il existe donc généralement une relation quasi-linéaire entre la conductivité électrique et le TDS calculé à partir des analyses chimiques de laboratoire. L'illustration 14a présente le TDS en fonction de la conductivité électrique. On observe ici une bonne corrélation entre ces paramètres ; aucun problème majeur, lors du déroulement des analyses chimiques ou des mesures de conductivité, ne semble donc devoir être suspecté. L'illustration 14b, représentant la somme des anions (Σ^-) en fonction de la somme des cations (Σ^+) en mEq/L , montre un équilibre entre charges positives et charges négatives mesurées dans les eaux. Les analyses ont donc semble-t-il pris en compte l'essentiel des éléments majeurs présents dans l'eau. Ceci doit cependant être confirmé par l'étude de la balance électrique. Le NICB (pour Normalized Inorganic Charge Balance) donne la balance des analyses chimiques selon la formule :

$$NICB = \frac{\Sigma^+ - \Sigma^-}{\Sigma^+ + \Sigma^-}$$

Le NICB correspond au pourcentage de charges positives excédentaires ou manquantes pour avoir un bilan des charges nul. Une eau ayant toujours un bilan de charges nul à l'équilibre, un excès de cations ou d'anions dénote d'une analyse chimique incomplète ou de mauvaise qualité. On considère que les analyses sont correctes pour un NICB compris entre -5 % et +5 %. D'après l'illustration 14c, toutes les analyses réalisées dans le cadre de cette étude présentent un NICB acceptable, la plupart d'entre elles avec un NICB compris entre -1 et +1 %.

Relations nappe-rivière du bassin de l'Austreberthe (Haute Normandie).
Synthèse des approches de modélisation et de traçage isotopique

N° Ech	nom échantillon	T °C	pH	Eh cor. mV	Cond. µS/cm 25°C	Ox. Diss %	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	NO ₃ mg/l	NO ₂ mg/l	NH ₄ mg/l	SO ₄ mg/l	Sr µg/l	Rb µg/l	B µg/l
Campagne Nov-06 (basses eaux)																			
Riv-1	rivière Limésy	11.0	7.23	459	638	90	108	4	10	2	292	20	29	<LQ	<LQ	9	170	1.1	-
Riv-2	rivière Le Paulu	10.1	8.09	431	666	100	109	4	17	3	316	27	24	<LQ	<LQ	15	187	2.0	-
Riv-3	rivière Duclair	11.4	7.44	506	643	90	104	5	15	3	295	23	22	<LQ	<LQ	12	175	1.7	-
So-1	source Limésy	10.9	7.14	646	638	66	108	4	10	2	297	20	30	<LQ	<LQ	9	177	1.1	-
So-2	source Ste-Austreberthe	10.8	7.14	490	623	74	106	4	9	2	293	19	28	<LQ	<LQ	7	163	1.1	-
So-3	source Duclair	11.6	7.11	513	614	85	103	6	11	2	296	15	23	<LQ	<LQ	5	174	0.6	-
So-4	source Barentin	12.1	7.06	489	686	48	119	5	11	2	350	18	19	<LQ	<LQ	13	203	0.8	-
So-5	source Ferrero	11.1	7.16	-	634	81	107	5	9	1	296	18	24	<LQ	<LQ	8	215	0.6	-
So-6	source Le Paulu	11.1	7.09	513	616	80	106	4	10	2	317	15	19	<LQ	<LQ	5	190	0.6	-
All-1	puits Duclair Pepinière	11.2	7.16	444	617	67	103	6	10	2	329	14	16	<LQ	<LQ	5	173	0.7	-
All-2	puits Barentin	13.4	7.20	472	712	57	122	5	13	3	341	22	22	<LQ	<LQ	20	213	1.3	-
FC-1	AEP Limésy	11.2	7.10	488	640	68	108	4	10	2	293	21	31	<LQ	<LQ	9	177	1.1	-
FC-2	AEP Sierville	11.2	7.22	525	611	74	105.6	5	7	1.1	301	15	29	<LQ	<LQ	6	155	0.7	-
FC-3	forage Duclair	12.0	7.06	487	659	72	110	7	11	2	338	15	22	<LQ	<LQ	6	190	0.8	-
FC-5	puits Bouville	11.8	7.43	532	357	62	53	2	6	8	160	6	19	<LQ	<LQ	10	95	0.8	-
FC-6	Forage Blacqueville	-	6.72	-	608	-	118	4	15	3	348	21	19	<LQ	<LQ	7	188	1.3	-
Campagne Mai-07 (hautes eaux)																			
Riv-1	rivière Limésy	11.7	7.35	519	639	94	108	4	9	2	301	20	33	<LQ	<LQ	10	168	1.1	-
Riv-2	rivière Le Paulu	12.6	7.99	509	655	93	108	5	13	3	304	23	25	<LQ	<LQ	11	160	1.6	19
Riv-3	rivière Duclair	11.9	7.71	443	635	92	106	5	10	2	308	18	25	<LQ	<LQ	9	178	1.0	-
So-1	source Limésy	10.8	7.17	515	639	93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
So-2	source Ste-Austreberthe	10.6	7.10	518	635	84	105	5	8	2	298	19	32	<LQ	<LQ	9	164	1.0	-
So-3	source Duclair	11.4	7.07	484	606	88	100	6	10	2	306	14	23	<LQ	<LQ	4	183	0.6	-
So-4	source Barentin	11.4	7.01	580	688	64	118	5	10	2	346	17	21	<LQ	<LQ	14	208	0.8	-
So-5	source Ferrero	11.2	7.14	-	634	82	108	5	9	1	306	19	29	<LQ	<LQ	11	219	0.6	-
So-6	source Le Paulu	11.4	7.02	540	612	65	105	5	9	2	284	15	20	<LQ	<LQ	6	186	0.7	-
All-1	puits Duclair Pepinière	12.4	7.10	471	615	74	102	6	10	2	320	13	17	<LQ	<LQ	6	176	0.7	10
All-2	puits Barentin	14.0	7.30	574	606	53	119	5	13	2	335	20	23	<LQ	<LQ	19	207	1.3	23
FC-1	AEP Limésy	11.3	7.06	455	654	83	109	4	9	2	295	24	34	<LQ	<LQ	10	163	1.2	8
FC-2	AEP Sierville	11.6	7.20	541	628	80	107	7	6	1	308	18	30	<LQ	<LQ	7	154	0.7	-
FC-3	forage Duclair	12.2	7.12	426	642	101	107	8	10	2	333	14	22	<LQ	<LQ	6	182	0.8	11
FC-5	puits Bouville	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FC-6	Forage Blacqueville	12.0	7.09	-	685	95	115	4	13	3	343	20	19	<LQ	<LQ	7	190	1.4	-
STEP	STEP Villers Ecalles	16.3	7.39	-	985	60	94	5	87	19	286	119	15	0.4	1	41	158	16.0	209

LQ : Limite de quantification CO₃ : systématiquement inférieur à LQ

Illustration 13 : Paramètres physico-chimiques et concentrations en éléments majeurs et traces pour les campagnes de hautes eaux et de basses eaux.

Le point FC-5 (puits Bouville) présente des concentrations inférieures aux autres points de prélèvement pour tous les éléments. Lors de l'échantillonnage de ce puits, des infiltrations superficielles ont été mises en évidence. Les eaux prélevées correspondent donc à un mélange entre des eaux souterraines et le ruissellement superficiel des eaux de pluie, il n'est donc pas représentatif de l'aquifère crayeux, objet de l'étude. C'est pour cette raison que le point FC-5 n'a pas été re-échantillonné lors de 2^{ème} campagne et que les analyses réalisées lors de la 1^{ère} campagne ne seront pas prises en compte par la suite dans les interprétations.

L'échantillon FC-6 (Forage Blacqueville) sort de l'alignement global observé (Illustration 14a). La mesure de conductivité de cet échantillon n'a pas pu être réalisée sur le terrain au moment du prélèvement, elle a été faite au laboratoire 24 heures plus tard avec un appareil différent de celui utilisé pour les autres échantillons. Pour cet échantillon, c'est bien la mesure de la conductivité qui est à remettre en cause puisque la somme des cations est égale à la somme des anions.

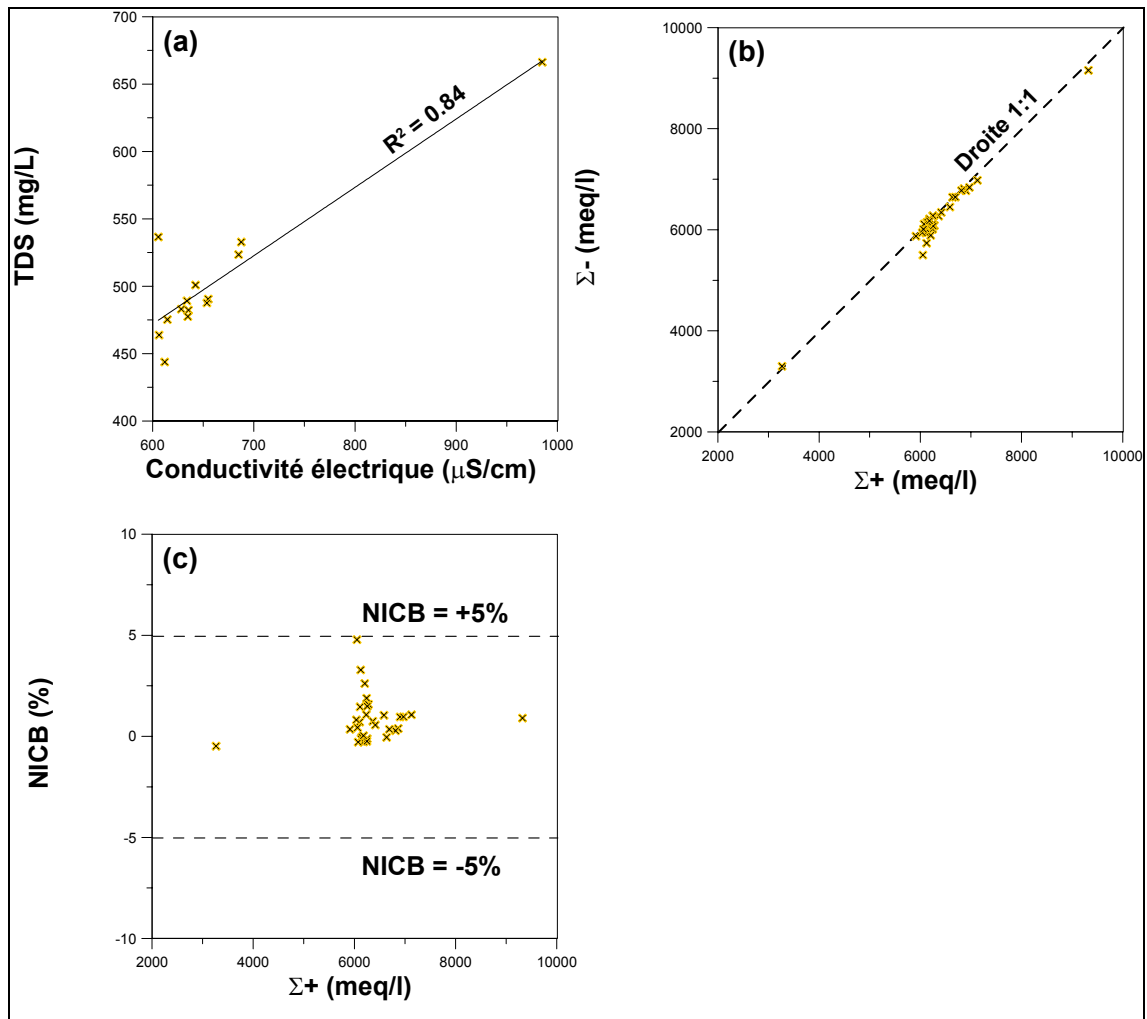


Illustration 14 : TDS vs. conductivité électrique de l'eau (a), somme des anions (Σ^-) vs. somme des cations (Σ^+) (b), balance ionique (NICB) vs. somme des cations (Σ^+) pour les campagnes de prélèvement de novembre 2006 et mai 2007.

3.1.2. Diagramme de Piper : faciès chimique des eaux

Les données en éléments majeurs ont été reportées dans un diagramme de Piper, seule la campagne de basses eaux (nov-06) est représentée dans l'illustration 15, les données de hautes eaux (mai-07) montrant un profil identique.

Le diagramme de Piper montre que toutes les eaux analysées (rivière, source et forage) présentent un faciès chimique bicarbonaté-calcique (Ca-HCO_3). Le calcium représente plus de 80 % des cations et les bicarbonates (HCO_3) plus de 75 % des anions, traduisant la dissolution de la matrice crayeuse.

Les variations sont très faibles d'un échantillon à l'autre et la composition est tout à fait similaire à celle mesurée dans les eaux souterraines de l'aquifère crayeux de la Somme (Négre et Petelet-Giraud, 2005).

