



DOCUMENT PUBLIC

***Traçage isotopique des sources de nitrates dans les
eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)
Rapport final***

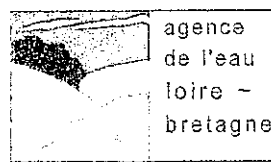
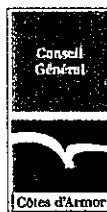
**Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 00P0LD06
Et des actions de recherche scientifique projet 01EAUD01**

**Octobre 2001
BRGM/RP-51091-FR**





VIVENDI
water



DOCUMENT PUBLIC

***Traçage isotopique des sources de nitrates dans les
eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)
Rapport final***

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 00P0LD06
Et des actions de recherche scientifique projet 01EAUD01

D. Widory, L. Chery, B. Mouglin, H. Talbo
avec la collaboration de
J. Bonnin, D. Plancard, H. Rochdi-Ghandour

Octobre 2001
BRGM/RP-51091-FR



*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Mots clés : Nitrates, traçage isotopique, azote, bore, hydrogéologie, Bretagne, pollution.

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

Widory D., Chery L., Mougin B., Talbo H., Bonnin J., Plancard D., Rochdi-Ghandour H., 2001 – Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines : cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor). Rapport BRGM/RP-51091-FR, 182 p., 28 fig., 6 tabl., 8 annexes.

© BRGM, 2001, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de l'existence d'une pollution nitratée sur le bassin versant de l'Arguenon, une étude environnementale préalable a été demandée au BRGM pour discerner l'origine des nitrates dans une eau ayant pu être contaminée par plusieurs sources. Cette étude bénéficie de plusieurs financements : un financement lié à l'activité de Service Public et aux actions de recherche scientifique du BRGM par le Ministère de la Recherche, un financement de la société COOPERL-HUNAUDAYE, avec la contribution du Conseil Régional de Bretagne, du Conseil Général des Côtes-d'Armor et de l'agence de l'eau Loire-Bretagne, un financement de la société ANJOU-RECHERCHE et un financement de la société AINF.

Elle s'inscrit dans une stratégie globale permettant à long terme de remonter à la source, et de mieux comprendre les phénomènes de transfert des pollutions nitratées vers les cours d'eau. C'est avec cet objectif que cette étude environnementale a été initiée par COOPERL-HUNAUDAYE. La zone d'étude est constituée par deux petits sous-bassins (Les Loges, La Noë Ronde) du bassin versant de l'Arguenon considéré comme sensible (réserve d'eau potable pour les Côtes-d'Armor), situés à S^t Igneuc (commune de Jugon les Lacs). Les travaux ont été réalisés en concertation et coopération étroite entre l'AINF, COOPERL-HUNAUDAYE et le BRGM.

Une première étude (rapport BRGM RP-40911-FR) avait permis d'initier la caractérisation des différentes sources potentielles et de définir l'état initial du bassin. La recherche des sources de contamination peut être réalisée à l'aide des isotopes de l'azote (rapport isotopique ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)) mais aussi du bore ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$) et du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Cette étude venait en appui à l'étude classique incluant l'étude hydrogéologique, les caractéristiques géologiques du milieu, la notion de vulnérabilité, et la caractérisation chimique des eaux, souterraines et superficielles.

Elle démontrait l'utilité des isotopes de l'azote et du bore comme traceurs permettant de contraindre des sources de contamination par les nitrates. Les différentes sources potentielles nitratées naturelles (minéralisation du sol) et anthropiques (lagunage, lisiers de porcs, fientes de volailles, fumiers de bovins, engrais, effluents domestiques diffus) ont été caractérisées par leur composition isotopique et leur composition chimique associée.

Cette étude se poursuit par une deuxième phase basée sur un suivi temporel sur une dizaine de points du bassin d'étude. Celle-ci a pour objectif d'observer les variations physico-chimiques sur une année hydrologique. Et ainsi de caractériser l'origine de celles-ci (temps de transfert, ruissellement plus important, influence des conditions d'écoulement et d'épandage), ainsi que l'impact de l'apport de chacune des sources, et d'essayer de quantifier les différents apports.

Cette deuxième phase s'articule autour de trois axes principaux :

1. Une étude hydrogéologique classique, renforcée par l'utilisation d'un modèle de simulation des écoulements (Gardenia). Ce modèle permet d'évaluer la participation du ruissellement et des écoulements souterrains à l'écoulement global dans les 2 sous-bassins étudiés. La modélisation du bassin versant est réalisée avec un modèle à deux réservoirs profonds pour simuler les deux régimes d'écoulement existant dans les socles bretons : un écoulement dans les roches altérées et un écoulement plus profond dans le milieu fissuré. La part de l'écoulement souterrain dans ces deux sous-bassins est non négligeable et l'influence de l'écoulement rapide (présence importante de parcelles drainées) explique les fortes teneurs en nitrates rencontrées dans le site d'étude.
2. La caractérisation chimique et isotopique des sources potentielles de nitrates, c'est à dire les différentes déjections animales (bovins, volailles et porcins), le lagunage et les engrais. Il s'agit de pouvoir établir des signatures propres à chacune de ces sources, condition sine qua non sans laquelle aucun traçage de sources n'est possible (i.e. si les sources de pollution ont des signatures similaires, il est impossible de les discriminer). Les résultats montrent que **si les pôles déjections de volailles et bovins sont similaires, les pôles lisiers de porcs, lagunage et engrais sont quant à eux bien distincts et caractéristiques, notamment au niveau isotopique ($\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{11}\text{B}$).**
3. Le calcul des compositions isotopiques en azote et en bore et l'identification des sources de pollution en nitrates pour chaque point de prélèvement. Les données chimiques et isotopiques mettent en évidence **une composante dénitrification naturelle** dans les eaux souterraines, qui a un **effet tampon et atténue les apports de nitrates aux rivières**. Malgré ce phénomène se traduisant par un changement du comportement isotopique de l'azote, il est possible d'approcher qualitativement les sources de pollution en nitrates pour chaque échantillon. Dans le cas du bore, le raisonnement est simplifié par le fait qu'il est insensible à la dénitrification et n'est contrôlé que par les processus de mélange. Ceci permet un traçage assez précis des sources de nitrates pour les différents échantillons.

La modélisation Gardenia du site d'étude met en évidence qu'il est effectivement nécessaire de distinguer 2 réservoirs pour expliquer les écoulements dans le bassin versant de l'Arguenon : l'eau superficielle (principalement liée à un écoulement rapide par ruissellement et une eau plus profonde. Les résultats de la modélisation montre que **la lame d'eau écoulée à la station hydrométrique de l'Arguenon à Jugon-les-Lacs est alimentée par les eaux souterraines à hauteur de 42,5 %**. L'Arguenon présente des étiages peu soutenus liés au fait que le bassin versant de l'Arguenon est soumis aux phénomènes de ruissellement. Ces phénomènes de ruissellement sont justifiés par la présence importante de parcelles drainées favorisant ces écoulements rapides sub-superficiels. Ces conclusions témoignent de l'interdépendance entre l'eau souterraine et les écoulements superficiels dans l'acquisition de la minéralisation des eaux aux exutoires du bassin versant.

L'utilisation des outils isotopiques montre que pour la grande majorité des points étudiés, l'origine de la pollution azotée peut être expliquée par un **mélange binaire dominant** entre le **pôle de « référence » (eau souterraine présente dans l'aquifère granitique)** et le **pôle lisiers de porcs**. Ces échantillons comprennent les forages et puits PCA2, FVE1, PVE2, FCA1 (à l'exception peut être d'un échantillon). L'origine des nitrates à l'exutoire du sous-bassin des Loges, bien que s'expliquant par un mélange avec les déjections animales, présente une forte composante « source lagunage ». La source de nitrates dans le puits PPE2 semble évoluer au cours du cycle hydrologique, d'un pôle de pollution majoritaire déjections animales (fientes de volailles ?), vers une influence accrue du pôle lagunage (origine domestique à proximité et/ou influence de S^t Igneuc), pour revenir à un pôle déjections animales prépondérant.

Le suivi du bassin versant sur un cycle hydrologique, mis à part les exceptions citées précédemment, montre que malgré des fluctuations parfois importantes des concentrations en nitrates, les sources de pollution sont relativement constantes au cours du temps. Les teneurs en nitrates du réservoir souterrain (qui regroupe l'aquifère supérieur dans la zone arénisée et la partie plus profonde fracturée) seraient proches en moyenne de 30 à 40 mg/l, ce qui confirme l'importance de la pression anthropique sur ces bassins.).

L'existence confirmée de processus de dénitrification au sein des eaux plus profondes permet d'atténuer les apports de nitrates aux rivières et sont des facteurs limitant d'une plus forte pollution.

Plus globalement, il est possible d'envisager à terme d'étendre cette application dans le cadre de l'estimation de la vulnérabilité des points d'eau destinés à la consommation humaine, et d'aider à la mise en place de périmètres de protection, en mettant en évidence l'importance relative des sources potentielles de pollution existant sur un bassin versant.

Sommaire

INTRODUCTION.....	13
1. RAPPEL DES OBJECTIFS.....	15
PRÉSENTATION DU SITE.....	17
1.1. LOCALISATION	17
1.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE.....	18
1.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE.....	20
1.3.1. Piézométrie.....	20
1.3.2. Evaluation des débits souterrains - Ratios ruissellement- infiltration.....	22
2. MÉTHODES D'INVESTIGATION	35
2.1. ANALYSES CHIMIQUES	35
2.2. TRACEURS ISOTOPIQUES.....	35
3. CHOIX DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT	39
4. RÉSULTATS	41
5. CARACTÉRISATION DES SOURCES DE POLLUTION.....	43
5.1. LES ENGRAIS.....	43
5.2. LE LAGUNAGE	45
5.3. LES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉJECTIONS ANIMALES.....	46
5.3.1. Lisiers de porcs.....	46
5.3.2. Fumiers de bovins.....	47
5.3.3. Fientes de volaille.....	49
5.3.4. Synthèse sur les déjections animales.....	50
6. CARACTÉRISATION DU PÔLE NON POLLUÉ.....	53
7. CARACTÉRISATION DE L'ÉTAT INITIAL DES BASSINS VERSANTS..	55
7.1. CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE	55
7.2. CARACTÉRISATION ISOTOPIQUE.....	57

7.3. INTERPRÉTATIONS	58
8. SUIVI DU BASSIN VERSANT SUR UN CYCLE HYDROLOGIQUE.....	61
8.1. SUIVI CHIMIQUE HEBDOMADAIRE ET MENSUEL	61
8.2. TRAÇAGE ISOTOPIQUE DES SOURCES DE NITRATES	66
8.2.1. <i>Apport des isotopes du strontium</i>	66
8.2.2. <i>Apport des isotopes de l'azote.....</i>	68
8.2.3. <i>Apport des isotopes du bore.....</i>	72
9. CONCLUSIONS & PERSPECTIVES	79
RÉFÉRENCES.....	83

Liste des annexes

- Ann. 1 - Méthodes analytiques des différents laboratoires d'analyse.
- Ann. 2 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques.
- Ann. 3 - Résultats du suivi hydrologique des points d'eau.
- Ann. 4 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques des sources de pollution en nitrates.
- Ann. 5 - Dispositifs expérimentaux de prélèvements sur les sources de nitrates (COOPERL HUNAUDAYE).
- Ann. 6 - Historique des épandages. Campagne culturale 2000.
- Ann. 7 - Débits journaliers et mensuels de l'Arguenon. à la station de Jugon-les-Lacs
Données Banque-Hydro 1999-2001.
- Ann. 8 - Données Météo France de précipitations. Station Trémeur (22).1999-2000.

Liste des illustrations

FIGURES

- Figure 1. Carte de présentation du site d'étude.
- Figure 2. Carte géologique schématique du site d'étude
- Figure 3. Carte piézométrique du site d'étude
- Figure 4 : Modèle Gardénia et cycle de l'eau
- Figure 5 : Modèle Gardénia et organisation des réservoirs
- Figure 6 : Schéma du cycle de l'eau
- Figure 7 : Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour l'Arguenon.
- Figure 8 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Arguenon. Calage des paramètres (1995-1996)
- Figure 9 : Modélisation Gardénia. Débits mesurés et calculés du bassin de l'Arguenon (1995-2000)
- Figure 10 : Bassin de l'Arguenon - Débits annuels rapides et souterrains (1996-2000)
- Figure 11 : Bassin de l'Arguenon - Débits mensuels moyens interannuels (1996-2000)
- Figure 12. Gamme de compositions isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{11}\text{B}$ des engrais.
- Figure 13. Gamme de compositions isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{11}\text{B}$ du lagunage.
- Figure 14. Gamme de compositions isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{11}\text{B}$ des différents types de déjections animales : volailles, bovins et porcs.
- Figure 15. Gammes de compositions isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{11}\text{B}$ de la minéralisation naturelle du sol.
- Figure 16. Diagramme de Piper de l'état initial
- Figure 17. Influence du mélange et de la dénitrification naturelle sur la composition isotopique de l'azote des nitrates.
- Figure 18. Évolution des concentrations en nitrates, pluviométrie au cours d'un cycle hydrologique
- Figure 19 . Relations précipitations, concentrations en nitrates et débit à l'exutoire des Loges.

Figure 20 . Relations précipitations, concentrations en nitrates et débit à l'exutoire de la Noë Ronde.

Figure 21. Relations calcium - sulfates dans les eaux des bassins versants étudiés.

Figure 22. Relations chlorure- sodium dans les eaux étudiées.

Figure 23. Relations $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et concentration en strontium.

Figure 24. Relations nitrates – fer total dans le bassin versant.

Figure 25. Variations de la composition isotopique en azote en fonction du logarithme de la concentration en nitrates à l' échelle du bassin versant.

Figure 26. Relations $\delta^{15}\text{N}$ en fonction de la concentration en nitrates.

Figure 27. Relations $\delta^{11}\text{B} - 1/\text{Sr}$ pour l'ensemble des échantillons.

Figure 28. Gamme de compositions isotopiques en bore dans les sources de pollution pour chaque point.

TABLEAUX

Tableau 1 : Bassin de l'Arguenon - Paramètres de la modélisation Gardénia

Tableau 2 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Arguenon - Période 1995-2000

Tableau 3 : Nature et localisation des points de prélèvement.

Tableau 4 : Concentrations en nitrates de l'état initial des bassins versants

Tableau 5 : Caractérisation isotopique de l'état initial.

Tableau 6 : Compositions isotopiques des pôles de pollution en bore ($\delta^{11}\text{B}_p$).

Introduction

Dans le cadre du traçage des pollutions nitratées diffuses sur le bassin versant de l'Arguenon, une étude environnementale préalable a été engagée pour discerner l'origine des nitrates et évaluer l'importance relative des diverses sources ayant pu contaminer l'eau.

Cette étude bénéficie de plusieurs financements : un financement lié à l'activité de Service Public et aux actions de recherche scientifique du BRGM par le Ministère de la Recherche, un financement de la société COOPERL-HUNAUDAYE, avec la contribution du Conseil Régional de Bretagne, du Conseil Général des Côtes-d'Armor et de l'agence de l'eau Loire-Bretagne, un financement de la société ANJOU-RECHERCHE et un financement de la société AINF.

Ce partenariat doit permettre une collaboration étroite sur le projet et la participation de chacun aux réflexions menées tout au long de l'étude.

Depuis les années 50, des pratiques agricoles de plus en plus performantes (fertilisation, travail du sol, ...) se sont accompagnées de pertes en nitrates sous la zone racinaire. Ces flux de nitrates sont relativement modestes comparés aux stocks mis en œuvre : nitrates des engrais, nitrates provenant de l'oxydation des matières organiques labiles du sol (fuites du cycle interne de l'azote), mais suffisants pour s'exprimer par des concentrations en nitrate élevées dans les eaux de lessivage puis dans les eaux souterraines, souvent proches ou supérieures à la concentration maximale admissible pour l'usage AEP (50 mg $\text{NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$). La contamination des eaux souterraines par les nitrates est donc devenue l'une des préoccupations majeures des gestionnaires de la qualité de l'eau. Sa maîtrise a déjà fait l'objet d'une directive européenne (EC Directive 91/976/EEC), ainsi que de nombreuses actions sur le territoire français : maîtrise des pollutions d'azote d'origine agricole (PMPOA), notamment dans les exploitations agricoles : attribution de labels Ferti-mieux, ou encore programme d'action contre les pollutions par les produits phytosanitaires d'origine agricole.

Du fait de la forte concentration d'élevages industriels (bovins, porcs, volailles) présents en Bretagne et notamment en Côtes-d'Armor, cette région se retrouve confrontée à de graves difficultés de maîtrise des concentrations de nitrates dans les eaux souterraines. Il apparaît donc vital de pouvoir contraindre les apports de nitrates dans les nappes et a fortiori de pouvoir déterminer leurs sources en cas de mesures anormalement élevées.

L'identification des sources de contamination peut être réalisée à l'aide de l'utilisation des isotopes stables (dans le cas présent du strontium, de l'azote puis du bore). Cette étude vient en appui à l'étude classique incluant l'étude hydrogéologique, les caractéristiques géologiques du milieu, la notion de vulnérabilité, et la caractérisation chimique des eaux, souterraines et superficielles.

Les résultats attendus de cette étude doivent permettre :

- d'apprécier à partir d'un site expérimental l'intérêt de l'apport de l'hydrogéochimie isotopique pour la connaissance des origines des pollutions azotées sur un bassin versant,
- d'acquérir les premiers résultats concernant les concentrations en nitrates dans l'eau en discernant les différentes origines, non pas sur la base d'un flux théorique reposant sur la connaissance de l'activité économique, mais sur la base d'analyses permettant l'identification de chacune des sources contribuant à la pollution globale,
- d'étendre cette application de traceurs dans le cadre de l'estimation de la vulnérabilité des points d'eau destinés à la consommation humaine, et d'aider à la mise en place de périmètres et des mesures de protection, en mettant en évidence les origines effectives des pollutions.

Cette étude comporte 2 phases :

- une première phase de caractérisation des différentes sources potentielles de nitrates par analyse de leur composition chimique et isotopique, de caractérisation géologique et hydrogéologique, et de définition de l'état initial en différents points d'eau du bassin,
- une deuxième phase de suivi dans le temps de la composition des points d'eau sélectionnés par les travaux de la phase 1, afin d'observer les variations sur un cycle hydrologique et de préciser ainsi le poids et les contributions de chaque source à la dégradation du milieu récepteur.

La première phase a fait l'objet d'un premier rapport d'étape (rapport BRGM RP-40911-FR).

Ce rapport présente les résultats de la phase 2.

Après un rappel des objectifs globaux de l'étude, une présentation du site d'étude est proposée en définissant les contraintes d'écoulement au sein du bassin et notamment la mise en évidence de l'importante part du réservoir souterrain, dans la contribution aux exutoires.

Après une rapide présentation des méthodes d'investigation et une identification des points suivis avec les résultats obtenus sur l'ensemble des 2 phases de l'étude, chacune des sources potentielles de nitrates est analysée et identifiée. L'état initial est caractérisé et présenté, avant de suivre l'évolution temporelle au cours de l'année hydrologique d'observation (année 2000). Les résultats obtenus doivent permettre de valider les méthodes utilisées par rapport aux objectifs initiaux et de caractériser la ressource du bassin en termes d'origine de l'eau, d'origine des sels dissous et de cheminement des eaux dans le bassin.

1. Rappel des objectifs

La pollution azotée a des origines diverses dont les impacts respectifs sur la qualité de l'eau des bassins versants nécessitent d'être évalués pour mieux cibler, bassin par bassin, les actions à mettre en œuvre prioritairement. L'utilisation des isotopes stables en tant que traceurs environnementaux est une voie en plein essor qui doit permettre de discerner dans une qualité d'eau globale les principales causes des concentrations élevées en nitrates.

Le site retenu pour cette étude de Saint Igneuc (Jugon les Lacs – 22) concentre sur moins de 2 km² :

- ↳ Un nombre conséquent de points d'eau (puits, forages, étangs et ruisseaux) permettant une étude et des caractérisations précises.
- ↳ Une présence agricole de par les activités liées à l'élevage intensif avec épandages de quantités non négligeables de lisiers de porcs, de fumier de bovins et de fientes de volailles, ainsi que des apports complémentaires d'engrais de synthèse.
- ↳ Un traitement par lagunage des effluents domestiques du bourg.

L'étude qui a été réalisée a compris 2 phases distinctes et successives.

Une première phase (Chery *et al.*, 2000) avait pour objectif de tester la faisabilité de l'utilisation des outils isotopiques (principalement azote et bore) comme traceurs de sources de nitrates, dans le cas précis du sous-bassin de l'Arguenon. Dans un premier temps, une étude systématique des compositions chimiques et isotopiques de l'ensemble des sources potentielles de pollution, a permis de poser de fortes contraintes quant à la faisabilité de l'étude (i.e. discrimination possible des différentes sources par des signatures isotopiques caractéristiques pour chacune d'elles).

Dans un deuxième temps, la comparaison avec les valeurs mesurées sur les prélèvements des différents points d'eau ont permis d'avoir une première estimation des sources de nitrates mises en cause. L'ensemble de cette phase, et notamment la sélection des points de prélèvement s'est appuyée sur l'examen des conditions géologiques et hydrogéologiques locales, ainsi que sur la connaissance détaillée du contexte agricole (type, historique et localisation des cultures et des périodes d'épandages) et sur l'accueil favorable d'une majorité des exploitants.

Une deuxième phase, dont le présent rapport rend compte, a pour objectif une discrimination plus fine des sources de pollution impliquées pour chacun des points d'eau, ainsi qu'une attention toute particulière au phénomène tampon de dénitrification naturelle.

L'utilisation des isotopes est à nouveau appliquée comme traceurs en s'intéressant aux apports des isotopes du strontium, de l'azote et du bore. De plus, un suivi hydrologique réalisé sur un an doit permettre d'observer les éventuelles variations des apports en fonction des pratiques culturales et de préciser de façon quantitative ou semi-

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

quantitative l'impact de chaque source, ainsi que les modes de transfert des pollutions qui en sont issues.

Parallèlement à cette caractérisation, un modèle de simulation des écoulements (Gardenia) sera utilisé afin d'évaluer la participation du ruissellement et des écoulements souterrains à l'écoulement global dans les 2 sous-bassins étudiés.

Présentation du site

1.1. LOCALISATION

Le site étudié se situe dans la commune de Jugon les Lacs, et plus précisément à Saint Igneuc en rive gauche de l'Arguenon (Fig.1).



Figure 1. Carte de présentation du site d'étude

2 petits sous-bassins versants contigus coexistent :

- ↗ Le bassin de la Noë Ronde (33 ha de superficie). Son exutoire est un ruisseau temporaire alimenté notamment par les drainages agricoles. Il traverse un étang artificiel mis en place à son tiers aval.
- ↗ Le bassin des Loges (125 ha). Son exutoire est un ruisseau très encaissé, qui serait pérenne, alimenté pour partie par le lagunage de Saint Igneuc.