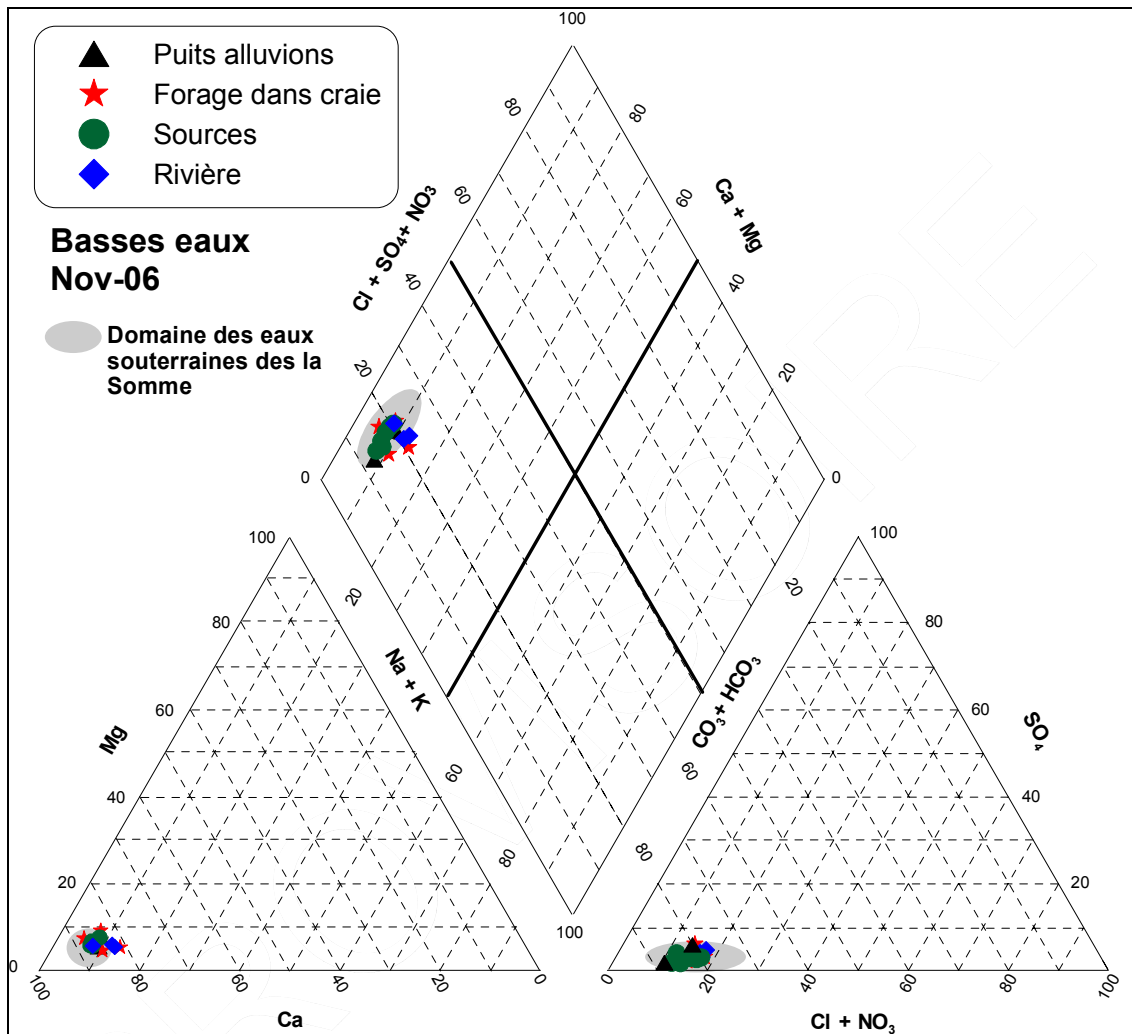


Illustration 15 : Diagramme de Piper des prélèvements réalisés en basses eaux (Nov-06), comparées aux données de l'aquifère de la Craie publiées dans la littérature (Négre et Petelet-Giraud, 2005).

3.1.3. Relation inter-éléments

Les deux sources naturelles principales de chlorures dans les eaux naturelles sont les aérosols marins et les évaporites de type halite. La proportion d'aérosols marins contenus dans les eaux de pluies augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de la mer. En l'absence de dépôts évaporitiques dans les niveaux lithologiques drainés, les eaux souterraines et les eaux de surface intègrent uniquement des

chlorures provenant de l'eau de pluie qui les alimentent (Meybeck, 1986, Berner et Berner, 1987). Ainsi les chlorures sont souvent utilisés comme élément de référence.

L'illustration 13 et illustration 16 montrent que les variations de concentrations d'un échantillon à l'autre sont relativement faibles à l'échelle du bassin, de nettes tendances se dessinent cependant et permettent l'interprétation, comme détaillé ci-après.

L'illustration 16 présente des diagrammes binaires du chlorure versus différents éléments majeurs, pour les résultats des analyses chimiques des 2 campagnes de prélèvement. La droite de dilution de l'eau de mer, correspondant aux concentrations en éléments dissous apportés uniquement par l'eau de pluie (influencée par les aérosols marins), est représentée comme référence à partir des données synthétisées par Berner et Berner (1987).

Sur le diagramme chlorures versus sodium (illustration 16a), les points se répartissent globalement sur la droite de dilution de l'eau de mer représentant les apports de chlorures et de sodium amenés par les aérosols marins via les eaux de pluie. Cependant un certain nombre de points sont enrichis en chlorures par rapport à cette droite. En dehors des apports d'eau de pluie et en l'absence de dépôts évaporitiques dans les lithologies drainées sur le bassin, les chlorures ne peuvent qu'être amenés par des apports anthropiques (de type engrais agricoles et rejets urbains). Les points qui s'écartent le plus de la droite de dilution de l'eau de mer sont les points FC-1 (AEP Limésy) et FC-2 (AEP Sierville) pour les forages dans la craie et les points So-1 (Limésy) et So-2 (Ste Austreberthe) pour les sources, ces points de prélèvement sont situés en amont du bassin étudié.

Sur le diagramme chlorures versus nitrates (illustration 16b), deux corrélations positives se dégagent entre ces deux paramètres. Le point All-1 (puits Duclair Pépinière) présente les concentrations en nitrates ($261-275 \mu\text{mol.l}^{-1}$) et en chlorures ($370-384 \mu\text{mol.l}^{-1}$) les plus basses mesurées, cet échantillon est aussi très proche de la droite de dilution de l'eau de mer dans le diagramme Cl-Na avec les valeurs les plus faibles. Les teneurs en Cl mesurées en All-1 ($370 - 384 \mu\text{mol.l}^{-1}$) peuvent être comparées aux valeurs naturelles apportées par les pluies. Les teneurs en Cl dans les pluies diminuent de la côte vers l'intérieur des terres, Meybeck (1986) a montré que les teneurs en Cl dans les pluies côtières sont de l'ordre de $790 \mu\text{mol.l}^{-1}$ et baissent à environ $150 \mu\text{mol.l}^{-1}$ à 50 km. Cette quantité de Cl apportée par la pluie est ensuite augmentée par l'évapotranspiration locale avant l'infiltration, le facteur d'évapotranspiration est calculé par la différence entre la quantité d'eau précipitée (P en mm) et l'évaporation (E en mm) selon la formule $F_{ET} = P/(P-E)$. Le facteur d'évapotranspiration moyen calculé sur le bassin versant de la somme est de 2.2 (Amraoui et al., 2002). Cette valeur peut être transposée au bassin de l'Austreberthe globalement sous les mêmes conditions hydro-climatiques que le bassin de la Somme. Ainsi, la teneur en Cl moyenne de la pluie locale ($150 \mu\text{mol.l}^{-1}$) multipliée par le facteur d'évapotranspiration conduit à une recharge avec une teneur moyenne en Cl d'environ $330 \mu\text{mol.l}^{-1}$, ce qui est tout à fait similaire à la teneur en Cl de All-1. L'échantillon All-1 (puits Duclair pépinière) sera considéré comme le pôle naturel.

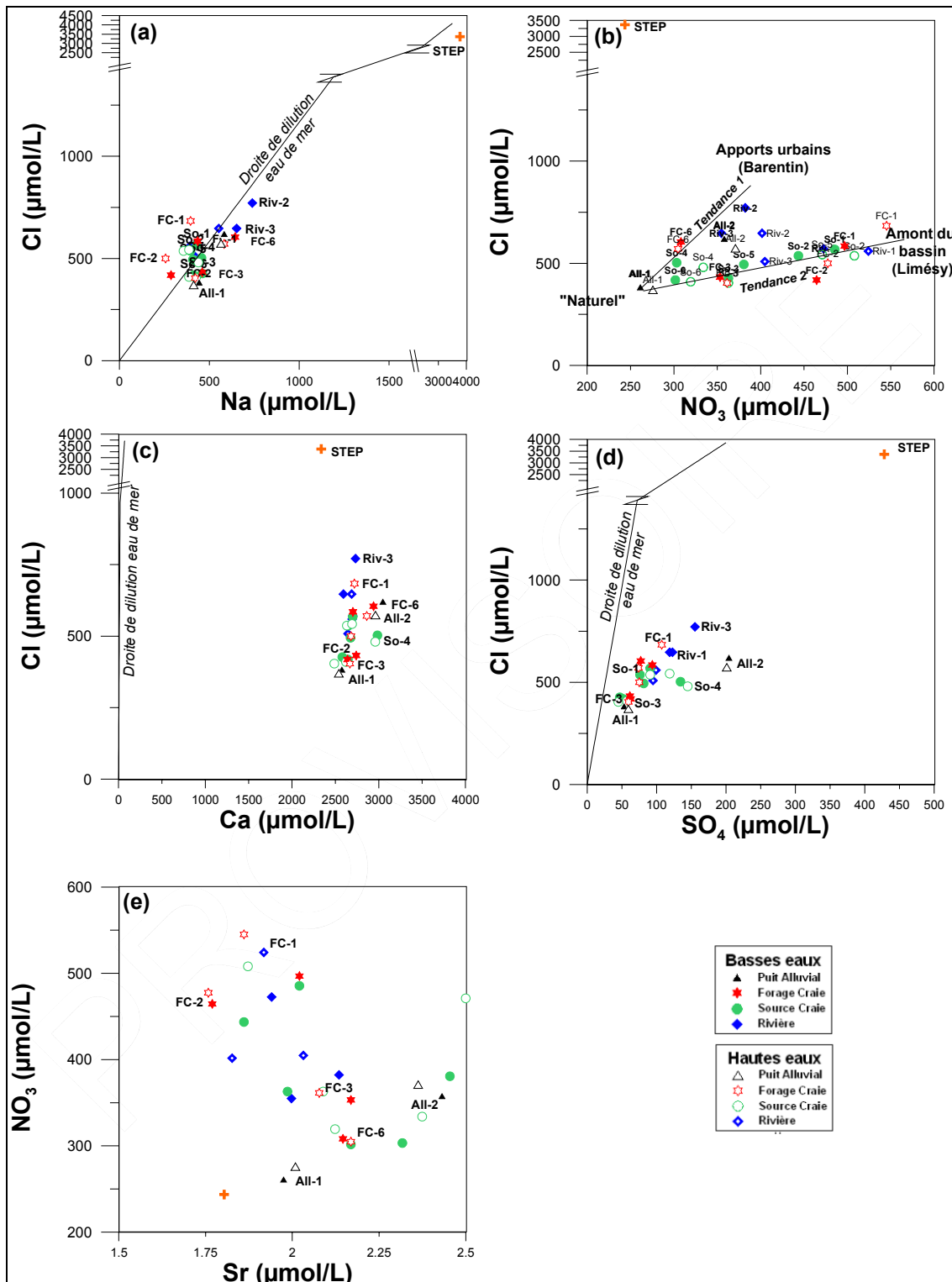


Illustration 16 : Cl vs. Na (a), Cl vs. NO₃ (b), Cl vs. Ca (c), Cl vs. SO₄ (d), NO₃ vs. Sr (e) pour les campagnes de basses eaux et de hautes eaux.

La première tendance (Tendance 1, Illustration 16b) entre ce pôle naturel et des concentrations plus élevées en chlorures et nitrates est décrite par les eaux de rivières Riv-2 (Austreberthe à Le Paulu) et Riv-3 (Austreberthe à Duclair) et le forage dans la craie FC-6 (Blacqueville). Les concentrations les plus élevées en chlorures (jusqu'à $770 \mu\text{mol.l}^{-1}$) et la situation des points de prélèvements de la rivière Austreberthe en aval de Barentin suggèrent que ces eaux intègrent des chlorures provenant des rejets urbains d'eau usées riches en cet élément. En effet les eaux usées de la STEP de Barentin mesurées dans le cadre de cette étude donnent une concentration en chlorures de $3370 \mu\text{mol.l}^{-1}$.

La deuxième tendance (Tendance 2) entre le pôle naturel et des concentrations plus élevées en chlorures et nitrates est décrite par les eaux de rivières et les eaux souterraines prélevées à Limésy en amont du bassin (Riv-1, So-1 et FC-1). Ces points présentent les concentrations les plus élevées en nitrates ($472\text{-}545 \mu\text{mol.l}^{-1}$) et sont situés en amont de Barentin. Ainsi les points se répartissant sur la tendance 2 semblent être contrôlés par des apports anthropiques probablement d'origine agricole, proportionnellement plus riches en nitrates que les rejets d'eaux usées.

Sur le diagramme chlorures versus calcium (Illustration 16c), tous les points se trouvent fortement enrichis en calcium par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer traduisant une origine majoritairement lithologique pour cet élément.