Le site est couvert par 2 cartes au $1/50000$: la feuille Lamballe au nord (n° BSS 244, huitièmes 6 et 7) et la feuille Broons au sud (n° BSS 280, huitièmes 2 et 3). Les coupures de l'IGN correspondantes sont 916 ET au nord et 917(O et E) au sud.

1.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La carte géologique au $1/80000$ (feuille Dinan n°60) distingue des granulites au sud et des granulites feuilletées au nord (Fig. 2). La limite entre ces 2 formations de direction W.S.W.-E.N.E. coupe en 2 parties égales le bassin des Loges. Elle est marquée par une mince bande d'amphibolites cartographiée le long du flanc nord du thalweg.

Des investigations complémentaires ont permis de préciser la nature des roches et l'emplacement de la limite lithologique. Si la partie nord du site est bien constituée de granites à tendance gneissique, ce sont des micaschistes qui constituent le substratum de la zone sud.

Ce secteur est situé sur une limite géologique importante matérialisée par un thalweg étroit en contrebas de la Ville Hèle. Il s'agit de l'accident de Cancale, cisaillement senestre inclus dans le domaine de Saint Malo pendant l'orogénèse Cadomienne. Cet accident implique des méta-sédiments (micaschistes à biotite, muscovite et feldspath) du Briovérien. Sa direction N60°E se retrouve au sud des granitoïdes plus ou moins gneissique du nord. Cette limite lithologique est soulignée par un filon d'amphibolites massives très dur, discontinu, compartimenté par des fractures transverses N105 à N105°E sur lesquelles sont implantées des sources captées à débit pérenne même en période de sécheresse.

Ces granitoïdes sont des roches quartzo-feldspathiques à biotites abondantes et à nombreuses enclaves surmicacées. Le grain est relativement grossier. Elles sont peu arénisées sur les interfluves et parfois sur les versants. Les micaschistes sont peu arénisés et traversés par des filons de quartz et pegmatites sans orientation préférentielle.

Dans le secteur, les affleurements sont rares. Des venues d'eau ont été observées sur des fractures N60°E en bordure de l'Arguenon alors que la fracturation N160°E paraissait sèche.

Présentation du site

1.1. LOCALISATION

Le site étudié se situe dans la commune de Jugon les Lacs, et plus précisément à Saint Ignec en rive gauche de l'Arguenon (Fig.1).



Figure 1. Carte de présentation du site d'étude

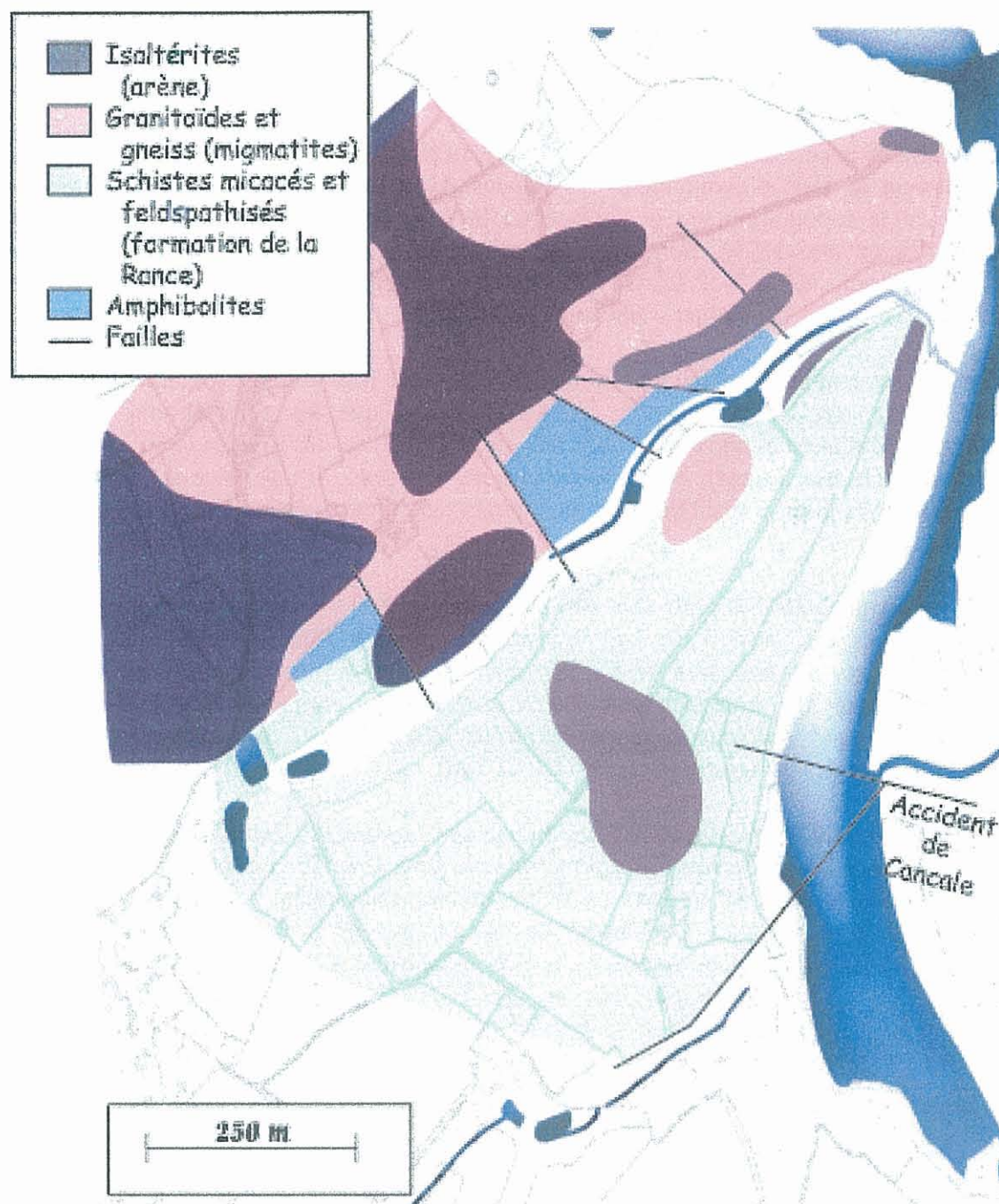


Figure 2. Carte géologique schématique du site d'étude

1.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

1.3.1. Piézométrie

La piézométrie permet de caractériser le contexte hydrologique des 2 bassins versants et notamment le sens d'écoulement des nappes. Une carte piézométrique schématique (carte de la topographie de la surface de la nappe) est reportée figure 3 (mesures effectuées en mai 1999). Sont aussi reportées sur la même figure les limites des 2 bassins versants de la Noë Ronde et des Loges. La carte ne prend en compte que les points d'eau ayant fait l'objet d'une analyse (cf. § 5).

Les courbes isopièzes indiquent de manière claire le rôle drainant des thalwegs de la Noë Ronde, des Loges et de la Ville Hèle, ainsi que les déformations dues aux pompages (rabattements) réalisés dans des puits (PPE2) ou des forages (FVE2 à la Porte Michel, FJH1 aux Loges). Nous pouvons noter l'absence d'influence du forage de la Noë Ronde (la pompe ayant été momentanément en panne, il était à l'arrêt depuis 2 ou 3 semaines).

De manière générale, les puits sont peu profonds (1 à 8.5 m). La surface de la nappe est très proche du sol : entre 0.5 et 1 m de profondeur sous le plateau, entre 0.1 et 0.5 m de profondeur sur les versants et à l'approche des bas-fonds (dans les ouvrages ne débordant pas). Les quelques puits où le niveau de la nappe est à plus de 1 m de profondeur, sont soit des ouvrages exploités (PPE2 ; 1.33 m), soit des ouvrages influencés par des forages proches (PVE1 ; 1.2 m).

Les forages régulièrement exploités répondent aux besoins des exploitations agricoles. 6 ouvrages sont recensés sur ou à proximité du site d'étude. Leurs profondeurs sont comprises entre 50 et 80 m, avec de faibles débits, témoignant d'une composante eau souterraine peu marquée. La plupart de ces forages ne permettent pas d'isoler les niveaux aquifères, supérieur dans les altérites, et inférieur dans la roche saine.

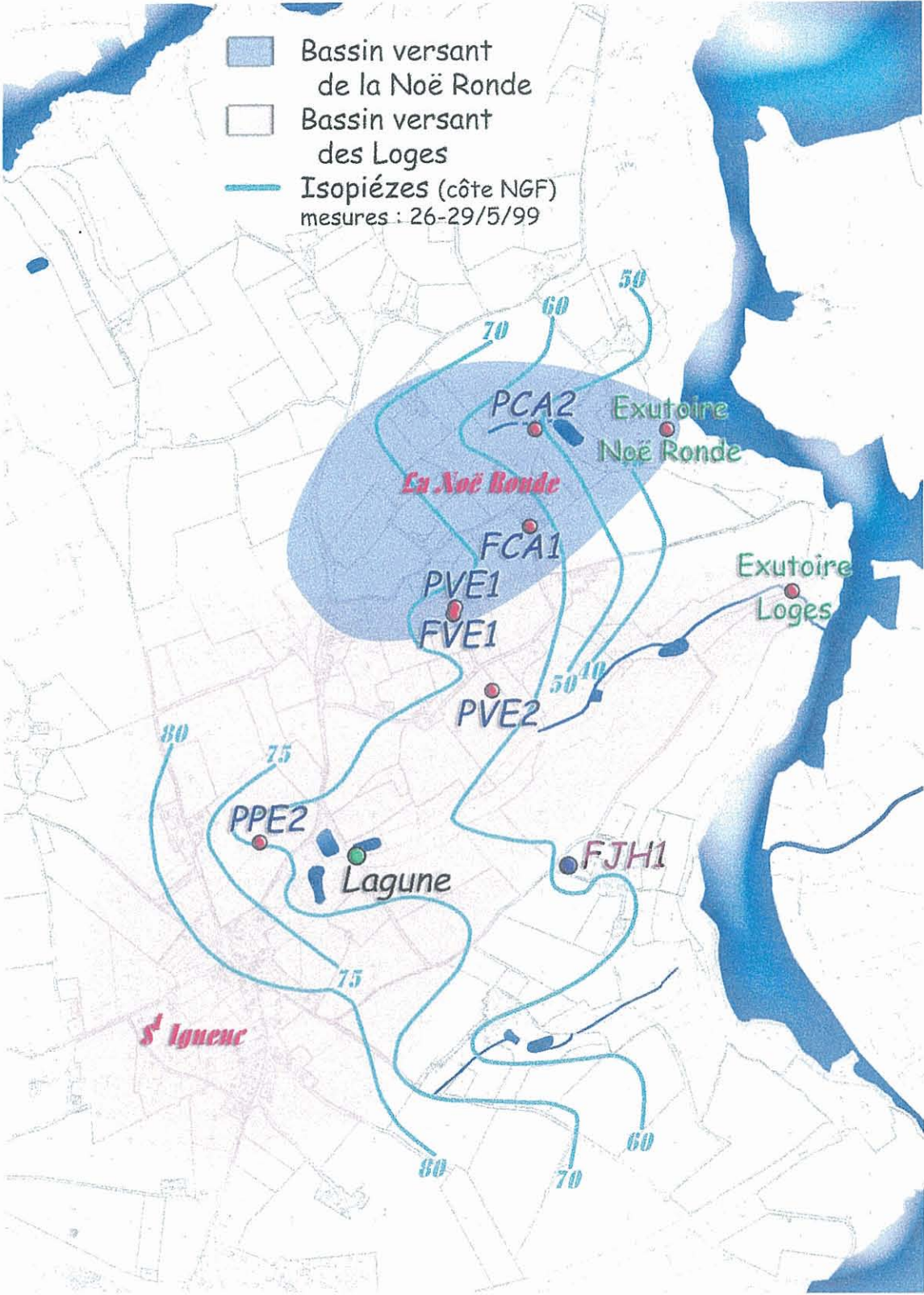


Figure 3. Carte piézométrique du site d'étude

1.3.2. Evaluation des débits souterrains - Ratios ruissellement-infiltration

Une modélisation des écoulements mesurés dans l'Arguenon à la station hydrométrique de Jugon-Les-Lacs a été effectuée avec le logiciel Gardénia, développé par le BRGM, afin d'évaluer la participation du ruissellement et des écoulements souterrains à l'écoulement global.

La modélisation du bassin versant a été réalisée avec un modèle à deux réservoirs profonds pour simuler les deux régimes d'écoulement existant dans les socles bretons : un écoulement dans les roches altérées et un écoulement plus profond dans le milieu fissuré.

Principe de la modélisation Gardénia

Le débit qui s'écoule dans une rivière est à tout moment la résultante de deux composantes essentielles (figure 4) :

- l'écoulement de surface qui totalise :
 - le ruissellement proprement dit,
 - les écoulements « hypodermiques » (écoulements retardés),
 - la pluviométrie sur les surfaces d'eau libre,
- et l'écoulement souterrain.

Gardénia est un logiciel de prévision hydrologique. Il utilise un modèle global sous forme de réservoirs souterrains (figure 5). A partir de chroniques connues de pluies, de débits et d'évapotranspiration potentielle (ETP) sur un bassin versant, il calcule des paramètres caractérisant les réservoirs, paramètres qui permettront ensuite de simuler le débit à partir des données de pluie et d'ETP seulement.

Gardénia est régi par le principe « fonction production - fonction transfert » (figure 5). La fonction « production » détermine quelle quantité d'eau sera apportée au modèle et quelle quantité d'eau sera évaporée ou s'infiltrera dans les horizons inférieurs pour ressortir « plus tard ». Le réservoir superficiel est au cœur de cette fonction « production ». Il correspond à la partie du sol dans laquelle l'évapotranspiration s'effectue. La hauteur dans le réservoir superficiel RU, correspond à l'eau restante lorsque la pluie s'est infiltrée dans le sol alors que l'évapotranspiration a eu lieu. Si l'évapotranspiration est plus importante que la pluie infiltrée, le niveau dans le réservoir superficiel diminue. De plus, le comportement de ce réservoir est régi par le seuil RUMAX, valeur de rétention. Si la hauteur dans le réservoir, RU, est supérieure à ce seuil, l'excédent ALIMH s'écoule dans le réservoir intermédiaire.

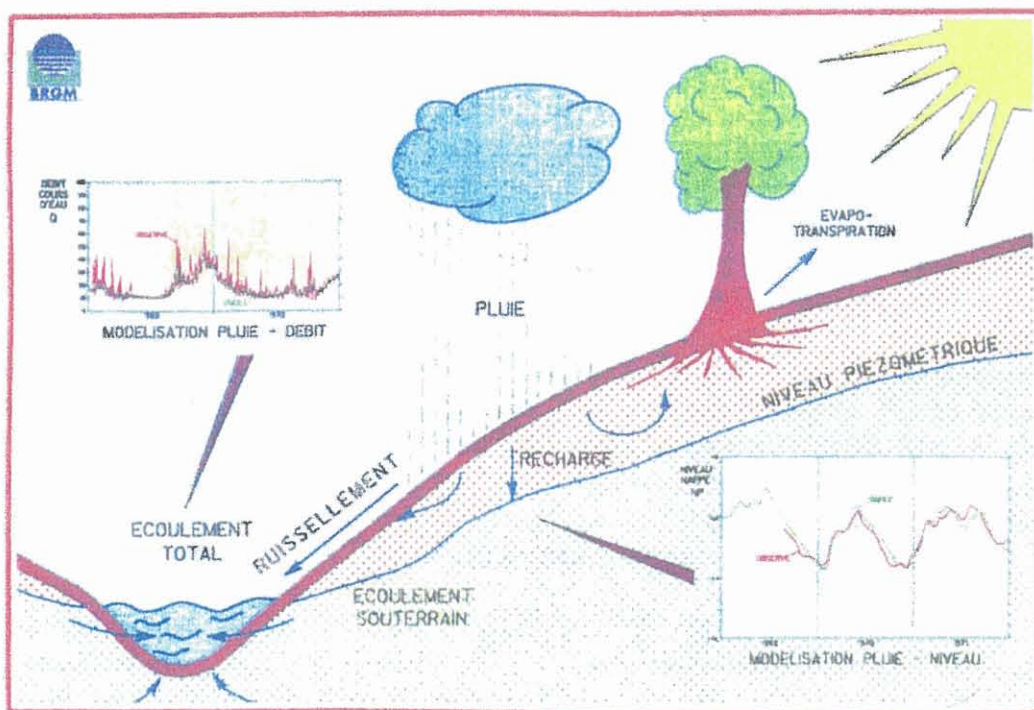


Figure 4 : Modèle Gardénia et cycle de l'eau

La fonction « transfert » est composée du réservoir intermédiaire et du réservoir souterrain (il y a possibilité d'ajouter un deuxième réservoir souterrain, plus profond). Le réservoir intermédiaire est caractérisé par deux écoulements en sortie : l'écoulement extérieur sous forme de « débit retardé » QH, et la percolation vers le réservoir souterrain sous forme de vidange exponentielle ALIMG. Ces deux écoulements sont liés, le « débit retardé » étant favorisé lorsque la hauteur H dans le réservoir est grande, et inversement. Le « débit retardé » dépend du paramètre RUIPER qui est la hauteur H pour laquelle la percolation et l'écoulement sont égaux. Pour sa part, le réservoir souterrain correspond à l'aquifère. Son écoulement en sortie QG1 suit aussi une loi de vidange exponentielle.

Les équations régissant les différents réservoirs souterrains sont les suivantes :

Réservoir superficiel :	$ALIMH = RU - RUMAX$
Réservoir intermédiaire :	$ALIMG = H \cdot dt / THG$ (dt = pas de temps)
	$QH = H \cdot dt / (THG \cdot RUIPER / H)$
Réservoir souterrain :	$QG1 = G1 dt / TG1$

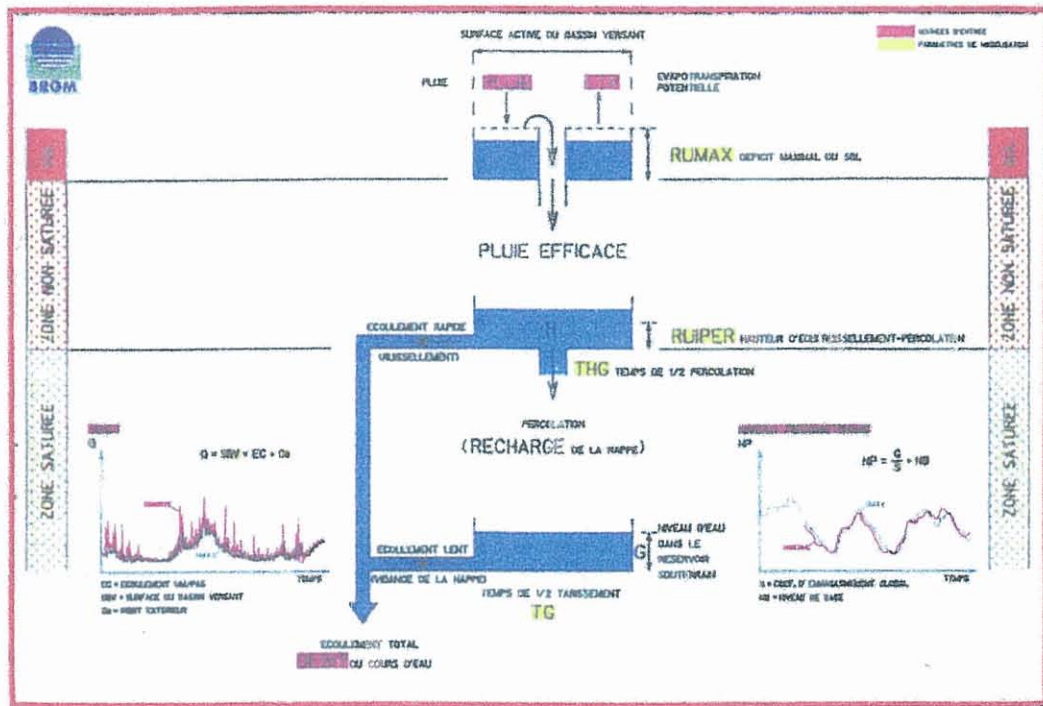


Figure 5 : Modèle Gardénia et organisation des réservoirs

Gardénia nécessite l'utilisation de chroniques de pluies, débits et d'ETP sur une longue période (typiquement dix ans), afin de connaître le comportement du bassin sur chaque type d'année (pluvieuse, moyenne ou sèche). Gardénia effectue d'abord un calage des paramètres hydrologiques caractérisant les réservoirs souterrains sur quelques années (souvent deux années suffisent), en utilisant les données de pluie, d'ETP et de débits. Il utilise ensuite ces paramètres pour simuler les débits cette fois-ci simplement à partir des données de pluies et d'ETP. Il compare les simulations de débits avec la chronique des débits mesurés et fournit alors la corrélation entre les deux séries de valeurs. Une bonne corrélation signifie que les paramètres sont bien calés et fiables.

La méthode d'optimisation est une adaptation de l'algorithme non linéaire de Rosembrock. Il s'agit de minimiser une fonction critère F en faisant varier successivement p paramètres. Une bonne corrélation signifie que les paramètres sont bien calés et fiables. Une fois le calage effectué, les paramètres hydrologiques obtenus donnent une bonne idée de la réalité du comportement des réservoirs du bassin versant, et notamment des temps de transfert.

Après calage des paramètres, Gardénia fournit les valeurs de pluie efficace sur le bassin versant, les débits de sortie des différents réservoirs, ce qui permet de connaître la répartition entre l'eau souterraine et l'eau de surface, ainsi que les constantes de tarissement des réservoirs.

Données disponibles

Données hydrométriques

Les données suivantes ont été obtenues après extraction dans la base HYDRO du Ministère de l'Aménagement et du Territoire et de l'Environnement :

- Arguenon : débits journaliers à la station de Jugon-Les-Lacs (superficie du bassin : 104 km²) de 1994 à 2000 (7 ans)

Données climatiques

Les données suivantes ont été achetées à Météo France :

- pour le bassin de l'Arguenon :
 - pluies journalières à : Trémeur (1994-2000), Lanrelas (1994-2000), et Collinée (1994-2000),
 - ETP journalières à Trémeur (1994-2000),

Validation et mise en forme des données

Validation des données de départ

Avant l'utilisation des données brutes de débit, pluie et ETP, une phase de validation des valeurs s'avérera nécessaire. Cette étape consiste à comparer la lame d'eau écoulée sur le bassin versant (volume d'eau écoulé au niveau de l'exutoire divisé par la surface du bassin) à la totalité des pluies efficaces.