Sur le diagramme chlorures versus sulfates (Illustration 16d), les eaux souterraines des alluvions, les eaux de sources et les eaux de rivières se trouvent enrichies en sulfates par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer. En l'absence de formations évaporitiques sur la zone d'étude, ce résultat suggère une contribution de sulfates d'origine anthropique particulièrement marquée dans les alluvions en aval de Barentin (All-2).

Il n'existe pas de corrélations entre les teneurs en NO_3 et Sr, les variations de concentrations en Sr étant très faibles d'un échantillon à l'autre. De même, les teneurs en Ca sont similaires pour l'ensemble des échantillons analysés. Le Sr et le Ca ne semblent donc pas être des traceurs de l'influence anthropique, leurs teneurs sont contrôlées majoritairement par la lithologie.

3.1.4. Rapports élémentaires

Nous avons précédemment mis en évidence l'influence importante de la lithologie sur la composition chimique des eaux de surface et des eaux souterraines. Or pour une même lithologie, en fonction du temps de transit qui conditionne le temps d'interaction eau-roche, du volume d'eau au contact des roches, et de l'évaporation éventuelle, un effet dilution-concentration peut aboutir à des compositions chimiques très différentes. Afin de s'affranchir de ces effets, de nombreux auteurs proposent de normaliser les différents éléments chimiques par rapport au sodium (Négre et al., 1993 ; Gaillardet et al., 1997 et 1999). Ainsi sur un diagramme binaire, la droite de dilution correspondant à une lithologie donnée se rapporte à un point dans un diagramme de rapports

élémentaires. Le sodium, couramment utilisé comme élément de référence, provient des eaux de pluie, de la dissolution d'aluminosilicates sodiques et avec un degré moindre de la dissolution d'évaporites lorsque de telles formations sont présentes dans le bassin.

Le rapport molaire Ca/Na est reporté en fonction du ratio NO_3/Na sur l'illustration 17a. Sur un tel diagramme, le mélange simple entre 2 pôles sources d'éléments dissous est représenté par une droite car le même élément (Na) est utilisé pour la normalisation. Sur l'illustration 17a, les points présentent une tendance positive vers les rapports molaires Ca/Na et NO_3/Na plus élevés. Les points FC-2 (Sierville), So-2 (St Austreberthe), FC-1, So-1 et Riv-1 (Limésy), dont les apports anthropiques ont été précédemment identifiés comme provenant majoritairement d'amendements agricoles, présentent les rapports Ca/Na et NO_3/Na les plus élevés. A l'inverse, les points Riv-2, Riv-3 et FC-6, majoritairement contrôlés par des apports urbains, présentent les rapports Ca/Na et NO_3/Na les plus bas et tendant vers les rapports obtenus pour les eaux usées de la STEP. Le pôle « naturel » définit précédemment par le point All-1 présente des rapports Ca/Na et NO_3/Na intermédiaires entre les deux groupes de points précédemment discutés (un groupe contrôlé par les apports agricoles l'autre par les apports urbains). Les points ne se répartissent pas sur une droite unique, il existe donc nécessairement plus de 2 sources d'éléments dissous sur le bassin. Les points décrivent deux segments de droite partant du pôle naturel, l'un vers un pôle de type agricole et l'autre vers un pôle de type apports urbains.

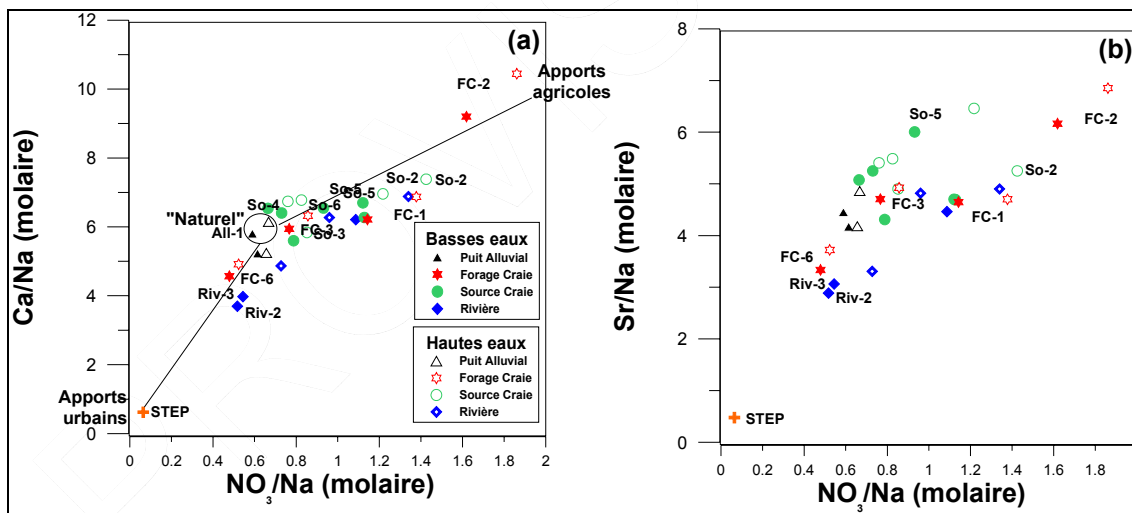


Illustration 17 : Ca/Na vs. NO_3/Na (a), Sr/Na vs. NO_3/Na (b)

Sur le diagramme Sr/Na vs. NO_3/Na (Illustration 17b) les points de prélèvement se répartissent globalement de la même manière que sur l'illustration 17a, ce qui confirme bien une distinction franche entre des eaux majoritairement contrôlées par des apports agricoles en amont du bassin et des eaux intégrant des éléments dissous provenant des apports urbains en aval du bassin.

En résumé, en s'appuyant sur les concentrations en éléments majeurs et traces 3 groupes de points peuvent être définis (1) Riv-1, So-1, FC-1 et FC-2 dont la composition géochimique est marquée par des apports anthropiques de type agricole ; (2) Riv-2, Riv-3, All-2 et FC-6 dont la composition géochimique est marquée par des apports urbains ; (3) All-1 dont la composition géochimique est dominée par la lithologie.

3.2. CARACTERISATION DES RESERVOIRS : ISOTOPES DE LA MOLECULE D'EAU ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ et tritium)

Les analyses isotopiques ainsi que les teneurs en éléments traces associés sont reportés dans l'illustration 18. On notera que les analyses en isotopes stables de la molécule d'eau ont été réalisées uniquement lors de la première campagne.

N° Ech	nom échantillon	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sr $\mu\text{g/l}$	Rb $\mu\text{g/l}$	$\delta^{11}\text{B}$ ‰	B $\mu\text{g/l}$	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ SMOW	$\delta^2\text{H}$ ‰ SMOW	^3H UT	err ^3H +/-
Campagne Nov-06 (basses eaux)										
Riv-1	rivière Limésy	0.707874	170	1.1	-	-	-7.1	-44.3	6	2
Riv-2	rivière Le Paulu	0.707974	187	2.0	-	-	-7.1	-45.1	7	2
Riv-3	rivière Duclair	0.707982	175	1.7	-	-	-6.9	-43.5	5	2
So-1	source Limésy	0.707861	177	1.1	-	-	-7.1	-44.0	6	2
So-2	source Sainte-Austreberthe	0.707927	163	1.1	-	-	-7.1	-45.1	10	2
So-3	source Duclair	0.707979	174	0.6	-	-	-7.0	-44.2	2	1
So-4	source Barentin	0.708090	203	0.8	-	-	-7.1	-45.4	4	1
So-5	source Ferrero	0.708197	215	0.6	-	-	-7.0	-44.0	2	1
So-6	source Le Paulu	0.707966	190	0.6	-	-	-7.0	-44.5	2	1
All-1	puits Duclair Pepinière	0.707955	173	0.7	-	-	-7.0	-44.8	<1	
All-2	puits Barentin	0.708113	213	1.3	-	-	-7.0	-44.3	3	1
FC-1	AEP Limésy	0.707859	177	1.1	-	-	-7.0	-44.9	6	2
FC-2	AEP Sierville	0.707907	155	0.7	-	-	-7.3	-45.8	9	2
FC-3	forage Duclair	0.708097	190	0.8	-	-	-7.0	-44.0	2	1
FC-5	puits Bouville	0.708685	95	0.8	-	-	-6.1	-38.3	10	2
FC-6	Forage Blacqueville	0.707972	188	1.3	-	-	-7.0	-44.2	5	2
Campagne Mai-07 (hautes eaux)										
Riv-1	rivière Limésy	0.707965	168	1.1	-	-	-	-	-	-
Riv-2	rivière Le Paulu	0.708004	160	1.6	9	19	-	-	-	-
Riv-3	rivière Duclair	0.708002	178	1.0	-	-	-	-	-	-
So-1	source Limésy	-	-	-	-	-	-	-	-	-
So-2	source Sainte-Austreberthe	0.707959	164	1.0	-	-	-	-	-	-
So-3	source Duclair	0.708004	183	0.6	-	-	-	-	-	-
So-4	source Barentin	0.708146	208	0.8	-	-	-	-	6	2
So-5	source Ferrero	0.708238	219	0.6	-	-	-	-	-	-
So-6	source Le Paulu	0.707982	186	0.7	-	-	-	-	3	1
All-1	puits Duclair Pepinière	0.707949	176	0.7	22.6	10	-	-	3	1
All-2	puits Barentin	0.708137	207	1.3	15.0	23	-	-	-	-
FC-1	AEP Limésy	0.707892	163	1.2	28.0	8	-	-	-	-
FC-2	AEP Sierville	0.707966	154	0.7	-	-	-	-	-	-
FC-3	forage Duclair	0.708133	182	0.8	14.4	11	-	-	4	1
FC-5	puits Bouville	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FC-6	Forage Blacqueville	0.708004	190	1.4	-	-	-	-	-	-
STEP	STEP Villers Ecalles	0.708120	158	16.0	4.5	209	-	-	-	-

Illustration 18 : Compositions isotopiques en H et O de l'eau, en tritium, en Sr et en B pour les deux campagnes de prélèvements.

3.2.1. Le Tritium : estimation de l'âge des eaux et identification de réservoirs

Dater les eaux souterraines signifie déterminer l'âge de l'eau souterraine, i.e. le temps écoulé à partir du moment où l'eau devient souterraine, en d'autres termes, depuis son infiltration dans le sol à partir des précipitations ou depuis tout autre type d'eau de surface (rivières, lacs). Il existe plusieurs méthodes pour calculer ou estimer l'âge des eaux souterraines (Illustration 19). La méthode du tritium basée sur la décroissance radioactive de cet isotope. Le processus physique de la décroissance radioactive est une des bases de la détermination de l'âge des eaux. La décroissance radioactive d'un élément est complètement indépendante des paramètres environnementaux comme la pression, la température, le pH ou les liaisons chimiques, et dépend seulement d'un degré d'instabilité caractéristique, exprimé par une demi-vie. De la demi-vie des éléments dépendra la plage de temps d'utilisation des traceurs dans les études hydrogéologiques (Illustration 19).

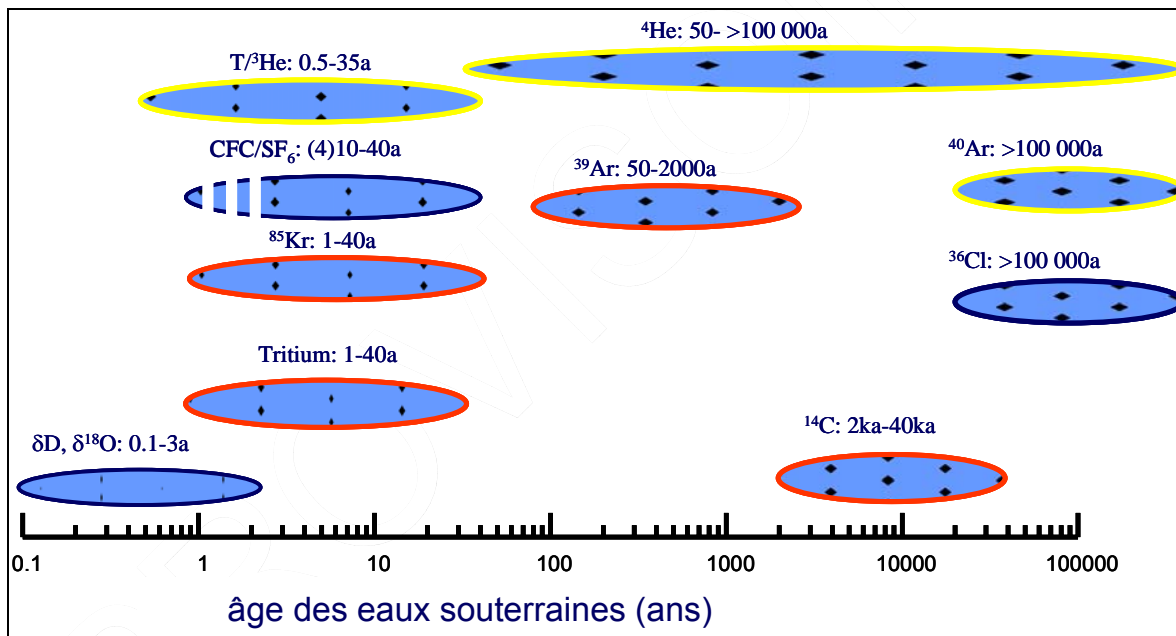


Illustration 19 : Echelle de datation pour quelques éléments radioactifs et gazeux

L'utilisation du tritium a pour but non pas la détermination d'un âge absolu des eaux mais la compréhension des échanges entre nappes alluviales et de la craie et eaux de surface. Le tritium, ³H, est un traceur intime de la molécule d'eau, qui permet d'estimer le temps de transit des eaux dans l'aquifère (gamme temporelle de 0 à une soixantaine d'années). C'est un marqueur des masses d'eau contemporaines. En effet, une production artificielle importante de ³H s'est ajoutée à la production naturelle au cours des essais thermonucléaires aériens, pendant la période 1952 - 1963 ; ces essais ont cessé depuis 1963 (Illustration 20). Par l'intermédiaire de cette production artificielle, on peut différencier les eaux qui résultent des précipitations sans ³H nucléaire (avant

1952), des eaux de précipitations formées dans une atmosphère contenant du ^3H nucléaire (après 1952). Cet isotope a été durant ces trente dernières années le plus utilisé en hydrogéologie notamment pour connaître si les recharges modernes d'aquifères étaient présentes, en comparant les teneurs en tritium de la fonction d'entrée du système aquifère (précipitation-évapotranspiration) et celles de la fonction de sortie (nappe atteinte par forage, sources,...). Il est impératif de garder à l'esprit que ce traceur ne donne qu'une information relative de l'âge d'une eau. L'âge radiométrique d'une eau souterraine est en fait l'âge moyen d'un mélange de nombreux écoulements élémentaires. La datation des eaux souterraines ne peut donc se limiter uniquement à déterminer un âge.

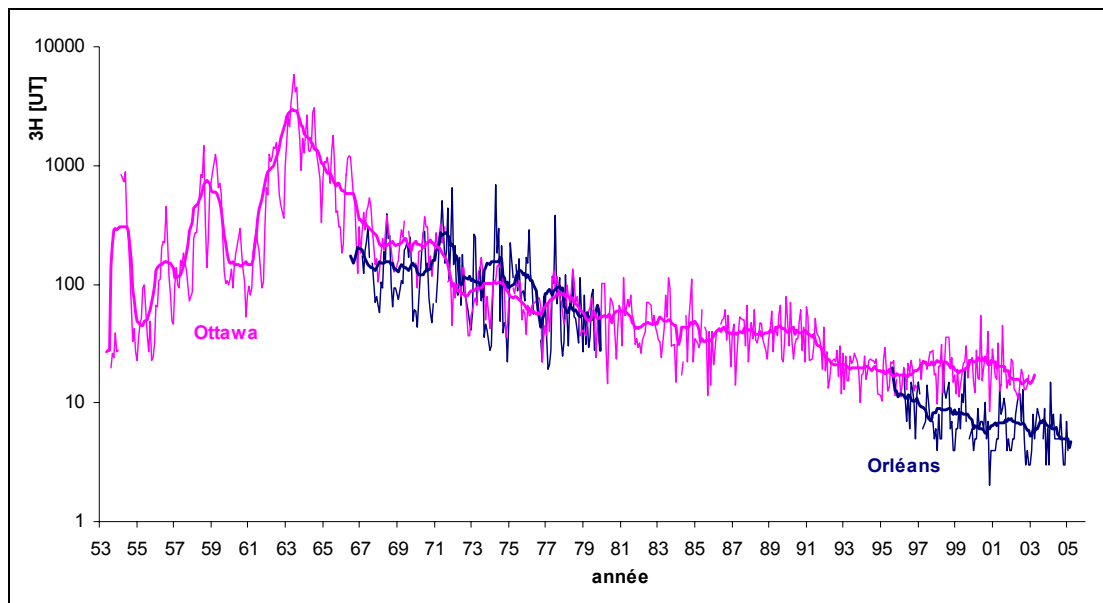


Illustration 20 : Chroniques de tritium à Ottawa, Canada (plus longue chronique existante) et Orléans (la plus proche du bassin de l'Austreberthe)

Un des facteurs limitant l'utilisation de ce traceur est l'absence d'une longue chronique indiquant la teneur en tritium des pluies locales, nous pourrions nous référer à la chronique des pluies d'Orléans (moyenne pondérée 7.35 ± 1.4 UT, période 1996-2003). D'autre part, en l'absence de mesure locale, il n'est pas possible d'évaluer l'impact potentiel, sur la signature des précipitations, des émissions de tritium par les centrales nucléaires de Paluel et de Penly.

Tous les échantillons de la première campagne de prélèvement ont été analysés (rivière, forage, source et puits) afin de voir s'il existe des différences significatives en terme de signature tritium. Ceci n'a pas pour but de réaliser une datation précise des eaux, mais de pouvoir interpréter ces données en terme de compartiments hydrologiques qui contiennent des eaux d'âge différent, ce qui peut ensuite se traduire en terme de vitesse de circulation relative et de contribution aux écoulements de surface.

Ainsi, l'illustration 21 présente toutes les données de la campagne de basses eaux (Nov-06) et de quelques points re-analysés lors de la campagne de hautes eaux (mai-07). Toutes les données sont comprises entre <1 et 10 UT, cette gamme de valeur est en accord avec les mesures réalisées sur le bassin de la Somme (Négrel et al., 2003). On distingue ainsi deux groupes de points, ceux avec des valeurs comprises en 6 et 10 UT, correspondant à la partie amont du bassin, et ceux avec de valeurs inférieures à 6 UT correspondant à la partie basse du bassin.

Le premier groupe de points comprend le puits de Bouville (FC-5) dont nous avons vu qu'il intègre des eaux de ruissellement de subsurface (faible minéralisation), il est donc probable que ce point reflète en partie un apport d'eau récente correspondant à ces ruissellements de subsurface. Les sources et forages de l'amont du bassin présentent des teneurs similaires en tritium, c'est notamment le cas de la source de Ste Austreberthe (So-2) qui donne naissance à la rivière du même nom, du forage AEP de Sierville (FC-2) et aussi de la source et du forage de Limesy (So-1 et FC-2). Ces sources jaillissent à faveur de failles ou ont fait l'objet de test de traçage montrant des circulations rapides au sein des conduits karstiques. Leur signature peut ainsi traduire la composante la plus lente des circulations dans les réseaux karstiques (situation de basses eaux). Des prélèvements en situation de très hautes eaux (non rencontrées durant la durée de cette étude) auraient pu permettre d'aller plus loin dans les interprétations.

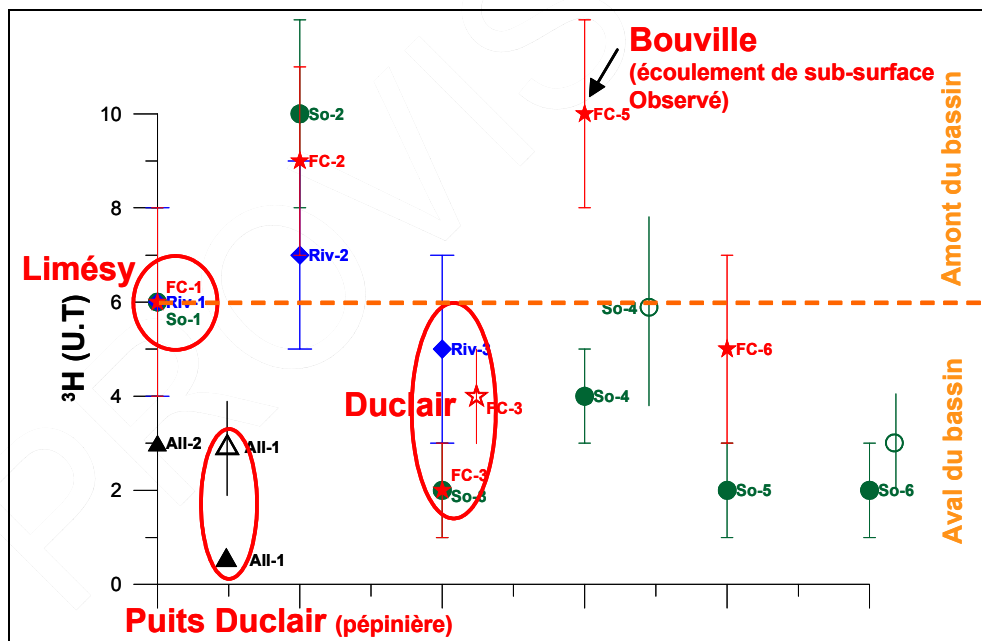


Illustration 21 : Résultats des analyses de tritium (^3H) exprimés en Unité Tritium (U.T.) pour les points de rivière, sources et forages de la campagne de basses eaux (Nov-06). Seuls quelques points ont été analysés lors de la campagne de hautes eaux (Mai-07, symbols vides).

Le second groupe comprend les points de l'aval du bassin avec des teneurs en tritium plus faibles. C'est notamment le cas du puits de Duclair (All-1) captant les alluvions le long de la rivière Austreberthe, il présente en effet une teneur en $^3\text{H} < 1$ UT en basses

eaux (nov-06) ce qui est caractéristique d'une eau rechargée avant 1952 (début des essais nucléaires aériens). Cette valeur surprenante pour un aquifère alluvial d'extension limité n'est pourtant pas en contradiction avec ce que nous avons décrit en termes de teneurs en éléments dissous, All-1 présentant les teneurs en Cl et NO₃ les plus faibles de la zone d'étude : All-1 pouvant ainsi représenter le pôle naturel du système. Ce même point présente une valeur légèrement plus élevée lors de la campagne de hautes eaux (mai-07) avec $^3\text{H} = 3 \pm 1$ UT, ce qui semble indiquer un apport d'eau plus récente. L'hypothèse suivante peut ainsi être avancée : All-1 correspond à un puits dans les alluvions le long de la rivière Austreberthe et est utilisé pour l'irrigation de pépinières. La nappe des alluvions est relativement restreinte de part et d'autre de la rivière, il semble donc improbable que l'on puisse avoir à faire à un réservoir isolé au sein des alluvions puisque cet ouvrage est largement sollicité pour les pépinières. Il est possible que cet ouvrage dans les alluvions capte une arrivée d'eau préférentielle de la nappe de la craie, eau ancienne, non impactée par les activités anthropiques du bassin. Lors de la campagne de hautes eaux (mai-07) un mélange peut se produire au sein de cet ouvrage incorporant de l'eau en provenance de la rivière, et/ou de la nappe des alluvions, et/ou de la nappe de la craie en sollicitant des circulations plus rapides. Un suivi temporel de ce forage, en particulier en très hautes eaux, permettrait de mieux comprendre ce point atypique.

Les sources So-3 (Duclair), So-6 (Paulu), So-5 (Ferrero) et le forage Duclair (FC-3) présentent aussi des teneurs en tritium faibles en basses eaux (nov-06) avec 2 ± 1 UT traduisant potentiellement une composante d'eau ancienne. Ceci est compatible avec la chimie de ces eaux qui montre que la contamination anthropique de ces sources est relativement limitée. La source So-5 est plus riche en nitrate en hautes eaux, où la part de circulation rapide peut être plus importante, la teneur en tritium n'a cependant pas été mesurée en hautes eaux.

La rivière Austreberthe d'amont en aval (de Riv-1 à Riv-3) présente une signature similaire compte tenu de l'incertitude analytique et semble majoritairement alimentée par les eaux de l'amont du bassin.

Les isotopes du tritium mettent en évidence une nette différence entre la partie amont du bassin et la partie basse, traduisant des modes de circulation distincts. Bien que ce ne soit pas le but de cette étude, il serait intéressant de pouvoir aller plus loin en termes de datation de ces eaux, en disposant d'une chronique des teneurs en tritium des pluies dans le secteur et en associant une autre méthode de datation des eaux contemporaines, à savoir les CFC (composés organochlorés responsables de la destruction de la couche d'ozone) et SF₆ (hexafluorure de soufre).

3.2.2. Les isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$)

En l'absence d'évaporation ou d'échange avec des gaz dissous, les isotopes stables de la molécule d'eau se comportent comme des traceurs conservatifs et reflètent le mélange des différentes recharges ayant alimenté les eaux souterraines considérées. L'histoire hydroclimatique d'un aquifère peut donc être reconstituée par l'abondance

des isotopes stables lourds de l'oxygène (^{18}O) et de l'hydrogène (^2H) dont les signatures correspondent à des environnements et des épisodes hydroclimatiques spécifiques, ou des altitudes de recharge différentes. Sous certaines conditions (faible rapport eau/roche, temps de résidence long, température élevée du réservoir, échange avec CO_2 , évaporation, ...), les interactions eau – roche peuvent modifier la composition isotopique initiale de l'eau. Les variations de concentrations en isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène, traceurs intimes de la molécule d'eau, obéissent à certaines lois. Lors des changements de phases (condensation, évaporation, passage phase liquide-phase solide), des fractionnements isotopiques entre les diverses molécules se réalisent ; ceux-ci sont dépendants de la température. Ainsi la composition isotopique des eaux météoriques varie en fonction de paramètres géographiques ou paléogéographiques : latitude, altitude, saison, période climatique (nombreux exemples d'eaux anciennes précipitées sous un climat qui n'a plus cours actuellement).