L'ETP (figure 6) représente la quantité d'eau théorique (elle peut être mesurée en 10^{ème} de millimètres), qui retourne à l'atmosphère par l'intermédiaire de l'évaporation directe ou de la transpiration des plantes avant de pouvoir s'écouler. La quantité réelle d'eau qui subit l'évapotranspiration (évapotranspiration réelle ETR) dépend d'une part des pluies tombées, et d'autre part de l'état de la Réserve Facilement Utilisable (RFU), qui représente l'eau retenue par une couche très superficielle du sol dans laquelle se produit l'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation).

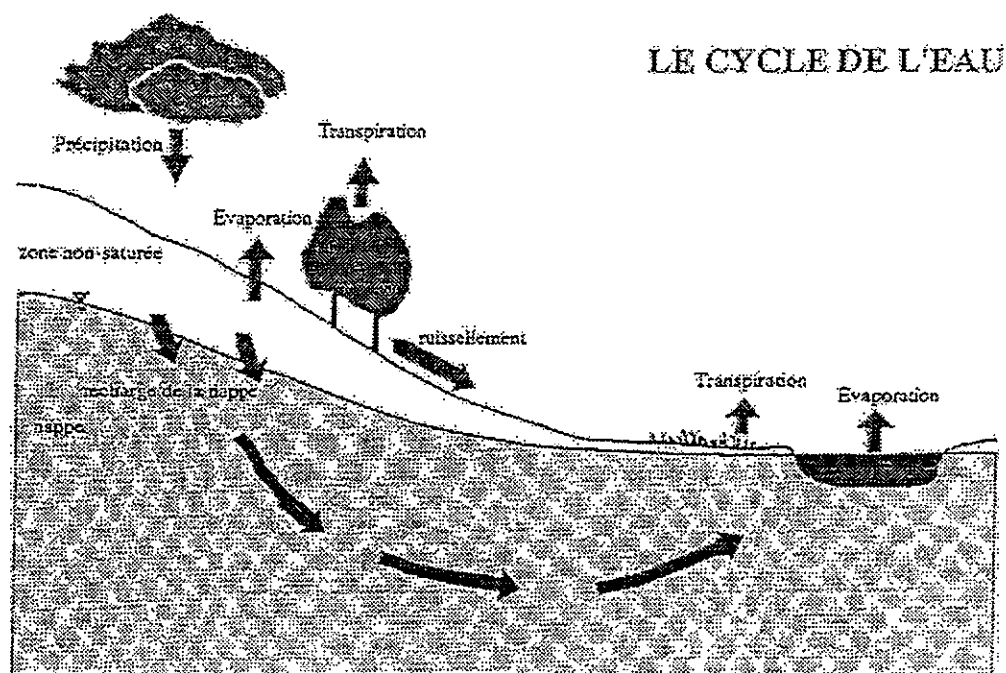


Figure 6 : Schéma du cycle de l'eau

Les pluies efficaces représentent la quantité d'eau journalière, issue des pluies, sujette à écoulement. Cette quantité est la différence entre les pluies totales et l'ETR. Cette eau peut ruisseler (écoulement rapide) ou s'écouler par voie souterraine (écoulement lent de la figure 5). Le ruissellement peut être épidermique (de surface) ou hypodermique (dans la couche superficielle du sol).

La comparaison entre les pluies efficaces et la lame d'eau écoulée doit faire apparaître deux grandeurs égales puisque la totalité des pluies, participant soit au ruissellement soit à l'infiltration, doivent se retrouver au niveau de l'exutoire du bassin versant.

Mise en forme des données

Le logiciel Gardénia nécessite « en données d'entrée », les pluies et ETP journalières des bassins versants étudiés. Le calcul de ces valeurs uniques (pluie ou ETP représentative de l'ensemble de la surface du bassin versant), a été réalisé à partir des données ponctuelles localisées aux stations de Météo France.

Le contour de chaque bassin versant a été recoupé avec la carte des normales de pluies interannuelles sur la période 1961-1990 (origine Météo France). Le bassin a été ainsi divisé en secteurs pluviométriques dans lesquels se situait au moins une station Météo France. Un poids proportionnel à la surface de la zone météorologique du bassin versant a alors été affecté à chaque station.

La régression obtenue pour le bassin versant de l'Arguenon est la suivante :

$$P \text{ Arguenon} = 0,40 P \text{ Trémeur} + 0,45 P \text{ Lanrelas} + 0,15 P \text{ Collinée}$$

$$ETP \text{ Arguenon} = ETP \text{ Trémeur}$$

Comparaison de la lame d'eau et des pluies efficaces

La comparaison entre les pluies efficaces et la lame d'eau écoulée sur les bassins versants s'effectue au pas de temps de l'année hydraulique, c'est à dire de septembre à septembre (par exemple, l'année hydraulique 1995 se déroule du 01/09/1994 au 31/08/1995). En effet, en vue de cette comparaison, il est plus logique de considérer les pluies à partir de septembre car elles contribuent aux débits pendant la période de crue et la période d'étiage.

La figure 7 présente cette comparaison.

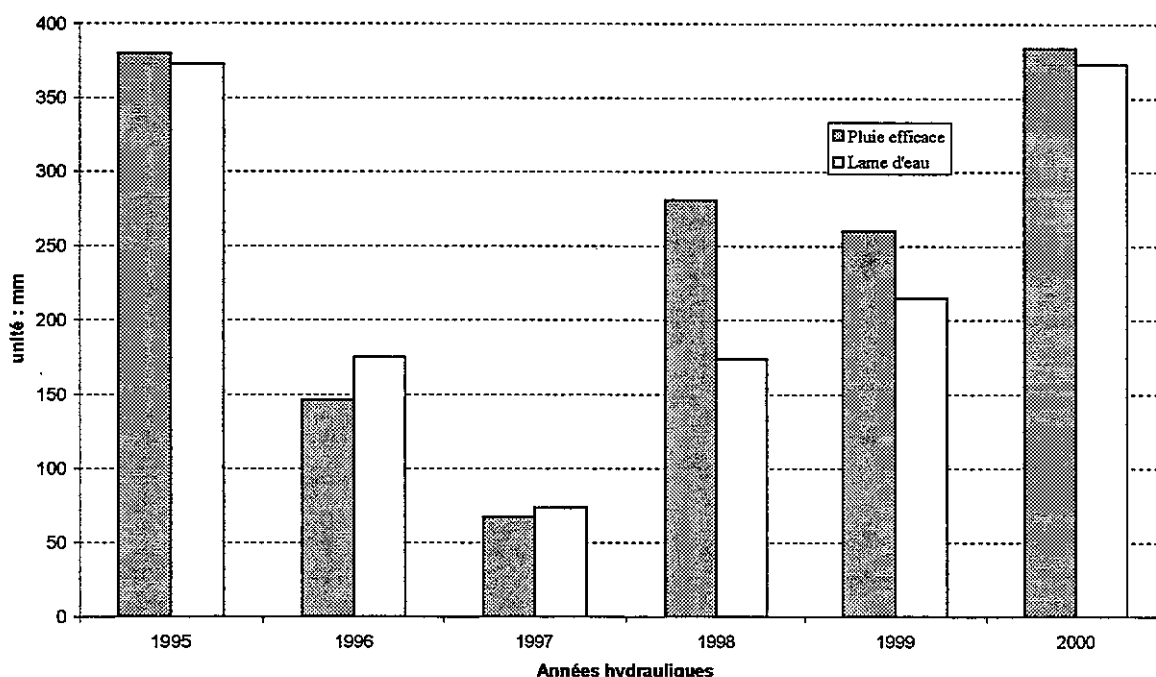


Figure 7 : Comparaison entre pluie efficace et lame d'eau pour l'Arguenon

L'adéquation entre la pluie efficace et la lame d'eau n'est pas tout à fait parfaite pour deux raisons principales :

- d'une part, le calcul de la pluie efficace utilise arbitrairement une RFU pour l'ensemble du bassin versant (150 mm pour l'Arguenon), or cette valeur peut être très hétérogène sur le bassin versant et peut même être en moyenne distincte de la valeur choisie,

- d'autre part, l'ETP affectée à l'ensemble du bassin versant provient d'une seule station de Météo France.

Calage des paramètres du modèle

Paramètres du modèle

Le calage consiste à ajuster les paramètres du modèle de telle sorte qu'ils permettent de calculer des débits aussi proches que possible des débits mesurés.

Les paramètres caractérisant les réservoirs de la modélisation sont les suivants :

- RUMAX (mm) : RFU maximale du sol,
- RUIPER (mm) : hauteur d'équilibre ruissellement-percolation,
- TAR1 (mois) : temps de demi-tarissement du premier réservoir souterrain,
- TPER1 (mois) : temps de demi-percolation du premier réservoir souterrain,
- TAR2 (mois) : temps de demi-tarissement du deuxième réservoir souterrain,
- TPER2 (mois) : temps de demi-percolation du deuxième réservoir souterrain.

Le temps de demi-tarissement est le temps au bout duquel, en l'absence de recharge du réservoir souterrain, le débit souterrain du réservoir est divisé par deux.

Le temps de demi-percolation caractérise la vitesse de réponse entre une pluie efficace et un accroissement du débit souterrain.

Le paramètre RUMAX est estimé suite à la comparaison des pluies efficaces et de la lame d'eau écoulée. C'est un paramètre nécessaire au calcul des pluies efficaces (RFU). Les temps de demi-tarissement des deux réservoirs souterrains (TAR1 et TAR2) sont calculés d'après les courbes exponentielles de décrues régulières (pas ou peu d'influence de la pluviométrie) des débits journaliers des cours d'eau.

Les autres paramètres doivent être calés en respectant les inégalités suivantes :

- $TPER1 \leq TAR1 \leq TAR2$,
- $TPER1 \leq TPER2 \leq TAR2$.

Influence des différents paramètres

Pour illustrer le rôle de chaque paramètre, des simulations ont été effectuées en faisant varier chacun à leur tour un seul des différents paramètres. Les points ci-dessous détaillent ainsi l'influence des paramètres :

- RUMAX (RFU moyenne à l'échelle du bassin) : une diminution de RUMAX entraîne une augmentation des pluies efficaces et donc une surestimation des débits souterrains,
- RUIPER (hauteur moyenne de débordement) : le rôle de ce paramètre se comprend

à partir de la relation suivante : $\frac{Q_{rapide}}{Q_{percolation}} = \frac{h_{surface}}{RUIPER}$ Lorsque la hauteur d'eau à la

surface est petite par rapport à RUIPER, l'essentiel de l'eau percole vers la nappe : $Q_{percolation} \geq Q_{rapide}$. Au contraire, lorsque la hauteur d'eau à la surface dépasse RUIPER, $Q_{percolation} \leq Q_{rapide}$, une diminution du paramètre RUIPER entraîne une proportion d'eau souterraine moins importante, et un temps de décroissance du débit rapide plus court,

- TPER1 (temps caractéristique de percolation de l'eau de la surface vers la nappe) : plus on augmente ce paramètre, plus la nappe réagit lentement aux augmentations de pluie efficace. Un retard de réaction de la nappe provoque un débit d'étiage surestimé et un débit de crue sous-estimé,
- TAR1 et TAR2 (temps de demi-tarissement du réservoir profond) : si l'on augmente ce paramètre, la pente de l'hydrogramme du débit souterrain obtenu sera plus faible à l'étiage,
- TPER2 (temps de percolation de l'eau du réservoir 1 au réservoir 2) : plus on augmente ce paramètre, plus la nappe profonde réagit lentement aux augmentations des infiltrations provenant du réservoir supérieur, et plus le débit du deuxième réservoir est faible.

Résultats sur le bassin versant de l'Arguenon

La simulation suivante a été testée : aquifère souterrain à 2 réservoirs, pas de temps journalier.

Compte-tenu de la disponibilité des données, la modélisation a été réalisée pour la période 1995-2000, après un calage des paramètres lors des années 1995 et 1996. Les ajustements susceptibles de représenter au mieux la réalité ont été obtenus en considérant les paramètres suivants :

Paramètre	RUMAX	RUIPER	TPER1	TAR1	TPER2	TAR2
Unité	mm	mm	mois	mois	mois	mois
Valeur	150	20	0.5	0.6	0.5	1.7

Tableau 1 : Bassin de l'Arguenon - Paramètres de la modélisation Gardénia

Les figures 8 et 9 illustrent l'ajustement du débit total calculé (en violet) au débit mesuré à la station hydrologique (en bleu), et les débits des deux réservoirs souterrains (supérieur en jaune et inférieur en vert) lors des périodes 1995-1996 et 1995-2000.

Les corrélations finales sont de 89,0 % pour la période 1995-1996 et de 81,5 % pour 1995-2000.

Pour la période considérée, les précipitations tombées sur le bassin représentent une lame d'eau moyenne de 861 mm par an, l'évapotranspiration est de 590 mm par an en moyenne et les précipitations efficaces, solde restant disponible pour le ruissellement et/ou l'infiltration, sont en moyenne de 271 mm par an, se répartissant en 156 mm (57,5 %) arrivant à la rivière après un cheminement rapide (ruissellement, écoulement retardé)

et 115 mm (42,5 %) après un cheminement lent (écoulement souterrain). La tableau 2 rassemble les résultats ultimes de cette modélisation :

Pluie totale mm/an	Evapo- transpiration mm/an	Pluie efficace mm/an	Ecoulement à Plouédern						
			Rapide		Lent			Total mm/an	
			mm/an	%	mm/an	%		271	
			156	57,5	115	42,5			
861	590	271			Lent réservoir 1		Lent réservoir 2		
		mm/an	%	mm/an	%				
		54	20	61	22,5				

Tableau 2 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Arguenon - Période 1995-2000

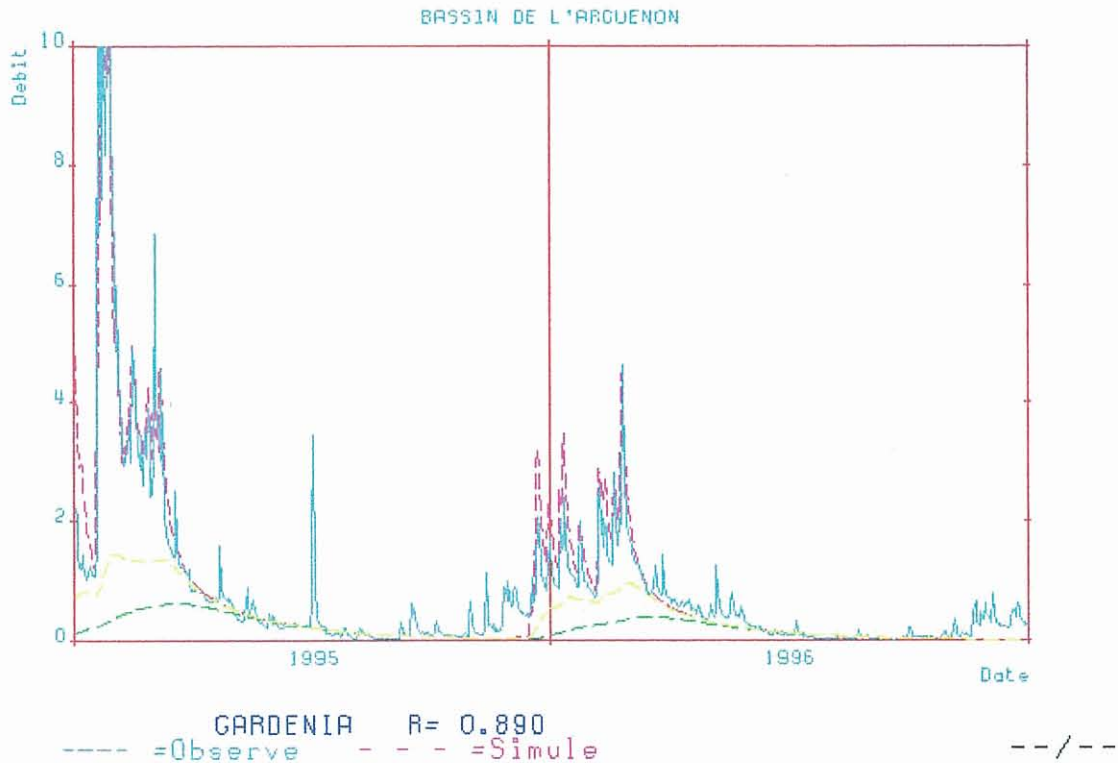


Figure 8 : Modélisation Gardénia - Bassin de l'Arguenon. Calage des paramètres (1995-1996)

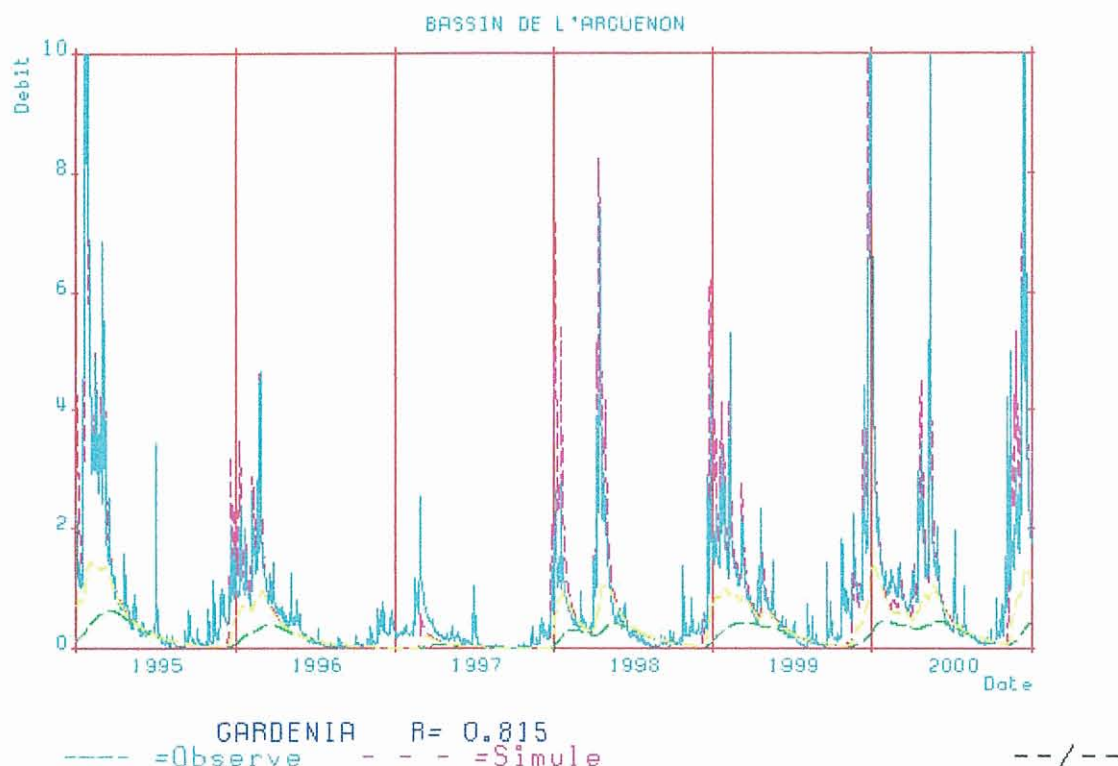


Figure 9 : Modélisation Gardénia. Débits mesurés et calculés du bassin de l'Arguenon (1995-2000)

La contribution des eaux souterraines au régime de l'Arguenon s'élève donc à plus 40% de l'écoulement total.

Les figures 10 et 11 montrent l'influence de l'écoulement souterrain durant les années hydrauliques 1996 à 2000, et durant les mois de ces années. Les différents débits sont exprimés en terme de lame d'eau écoulée sur le bassin versant (en mm).

La figure 10 détaille l'importance que prend l'écoulement souterrain lors d'une année sèche (1997) où le débit rapide (ruissellement) décroît plus fortement que les débits souterrains (1 : réservoir supérieur et 2 : réservoir inférieur). Ce phénomène illustre le soutien de la nappe en période de sécheresse. Cette figure met également en évidence une participation équivalente (environ 20 % chacun d'après le tableau 2) des deux réservoirs souterrains à l'écoulement global mesuré à l'exutoire.

La figure 11 montre une influence prépondérante du réservoir souterrain inférieur (2), par rapport au réservoir supérieur (1), lors de la période d'étiage : du mois de juin au mois d'octobre. La tendance s'inverse pour les autres mois de l'année. Ce soutien de la nappe en période d'étiage (l'écoulement souterrain total étant supérieur à 96 % de l'écoulement global) atteint même son paroxysme aux mois d'août, septembre et octobre où la totalité (100 %) de l'écoulement de la rivière provient de l'écoulement souterrain. Pendant la période de crue (décembre et janvier) ce pourcentage diminue vers 15 et 34 %.