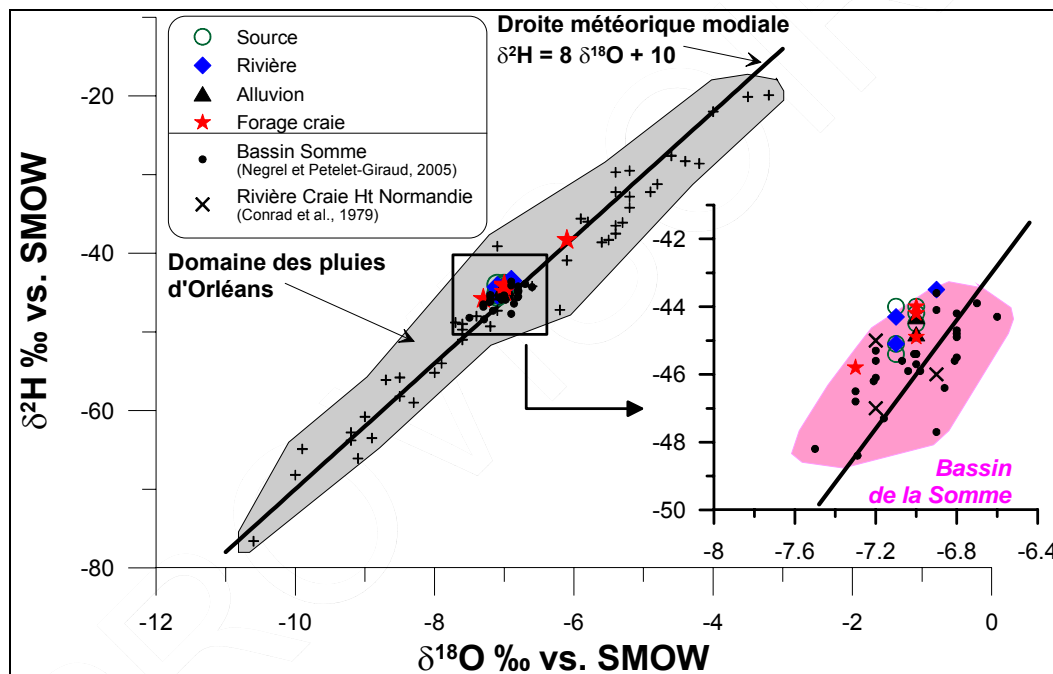


Illustration 22 : Relation $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ des eaux du bassin de l'Austreberthe lors de la campagne de basses eaux (nov-06). Ces données sont comparées aux pluies d'Orléans, ainsi qu'aux eaux souterraines issues du bassin crayeux de la Somme et de rivières de Haute Normandie.

Afin de connaître les relations entre aquifères et les relations aquifères/eaux superficielles, les deux isotopes stables $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, traceurs constitutifs de la molécule d'eau, sont analysés. La mesure des deux éléments permet la comparaison par rapport à la fonction entrée, c'est-à-dire par rapport à la droite météorique locale et de voir si les eaux de l'aquifère ont été modifiées par échange ou mélange avec des eaux extérieures au système. La mesure de ces deux traceurs est indispensable pour détecter les phénomènes d'évaporation et déterminer l'origine des eaux. Les signatures des eaux continentales (e.g. les eaux de rivières et les eaux souterraines)

en isotopes stables sont contrôlées par trois phénomènes qui sont (1) les précipitations, (2) l'évaporation et (3) les mélanges d'eau.

L'illustration 22 représente les signatures isotopiques en $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ des eaux de la campagne de basses eaux (nov-06). Les eaux de surface et eaux souterraines du bassin de l'Austreberthe se situent le long de la droite météorique mondiale et s'inscrivent dans le domaine défini par les précipitations mesurées à Orléans. Seul un point se distingue des autres avec des signatures en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ plus élevées, il s'agit de FC-5 qui a été identifié comme intégrant une forte composante de ruissellement de subsurface, ceci est en accord avec sa signature en isotope stable pouvant traduire la signature des dernières précipitations qui induisent ce ruissellement de subsurface.

Les eaux ne présentent aucun signe d'évaporation c'est-à-dire que les eaux se sont infiltrées vers la nappe sans subir de profonde modification. Les variations spatiales à l'échelle du bassin sont extrêmement faibles, la signature moyenne de ces eaux est similaire à la valeur moyenne de la recharge à Orléans, faute de pouvoir comparer avec les précipitations locales. Ceci traduit une fonction capacitive importante de l'aquifère crayeux, moyennant les variations saisonnières du signal d'entrée, ce qui est en accord avec l'étude de Conrad et al. (1979) sur la craie de la région.

Les eaux du bassin de l'Austreberthe sont comparées aux eaux souterraines du bassin voisin de la Somme, lui aussi en domaine crayeux, les valeurs observées sont tout à fait similaires à celles de la Somme en hautes et basses eaux. Les signatures sont aussi identiques à celles mesurées par Conrad et al. (1979) sur des rivières et eaux souterraines en Haute Normandie (Illustration 22 partie agrandie).

Enfin, on notera que la signature des eaux souterraines est similaire à celle des eaux de surface, ce qui est tout à fait compatible avec une alimentation de la rivière par la nappe.

3.3. CARACTERISATION DES APPORTS D'EAU ET D'ELEMENTS DISSOUS

3.3.1. Les isotopes du strontium

Le rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) d'une eau est lié à celui du minéral ou à des associations minéralogiques avec lesquelles le fluide a interagi. Les effets de fractionnements isotopiques liés à la différence de masse ne sont pas détectables pour des éléments dont la masse est proche de 80. De plus, les effets de variations du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ liés à la décroissance radioactive du nucléide père (^{87}Rb) en nucléide fils (^{87}Sr) ne sont pas significatifs, compte tenu de la courte échelle de temps à laquelle ces processus sont étudiés en géochimie environnementale par rapport à la période de décroissance du rubidium. Lors des phénomènes d'interaction eau-roche, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la fraction de strontium libéré sera différent de la roche totale et typique du ou des minéraux altérés et ceci en liaison avec la "résistance" des minéraux vis-à-vis

de l'agressivité du fluide. Les variations isotopiques observées dans les fluides peuvent être issues du mélange de strontium de compositions isotopiques différentes provenant de différentes sources. Ainsi, dans le cas simple où deux sources de rapport isotopique ou chimique différents sont présentes, la composition du mélange peut être déterminée. Les variations du rapport isotopique du strontium dans un hydrosystème donnent ainsi des informations sur (1) la nature et l'intensité des processus d'interaction eau/roche liés notamment à l'altération et à l'érosion ainsi que sur (2) l'origine et les proportions de mélange du Sr dissous provenant de différents réservoirs hydriques (eaux souterraines/ eaux de surface).

La gamme de composition isotopique en Sr décrite par les eaux de surface et les eaux souterraines est restreinte (0.70786-0.70824) mais reste très largement significative par rapport à l'erreur analytique ($\pm 8.10^{-6}$ à 2σ) associée à la mesure du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Les teneurs en Sr varient quant à elles entre 1.76 et 2.5 $\mu\text{mol.l}^{-1}$. Les variations de composition isotopique en Sr observées peuvent donc légitimement être interprétées en termes de contribution de différentes sources de Sr et de mélange au sein du bassin. Sur la zone d'étude les sources potentielles de Sr peuvent être (1) la lithologie et (2) de manière secondaire les apports anthropiques type engrais agricoles et type rejets urbains.

La signature isotopique en Sr de la nappe de la craie a été caractérisée sur d'autres secteurs géographiques, dans la Somme en particulier où les compositions $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont comprises entre 0.7077 et 0.7081 (Négre et Petelet-Giraud, 2005). Sur le diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ (Illustration 23) la gamme observée et la variabilité de composition isotopique et teneur en Sr des eaux souterraines prélevées dans l'aquifère de la craie sur la zone d'étude sont tout à fait comparables à celles observées pour cet aquifère dans la Somme. Par ailleurs l'ensemble des points prélevés sur le bassin décrivent une tendance entre deux pôles caractérisés par (1) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevé et teneur en Sr les plus élevées, (2) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ faible et teneurs en Sr les plus faibles. Le pôle (1) est représenté par la source So-5 (0.70820-0.70824 respectivement en basses et hautes eaux). Le pôle (2) est représenté par les points Riv-1, So-1 et FC-1 drainant la partie amont du bassin. Les signatures isotopiques en Sr de ces points sont comprises entre 0.70786 et 0.70797.

Le Sr peut avoir une origine agricole via les engrais, des études antérieures ont montré que la signature des eaux peut en partie être contrôlée par ces apports. Ainsi, la composition isotopique moyenne en Sr des engrais commerciaux est comprise entre 0.708 et 0.709 (Vitoria et al., 2004) mais des valeurs plus basses, allant jusqu'à 0.70300 (Vitoria et al., 2004) peuvent être observées. Les études menées en France montrent les mêmes gammes de variation. Cependant, d'autres études ont mis en évidence que les apports agricoles pouvaient ne pas avoir d'influence significative sur la composition isotopique des eaux (Semhi et al., 2000; Petelet-Giraud et al., 2006). Les fertilisants utilisés sur le bassin versant n'ont pas été analysés, cependant, les teneurs en Sr mesurées dans les eaux de surface et eaux souterraines sont relativement faibles et homogènes, elles sont de plus dans la même gamme de valeur que les eaux de la craie de la Somme où aucun apport de Sr anthropique n'a été mis en évidence pour les eaux souterraines (Négre et Petelet-Giraud, 2005). Ceci nous

permet d'émettre l'hypothèse que les apports de Sr via les pratiques agricoles sont négligeables.

La signature isotopique et la teneur en Sr de la seconde source anthropique potentielle (effluents de la station d'épuration) a aussi été mesurée. La teneur en Sr est dans la gamme la plus basse des concentrations mesurées sur le bassin, avec un rapport isotopique similaire au forage AEP de Duclair. Cette teneur en Sr semble indiquer que les eaux usées ne sont pas enrichies par une source anthropique de Sr.

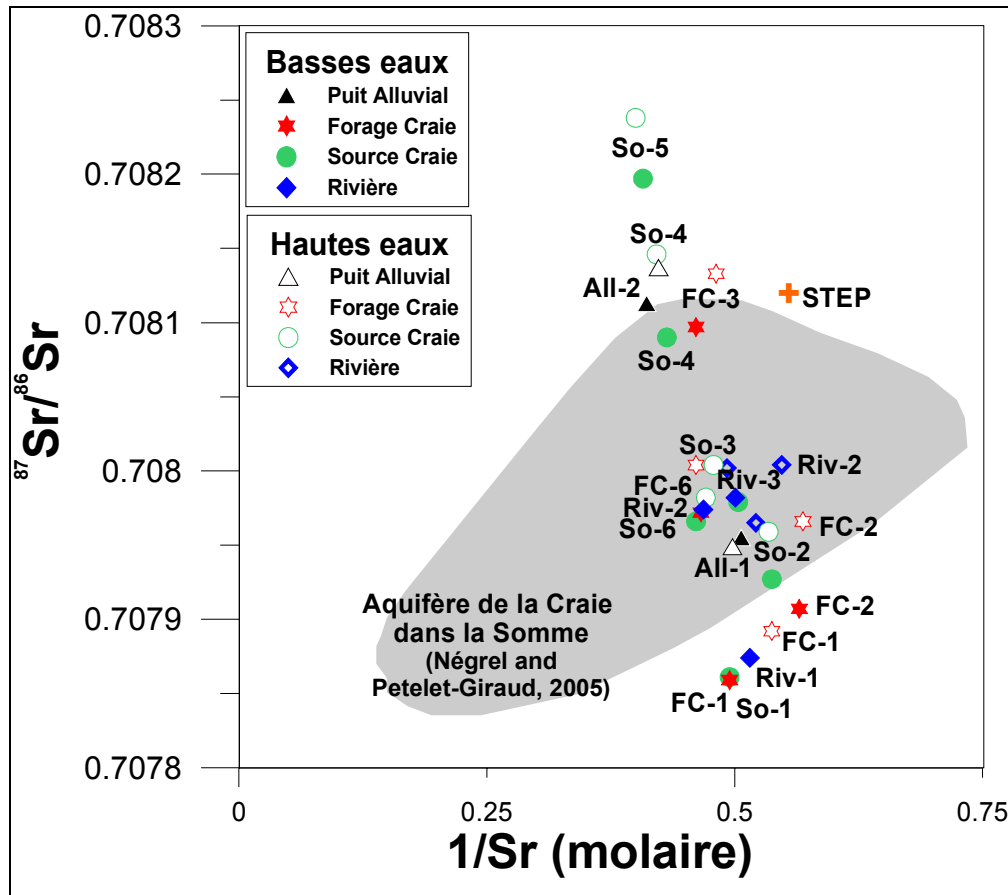


Illustration 23 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $1/\text{Sr}$ pour les eaux des deux campagnes de prélèvement.