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

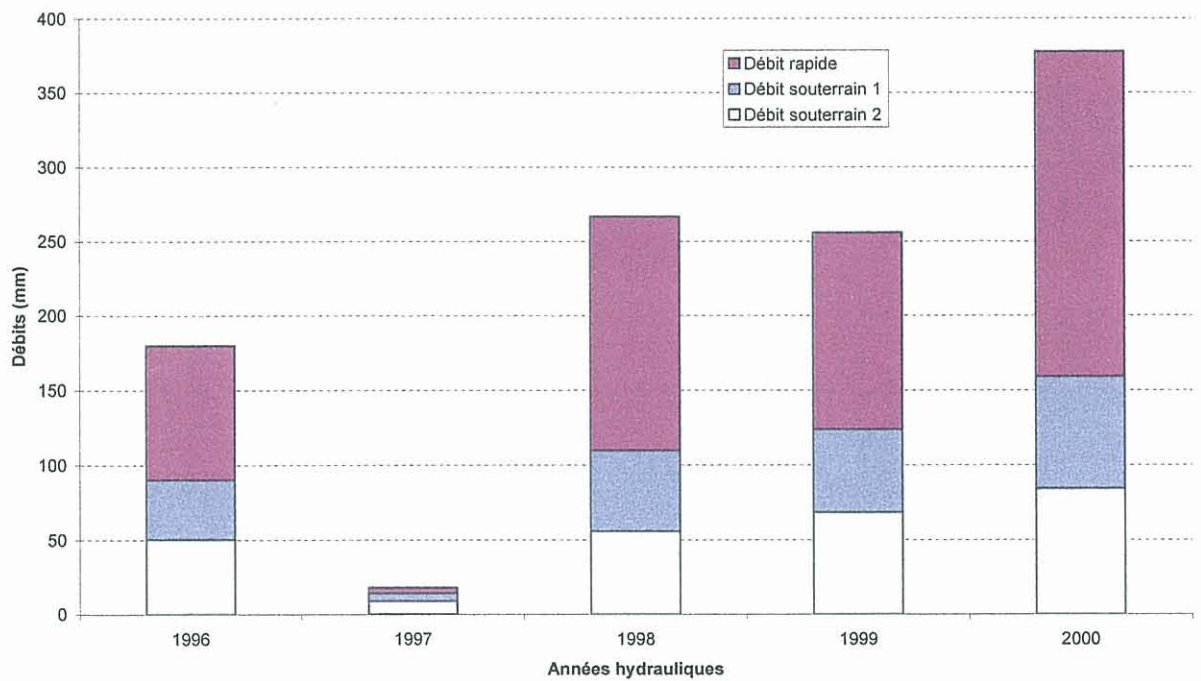
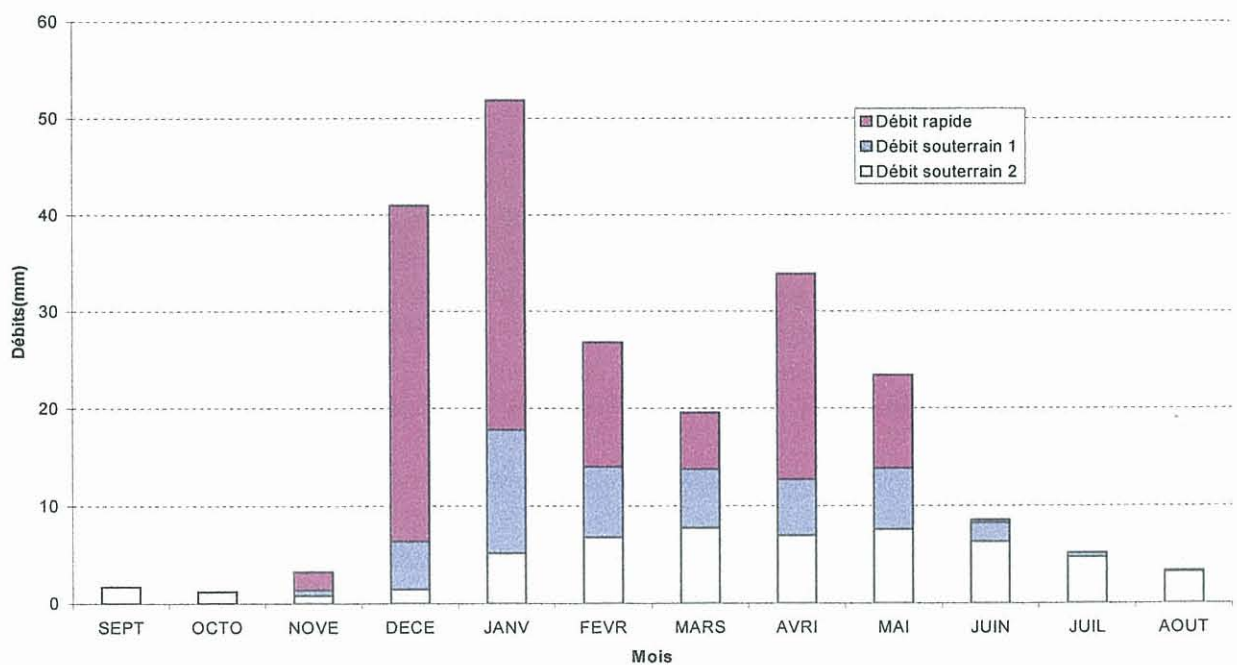


Figure 10 : Bassin de l'Arguenon - Débits annuels rapides et souterrains (1996-2000)



**Figure 11 : Bassin de l'Arguenon
Débits mensuels moyens interannuels (1996-2000)**

Conclusions

Les résultats de la modélisation indiquent que la lame d'eau écoulée à la station hydrométrique est alimentée par les eaux souterraines à hauteur de 42,5 %.

Les écoulements souterrains amortissent les variations climatiques, leur poids relatif augmente :

- vers l'étiage, où ils peuvent représenter la totalité de l'écoulement observable dans la rivière (cas des mois d'août, septembre et octobre),
- et en année « sèche » : par exemple, pour l'année hydrologique 1997, l'Arguenon est alimenté à 78 % par les apports souterrains.

Les résultats mettent en évidence que l'Arguenon présente des étiages peu soutenus liés au fait que le bassin versant de l'Arguenon est soumis aux phénomènes de ruissellement. Ceci est confirmé par un paramètre RUIPER faible (20 mm) retenu pour la modélisation, qui favorise l'écoulement rapide donc le ruissellement.

Ces premiers résultats montrent que la composante eau souterraine a un poids certain dans l'estimation des flux globaux dans le système. L'écoulement rapide est favorisé, sur le site d'étude de S^t Igneuc, par la présence de très nombreuses parcelles drainées.

2. Méthodes d'investigation

Les méthodes d'investigation choisies pour cette étude hydrogéologique sont au nombre de 2. La chimie donne une indication quant à l'ampleur du phénomène de pollution par la mesure en particulier des concentrations en nitrates présentes, ainsi que la chimie caractéristique du milieu pouvant apporter des contraintes quant aux mécanismes mis en jeu. Et enfin les compositions isotopiques (principalement azote et bore), sont utilisées comme traceurs des sources de pollution en nitrates.

2.1. Analyses chimiques

Pour la première phase du projet, les analyses chimiques ont été réalisées par le laboratoire d'analyses du BRGM.

Pour le suivi continu sur une année hydrologique, 4 catégories de mesures ont été réalisées :

⇒ Mesures in situ = MS (Laboratoire de COOPERL). Hebdomadaire.

Pour chaque prélèvement, température, pH, conductivité, potentiel redox, alcalinité et oxygène dissous. Mesure de débit sur 3 points (les exutoires et la lagune). Mesure du niveau piézométrique (statique ou dynamique, en fonction de la période d'observation) dans les puits et forages.

⇒ Analyses sommaires = SO (Laboratoire d'ANJOU recherche). Hebdomadaire.

Mesures NO_3 , SO_4 , Cl, Fe, HCO_3 .

⇒ Analyses simplifiées = SI (Laboratoire d'ANJOU recherche). Mensuel (en complément de SO).

Analyses sommaires (SO) + mesures de Ca, Mg, Na, K, NH_4 , NO_2 , PO_4 , F, SiO_2 , I, Al, Br, B, Cu, Zn, Li, Mn, Ni, COD.

⇒ Analyses complètes = CO (Laboratoire du BRGM). Trimestriel.

Analyses simplifiées (SI) + mesures de $\delta^{11}\text{B}$, $\delta^{15}\text{N}$, ^3H , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

2.2. TRACEURS ISOTOPIQUES

Contrairement aux propriétés chimiques liées au cortège électronique, les propriétés physiques d'un élément dépendent de son noyau. Les isotopes des éléments, possédant le même nombre de protons, mais un nombre variable de neutrons, auront des propriétés chimiques identiques, mais des propriétés physiques telles que la viscosité, la pression de vapeur ou encore la masse, différentes.

Lorsque les produits d'une réaction présentent des compositions isotopiques distinctes de celles des produits d'origine, on parle de fractionnement isotopique. Les écarts de composition isotopique étant souvent très faibles, on préfère utiliser la notation δ qui

exprime la différence relative (en ‰) d'atomes de l'isotope léger entre l'échantillon et un standard international :

$$\delta^{15}N = \left(\frac{\left(\frac{^{15}N}{^{14}N} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{15}N}{^{14}N} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

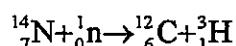
Pour l'azote le standard est l'air : $^{15}N/^{14}N = 3675.5 \cdot 10^{-6}$ (Junk et Svec, 1958). Les compositions isotopiques en azote sont mesurées par spectrométrie de masse à source gazeuse. La méthode de préparation des échantillons est adaptée de Kreitler (Kreitler, 1975). Les substances azotées sont tout d'abord concentrées par évaporation, puis réduites par l'alliage de Devarda. L'ammoniac formé est piégé sous forme de chlorure d'ammonium (NH_4Cl) dans de l'acide chlorhydrique (HCl). Mis à réagir avec du $LiOBr$, il se forme de l'azote qui est piégé sur du charbon actif, avant d'être analysé. La précision sur les mesures est de 0.2 ‰.

Dans le cas du bore, la notation $\delta^{11}B$ est utilisée (isotopes : ^{11}B et ^{10}B), le standard étant le standard NBS-951 ($^{11}B/^{10}B = 4.04362$; Cantanzaro *et al.*, 1970) :

$$\delta^{11}B = \left(\frac{\left(\frac{^{11}B}{^{10}B} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{11}B}{^{10}B} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

Les compositions isotopiques du bore sont mesurées sur un spectromètre de masse à source solide (Finnigan MAT 261). L'échantillon est introduit dans le spectromètre de masse sous forme de borate de césium ($CsBO_2$). Il est donc nécessaire de transformer chimiquement les échantillons en cette espèce. La méthode utilisée au BRGM est celle de Mossadik (Mossadik, 1997). La valeur mesurée par le laboratoire du BRGM du standard NBS-951, pour la période d'analyse considérée est de 4.051214 ± 0.00234 (2σ ; $n=15$). La précision sur les mesures est 0.6 ‰.

Le tritium 3H est un traceur intime de la molécule d'eau. La production naturelle du tritium est liée à l'impact neutronique du rayonnement cosmique sur les noyaux d'azote de l'air.



Cette production conduit à une teneur de 1 atome de 3H pour 10^{18} atomes de 1H . La décroissance consécutive à la production du tritium s'accompagne d'une émission de particules β que l'on mesure :



Pour l'analyse du tritium, les échantillons subissent un pré-traitement électrolytique qui enrichit préférentiellement le liquide en tritium. La radioactivité β se mesure dans un compteur à scintillation liquide. La précision analytique est de 10 %.

La période radioactive (ou temps de demi-vie) du tritium est de 12.43 ans, cela signifie qu'au bout de 12.43 ans le nombre de désintégrations β par unité de temps a diminué de moitié, ou encore qu'en 1992 l'activité du tritium est environ 4.5 fois plus faible qu'en 1963 ; et ceci si l'on considère que les essais nucléaires aériens n'ont pas été réalisés depuis 1963.

Le rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) d'un fluide est directement relié à celui du minéral ou des associations minéralogiques avec lequel 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.

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. Globalement, le strontium solubilisé dans la roche et transporté vers l'extérieur du système formé par la roche est beaucoup moins radiogénique (c'est-à-dire de rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus bas) que le strontium dans la roche non altérée ; d'autre part, le strontium des argiles résiduelles est beaucoup plus radiogénique. Les variations isotopiques observées dans les fluides peuvent être issues du mélange de Sr de composition isotopique différente provenant de différentes sources. Ainsi, dans le cas simple où deux sources de rapport isotopique ou chimique 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) l'origine et les proportions de mélange des différents composants fluides ainsi que sur (2) la nature et l'intensité des processus d'interaction roche-eau liés notamment à l'altération et à l'érosion.

L'analyse du rapport isotopique du strontium se fait par spectrométrie de masse à source solide. L'analyse se fait sur mono-filament au W, avec mesures comparées au standard NBS987 (valeur certifiée de 0.710240). L'erreur est donnée à 2 sigma (M) entre 0.000006 et 0.000012.

3. Choix des points de prélèvement

Le tableau 3 présente les coordonnées géographiques et le numéro d'indice national des points qui ont fait l'objet de mesures, lors de cette deuxième phase.

Désignation	Nature	X	Y	Z	N° BSS
Source Bonne Fontaine	Source	253 300	1098 300	≈90	02446X0027
Exutoire des Loges	Rivière	255 015	1091 135	≈37	02447X0039
Exutoire de la Noë Ronde	Rivière	254 710	1091 530	≈35	02447X0040
Aval Lagune	Rejet	253 960	1090 500	≈65	02803X0032
Forage FCA1	Forage	254 390	1091 312	65.44	02447X0054
Puits PCA2	Puits	254 400	1091 552	53.42	02447X0043
Puits PPE2	Puits	253 725	1090 535	72.12	02442X0034
Source PVE2	Source	254 300	1090890	62.9	02447X0051
Puits PVE1	Puits	254 200	1091 120	73.23	02447X0049
Forage FJH1 des Loges	Forage	254 364	1090 235	74.77	02803X0006
Forage FVE1	Forage	254 190	1091 100	74.48	02447X0041
Pluviomètre	Pluie	253 715	1090 525	≈73	02802X0032

Tableau 3. Nature et localisation des points de prélèvement.

Lors de la phase 2, 8 points ont été suivis, répartis en 2 groupes :

⇒ Groupe A : suivi et prélèvements hebdomadaires :

- Exutoire de la Noë Ronde.
- Exutoire des Loges.
- Source PVE2.

⇒ Groupe B : suivi et prélèvements bi-mensuels :

- Sortie lagune.
- Puits PPE2.
- Puits PCA2.
- Forage FVE1.
- Forage FCA1.

Des points supplémentaires ont été échantillonnés, la source Bonne Fontaine, le forage FJH1 et le puits PVE1. Ces 3 points et le pluviomètre avaient été suivis lors de la phase 1 (rapport BRGM RP-40911-FR) et ont fait l'objet de quelques analyses supplémentaires lors de la phase 2.

Les critères de sélection de l'ensemble de ces points sont justifiés dans le rapport de phase 1 (rapport BRGM RP-40911-FR).

4. Résultats

Les analyses ont porté, au niveau des points d'eau, sur :

- ↳ 1 source non polluée (Bonne Fontaine) et 1 forage dépourvu de nitrates représentatif de l'aquifère profond (FJH1).
- ↳ 2 exutoires : la Noë Ronde et les Loges.
- ↳ 6 points d'eau répartis en : -2 forages (FCA1 et FVE1)
 - 3 puits (PCA2, PPE2 et PVE1)
 - 1 source (PVE2)
- ↳ 1 pluviomètre.

Ainsi que sur les différentes sources de pollution potentielles : engrais, lagune, et les différents types de déjections animales (porcs, volailles et bovins).

Au total 87 échantillons ont été analysés. Les résultats des mesures in situ des paramètres physico-chimiques, des analyses chimiques et isotopiques sont reportés dans l'annexe 2.

L'annexe 3 présente les données de suivi hydrologique. Les méthodes utilisées par chaque laboratoire sont reportées en annexe 1.

5. Caractérisation des sources de pollution

Les sources potentielles de pollution considérées lors de cette étude sont au nombre de 5, réparties en 3 catégories :

- ↪ 1 engrais couramment utilisé sur la zone d'étude (ammonitrate : NH_4NO_3).
- ↪ Le lagunage. Les rejets de la station d'épuration par lagunage naturel de St-Igneuc. Ce lagunage est constitué de 2 bassins (1 bassin amont et 1 bassin aval). La source de nitrate caractérisée sera associée aux effluents d'origine domestique.
- ↪ L'oxydation des matières organiques issues des déjections animales. Afin d'apprécier la variabilité éventuelle des rapports isotopiques issus des déjections de différents animaux, on doit identifier des signatures des différentes déjections animales épandues sur les parcelles : porcs, bovins et volailles.

La source naturelle de la minéralisation du sol a nécessité d'échantillonner un point situé en zone amont, sous couvert de prairies naturelles ou forêt, pour permettre d'acquérir le référentiel azote minéral du système aquifère (caractérisation de la minéralisation naturelle de la matière organique des sols).

Pour chacune des sources il a été effectué au minimum une caractérisation isotopique, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{11}\text{B}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, en plus de la caractérisation chimique classique (annexe 4).

5.1. LES ENGRAIS

Les engrais habituellement utilisés sur la zone concernée sont constitués de granulés d'ammonitrate. Un échantillon a été fourni par COOPERL-HUNAUDAYE et analysé au laboratoire du BRGM.

Les premières analyses effectuées sur cet échantillon donnent pour les espèces de l'azote :

NH_4	22 %
NO_3	71.8 %

La figure 12 présente les gammes de compositions isotopiques mesurées sur les engrais utilisés sur le bassin versant, comparées à des données bibliographiques.

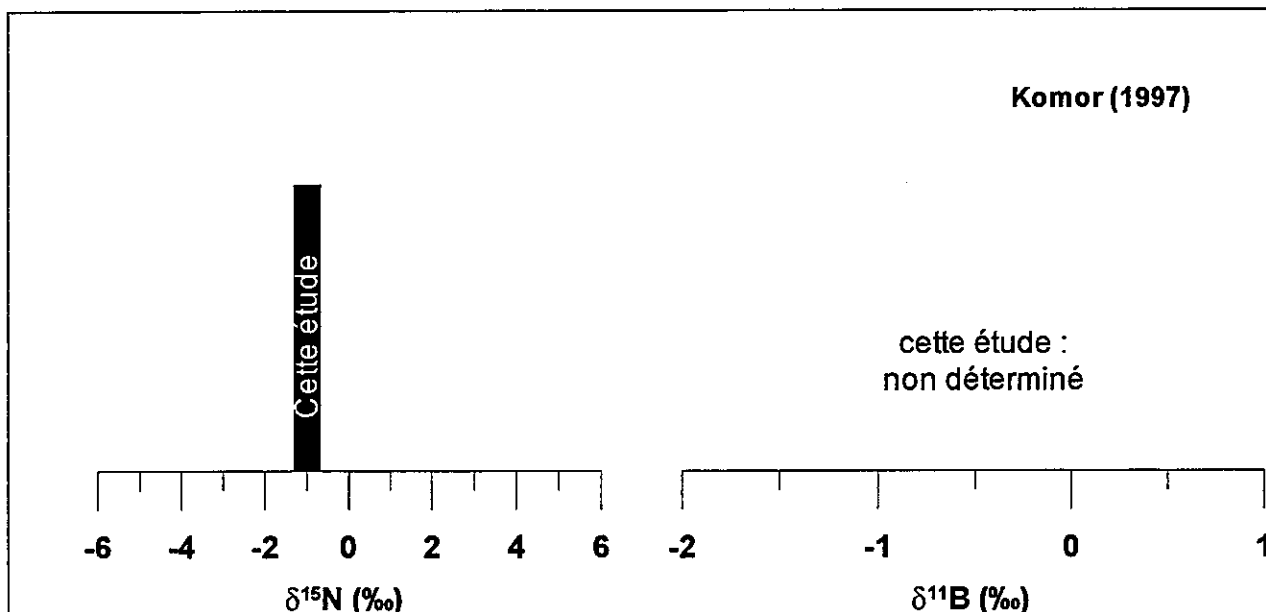


Figure 12. Gamme de compositions isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{11}\text{B}$ des engrais.

La mesure de $\delta^{15}\text{N}$ obtenue ($-1.6 \pm 0.2 \text{ ‰}$) est cohérente avec celles de la littérature (Shearer *et al.*, 1974; Freyer et Aly, 1975; Berger *et al.*, 1976; Bergé, 1983; Mariotti, 1984). Les engrais sont synthétisés à partir de l'azote de l'air suivant des processus fractionnant très peu les isotopes stables de cet élément. La variabilité des $\delta^{15}\text{N}$ s'explique par le fait que les mesures de la littérature proviennent de divers types d'engrais, nitrate de chaux, de potasse, de soude, ammonitrate et sulfate d'ammonium (celui de la présente étude étant un ammonitrate).

Les concentrations en bore dans l'engrais échantillonné étant inférieures au seuil de détection ($<0.1 \mu\text{g.g}^{-1}$), il n'a pas été possible d'en déterminer la composition isotopique en bore. Sur la figure 12 a été tout de même reportée la gamme de valeurs mesurées par Komor (Komor, 1997).

La valeur de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obtenue sur l'ammonitrate est de 0.707876 ± 0.000008 . Ce résultat est comparable à d'autres mesures effectuées sur des engrais en France (Negrel, 1999).

D'autres engrais sont en fait utilisés sur le bassin. Des analyses récemment effectuées par le laboratoire d'Anjou Recherche montrent que certains sont plus enrichis en bore. Des analyses des rapports de l'azote-15 et du rapport isotopique du bore seront faites sur ces engrais, mais les résultats ne pourront pas être intégrés dans ce rapport.

Type engrais	Concentration en bore
	mg/kg sec
Ammonitrate France	<10
Ammonitrate Pays de l'Est	<10
Engrais 18-46	55
Engrais 14-07-24	23

Le fait d'obtenir une très faible concentration en bore dans les engrais utilisés sur le bassin est une information importante en soi. En effet si ceux-ci ne contiennent pas de bore et que des concentrations élevées en bore sont mesurées dans les eaux souterraines, on peut alors émettre l'hypothèse que la contribution de cette source sera vraisemblablement négligeable.

5.2. LE LAGUNAGE

Le bourg de St-Igneuc est raccordé à un réseau d'assainissement pour les eaux usées dimensionné pour 350 eq/hab, avec un rejet de 52 m³/jour. Ce réseau est raccordé à un lagunage naturel constitué de 2 bassins situés en aval du bourg et dont le trop-plein se déverse directement dans le ruisseau des Loges.

Des prélèvements ont été réalisés à l'aval de ce lagunage pour identifier la source de pollution liée aux effluents domestiques.

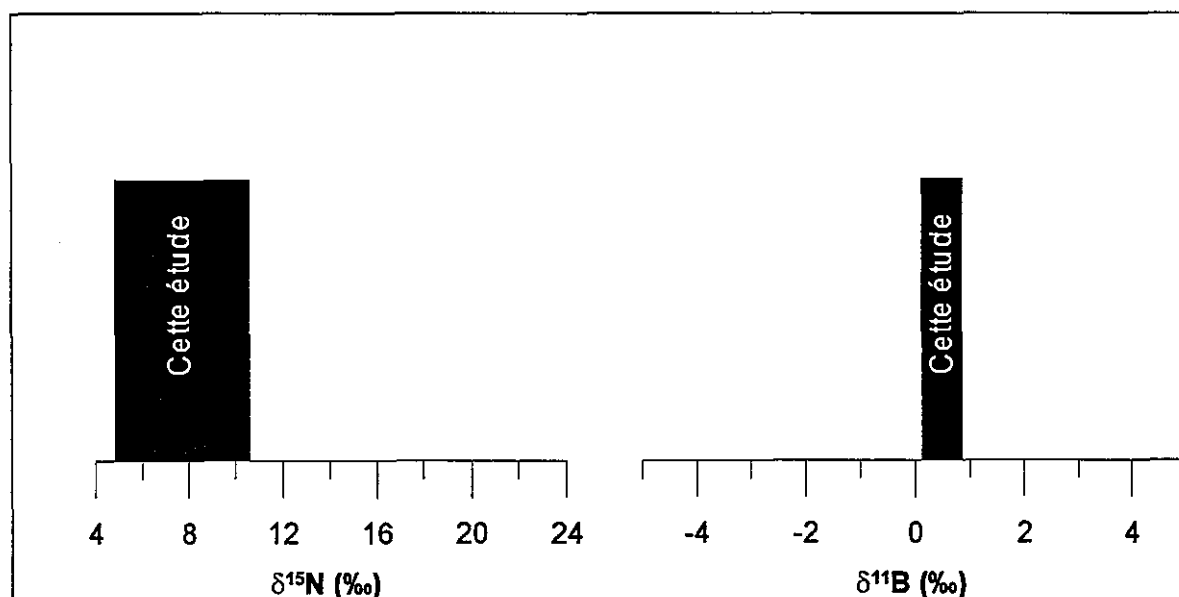


Figure 13. Gamme de compositions isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{11}\text{B}$ du lagunage.

La gamme de compositions isotopiques en azote obtenue, entre 4.3 et 10.4 ‰ vs air (Fig. 13), est légèrement inférieure à celle rencontrée dans la littérature (Bergé, 1983; Donvill et Bergé, 1985; Aravena et Robertson, 1998).

Les borates de sodium naturels des séquences évaporitiques non-marines sont mondialement utilisés pour la production de perborate de sodium. Cet agent blanchissant entre dans la composition de la plupart des formulations de produits nettoyants et détergents (Bart, 1998). Dans les rejets du lagunage de St-Igneuc, les concentrations en bore évoluent de 38 à 909 µg/l. La concentration de 909 µg/l est la plus forte mesurée au cours des différentes campagnes analytiques. Elle a été obtenue à l'aval du premier bassin, et correspond donc à la moins diluée des sources potentielles. Le rapport isotopique correspondant à cette mesure (0.18 vs ‰ NBS 951) a été choisi comme référence. Les autres mesures sont plus enrichies en ¹¹B et plus proches des valeurs rencontrées dans les eaux échantillonnées sur le bassin (drains, puits, forages).

Le rapport isotopique en strontium de cette source est de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.714498 \pm 0.000009$.

5.3. LES DIFFERENTS TYPES DE DEJECTIONS ANIMALES

5.3.1. Lisiers de porcs

Afin d'identifier cette source potentielle, différentes méthodes de récupération ont été testées.

Au cours de la phase 1, le dispositif retenu est celui d'une parcelle du programme SOLEPUR mise en place par le CEMAGREF de Rennes (Martinez J., Peu P., 1999). C'est une parcelle étanche contenant de la terre vierge, permettant de recevoir du lisier de porcs par aspersion ou par enfouissement. Des conditions expérimentales favorables permettent d'accélérer la nitrification.. Ainsi après un arrosage, les échantillons sont récupérés. Pour l'étude 2 échantillons prélevés en 1995 ont été récupérés (après stockage et conservation dans une chambre froide du CEMAGREF) :

- 1 échantillon représentant un recueil du 28/04/1995 au 03/05/1995, (NO₃ = 268 mg/l)
- 1 échantillon représentant un recueil du 08/11/1995 au 14/11/1995, (NO₃ = 375 mg/l)

Une analyse sommaire préalable (teneurs en nitrates voisines) a permis de sélectionner le premier échantillon (meilleure sécurité sur la conservation de l'échantillon) pour identifier la composition chimique et isotopique de la source de déjection porcine.

La phase 2 a permis de compléter l'acquisition par le même mécanisme que celui utilisé pour les déjections bovines et de volailles au cours de la phase 1, celle d'une parcelle expérimentale. Ainsi, une parcelle d'une surface de 28 m² a été réalisée par COOPERL-HUNAUDAYE (annexe 5) sur un site placé à 20 km de St Igneuc (zone de Lanjouan). Cette parcelle a l'avantage d'être constituée en terre végétale vierge n'ayant reçu aucune culture, ni engrais, ni fertilisants azotés, avec un réseau de drainage protégé par des graviers. Du lisier de porc a été ajouté. Le dispositif est décrit avec précision en annexe 5. Le prélèvement a été effectué le 9 octobre 2000.

Enfin, un prélèvement de lisier a été effectué directement dans la fosse à lisier d'une ferme située sur le bassin versant, et dont le lisier est représentatif de celui épandu sur les parcelles du bassin. Le lisier préalablement filtré avec des filtres de gros diamètre a été placé dans un broyeur à hélice. Le filtrat récupéré après centrifugation a été récupéré pour analyses.

Les résultats obtenus montrent des variations entre les différentes sources ainsi récupérées :

Nature de la source	NO3	NH4	B	Sr
	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l
Lisier parcelle SOLEPUR (04-05/1995)	268	<0.1	28	nm
Lisier fosse	<0.5	1300	497	0.32
Lisier parcelle expérimentale 09/10/2000	149	<0.1	25.1	0.16

Nature de la source	$\delta^{15}\text{N}$ vs air	$\delta^{11}\text{B}$ vs NBS951	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Lisier parcelle SOLEPUR	33.2 ± 0.2	42.04 ± 1.03	
«		41.88 ± 0.44	
«		42.39 ± 0.52	
Lisier fosse	nm	19.34 ± 0.15	0.709707 ± 0.000009
«		19.46 ± 0.1	
Lisier parcelle expérimentale	14.1 ± 0.2	19.64 ± 0.27	0.712416 ± 0.000008
«		19.28 ± 0.25	

Le lisier directement prélevé dans la fosse correspond principalement à une fermentation ammoniacale. L'azote est principalement sous forme d'ammonium. La mesure du rapport isotopique des nitrates n'était par conséquent pas possible.

Les lisiers de la parcelle expérimentale présentent un $\delta^{15}\text{N}$ moins élevé que ceux de la parcelle SOLEPUR, qui montrent déjà des phénomènes de dénitrification, enrichissant donc en ^{15}N les nitrates résiduels prélevés à l'aval de la parcelle.

Les concentrations en bore sont très différentes pour le lisier prélevé directement dans la fosse et pour le lisier épandu sur la parcelle expérimentale, mais les rapports isotopiques sont identiques ce qui implique une origine identique pour le bore (origine alimentaire). En revanche, le rapport isotopique du bore dans le résidu à l'aval de la parcelle SOLEPUR est très différent (alimentation différente, enrichissement le bore en ^{11}B par adsorption sur les argiles de la parcelle ?).

Les compositions isotopiques en strontium sont voisines et comprises entre 0.709 et 0.712.

5.3.2. Fumiers de bovins

Pour les déjections bovines, une parcelle d'une surface de 28 m² a été réalisée par COOPERL-HUNAUDAYE (annexe 5) sur un site placé à 20 km de St Igneuc (zone de Lanjouan). Cette parcelle a l'avantage d'être constituée en terre végétale vierge n'ayant

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

reçu aucune culture, ni engrais, ni fertilisants azotés, avec un réseau de drainage protégé par des graviers. Du fumier de bovin a été ajouté. Le dispositif est décrit avec précision en annexe 5.

Une première expérimentation a été réalisée en 1999, mais en arrosant la parcelle avec l'eau du réseau AEP (eau ayant une signature d'eau dénitrifiée). L'expérience a été renouvelée en 2000 avec de l'eau de pluie récupérée.

Le filtrat ainsi récupéré a fait l'objet d'analyses. Les échantillons sont les suivants :

- aval de la parcelle le 03/09/1999 de 14H45 à 14H57,
- aval de la parcelle le 09/10/2000 dernier prélèvement (peu nitraté),
- aval de la parcelle le 11/10/2000 de 15H05 et 16H16.

Du fumier de bovin a également été récupéré directement. Celui-ci a été mis dans un broyeur et dilué avec de l'eau Baker ultra - pure. Les filtrats ainsi récupérés après centrifugation ont été analysés.

Les résultats obtenus montrent des variations entre les différentes sources ainsi récupérées :

Nature de la source	NO3	NH4	B	Sr
	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l
Fumier de bovin parcelle 1999	203	0.1	47	
Fumier de bovin parcelle 2000 09/10/2000	15.5	<0.1		0.64
Fumier de bovin parcelle 2000 11/10/2000	65	<0.1	7	
Fumier de bovin source directe (broyage)	<1	71.1	1.84	

Nature de la source	$\delta^{15}\text{N}$ vs air	$\delta^{11}\text{B}$ vs NBS951	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Fumier bovin parcelle 1999	14 ± 0.2	25.95 ± 0.24 25.95 ± 0.91	nm
Fumier bovin parcelle 11/10/2000	4.3 ± 0.2	27.31 ± 0.15 27.57 ± 0.1	0.712201 ± 0.000009 0.712153 ± 0.000009
Fumier bovin source directe (broyage)	nm	28.69 ± 0.11 28.60 ± 0.23	0.710922 ± 0.000008

Les concentrations en azote et les compositions isotopiques associées obtenues à l'aval des parcelles expérimentales de 1999 et 2000 sont différentes. La nitratisation était peut-être moins efficace pendant l'expérimentation 2000.

Les compositions isotopiques en bore sont proches pour les 3 modes de récupération, malgré des variations importantes dans les concentrations en bore.

Les compositions isotopiques en strontium comprises entre 0.709 et 0.712 sont très voisines de celles mesurées dans les lisiers de porcs.

5.3.3. Fientes de volaille

Selon un protocole similaire à celui utilisé pour les sources de déjections bovines (annexe 5), deux expérimentations ont eu lieu pour caractériser la source de déjection de fientes de volailles :

- à l'aval de la parcelle le 02/09/1999 de 14H25 à 14H31,
- à l'aval de la parcelle le 09/10/2000.

Des fientes de volaille ont également été récupérées directement. Celles-ci ont été mises dans un broyeur et diluées avec de l'eau Baker ultra - pure. Les filtrats ainsi récupérés après centrifugation ont été analysés.

Les résultats obtenus montrent des variations entre les différentes sources ainsi récupérées :

Nature de la source	NO3	NH4	B	Sr
	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l
Fientes de volaille parcelle 1999	448	0.2	46	nm
Fientes de volaille parcelle 2000 09/10/2000	206	0.2	37.9	0.33
Fientes de volaille source directe (broyage)	<1	334.5	13.4	3.85

Nature de la source	$\delta^{15}\text{N}$ vs air	$\delta^{11}\text{B}$ vs NBS951	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Fientes de volaille parcelle 1999	13.8 ± 0.2	25.88 ± 0.46 25.41 ± 0.74	nm
Fientes de volaille parcelle 09/10/2000	10.9 ± 0.2	15.29 ± 0.12 14.79 ± 0.07	0.712061 ± 0.000010
Fientes de volaille source directe (broyage)	nm	27.61 ± 0.10 27.68 ± 0.15	0.709195 ± 0.000010

Les concentrations en azote sont différentes mais les compositions isotopiques associées obtenues à l'aval des parcelles expérimentales de 1999 et 2000 sont relativement voisines.

Les compositions isotopiques en bore sont proches pour la source directe et les filtrats à l'aval de la parcelle expérimentale de 1999, mais différentes pour celle de la parcelle 2000, bien que les concentrations en bore mesurées à l'aval des parcelles en 1999 et 2000 soient identiques (origine de bore différente, réactions avec les argiles ?).

Les compositions isotopiques en strontium comprises entre 0.709 et 0.712 sont très voisines de celles mesurées dans les lisiers de porcs et les fumiers de bovins. Ceci confirmerait une origine identique du strontium pour les 3 types de déjections animales.

5.3.4. Synthèse sur les déjections animales

Malgré une gamme de $\delta^{15}\text{N}$ plus large que celle de la littérature (Kreitler, 1975; Heaton *et al.*, 1983; Showers *et al.*, 1990; Figure 14), les valeurs rencontrées pour les différents types de déjections sont cohérentes avec les études précédentes. La suite de la discussion montrera que ces valeurs élevées de $\delta^{15}\text{N}$ pour le lisier de porc ne sont pas aberrantes et même cohérentes avec les hypothèses proposées sur les sources de nitrates du bassin versant.

La composante principale du bore dans les excréments animaux est l'urine (National Academy of Sciences, 1980). Sa composition isotopique est donc contrôlée par l'alimentation de ces animaux, ce qui pourrait expliquer la différence de gammes de $\delta^{11}\text{B}$ observées, notamment pour le lisier de porcs (l'étude de Komor se situe dans le Minnesota).

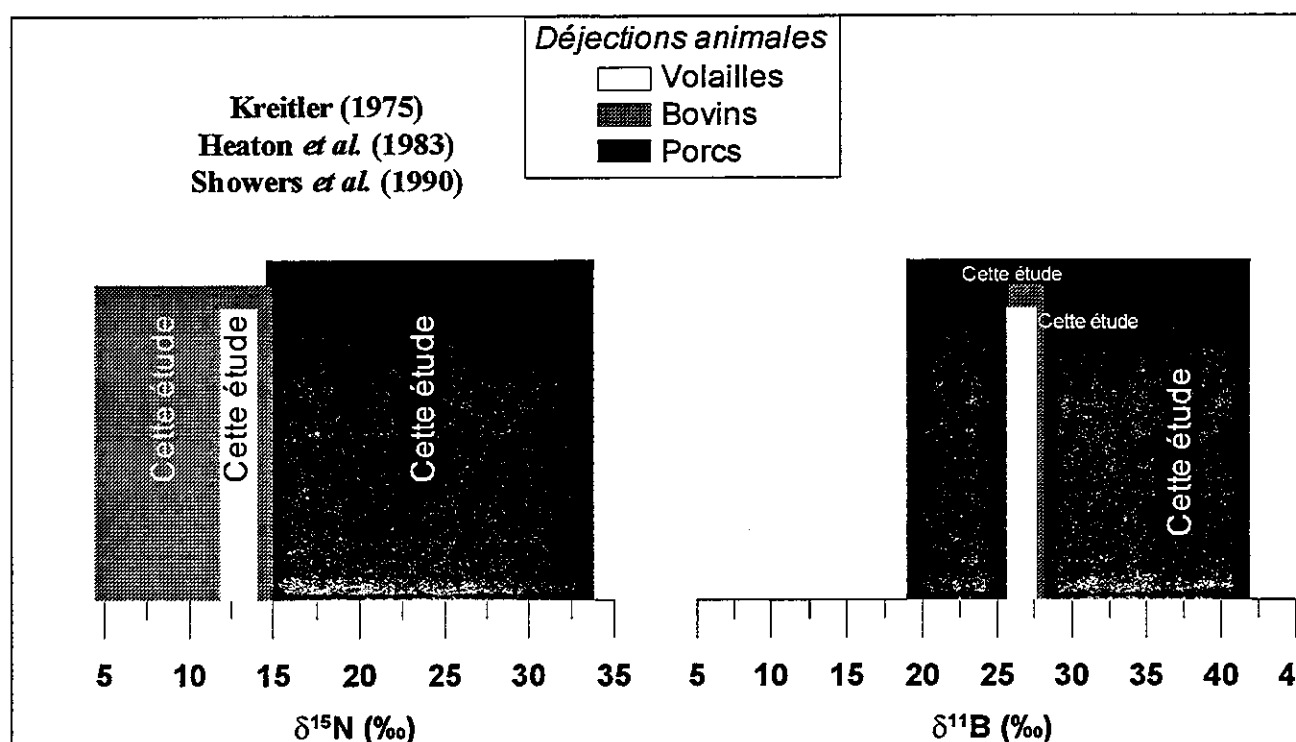


Figure 14. Gamme de compositions isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{11}\text{B}$ des différents types de déjections animales : volailles, bovins et porcs.

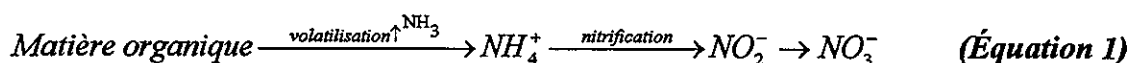
Pour le fumier de bovins, les $\delta^{11}\text{B}$ sont homogènes entre tous les types d'échantillons (parcelles expérimentales 1999 et 2000, lixiviation sur source directe), alors que la valeur de $\delta^{15}\text{N}$ est basse pour la parcelle expérimentale 2000 par rapport à la gamme de valeurs attendues (les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ sont, à l'exception d'un échantillon, supérieures à environ 10 ‰, figure 14).

Le lisier de porcs présente une gamme de $\delta^{15}\text{N}$ large (14.1 à 33.2‰), mais néanmoins cohérente avec la bibliographie. Les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ montrent une tendance similaire. Les compositions isotopiques en strontium ont une gamme de valeurs comprises entre 0.709707 ± 0.000009 et 0.712416 ± 0.000008 , mais trop peu discriminantes entre chaque source.

6. Caractérisation du pôle non pollué

Afin de pouvoir caractériser un état pollué il est nécessaire de définir l'état non pollué. Pour cela, 2 points spécifiques ont été échantillonnés. D'une part le forage FJH1 (choisi pour sa très faible teneur en nitrates) et d'autre part la source Bonne Fontaine (située en forêt, exempte de toute pollution anthropogénique). Tous deux sont considérés comme représentant l'état le moins pollué (en termes de concentrations en nitrates) du sous-bassin de l'Arguenon.

Les nitrates issus de la décomposition naturelle de la matière organique sont décrits par les processus suivants :



La source Bonne Fontaine est peu minéralisée (conductivité de $195 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), et témoigne d'une acquisition de la minéralisation par un apport météorique qui interagit avec l'encaissant. Le forage FJH1 est légèrement plus minéralisé (conductivités de 307 et $267 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, mesurées respectivement en novembre 1999 et novembre 2000).

La source et le forage présentent un faciès chloruré sodique. Cela témoigne d'une forte influence de la composition chimique des pluies, à une faible distance de l'océan. Les teneurs en chlorure voisines de $30 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Bonne Fontaine : $27 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$; FJH1 : $32.6 \pm 0.9 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) sont plus élevées que celles mesurées dans les pluies échantillonnées ($3.7 \pm 0.8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). En première approximation, l'hypothèse est faite que ces sources éloignées a priori de toute pollution anthropique reflètent la composition moyenne de l'aquifère en chlorure, et cette valeur sera prise comme significative de la valeur naturelle du site.

Ces concentrations sont cohérentes avec celles observées dans des contextes géologiques similaires en Bretagne (Faillat *et al.*, 1999).

Les faibles teneurs en nitrates mesurées sur les sites FJH1 et Bonne Fontaine lors de la première campagne d'échantillonnage en 1999 (respectivement 3.3 et $10.1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) semblent cohérentes avec l'idée d'un pôle non-pollué, ou tout du moins le moins pollué possible, dans la mesure où ces faibles concentrations en nitrates peuvent résulter de la dénitrification naturelle.

Les compositions isotopiques en bore sont similaires entre les deux points de prélèvement ($\delta^{11}\text{B}$ de 38.5 et 40.5 ‰), et peuvent être comparées à la valeur de l'eau de mer (mondialement constante à 39.5 ‰ ; (Barth, 1993)), qui semble l'origine première de la minéralisation de ces eaux (via la pluie).

La composition isotopique en azote de $6.7 \pm 0.2 \text{ ‰}$ pour Bonne Fontaine est proche de celle rencontrée dans des sols où le nitrate est issu uniquement de la minéralisation de l'azote du sol. Sa teneur en tritium de $7 \pm 2 \text{ UT}$ est compatible avec une recharge récente de cette source (de l'ordre de quelques années).

La Figure 15 présente les gammes de $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{11}\text{B}$ du pôle non pollué (Bonne Fontaine), ainsi que les valeurs obtenues par d'autres auteurs sur des échantillons similaires (Shearer *et al.*, 1974; Rennie *et al.*, 1976; Ben Halima, 1977; Mariotti, 1984; Heaton, 1986)

Pour FJH1, son analyse montre qu'il contient 1.5 mg.l^{-1} de fer, témoin d'un milieu réducteur. L'absence de nitrates pourrait donc s'expliquer par la dénitrification, mais pas à partir d'un nitrate anthropogénique car le forage ne contient ni chlorures, ni phosphates. De plus la faible teneur en tritium ($2 \pm 1 \text{ UT}$) obtenue pour FJH1 peut être expliquée par un mélange entre l'eau de la nappe de l'arène (i.e. Bonne Fontaine) et l'eau d'un aquifère plus profond, eau rechargée probablement avant 1952 et où il est possible de supposer qu'il n'y avait pas de nitrates (car antérieure à la sur-productivité agricole).

En raison de la trop faible concentration en nitrates des eaux du forage FJH1 (environ 3 mg.l^{-1}), la composition isotopique en azote mesurée ($\delta^{15}\text{N} = -3.1 \text{ ‰}$) est de toute évidence incohérente et résulte d'un fractionnement isotopique analytique. Elle ne peut donc être prise en compte.

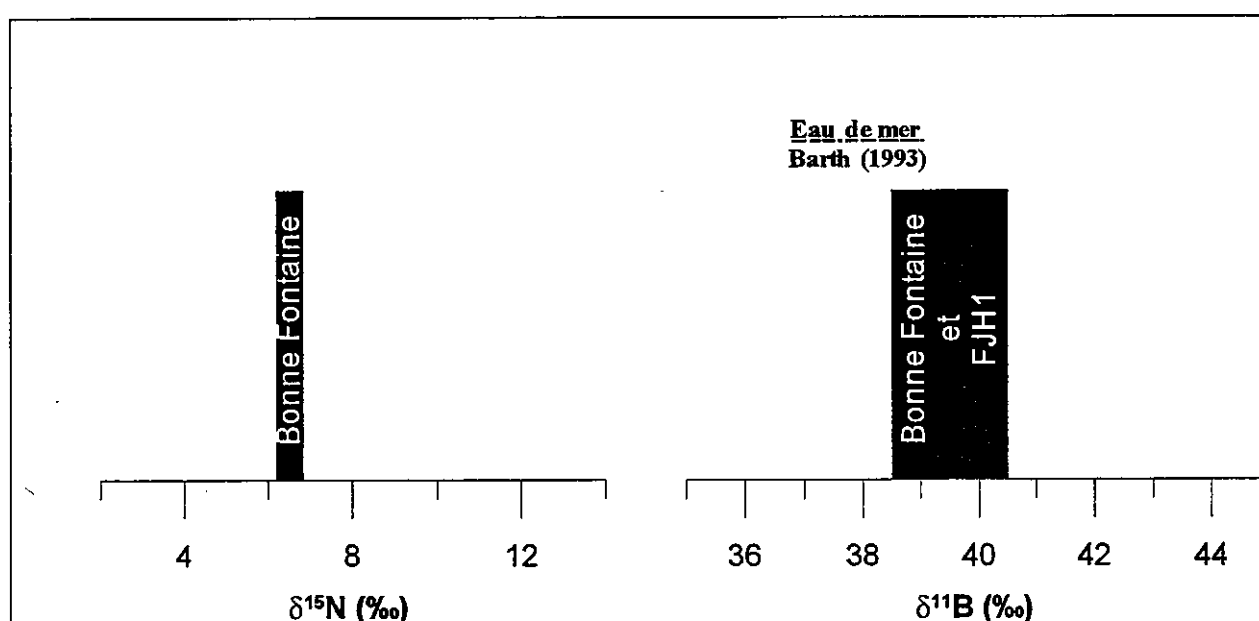


Figure 15. Gammes de compositions isotopiques $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{11}\text{B}$ de la minéralisation naturelle du sol.