Dans l'illustration 23, on peut globalement distinguer deux groupes de points. Le premier regroupant la source So-5 (Ferrero), la source So-4 (Barentin), All-2 (puits Barentin) et FC-3 (AEP Duclair). Ces points sont situés dans la partie avale du bassin et drainent majoritairement les dépôts crayeux du Santonien et du Campanien. Le second groupe rassemble les points de l'amont du bassin avec les sources de l'Austreberthe (So-2) et de Limésy (So-1), le forage de Limésy (FC-1) et sont issues des formations crayeuses inférieures (Coniacien et Turonien). En l'absence de contribution anthropique de Sr, les variations de signatures isotopiques au sein du bassin versant peuvent s'expliquer par les interactions eau-roche avec les différents niveaux de la matrice crayeuse.

En résumé, il semble que les apports anthropiques en Sr via l'agriculture et les rejets d'eaux usées soient négligeables. Le Sr mesuré est donc d'origine lithologique, les différences de signatures isotopiques étant probablement à relier aux variations de faciès entre les différents niveaux de la craie et/ou au sein d'un même niveau. Ces variabilités au sein de la matrice crayeuse ont déjà été mises en évidence dans le bassin versant de la Somme (Négrel and Petelet-Giraud, 2005).

3.3.2. Les isotopes du bore

La grande différence relative de masse entre les deux isotopes stables ^{10}B et ^{11}B du bore, ainsi que la forte réactivité géochimique de cet élément entraînent un fractionnement isotopique naturel du bore de l'ordre de 90 unités delta. Les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ les plus basses (-30 ‰) correspondent aux évaporites non marines, tandis que le réservoir le plus enrichi en ^{11}B est représenté par les saumures des lacs salés d'Australie et par la Mer Morte en Israël ($\delta^{11}\text{B}$ jusqu'à +59 ‰). Le réservoir océanique présente une valeur de $\delta^{11}\text{B}$ mondialement constante de l'ordre de +39.5 ‰. Les apports anthropiques peuvent également constituer une source de B pour les eaux naturelles. D'après la littérature les rejets urbains de type eaux usées ont une composition isotopique $\delta^{11}\text{B}$ comprise entre -5‰ et 12‰ (avec des valeurs souvent inférieures à 0 en France) et les engrais minéraux entre -2‰ et 15‰ (Widory et al., 2004). Ainsi la composition isotopique en bore des eaux souterraines, des eaux issues d'eaux résiduaires urbaines ou d'eau d'irrigation, par exemple, peuvent présenter des signatures très contrastées. Par ailleurs des fractionnements isotopiques peuvent être liés à des phénomènes d'adsorption/désorption sur des argiles. Le bore présente ainsi un fort potentiel pour comprendre les mélanges d'eaux au sein de l'aquifère et notamment de tracer la contribution éventuelle d'eaux de rivières à la nappe et de mettre en évidence d'éventuels processus spécifiques.

A la lumière des résultats de la première campagne de prélèvement, il a été décidé lors du comité de pilotage de mi-projet d'utiliser les isotopes du bore comme traceur des pollutions anthropiques afin d'affiner la compréhension des sources de pollutions. Ainsi, 5 échantillons d'eau ont été analysés pour la teneur en B et le rapport isotopique $\delta^{11}\text{B}$ (Riv-1, All-1, All-2, FC-1 et FC-3) ainsi que l'effluent de la station d'épuration.

Sur la zone d'étude, les sources potentielles de B sont en premier lieu les apports anthropiques de type engrais agricoles et de type rejets urbains. La signature chimique en NO_3 et B et isotopique en B des rejets de la STEP ($\text{NO}_3 = 244 \mu\text{mol.l}^{-1}$; $\text{B} = 19.3 \mu\text{mol.l}^{-1}$; $\delta^{11}\text{B} = -4.5\text{‰}$; Illustration 24a&b) a ainsi été caractérisée afin de contraindre davantage la contribution de ce pôle pour les eaux de surface et les eaux souterraines de la zone d'étude.

Sur le diagramme $\delta^{11}\text{B}$ vs. $1/\text{B}$ (Illustration 24b), les points mesurés se répartissent globalement sur une droite de mélange, suggérant que sur la zone d'étude le B provient uniquement de deux sources, une anthropique correspondant aux rejets urbains avec une teneur élevée en B ($19 \mu\text{mol.l}^{-1}$) et de composition $\delta^{11}\text{B} = -4.5\text{‰}$, et une naturelle correspondant aux apports atmosphériques avec une teneur faible en B et de composition isotopique proche de celle de l'eau de mer ($\delta^{11}\text{B} = 39.5\text{‰}$), en effet, la composition de l'eau de pluie en bore n'a pas été mesurée, cependant, des mesures

ont été réalisées à Brest (BRGM, non publié) montrant que la signature en bore est très proche de celle de l'eau de mer. Des analyses réalisées sur les pluies d'Orléans montrent une variabilité beaucoup plus importante des rapports isotopiques en fonction semble-t-il de l'origine des masses d'air. Compte tenu de la situation géographique du bassin, relativement proche de la côte et sous influence atlantique, nous ferons l'approximation que le rapport isotopique des précipitations est proche de celui de l'eau de mer en gardant à l'esprit une variabilité potentielle. En outre, les pluies de Brest présentent une teneur moyenne pondérée de $0.32 \mu\text{mol.l}^{-1}$ (BRGM, non publié), ce qui compte tenu du facteur d'évapotranspiration local est tout à fait similaire à l'échantillon le plus faiblement concentré mesuré (FC-1).

Le point FC-1 (Illustration 24b), précédemment identifié comme fortement contrôlé par des apports anthropiques d'origine agricole présente des concentrations élevées en nitrates ($497\text{-}545 \mu\text{mol.l}^{-1}$) associées à des concentrations faibles en bore ($0.78 \mu\text{mol.l}^{-1}$). Il présente la composition isotopique en B la plus éloignée de celle des rejets de la STEP ($\delta^{11}\text{B} = 28\text{‰}$; Illustration 24b) parmi les points mesurés dans le cadre de cette étude, ce point ne présente pas de signe d'apports anthropiques d'origine urbaine.

La composition isotopique et les teneurs en bore des fertilisants utilisés sur le bassin n'ont pas été mesurées, cependant compte tenu de la très faible teneur en bore (de l'ordre de celle des apports atmosphériques) de l'échantillon FC-1, il semble que les apports de bore par les activités agricoles soient négligeables.

Le point All-1, précédemment identifié le pôle naturel, présente des concentrations en nitrates ($261\text{-}276 \mu\text{mol.l}^{-1}$) et en bore ($0.96 \mu\text{mol.l}^{-1}$) faibles. La signature isotopique en B mesurée pour ce point ($\delta^{11}\text{B} = 22.6\text{‰}$; Illustration 24b), très supérieure à celle des rejets urbains de la STEP ($\delta^{11}\text{B} = -4.5\text{‰}$), vient conforter l'origine majoritairement naturelle du B pour ce point.

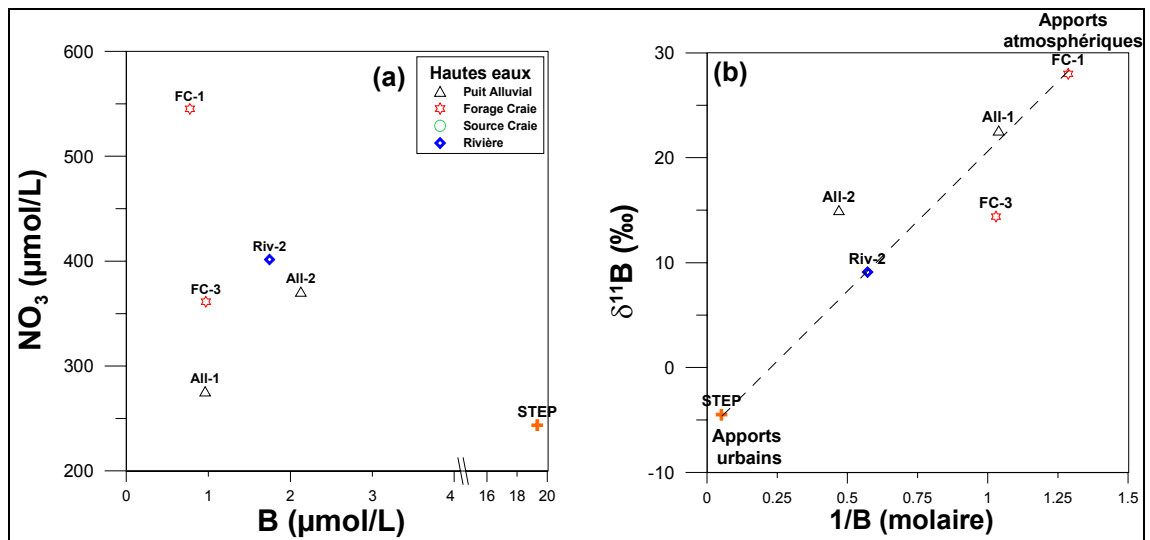


Illustration 24 : NO₃ vs. B (a), δ¹¹B vs. 1/B (b)

Le point Riv-2, situé en aval de Barentin, présente la composition isotopique en B la plus basse ($\delta^{11}\text{B} = 9\text{‰}$) parmi tous les points échantillonnés et donc la plus proche de celle des rejets de la STEP. Ce résultat est en parfait accord avec les interprétations formulées précédemment concernant un contrôle de la géochimie des eaux de rivières prélevées en ce point par des rejets urbains. Le point All-2 présente une teneur en Bore plus élevée que celle de Riv-2, avec un $\delta^{11}\text{B} = 15\text{‰}$, il semble lui aussi être contrôlé par les apports en bore de type eaux usées.

Le forage AEP de Duclair (FC-3) présente une teneur en bore faible (similaire à celle de All-1) mais avec un rapport $\delta^{11}\text{B}$ plus faible, similaire à celui mesuré pour All-2 (Illustration 24b). Compte tenu de la teneur mesurée en B, il semble que les eaux de ce forage ne soient pas impactées de manière significative par des apports anthropiques, l'explication du rapport isotopique plus bas serait alors attribuée à des phénomènes d'adsorption/désorption sur des argiles du réseau karstique capté par l'AEP de Duclair. Cette hypothèse demanderait cependant à être testée, en comparant par exemple avec la source de Duclair (So-3) non mesurée.

3.4. VARIABILITE TEMPORELLE

Afin d'appréhender les possibles variabilités temporelles de compositions géochimiques des eaux souterraines et des eaux de surface en fonction du régime hydrique (hautes eaux / basses eaux), deux campagnes de prélèvement ont été réalisées. De la compréhension de ces variabilités découle l'identification et la caractérisation des relations nappe-rivière, potentiellement différentes selon la période du cycle hydrique considérée.

Comme évoqué précédemment, pour une même lithologie, en fonction du temps de transit qui conditionne le temps d'interaction eau-roche, du volume d'eau au contact des roches, et de l'évaporation éventuelle, en d'autres termes de la période du cycle hydrologique considérée, un effet dilution-concentration peut aboutir à des compositions chimiques très différentes. Ainsi pour s'affranchir de ces effets, on utilise généralement les rapports élémentaires pour identifier d'éventuelles variations temporelles de sources d'éléments dissous sur le bassin étudié. Cependant, dans le cas du bassin de l'Austreberthe, les variations de concentration entre les deux campagnes considérées sont faibles, il apparaît donc judicieux de s'intéresser directement aux teneurs plutôt qu'aux rapports de concentration.

Les teneurs en calcium mesurées dans les eaux de surface (rivière) et dans les eaux souterraines (forages, sources et puits) sont identiques en période de basses eaux (nov-06) et hautes eaux (mai-07), l'illustration 25a met ainsi en évidence que tous les points se situent sur la droite 1:1 lorsque l'on compare les teneurs des deux campagnes de prélèvements. Les barres d'erreur correspondant à l'incertitude analytique ont été ajoutées afin de montrer clairement que la déviation de certains points par rapport à la droite 1:1 n'est qu'un effet d'échelle de la représentation graphique. De même, l'illustration 25b comparant les teneurs en Sr des deux campagnes montre que cet élément reste en concentration constante dans les eaux du

bassin au moment des deux périodes d'échantillonnage. Cette stabilité remarquable des concentrations en Ca et Sr entre les basses et hautes eaux mesurées traduit un apport identique, pouvant ainsi correspondre à une même source lithologique. Il semble ainsi que ce soit le même compartiment aquifère qui contribue aux écoulements lors des deux périodes échantillonnées.

Sur le diagramme comparant les signatures isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mesurées en période de hautes eaux et en période de basses eaux (Illustration 25c) la plupart des points se trouvent au-dessus de la droite de pente 1:1 dans ce diagramme, les barres d'erreur correspondant à l'incertitude analytique sont comprises dans la taille des points. Cette différence de signature, même faible, semble traduire une contribution plus importante d'un pôle source de Sr présentant une signature isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus élevée en période de hautes eaux. Ce Sr peut correspondre à une origine lithologique en sollicitant des eaux stockées dans un niveau aquifère différent (le niveau piézométrique étant plus haut durant la période de hautes eaux), ou une eau qui a été en contact avec des argiles (libérant du Sr à rapport isotopique plus élevé que la matrice crayeuse) remobilisées au sein des réseaux karstiques à la faveur de circulations plus rapides en hautes eaux. Une autre hypothèse serait de faire intervenir une source anthropique de Sr, c'est cependant peu probable car d'une part les teneurs en Sr restent tout à fait similaires et d'autre part, les valeurs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont plus élevées en période de hautes eaux pour l'ensemble des points alors que nous avons mis en évidence précédemment que ces points sont affectés de manière très inégale par les apports anthropiques. De plus, il n'existe aucune corrélation entre les isotopes du Sr et les concentrations en NO_3 et Cl.