7. Caractérisation de l'état initial des bassins versants

L'état initial des bassins versants correspond à celui de la première campagne d'échantillonnage (juin 99).

7.1. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE

Le tableau 4 rapporte les concentrations en nitrates pour la campagne d'échantillonnage de juin 99¹.

Echantillon	NO ₃ (mg.l ⁻¹ ± 5 %)
Bonne Fontaine	10
Noë Ronde	105
Loges	91.7
FCA1	60
PCA2	205
PPE2	16
PVE2	245
PVE1	198

Tableau 4. Concentrations en nitrates de l'état initial des bassins versants

Sur l'ensemble des mesures de concentrations en nitrates de l'état initial des bassins versants, seuls la Source Bonne Fontaine, le forage FJH1 et le puits PPE2 possèdent des valeurs inférieures au seuil autorisé de 50 mg.l⁻¹ (concentrations respectives de 10 et 16 mg.l⁻¹). Les autres concentrations sont comprises entre 60 et 245 mg.l⁻¹.

Bonne Fontaine, comme attendu, présente une très faible concentration en nitrates. De même PPE2 est un point situé en amont, sur une partie haute du bassin, sous prairie (la suite de la discussion montrera que malgré la faible concentration mesurée, les isotopes stables montrent que le site subit tout de même l'influence d'une composante anthropique).

Les eaux échantillonnées présentent des pH compris entre 5.5 et 6.3 pour les points d'eau souterraine et les drains, entre 7.1 et 7.6 pour les eaux de surface et 6 pour les eaux de pluie. Ces valeurs sont celles classiquement rencontrées pour des eaux en contexte de socle.

Les potentiels redox compris entre 271 et 487 mV témoignent d'un milieu relativement peu réducteur. La valeur la plus basse est mesurée dans le puits PPE2 (amont du bassin des Loges) où l'on observe une des plus faibles concentrations en nitrates (15.9 mg.l⁻¹), peut-être dû à des processus de dénitrification ? La valeur maximale est mesurée à la

¹ Par souci de clarté, nous ne reportons que les données de nitrates, élément central de l'étude ; le reste des données de caractérisation chimique est présenté en annexe 2.

source PVE2 (bassin des Loges) et correspond à une forte concentration en nitrates (245 mg.l^{-1}).

La figure 16 présente le diagramme de Piper établi à partir des données de l'état initial. Un tel diagramme permet de dépeindre les divers faciès présents ainsi que l'évolution chimique entre les différents points.

Les 2 exutoires montrent un faciès chloruré et nitraté sodique. Les autres sources, puits et forages ont un faciès chloruré et/ou nitraté calcique et magnésien. L'ion chlorure est dominant pour le puits PPE2, le forage FCA1 et la source Bonne Fontaine. L'ion nitrate est dominant pour les puits PVE1, PCA2 et la source PVE2.

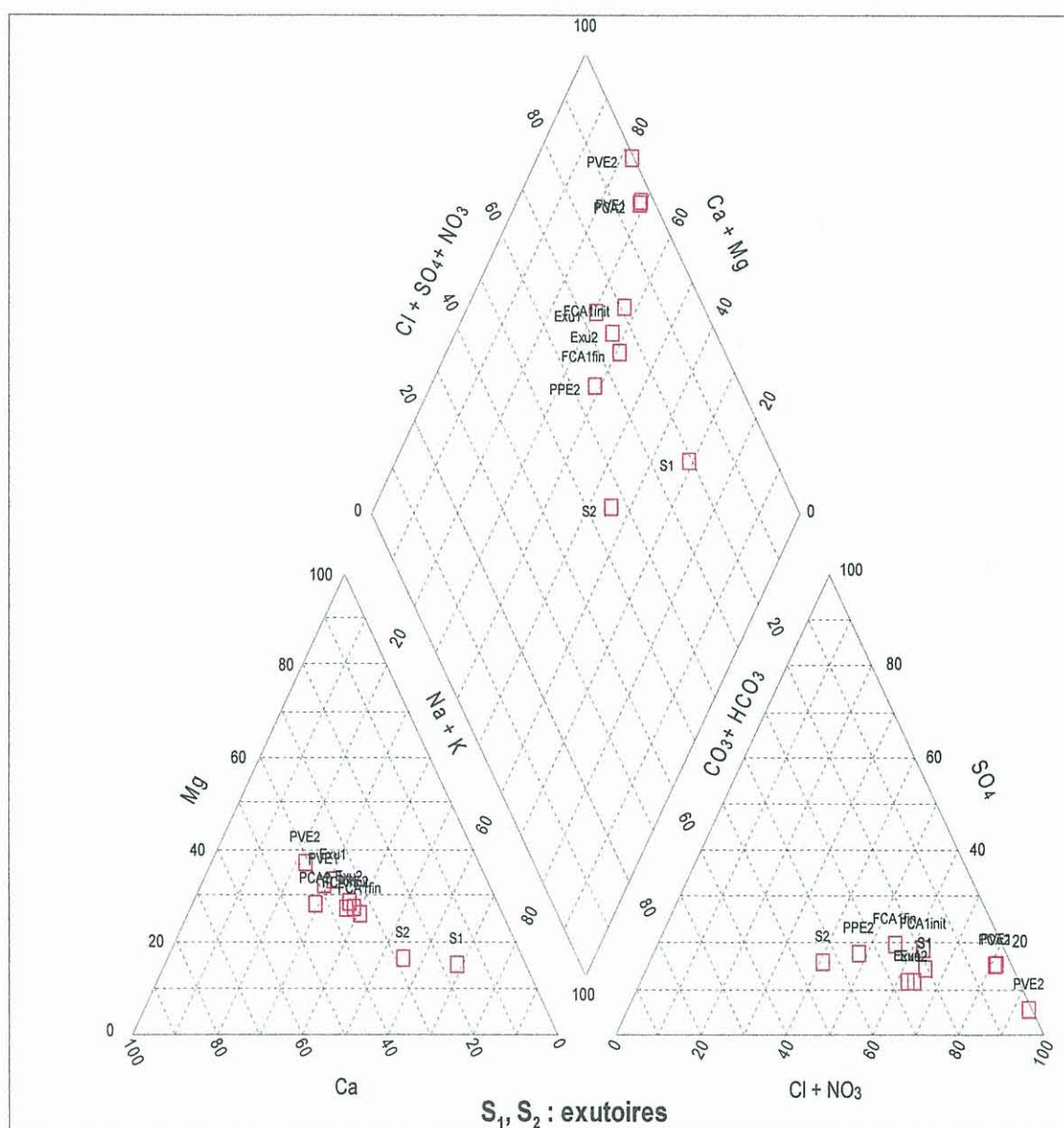


Figure 16. Diagramme de Piper de l'état initial

Classiquement des eaux circulant dans un tel contexte géologique, sans forte interaction eau-roche du fait de leur circulation relativement superficielle devraient avoir un faciès bicarbonaté calcique. *L'apport de chlorure et de nitrates n'est donc pas d'origine naturelle.* Il n'est cependant pas possible d'éliminer l'hypothèse d'un apport de chlorures par les pluies.

7.2. CARACTERISATION ISOTOPIQUE

Les données isotopiques mesurées sur les échantillons de la campagne de juin 1999 sont reportées en annexe 2.

Les résultats montrent qu'aussi bien au niveau des isotopes stables de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) que de ceux du bore ($\delta^{11}\text{B}$), les gammes de valeurs mesurées sont assez importantes (respectivement de 6.7 à 21 ‰ et 15.8 à 42.5 ‰), indiquant la présence de sources de nitrates et de bore multiples.

Les concentrations en nitrates montrent de larges variations de 3.2 ± 0.2 à 245 ± 12 mg.l^{-1} , pour une valeur moyenne de 106 ± 78 mg.l^{-1} , au-dessus de la valeur recommandée de 50 mg.l^{-1} . Les $\delta^{15}\text{N}$ correspondants varient de 6.7 ± 0.2 à 21 ± 0.2 ‰, valeurs comprises dans la gamme des compositions isotopiques des sources de pollution (-1.6 à 33.2 ‰, tableau 7).

Mais, ces valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ observées peuvent résulter de la superposition de 2 processus différents (figure 17) :

- ↪ Le mélange, par ajout de nitrates d'origine anthropique, ayant des $\delta^{15}\text{N}$ généralement supérieurs à 10 ‰ (mis à part les engrais chimiques).
- ↪ La dénitrification, naturelle, qui peut s'opérer dans les eaux souterraines sous certaines conditions (e.g. Mariotti, 1986).

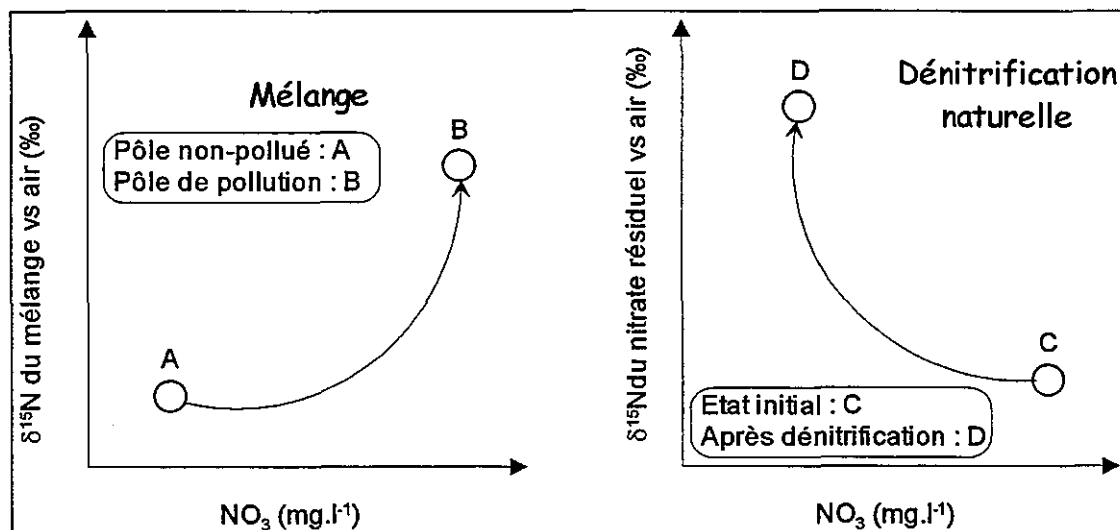


Figure 17. Influence du mélange et de la dénitrification naturelle sur la composition isotopique de l'azote des nitrates.

Ces 2 processus modifient dans le même sens les compositions isotopiques en azote des nitrates de l'eau (i.e. augmentation du $\delta^{15}\text{N}$, figure 17). Il est donc difficile d'émettre des hypothèses quant aux sources de pollution à partir des données seules.

Échantillon	$\delta^{15}\text{N}$ (± 0.2 ‰)	$\delta^{11}\text{B}$ (‰)
Bonne fontaine	6.7	38.5 $\pm$ 0.4
Noë Ronde	21.0	31.5 $\pm$ 0.4
Loges	13.4	15.8 $\pm$ 0.3
FCA1	13.3	42.5 $\pm$ 0.5
PCA2	12.5	32.9 $\pm$ 0.5
PPE2	20.8	34.0 $\pm$ 0.7
PVE2	9.5	40.4 $\pm$ 0.4
PVE1	8.8	29.6 $\pm$ 0.4

Tableau 5. Caractérisation isotopique de l'état initial

Le bore, au contraire, dans la mesure où il n'y a aucune interaction avec la matrice, est isotopiquement insensible au phénomène de dénitrification, il n'est régi que par le mélange. La gamme de $\delta^{11}\text{B}$ mesurée s'étend de 15.8 à 42.5 ‰. Là encore il s'agit d'une gamme importante couvrant l'ensemble des sources potentielles, depuis les engrais et le lagunage ($\delta^{11}\text{B}$ proches de 0 ‰ ; e.g. (Barth, 1993)) jusqu'aux lisiers de porcs ($\delta^{11}\text{B}$ supérieurs à 40 ‰). Les points d'eau semblent se classer en 3 catégories distinctes :

- ☞ $\delta^{11}\text{B} > 33$ ‰ : compatibles avec une signature lisier de porcs : FCA1, PVE2, PPE2, et PCA2.
- ☞ $25 < \delta^{11}\text{B} < 33$ ‰ : compatibles avec une signature lisier de volailles et bovins, mais qui n'exclut pas la possibilité du lisier de porcs : PVE1 et l'exutoire de la Noë Ronde.
- ☞ $\delta^{11}\text{B} < 25$ ‰ : compatibles avec une influence marquée d'une signature lagunage et/ou engrais : exutoire des Loges.

7.3. INTERPRETATIONS

L'eau qui arrive à l'Arguenon par les 2 exutoires de la Noë Ronde et des Loges apparaît comme un mélange, en proportions certainement variables dans le temps. Les transferts rapides dus au ruissellement, favorisé par les fortes pentes, et aux écoulements hypodermiques liés à l'importance des surfaces drainées, sont vraisemblablement majoritaires en période humide. Les écoulements souterrains lents circulent à différentes profondeur dans le sous-sol. Les eaux souterraines sont le plus souvent dépourvues en nitrates, ce qui conforte l'hypothèse de l'existence de dénitrification. A cette diversité de cheminement se superpose la diversité dans le temps et dans l'espace des sources de pollution, ce qui laisse présager d'une variabilité non négligeable de la composition des eaux aux exutoires.

Les fortes teneurs en nitrates observées dans les drains agricoles tendent à montrer qu'une grande partie des apports aux exutoires serait en partie liée à l'existence de ces écoulements superficiels à transfert rapide.

Au niveau du traçage de source des nitrates, les données isotopiques en azote sont difficilement exploitables en l'état (i.e. superposition de processus pouvant influencer sur le $\delta^{15}\text{N}$). Les compositions isotopiques en bore, quant à elles, permettent d'apporter des premières informations : la plupart des échantillons (FCA1, PCA2, PVE2, PVE1 et Noë Ronde) ont des $\delta^{11}\text{B}$ compatibles avec une source de pollution de type déjection animale, à l'exception de PPE2 et de l'exutoire des Loges qui semblent influencés plus nettement par un apport de type lagunage et/ou engrais.

La dilution des eaux de surface par les eaux souterraines plus profondes, soit dénitrifiées soit n'ayant jamais été polluées en nitrates, tamponnerait leurs concentrations en nitrates, mais tendrait par la même occasion à masquer l'importance du phénomène de pollution présent.

8. Suivi du bassin versant sur un cycle hydrologique

8.1. SUIVI CHIMIQUE HEBDOMADAIRE ET MENSUEL

Des analyses physico-chimiques ont été réalisées sur l'ensemble des points d'eau, de manière régulière, au cours d'un cycle hydrologique (annexe n°3). Ceci dans le but de pouvoir suivre les éventuelles variations associées aux nitrates et de pouvoir mieux contraindre les processus régissant le cycle de l'azote dans les eaux souterraines de l'Arguenon.

De même au cours de ce suivi, un historique des épandages a été réalisé par COOPERL HUNAUDAYE (annexe 6). Lors de cette campagne culturale, une enquête menée sur le terrain a permis de recueillir quelques données concernant le suivi d'épandages de quelques parcelles avec les produits épandus (quantité, date d'épandage, engrais ou fertilisants azotés).

La majorité des points d'eau mesurés (Les Loges, Noë Ronde, PVE2, PCA2 et FVE1) ont des teneurs en nitrates généralement supérieures à la valeur seuil de 50 mg.l⁻¹ tout au long de l'année.

FJH1 a bien des concentrations inférieures à la valeur pour l'usage AEP, variant d'un peu moins de 3.5 mg.l⁻¹ à moins de 0.5 mg.l⁻¹ (figure 18).

Les concentrations en nitrates du puits PPE2 sont toujours inférieures à 50 mg.l⁻¹, quant à celles du forage FCA1, bien que les dépassant légèrement au début de l'année 2000 ainsi qu'au mois de mai 2000, elles sont aussi inférieures à cette valeur (figure 18).

Pour les 2 exutoires (Loges et Noë Ronde), les figures 19 et 20 présentent les variations en nitrates en fonction des pluies (station météorologique de Trémeur), et des variations de débit à l'exutoire des 2 sous-bassins. Ces graphiques confirment les résultats obtenus par la modélisation Gardénia. A l'étiage, une forte diminution des teneurs en nitrates est observée au niveau des deux exutoires : ceci est lié à la diminution de l'écoulement rapide et à l'augmentation de l'influence des réservoirs souterrains moins chargés en nitrates. De plus, il existe une dilution des teneurs en nitrates mesurées au niveau des deux exutoires (mai et juillet 2000), mais cette dilution est souvent cachée par les épandages successifs. Les étiages peu soutenus des rivières de la Noë Ronde et des Loges (respectivement 0,166 et 0,633 l/s) indiquent que les bassins versants sont d'avantage soumis au ruissellement « anthropique » qu'à l'infiltration.

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

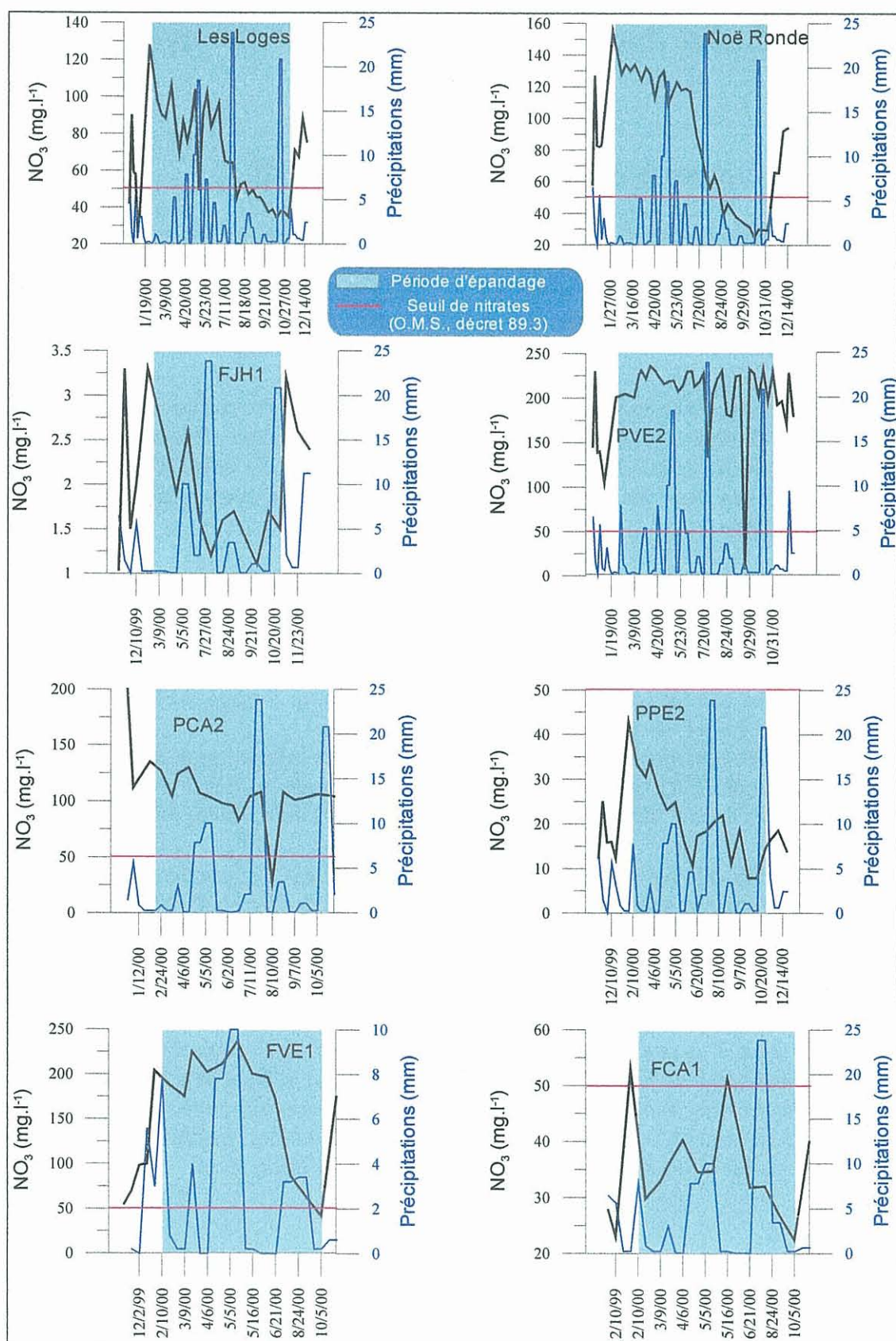
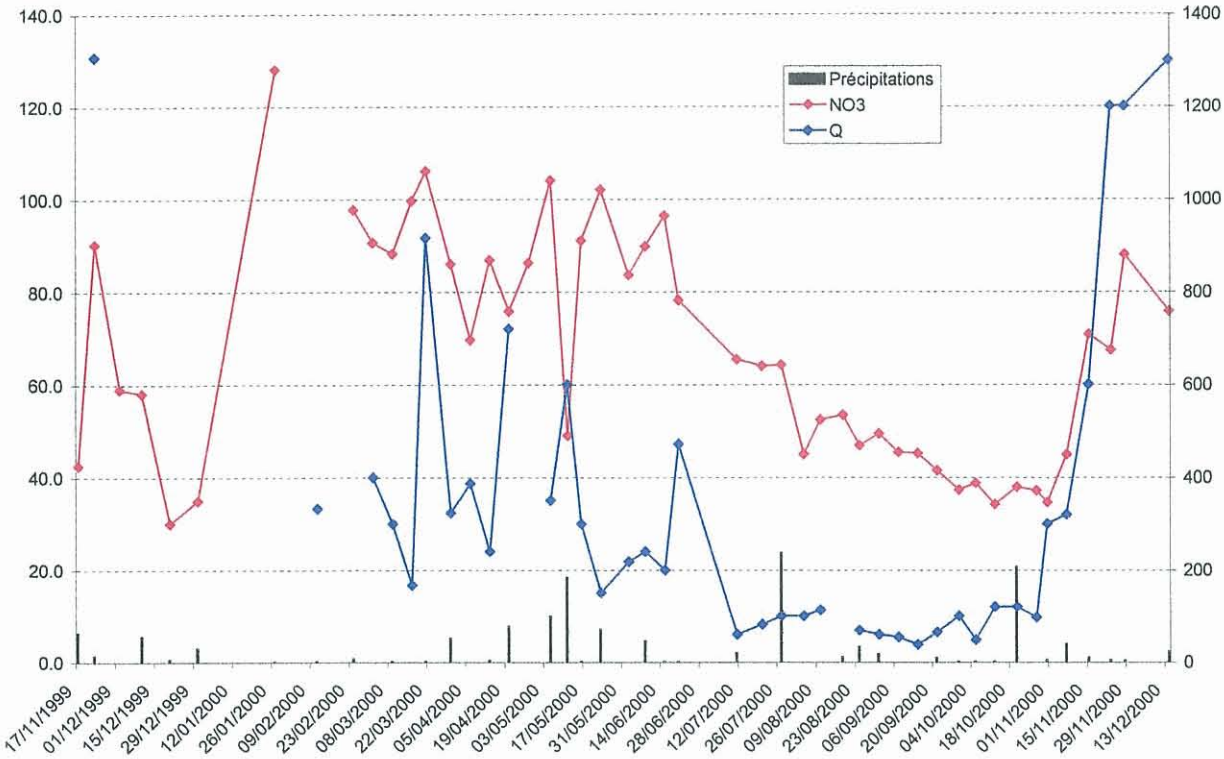
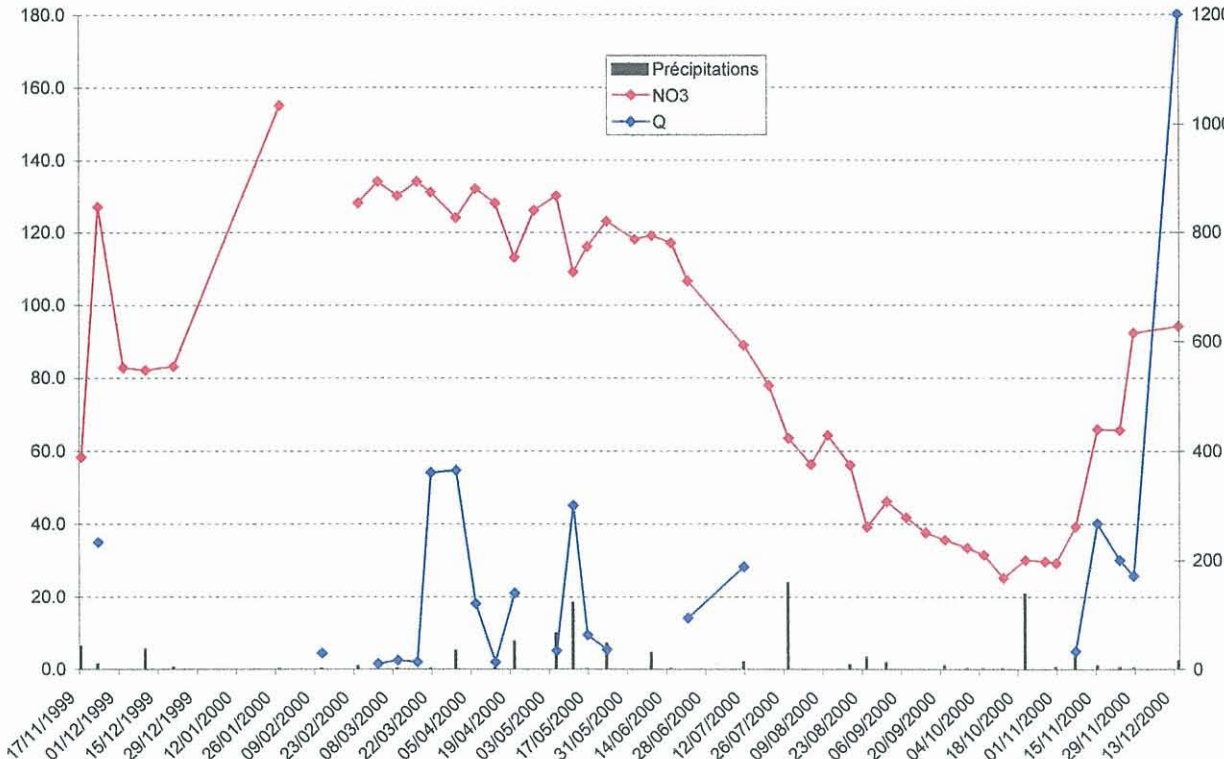