Sur le diagramme comparant les teneurs en NO_3 mesurées en période de hautes eaux et en période de basses eaux (Illustration 25d) tous les points sont globalement sur la droite de pente 1:1 excepté les points So-2 et So-5 clairement au-dessus de la droite (compte tenu des barres d'erreur) traduisant ainsi des teneurs en NO_3 plus élevées en période de hautes eaux. Il a été mis en évidence plus haut que les apports en nitrate sont liés à l'activité agricole. Ces deux sources présentent ainsi une contribution plus importante des apports agricoles pendant la période de hautes eaux propices au lessivage des sols et donc à la remobilisation des nitrates. Les deux points où cet effet est le plus marqué sont deux sources karstiques où les transferts peuvent être rapides. Dans une moindre mesure, l'échantillon Riv-1 à Limésy présente aussi un excès de NO_3 en hautes eaux. La source So-1, donnant naissance à la rivière, n'a pas été analysée en hautes eaux, le forage FC-1 présente quant à lui une teneur en NO_3 très peu différente de celle des basses eaux.

Sur le diagramme comparant les teneurs en Cl mesurées en période de hautes eaux et en période de basses eaux (Illustration 25e) tous les points sont globalement sur la droite de pente 1:1 excepté les points FC-1 et FC-2 qui présentent une teneur légèrement supérieure en Cl en hautes eaux. Le Cl a été identifié comme co-migrant des nitrates provenant des activités agricoles sur la partie amont du bassin d'où provient l'eau prélevée au niveau de ces forages captant des conduits karstiques. Cette contribution plus importante de Cl en période de lessivage du sol apparaît donc tout à fait compatible avec le comportement général observé pour les nitrates.

Relations nappe-rivière du bassin de l'Austreberthe (Haute Normandie).
Synthèse des approches de modélisation et de traçage isotopique

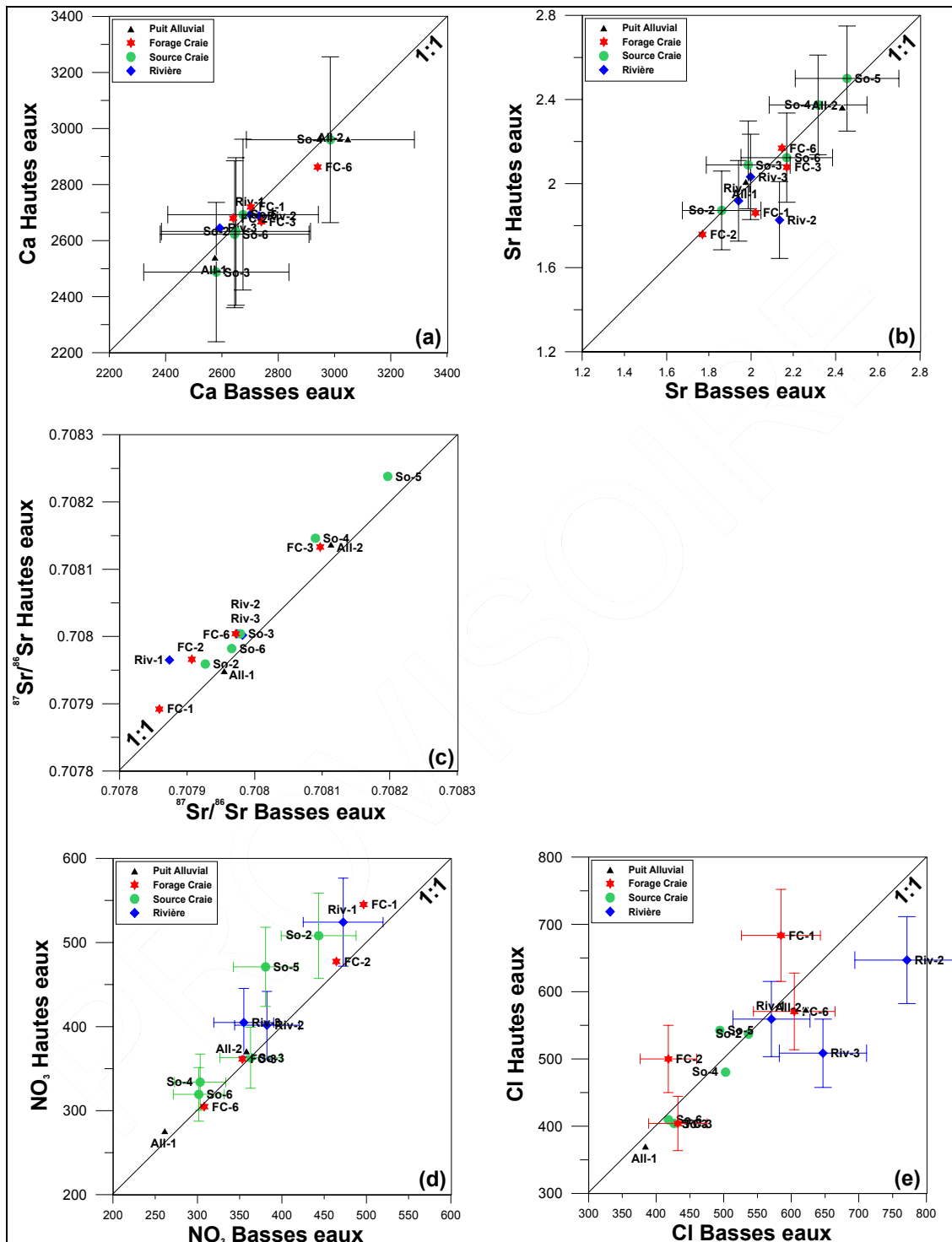


Illustration 25 : Comparaison des compositions géochimiques et isotopiques entre la campagne de basses eaux et de hautes eaux pour Ca (a), Sr (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (c), NO_3 (d) et Cl (e).

Dans ce même diagramme comparant les teneurs en Cl mesurées en période de hautes eaux et en période de basses eaux (Illustration 25e), deux échantillons présentent des teneurs plus faibles en hautes eaux. Il s'agit des deux échantillons de la rivière Austreberthe prélevés en aval du bassin (Riv-2 et Riv-3). Ces points ont préalablement été identifiés comme influencés principalement par les apports de type urbain. Il semble qu'en hautes eaux la rivière en aval du bassin soit légèrement diluée en Cl, l'influence des rejets urbains semblant alors proportionnellement moins importante.

3.5. VARIABILITE SPATIALE

Pour les eaux de rivières, les 3 points de prélèvement considérés permettent de suivre une évolution spatiale de la géochimie des eaux d'amont en aval sur le bassin. Le prélèvement du Saffimbec (Riv-1), point le plus en amont sur le bassin, a été identifié comme présentant clairement un contrôle de sa signature géochimique par des apports agricoles. Les points Riv-2 et Riv-3 correspondent à des prélèvements de la rivière Austreberthe en aval de Barentin et de la confluence avec le Saffimbec. D'amont en aval on observe globalement une augmentation des concentrations en chlorures conjointe avec une diminution des concentrations en nitrates (Illustration 16b) ; une diminution des rapports molaires NO_3/Na (Illustration 17) ; une augmentation de la signature isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Illustration 25c). L'identification des différentes sources d'éléments dissous sur le bassin proposée précédemment permet donc d'interpréter cette évolution progressive d'amont en aval comme une augmentation de la proportion d'éléments dissous provenant des apports urbains et une diminution de cette proportion provenant des apports agricoles. Les variabilités lithologiques ont également été démontrées comme un élément de contrôle sur les différences de composition géochimique des eaux sur le bassin. Ainsi la globale diminution du rapport Ca/Na et Sr/Na et l'augmentation de la signature isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ d'amont en aval pour les eaux de rivières pourraient traduire des apports d'eau ayant drainé différentes lithologies.

Deux points de prélèvement ont été considérés pour caractériser les eaux souterraines des alluvions (All-1 et 2). Le point All-2 présente des concentrations plus élevées en nitrates ($358\text{-}371 \mu\text{mol.l}^{-1}$) et chlorures ($573\text{-}622 \mu\text{mol.l}^{-1}$) que All-1 et une signature isotopique en B ($\delta^{11}\text{B}=15\text{‰}$) traduisant une contribution de B issu des rejets urbains contrairement à All-1 (Illustration 24b). Ce résultat peut s'expliquer par la situation du point All-2 en aval direct de la commune de Barentin contrairement à All-1 qui s'en trouve plus éloigné. Par ailleurs ces deux points présentent des signatures isotopiques en Sr différentes, 0.70795 pour All-1 et 0.70811 et 0.70814 pour All-2. Cette différence pourrait être liée à une différence de lithologie drainée entre les eaux souterraines prélevées en All-1 et All-2 (nature des alluvions) ou bien à la différence de signature des eaux qui alimentent les alluvions.

Les eaux souterraines de l'aquifère de la craie sont caractérisées par 6 sources (So-1 à 6) et 4 forages (FC-1, FC-2, FC-3 et FC-6). Les sources se répartissent suivant deux groupes : les sources en amont du bassin So-1 et So-2 ; les sources en aval du bassin

So-3 à 6. Les sources en amont ont été identifiées comme étant marquées par des apports agricoles significatifs. La source So-5 présente la signature isotopique en Sr la plus élevée parmi tous les échantillons analysés (Illustration 25c). Le Sr étant, dans le cas du bassin de l'Austreberthe, un traceur des lithologies drainées, cette source semble contraindre une lithologie du bassin (dépôts crayeux du Santonien et du Campanien). Cette source So-5 a aussi la particularité de présenter une augmentation significative de la teneur en NO_3 lors des hautes eaux, pouvant traduire des apports agricoles plus importants par lessivage des sols par exemple.

Les forages situés en amont du bassin points (FC-1 et FC-2) présentent des concentrations élevées en nitrates associées à des concentrations intermédiaires en chlorures (Illustration 16b) ; des rapports molaires NO_3/Na (Illustration 17) élevés. De plus le point FC-1 présente les concentrations en B les plus faibles et la signature isotopique en B la plus élevée (Illustration 24b). Ainsi ces points ont été identifiés comme fortement contrôlés par des apports agricoles, sans apport de type urbain. Le point FC-6 présente des concentrations intermédiaires en chlorures associées à des concentrations peu élevées en nitrates (Illustration 16b). Ainsi les eaux de l'aquifère de la Craie prélevées en ce point semblent contrôlées par des apports de type urbain. Ce point est cependant situé sur le plateau, hors contexte urbain. Une hypothèse envisageable serait un apport de rejets domestiques ponctuels, cette hypothèse demande cependant à être vérifiée. En aval du bassin le point FC-3 (AEP de Duclair) présente une signature isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus élevée (Illustration 25c) que celle de la source du même nom (So-3), la source et le forage ne drainant ainsi pas exactement le même compartiment de l'aquifère crayeux, bien que ces deux points présentent par ailleurs des teneurs identiques en Cl et NO_3 . Par ailleurs, FC-3 présente un rapport Ca/Na (Illustration 17) et une signature isotopique en Sr contrastée comparés à la rivière Austreberthe prélevée au droit du forage (Riv-3), ce qui suggère que l'infiltration des eaux de rivière vers la nappe aquifère de la Craie reste limitée.

L'évolution d'amont en aval de la géochimie des eaux de la rivière suit rigoureusement l'évolution observée pour les eaux souterraines de l'aquifère de la Craie : intégration d'éléments dissous provenant d'apports agricoles en amont et d'apports urbains en aval du bassin. Ce résultat suggère que l'alimentation des eaux de la rivière est fortement contrôlée par les eaux souterraines. Ainsi les eaux de la rivière Austreberthe prélevées en Riv-3 correspondraient à un mélange intégrateur de l'ensemble des eaux souterraines de la nappe de la Craie du bassin. La signature isotopique en Sr de Riv-3, présente une valeur intermédiaire (0.70798-0.70800) par rapport à toutes les eaux souterraines prélevées dans la Craie, ce qui vient appuyer cette interprétation. Le Sr ayant été identifié comme traceur des lithologies drainées.

4. Conclusion : couplage des outils géochimiques et de modélisation hydrologique pour l'étude des relations nappe-rivière

Ce partie a pour but de mettre en commun les résultats obtenus par les deux approches mises en œuvre dans le cadre de ce projet : (1) l'approche de modélisation hydrologique (pluie-débit et pluie-niveau) dont les résultats détaillés font l'objet d'un rapport BRGM (Arnaud, 2007) et (2) l'approche par géochimie et géochimie isotopique décrite dans le présent rapport.

4.1. CONTEXTE HYDROLOGIQUE DES CAMPAGNES DE PRELEVEMENT : RESULTATS DE LA MODELISATION

Les deux campagnes de prélèvement ont été menées respectivement du 9 au 10 novembre 2006 pour représenter une situation de basses eaux et du 9 au 11 mai 2007 pour une situation de hautes eaux, correspondant à la fin de période de recharge.