Figure 18. Évolution des concentrations en nitrates, pluviométrie au cours d'un cycle hydrologique

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*



**Figure 19 . Relations précipitations, concentrations en nitrates
et débit à l'exutoire des Loges**



**Figure 20 . Relations précipitations, concentrations en nitrates
et débit à l'exutoire de la Noë Ronde**

L'utilisation du modèle Gardénia montre qu'aux mois de septembre et d'octobre, la totalité de l'écoulement provient du réservoir souterrain profond : les teneurs moyennes en nitrates le caractérisant seraient alors les suivantes : 39 mg.l⁻¹ (Loges) et 33 mg/l (Noë Ronde), ces dernières valeurs sont en accord avec les teneurs du forage FCA1 (moyenne de 36 mg/l) où il existerait déjà un abattement lié à la dénitrification ; un processus « plus poussé » de dénitrification peut aboutir à des teneurs de 2 mg/l (cas du forage FJH1). le forage PPE2 se trouve en amont du bassin versant et sa teneur moyenne de 20 mg/l peut s'expliquer par sa situation géographique peu soumise à l'épandage. La source PVE2 située à mi-pente du bassin versant des Loges, semble représentative des fortes teneurs en nitrates (environ 200 mg/l) liées au drainage agricole sur les parcelles soumises à l'épandage. Ces teneurs sont assez stables durant l'année hydraulique et sont parfois fortement diluées par les précipitations (abattement de 20 à 40 mg/l).

Les teneurs en nitrates du forage FVE1 (150 mg/l en moyenne) et du puits PCA2 (118 mg/l) pourraient s'expliquer par un mélange des eaux du réservoir souterrain superficiel et de l'écoulement rapide (drainage superficiel), avec peu (PCA2) ou pas d'influence (FVE1) du réservoir souterrain plus profond. Ces remarques montrent l'influence importante des drainages des parcelles.

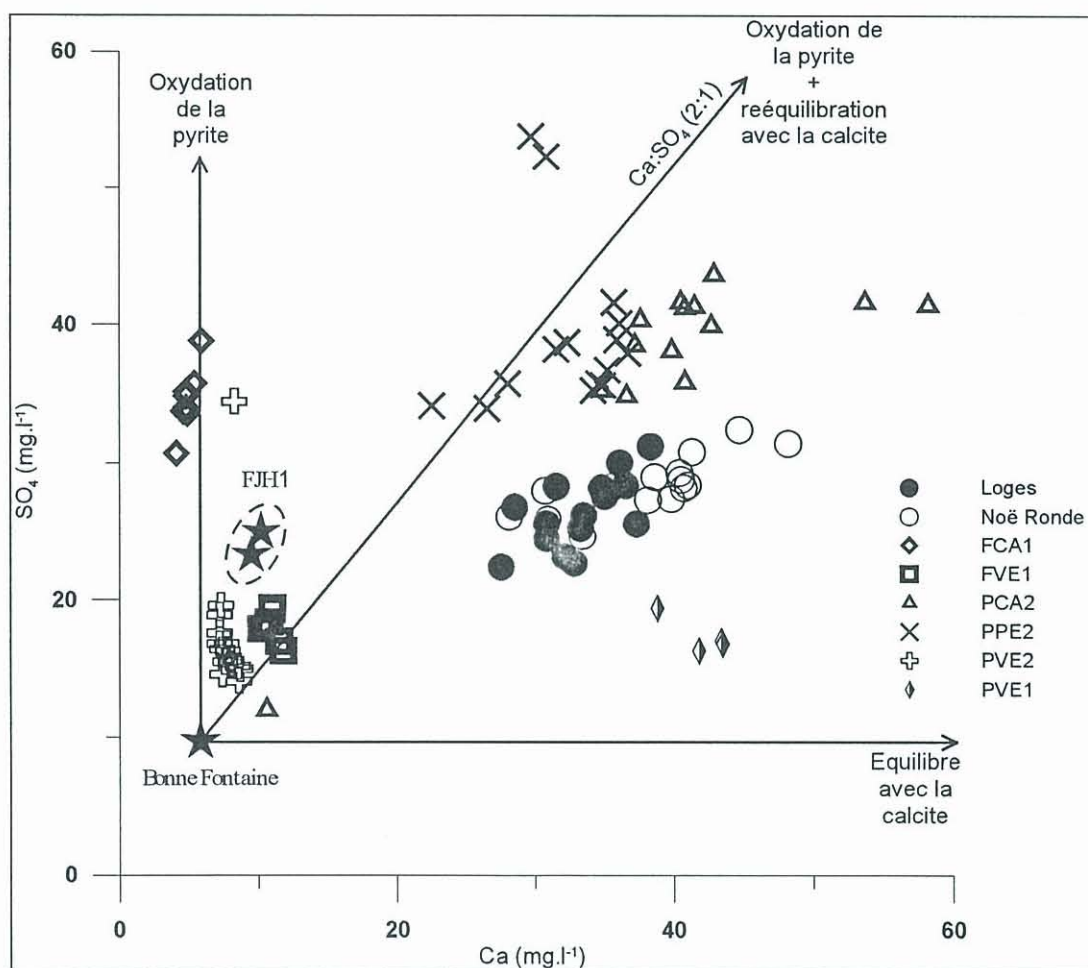


Figure 21. Relations calcium - sulfates dans les eaux des bassins versants étudiés

La figure 21 présente les variations des concentrations en calcium et sulfates des eaux de l'Arguenon à l'échelle d'un cycle hydrologique. L'intérêt de ce diagramme réside dans la possibilité de pouvoir mettre en évidence une éventuelle présence de dénitrification (ceci sera de nouveau discuté par la suite). La dénitrification se situe entre la disparition d'oxygène dissous par respiration aérobie et l'apparition en solution d'ions dont notamment les sulfates.

Les données de la figure 21 semblent suivre plusieurs tendances. Les concentrations en SO_4 de certains échantillons (FCA1 et PVE2) s'expliquent par une simple oxydation de la pyrite, ce qui, sans en être une preuve (la dénitrification peut aussi se faire par réaction avec la matière organique), est propice au phénomène de dénitrification naturelle (Panno *et al.*, 2001). Quant à PPE2 et la majorité des échantillons de PCA2, leurs concentrations s'expliquent de nouveau par une oxydation de la pyrite mais suivie d'une équilibration avec de la calcite. Les échantillons des Loges, Noë Ronde et PVE1, s'expliquent de la même manière que précédemment, mais à la suite de l'oxydation et de l'équilibration, l'eau continue de dissoudre de la calcite (sans autre apport de sulfates).

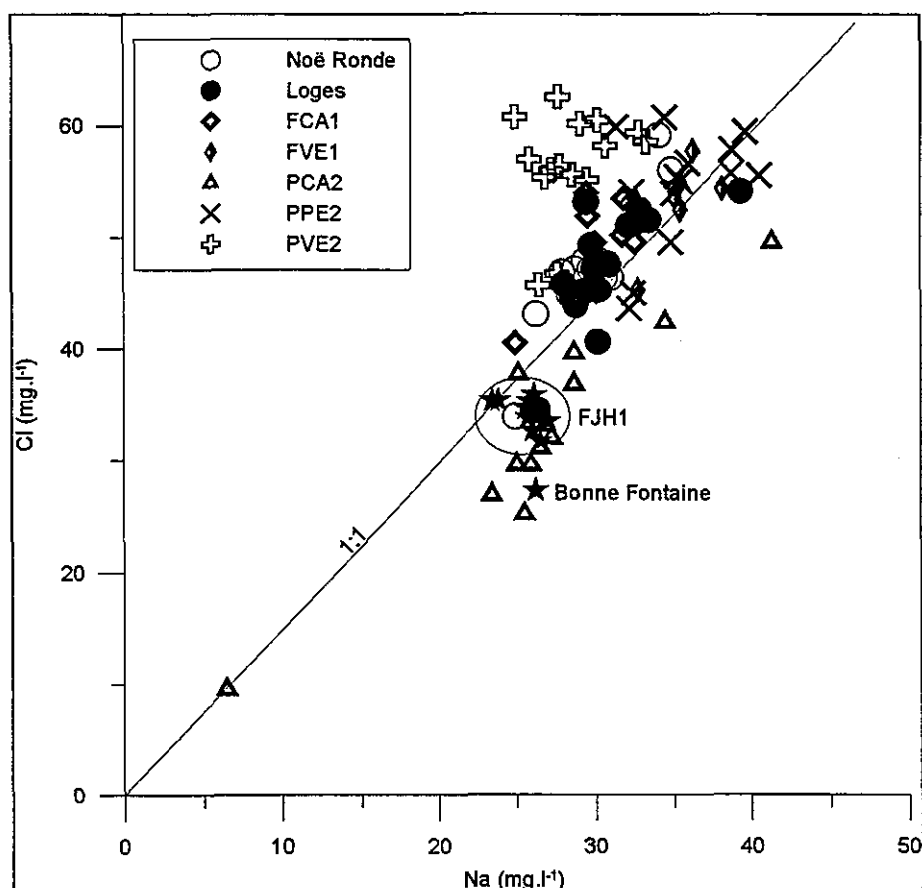


Figure 22. Relations chlorure- sodium dans les eaux étudiées

Les concentrations en chlorures du site d'étude, dans la majorité des échantillons, entre 15 mg.l^{-1} et 70 mg.l^{-1} . La figure 22 montre que si le chlorure semble avoir une origine naturelle (jusqu'à 30 mg.l^{-1} de chlorure dans les pluies sur la zone considérée), une

partie des échantillons, et notamment PVE2 et dans une moindre mesure la Noë Ronde, les Loges et FCA1 et PPE2 sont enrichis en chlore (par rapport à la concentration attendue étant donné leur concentration en sodium), indiquant vraisemblablement une origine anthropogénique ou des échanges cationiques.

FJH1 et Bonne Fontaine présentent des teneurs en chlorure proches de celles des pluies et un léger enrichissement en sodium qui peut s'expliquer par une interaction avec l'encaissant (sodium issu des minéraux des granites).

L'étude des résultats des analyses chimiques au cours du suivi sur une année hydrologique confirme les résultats de la modélisation Gardénia.

L'évolution des teneurs en nitrates en fonction des pluies et du débit montrent l'importance du rôle des drainages des parcelles dans l'augmentation des teneurs en nitrates. En période d'étiage, la forte diminution des teneurs en nitrates dans les 2 exutoires montre l'influence très nette du réservoir souterrain. Les teneurs observées aux mois de septembre – octobre représenteraient la teneur moyenne de base du réservoir souterrain sur le site étudié, et serait de 30-40 mg.l⁻¹. C'est en général la valeur que l'on retrouve à l'étiage dans les forages FCA1 et FVE1.

Cette composante souterraine est constituée de la composante profonde mais aussi probablement de l'écoulement de la zone arénisée.

Dans le forage FJH1 la teneur observée serait plus proche de celle du réservoir profond (probablement meilleure isolation des arrivées du compartiment supérieur), avec un processus de dénitrification qui se superpose et qui tendrait à diminuer la teneur observée.

Le suivi des autres éléments ne permet pas de discriminer les différentes origines possibles des nitrates.

8.2. TRAÇAGE ISOTOPIQUE DES SOURCES DE NITRATES

8.2.1. Apport des isotopes du strontium

Une première estimation des processus affectant l'aquifère peut être apportée par l'étude des compositions isotopiques du strontium (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr). La figure 23 présente les variations du rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr de chaque échantillon² en fonction de l'inverse de sa concentration en strontium (il n'a été réalisé qu'une mesure par site, correspondant à la campagne de prélèvement de mars 2000).

Les points s'alignent sur une droite relativement contrainte ($r^2=0.82$). Or dans un tel diagramme, une droite est représentative d'un mélange binaire³.

Les isotopes du strontium montrent que les prélèvements s'expliquent par un mélange binaire entre un pôle non-pollué (représenté ici par FJH1) et un pôle de pollution, qu'il appartient de déterminer.

² Pour les échantillons issus d'un même contexte géologique, ce qui exclut la source Bonne Fontaine.

³ L'abscisse et l'ordonnée ayant le même dénominateur (car $\text{Sr} \approx {}^{86}\text{Sr}$).

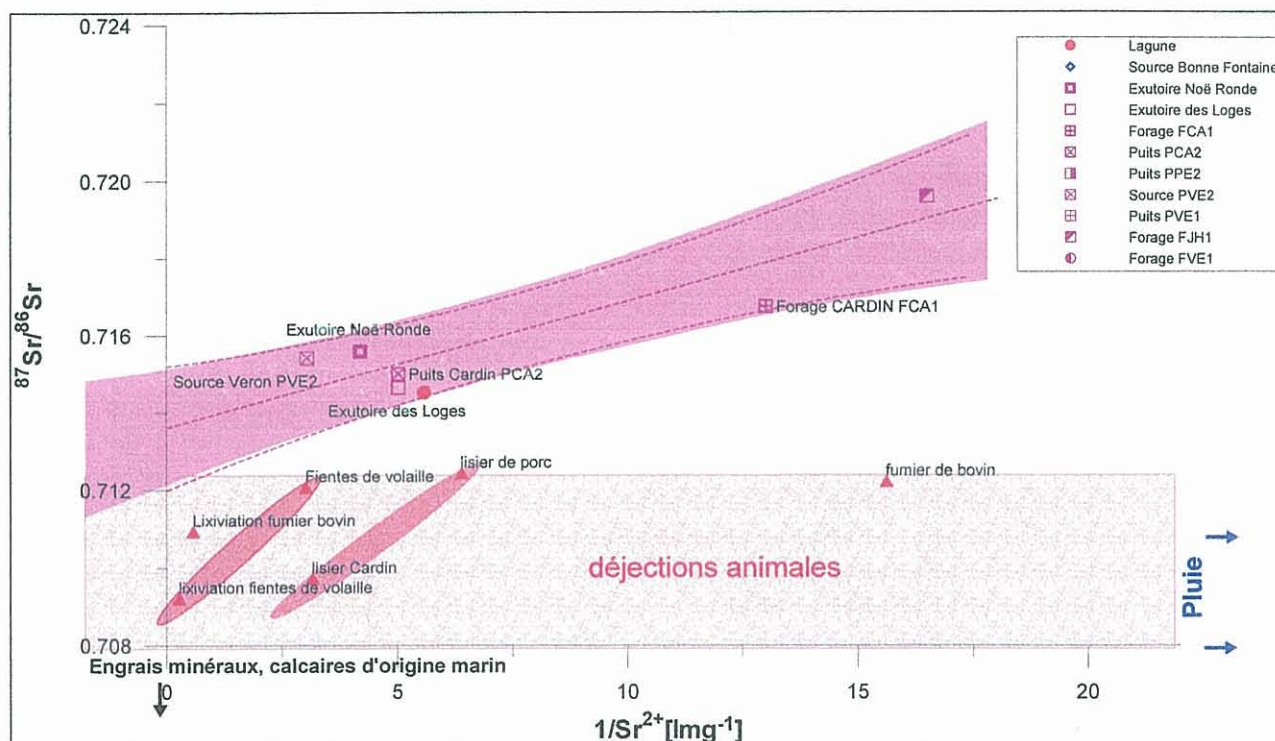


Figure 23. Relations $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et concentration en strontium

Il est possible de donner une première estimation de la composition isotopique en strontium du pôle moyen de pollution à l'échelle de la période de prélèvement, par l'ordonnée à l'origine de la droite de mélange. L'intervalle de confiance à 95 % de l'intercepte s'étend de 0.715 à 0.712. Cette valeur minimale est compatible avec la gamme supérieure des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des polluants potentiels. Les sources ayant les valeurs les plus proches de cette valeur extrapolée (déjections animales) ont une gamme trop peu discriminante pour pouvoir en identifier une précisément (0.709 à 0.712).

Toutefois, étant donné leur rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ bas, les engrais ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.707876$) et les eaux météoriques ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.708727$) ne semblent pas avoir d'influence sur le bassin versant.

Le fait que les eaux peu concentrées (FJH1) ont des valeurs très radiogéniques (rapports élevés) s'explique par un apport en strontium des roches du bassin versant. Des valeurs aussi élevées sont compatibles avec la nature (gneiss, micaschistes, ...) et l'âge de ces roches. Le contraste isotopique entre les eaux de pluie ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ d'environ 0.710) et l'eau de FJH1 témoignerait du rôle important de l'interaction eau-roche dans le bilan du strontium du bassin à laquelle se superpose l'influence de la contamination.

Le traçage par les isotopes du strontium permet de confirmer l'influence des pollutions dans l'acquisition des teneurs en strontium des eaux échantillonnées, sans pouvoir discriminer clairement l'origine de cette pollution.

8.2.2. Apport des isotopes de l'azote

a) Mise en évidence des processus de dénitrification

La principale difficulté de l'utilisation des isotopes stables de l'azote comme traceurs de sources de nitrates réside dans l'éventuelle superposition de deux processus majeurs pouvant fractionner les isotopes de l'azote : le mélange et la dénitrification.

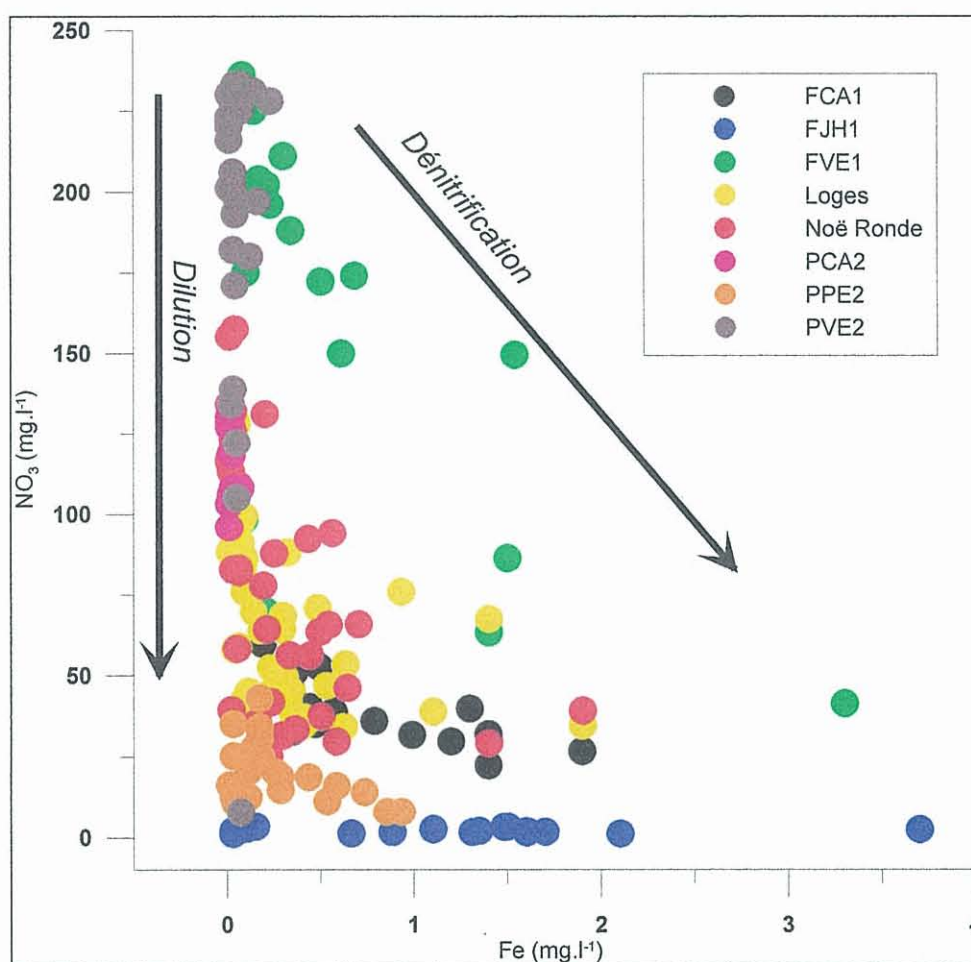


Figure 24. Relations nitrates – fer total dans le bassin versant

Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer la présence ou non de dénitrification (Mariotti, 1986).