Le graphique de l'illustration 26 présente les évolutions des précipitations à la station de Boos, des niveaux piézométriques de l'aquifère crayeux à Blacqueville et des débits journaliers moyens de l'Austreberthe à Saint-Paër pour le cycle hydrologique en cours (de septembre 2006 à juin 2007).

En novembre 2006, correspondant à la première campagne de prélèvement, la situation hydrogéologique de l'aquifère crayeux correspondait à un état de basses eaux marqué, et la recharge hivernale n'avait toujours pas débuté sous les plateaux. Le piézomètre de Blacqueville indiquait alors un taux de remplissage de l'aquifère de 28 % pour un niveau piézométrique de 51 m NGF. Les précipitations cumulées sur le mois d'octobre 2006 à Boos ont été de 55 mm (moyenne mensuelle interannuelle de 75 mm) et de 6 mm sur la première décennie de novembre. Ce déficit pluviométrique n'a pas permis de générer de pluies efficaces (ruissellement + infiltration) significatives en fin d'automne. Une légère augmentation du débit de l'Austreberthe à Saint-Paër n'est, en effet, observée qu'à partir de la deuxième décennie de novembre. Cette augmentation de débit s'amplifie ensuite sur la troisième décennie de novembre et surtout sur la première décennie de décembre.

Lors de la première campagne de prélèvement, l'étiage était ainsi marqué pour la nappe comme pour le cours d'eau. Aussi, le modèle calcule une contribution des écoulements souterrains lents de 98 % pour le mois de novembre (part des ruissellements négligeable).

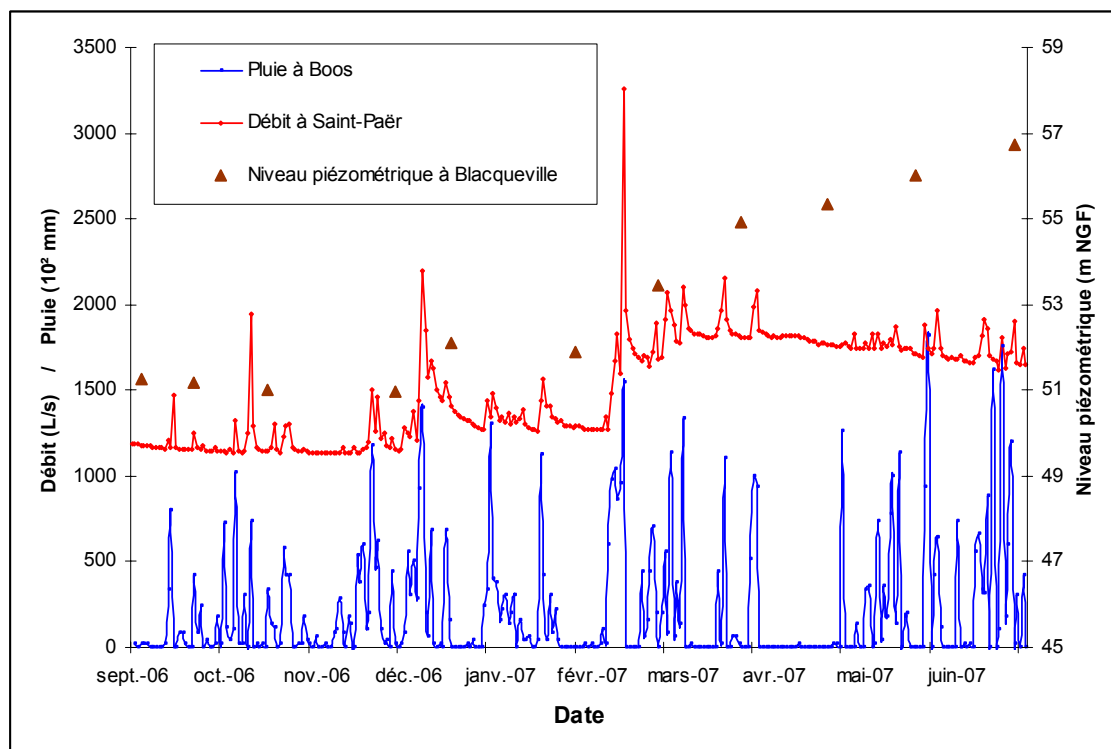


Illustration 26 : Evolution des paramètres hydro-climatiques pour le cycle hydrologique 2006-2007 (Arnaud, 2007).

Début mai 2007, correspondant à la seconde campagne de prélèvements, le piézomètre de Blacqueville indiquait un taux de remplissage de l'aquifère de 36 % avec un niveau de l'ordre de 56 m NGF (+ 5 m par rapport à novembre 2006). Sur le cycle hydrologique 2006-2007, la recharge de l'aquifère crayeux s'est étalée de décembre 2006 à juillet 2007 (Illustration 26). En revanche, en l'absence de précipitations sur le mois d'avril (excepté le 29 avril), l'Austreberthe avait déjà entamé sa décrue estivale. En définitive, le printemps 2007, exceptionnellement sec, a empêché tout ruissellement significatif sur le bassin de l'Austreberthe les semaines précédant la deuxième campagne de prélèvement, et le modèle calcule une contribution des écoulements souterrains lents de 96 %. L'ordre de grandeur reste donc identique à celui calculé pour novembre 2006 même si les conditions hydrologiques sont différentes (recharge de l'aquifère en cours et débit de l'Austreberthe supérieur).

Pour chacune des campagnes de prélèvements, les conditions hydrologiques sont reportées dans le tableau de l'illustration 27.

Campagne de prélèvements	Date	Piézométrie de l'aquifère crayeux à Blacqueville		Débit décadaire de l'Austreberthe à Saint-Paër (L/s)		Contribution des écoulements lents (%)
		NP (m NGF)	Taux de remplissage (%)	Observé	Simulé	
Basses eaux	9 au 10/11/06	51	28	1 155	1 052	98
Hautes eaux	9 au 11/05/07	56	36	1 779	1 286	96

Illustration 27 : Synthèse des données piézométriques et hydrologiques pour les deux campagnes de prélèvements

4.2. RESULTATS DE L'APPROCHE GEOCHIMIQUE REPLACES DANS LE CONTEXTE HYDROLOGIQUE

Les deux campagnes programmées pour être réalisées en période hydrologique à priori contrastées se révèlent correspondre à des situations hydrologiques relativement similaires. En effet, la campagne de nov-06 correspond bien à des basses eaux (niveau piézométrique, recharge non amorcée, déficit de précipitations en début d'automne). La campagne d'avril 2007 correspond bien à une situation de hauts niveaux piézométriques, cependant l'absence de précipitations sur le mois d'avril (excepté le 29 avril) conduit au début de la décrue estivale de l'Austreberthe.

La modélisation hydrologique a montré que pour les deux campagnes, la contribution des écoulements lents est supérieure à 95 %, ce qui traduit une alimentation quasi exclusive par les eaux souterraines. Le terme d'écoulement lent dans la modélisation Gardenia correspond plutôt aux écoulements matriciels au sens Darcy, par rapport aux écoulements rapides de type ruissellement de surface et/ou écoulement via les réseaux karstiques en charge. Les jours précédents les deux campagnes aucun événement pluvieux important n'a provoqué de ruissellement de surface ou de mise en charge significative des réseaux karstiques. Dans ce contexte hydrologique, les écoulements via les sources pérennes en bordure de rivière peuvent être assimilés à des écoulements lents au sens de la modélisation Gardenia. Ainsi, il n'y a pas d'écoulement rapide (de type conduit karstique en charge) pendant les deux périodes d'échantillonnage.

La modélisation Gardenia pluie-débit est une modélisation intégrée à l'échelle du bassin versant. Elle compare en effet les précipitations globales du bassin avec le débit de la rivière à l'exutoire de celui-ci. Dans le cas de l'Austreberthe, c'est la station de jaugeage de Saint-Paër, en aval du bassin qui a été considérée. Cette modélisation ne peut donc pas présager des variabilités spatiales dans l'alimentation de la rivière. Dans l'approche géochimique, le point le plus en aval de la rivière a été échantillonné à Duclair soit moins de 2 km en aval de la station de jaugeage. Entre ces deux points, il

n'y a pas de d'apports d'eau significatifs à la rivière (affluents ou grosses sources). Ces deux points peuvent donc être aisément comparés : la modélisation hydrologique pluie-débit identifie les eaux souterraines comme alimentation quasi exclusive de la rivière. L'approche géochimique montre que les eaux de l'Austreberthe en aval (Riv-3) présentent une signature intégratrice de l'ensemble des eaux et des éléments associés à l'échelle du bassin :

(1) Les traceurs des interactions eaux-roche (isotopes du Sr) montrent que la rivière en aval correspond à un mélange de toutes les eaux souterraines prélevées sur le bassin, traduisant les différentes lithologies drainées.

(2) Les traceurs des impacts anthropiques (nitrate, chlorure et bore) tracent une déconvolution spatiale des différentes pressions : des apports agricoles en amont du bassin (nitrates essentiellement + chlorure) et des rejets urbains dans la partie aval (Cl + B).

(3) L'approche géochimique permet d'aller plus loin en termes de connaissance de l'alimentation en eau et en éléments dissous de la rivière sur le bassin : les eaux de surface ont été prélevées en 3 points d'amont en aval du bassin. Il a été montré que l'évolution de la composition géochimique de ces eaux suit rigoureusement celle des eaux souterraines qui contribuent à l'écoulement de surface. Le pouvoir intégrateur de la rivière, bien qu'attendu, est clairement mis en évidence en reflétant par tronçon la diversité des apports dissous correspondant à la fois aux apports lithologiques (interaction eau-roche) et aux apports anthropiques (agricole et urbain). Ainsi, compte tenu des conditions hydrologiques lors des deux campagnes, absence de ruissellement de surface significatif, les eaux de surface refléteraient une alimentation quasi exclusive par les eaux souterraines tout au long de la rivière, comme l'indique les compositions chimiques de la rivière.

Par ailleurs, pour les deux campagnes, l'approche géochimique montre clairement le découplage de signature entre les eaux de surface et les eaux souterraines au niveau de Duclair. En effet, la rivière intègre par mélange tous les apports du bassin, ce qui n'est pas le cas des eaux souterraines à Duclair. Ce découplage de signature indique qu'il n'y a pas de réalimentation du forage de Duclair (FC-3) par les eaux de la rivière via les alluvions. On note aussi une nette différence entre la source de Duclair (So-3) et le forage (FC-3) ce qui montre que les réservoirs souterrains sollicités ne sont pas identiques.

Bibliographie

Arnaud, L. (2007) - Etude des relations nappe-rivière en Haute-Normandie – Modélisations GARDENIA. Rapport BRGM/RP-55813-FR, 55 p., 26 illus., 2 ann.

Amraoui, N., Golaz, C., Mardhel, V., Négrel, Ph., Petit, V., Pinault, J.L., Pointet, T., 2002. Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme. BRGM/RP-51827-FR report, 184 p.

Berner, E.K., Berner, R.A. (1987).- The Global water cycle. Geochemistry and environment - Prentice-Hall. 397 p.

Conrad, G., Jouel, J., Merlivat, L. et Puyoo, S. (1979) – La nappe de la Craie en Haute-Normandie (France) et ses relations avec les eaux superficielles. Apport des techniques isotopiques. Isotope Hydrology 1978, IAEA-SM-228/15, p. 265-287.

Equilbey, E. (2003) – BRGM – Pilote de l'inventaire historique régional Haute-Normandie des bétouilles, itinéraires souterrains des eaux (traçages) et des exutoires. Rapport BRGM/RP- 52423-FR.

Gaillardet, J., Dupre, B., Allegre, C.J. (1997) - Chemical and physical denudation in the Amazon river basin. Chemical Geology 142, 141-173.

Gaillardet, J., Dupre, B., Louvat, P. et al. (1999) - Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. Chemical Geology 159, 3-30.

Meybeck M. (1986) - Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. Sciences Géologiques Bulletin 39, 3-77.

Négrel, Ph., Petelet-Giraud, E., Doerfliger, N., Pointet, T. et Pennequin, D. (2003) - Apport des traçages isotopiques à la compréhension des inondations : le cas de la Somme. La Houille Blanche, 6, 104-111

Négrel, P., Petelet-Giraud, E. (2005).- Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France). Journal of Hydrology 305, 99-119.

Négrel, P., Allegre, C.J., Dupre, B. et al. (1993).- Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios in river water: The Congo case. Earth Planetary Science Letters 120, 59-76.

Petelet-Giraud, E., Négrel, Ph. et Widory, D. (2006) - Caractérisation des circulations au sein d'une nappe alluviale à l'aide des isotopes du strontium : champ captant de l'île du Chambon (Allier). La Houille Blanche, 1, 82-90.

Semhi, K., Clauer, N., Probst, J.L. (2000) - Strontium isotope compositions of river waters as records of lithology-dependent mass transfers: the Garonne River and its tributaries (SW France). *Chemical Geology* 168, 173-193.

Vitoria, L., Otero, N., Soler, A., et al. (2004) -Fertilizer characterization: isotopic data (N, S, O, C, and Sr). *Environment Science and Technology* 38, 3254-3262.

Widory, D., Kloppmann, W., Chery, L., et al. (2004).-Nitrate in groundwater: an isotopic multi-tracer approach. *Journal of Contaminant Hydrology* 72, 165-188.

PROVISOIRE



**Centre scientifique et technique
Service EAU**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34