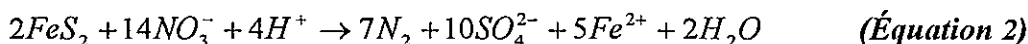
L'une d'elle repose sur l'étude du potentiel redox (Eh) du système. S'il existe un gradient de potentiel redox dans un système fermé, les oxydants dans l'aquifère sont réduits suivant la séquence : O_2 , NO_3^- , $Mn[IV]$, $Fe[III]$, SO_4^{2-} , ... (Stumm, W. et Morgan, 1981).

La dénitrification se situe donc entre la disparition de l'oxygène dissous par respiration aérobie et l'apparition en solution des ions Mn^{2+} et Fe^{2+} , si les minéraux correspondants

sont présents dans les roches encaissantes (Mariotti *et al.*, 1988). On passe ainsi de l'état oxydé en zone de recharge à un état réduit à potentiel redox inférieur ou égal à celui qui témoigne du processus de dénitrification.

La figure 24 reprend l'ensemble des données de concentrations en fer total en fonction de celles en nitrates pour l'ensemble des données du bassin versant. Les résultats montrent qu'il existe une relation inverse entre les concentrations des deux éléments. Lorsque les concentrations en fer augmentent les concentrations en nitrates diminuent.

Il semble donc que la dénitrification fasse partie des processus contrôlant les concentrations de nitrates dans le bassin. De plus, le fait d'obtenir cette dépendance entre les nitrates et le fer pourrait s'expliquer par une réaction de dénitrification biochimique de type chemiolithotrophe (autotrophe) faisant intervenir la pyrite FeS_2 (Landreau *et al.*, 1988), implication de la pyrite confirmée par la relation Ca-SO_4 de la figure 21 :



Cette interprétation, basée sur la chimie classique, peut être appuyée par l'utilisation des isotopes stables de l'azote. En effet, lors de la réaction de dénitrification, il se produit un fractionnement isotopique dû au fait que les liaisons établies entre l'oxygène et l'isotope léger de l'azote (^{14}N) sont plus facilement rompues que celles établies avec l'isotope lourd (^{15}N). Ainsi, lors d'un processus de dénitrification, le nitrate résiduel (i.e. dissous) est enrichi en ^{15}N par rapport à sa composition isotopique initiale (Mariotti, 1982). Cette évolution suit la loi classique de Rayleigh en matière de fractionnement isotopique :

$$\delta - \delta_0 = \varepsilon \ln \frac{C}{C_0} \quad (\text{Équation 3})$$

δ : composition isotopique de l'azote nitrique résiduel.

δ_0 : composition isotopique de l'azote nitrique initial (i.e. avant dénitrification).

C : concentration de l'azote nitrique mesuré.

C_0 : concentration initiale de l'azote nitrique.

ε : coefficient d'enrichissement isotopique.

Les valeurs de compositions isotopiques en azote ($\delta^{15}\text{N}$) sont reportées en fonction du logarithme de la concentration en nitrates sur la figure 25. Les données obtenues montrent une tendance linéaire ($r = 0.77$), ce qui est en accord avec l'équation 1, est représentatif d'un processus de dénitrification (un processus de mélange majoritaire aurait donné une courbe d'allure hyperbolique). La pente de la droite dans ce diagramme donne la valeur de l'enrichissement isotopique de la réaction, $\varepsilon = -3.1 \pm 0.5$ ‰. Cette valeur d'enrichissement isotopique est comparable à celle obtenue pour un contexte géologique similaire par Pauwels *et al.* (2000), $\varepsilon = -4$ ‰.

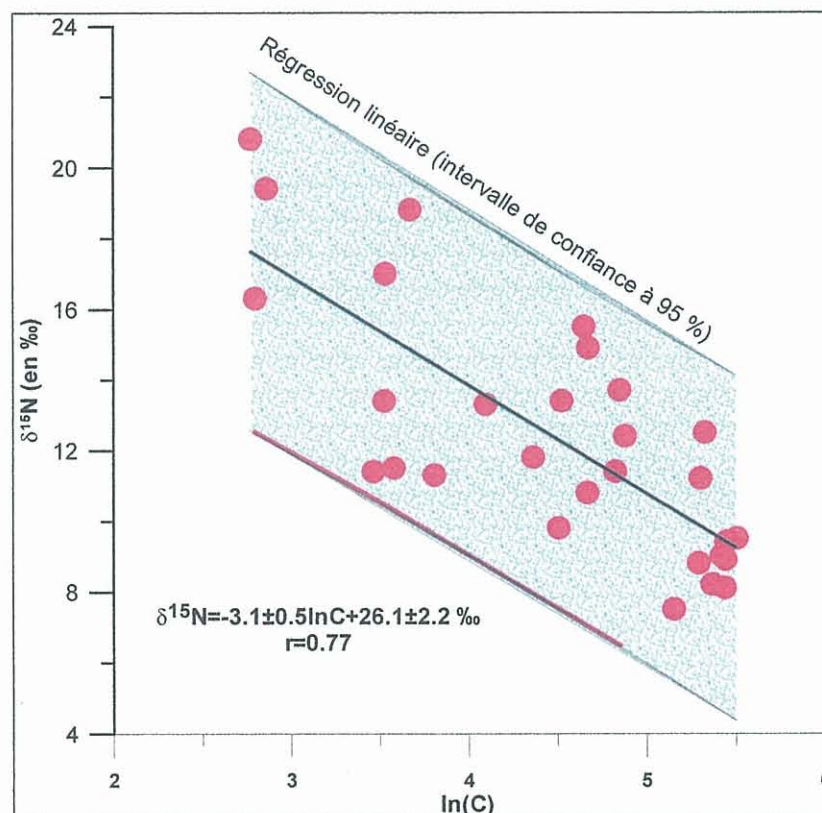


Figure 25. Variations de la composition isotopique en azote en fonction du logarithme de la concentration en nitrates à l'échelle du bassin versant

Il est important toutefois de noter que l'existence de la dénitrification n'exclut pas la présence de processus de mélange, ce diagramme permet de dire que l'étude des isotopes stables de l'azote montre une influence de la dénitrification qui affecte le $\delta^{15}\text{N}$. Bien qu'il soit impossible de quantifier la quantité d'azote dénitrifiée, cela met tout de même en avant le rôle tampon de ce processus. Si la dénitrification n'opérait pas dans le bassin, les concentrations élevées en nitrates mesurées dans les eaux souterraines le seraient encore plus.

La figure 26 présente les relations $\delta^{15}\text{N}$ en fonction de la concentration en nitrates pour l'ensemble des échantillons. Sur le même diagramme sont reportés les domaines correspondant aux différentes sources de pollution, ainsi que la modélisation de certaines courbes de dénitrification et de mélange binaire.

Ne connaissant pas la concentration réelle en nitrates du pôle polluant, il n'est possible de faire que des hypothèses sur l'évolution isotopique liée à la dénitrification. Pour le modèle appliqué dans la figure 26, une concentration initiale du polluant en NO_3 de 300 mg.l^{-1} a été considérée (valeur supérieure à la concentration la plus élevée mesurée dans les échantillons d'eaux polluées).

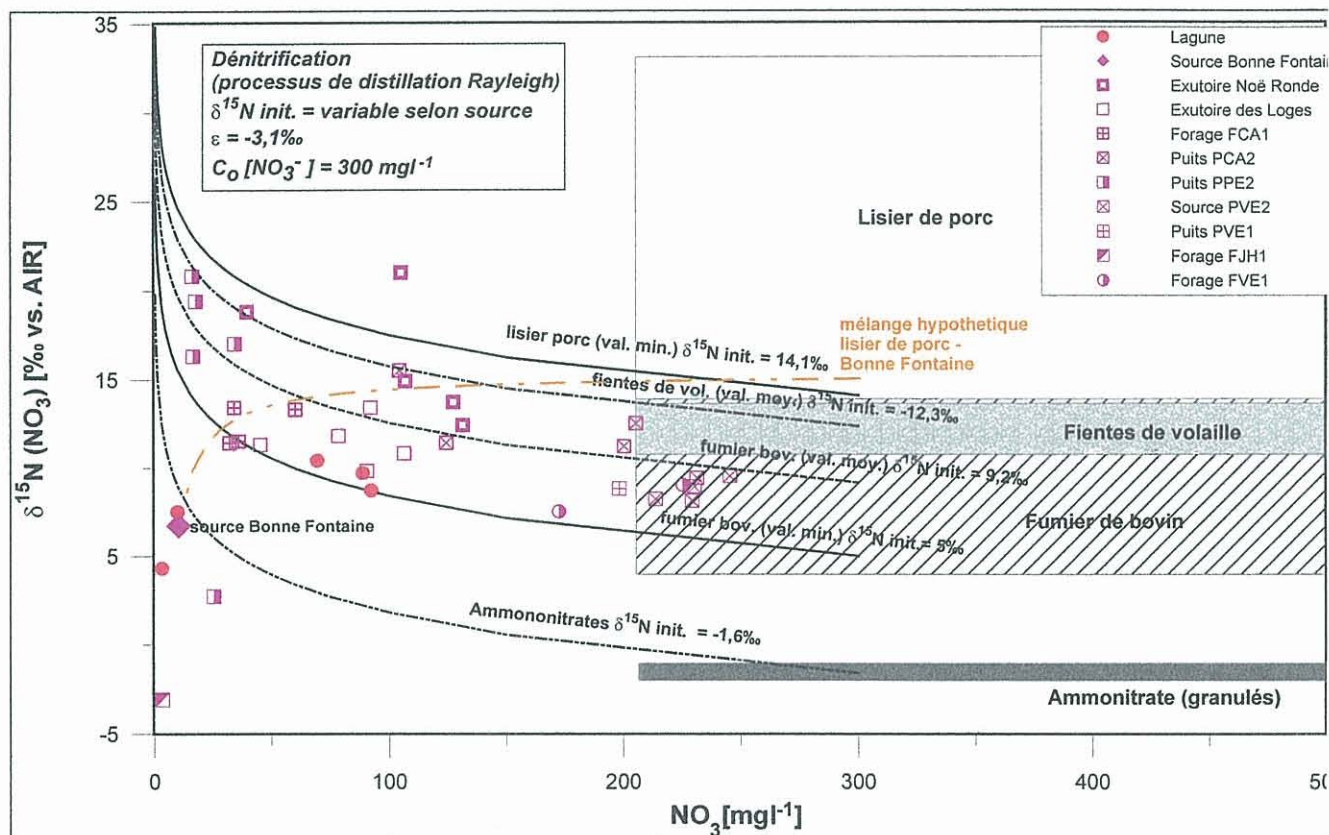


Figure 26. Relations $\delta^{15}N$ en fonction de la concentration en nitrates

Une première observation est qu'une augmentation du $\delta^{15}N$ accompagnant une diminution de la concentration en nitrates est observée. Ceci, en accord avec l'équation 3, est compatible avec un processus de dénitrification naturelle sur le bassin versant.

Les courbes de dénitrification calculées, pour les nitrates provenant de déjections animales, englobent la presque totalité des échantillons. L'influence des ammonitrates semble négligeable dans la mesure où les valeurs modélisées sont supérieures aux valeurs observées. Il n'est néanmoins pas possible d'exclure l'influence des processus de mélange. A titre d'exemple est reportée sur la figure 26 la modélisation d'un mélange binaire entre Bonne fontaine et un pôle lisier de porcs. Des séries de courbes similaires pourraient également expliquer la position de la plupart des points dans le diagramme.

Il apparaît donc que sur la seule base des isotopes stables de l'azote, il n'est pas possible de discriminer clairement mélange et processus de dénitrification. Il semble néanmoins que la dénitrification joue un rôle significatif dans le bilan nitrates du bassin versant.

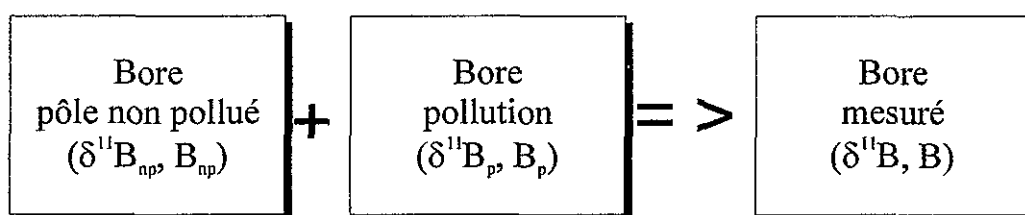
Il est également difficile de se lancer dans une mesure quantitative des contributions respectives de différentes sources de pollution. Cependant, il est possible de présumer que la composition isotopique des eaux les plus polluées est proche de celles des polluants eux-mêmes. Ces eaux les plus concentrées en nitrates se situent dans le domaine des fumiers de bovins (un mélange lisier de porcs – engrais est moins probable, cf discussion sur le strontium).

8.2.3. Apport des isotopes du bore

Afin de renforcer les contraintes sur le traçage des sources de nitrates du bassin apportées par les isotopes stables de l'azote, une étude conjointe des isotopes stables du bore a été réalisée.

Le choix du bore a été motivé par le fait que c'est un élément conservatif, c'est à dire qu'il est peu sensible aux processus biologiques (i.e. ils n'ont aucune influence sur sa composition isotopique), et notamment à celui de la dénitrification (Bernard *et al.*, 1996). C'est de plus une systématique ayant déjà fait ses preuves dans le domaine du traçage de sources de nitrates dans l'eau (Leenhouts *et al.*, 1998). Sa composition isotopique peut néanmoins être modifiée par des interactions avec l'encaissant (dissolution, précipitation, adsorption, désorption) qui doivent être prises en compte dans l'interprétation des données.

Nous avons adopté un modèle de mélange bipolaire simple qui prend en compte un pôle polluant (pouvant résulter du mélange de plusieurs sources de pollution) et un pôle non pollué. Le raisonnement suivi est le suivant : le bore présent dans les eaux souterraines est le produit de mélange du bore d'un pôle non-pollué plus celui issu de la ou des sources de pollution :



où chaque boîte est caractérisée par sa composition isotopique en bore ($\delta^{11}\text{B}$) et sa concentration en bore (B) spécifiques. Concernant le pôle non pollué les résultats obtenus sont, dans les barres d'erreur, insensibles au choix de ce dernier (entre Bonne Fontaine et FJH1). Par souci de cohérence avec l'azote, le pôle Bonne Fontaine a été retenu dans les calculs.

Au niveau isotopique, ceci se traduit par une simple équation de mélange, définie par le système :

$$\begin{cases} B = a \times B_{np} + (1 - a) \times B_p \\ a \times B_{np} \times \delta^{11}B_{np} + (1 - a) \times B_p \times \delta^{11}B_p = B \times \delta^{11}B \end{cases} \quad (\text{Équation 4})$$

où « a » représente la proportion du pôle non-pollué dans le mélange. Dans un diagramme $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de l'inverse de la concentration en bore, ces équations de mélange se traduisent par des droites (Fig. 27).

A partir de ces différentes hypothèses il est possible de donner une gamme de compositions isotopiques en bore pour les sources de pollution de chaque échantillon. Une première limite de cette gamme est donnée par la mesure de $\delta^{11}\text{B}$ de l'échantillon

lui-même. En effet, cela correspond à la concentration minimale qui peut représenter la source de pollution (et donc sa composition isotopique associée). A l'autre extrémité de la gamme on retrouve ce qui doit représenter la concentration maximale en bore de la source de pollution (i.e. sa concentration réelle dans l'absolu). En première approximation il est possible de prendre la concentration correspondant à $1/B=0$, c'est à dire une concentration en bore infinie pour la source de pollution.

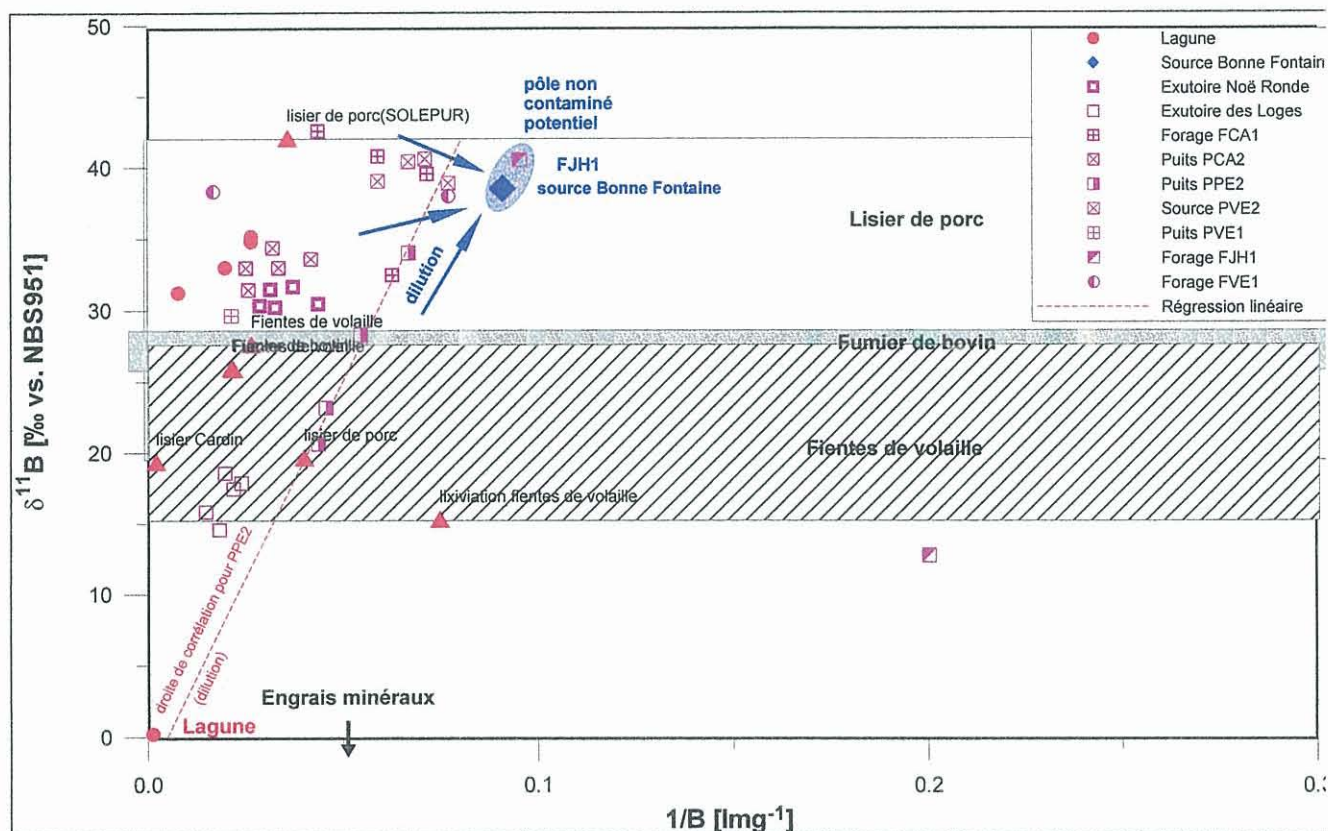


Figure 27. Relations $\delta^{11}\text{B} - 1/\text{Sr}$ pour l'ensemble des échantillons

En résumé, la valeur $\delta^{11}\text{B}_p$ de chaque échantillon sera comprise entre la valeur $\delta^{11}\text{B}$ mesurée sur l'échantillon et $\delta^{11}\text{B}_{p0}$, l'ordonnée à l'origine de la droite passant par le pôle non-pollué et l'échantillon (dans le diagramme $\delta^{11}\text{B}$ -1/B, Fig. 27).

Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 6.

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Échantillon	Date	$\delta^{11}\text{B}$ (‰)	$\delta^{11}\text{B}_{\text{p0}}$ (‰)
Exutoire Noë Ronde	22/06/99	31.5	27.8
Exutoire Noë Ronde	23/11/99	30.3	26.5
Exutoire Noë Ronde	21/03/00	30.4	23.0
Exutoire Noë Ronde	21/06/00	31.6	26.9
Exutoire Noë Ronde	07/11/00	30.2	25.6
Exutoire des Loges	21/06/99	15.8	11.4
Exutoire des Loges	23/11/99	18.5	13.0
Exutoire des Loges	21/03/00	17.8	10.5
Exutoire des Loges	20/06/00	14.5	8.6
Exutoire des Loges	07/11/00	17.4	10.8
Forage FCA1	21/06/99	42.5	46.2
Forage FCA1	22/06/99	40.8	44.9
Forage FCA1	22/03/00	32.5	19.1
Forage FCA1	21/06/00	39.5	43.3
Puits PCA2	22/06/99	32.9	30.8
Puits PCA2	23/11/99	31.4	28.6
Puits PCA2	22/03/00	33.6	29.4
Puits PCA2	21/06/00	33.0	29.8
Puits PCA2	07/11/00	34.4	32.1
Puits PPE2	22/06/99	34.0	21.6
Puits PPE2	23/11/99	23.1	7.8
Puits PPE2	20/06/00	20.6	4.2
Puits PPE2	07/11/00	28.3	13.0
Source PVE2	22/06/99	40.4	45.5
Source PVE2	23/11/99	39.0	39.9
Source PVE2	22/03/00	38.9	40.9
Source PVE2	07/11/00	40.6	47.9
Puits PVE1	21/06/99	29.6	26.9
Forage FVE1	23/03/00	38.0	35.1
Forage FVE1	21/06/00	38.3	38.2

Tableau 6. Compositions isotopiques des pôles de pollution en bore ($\delta^{11}\text{B}_p$)

Il est alors possible de comparer ces valeurs avec celles des sources de pollution afin de dégager les sources majoritaires (Fig. 28).

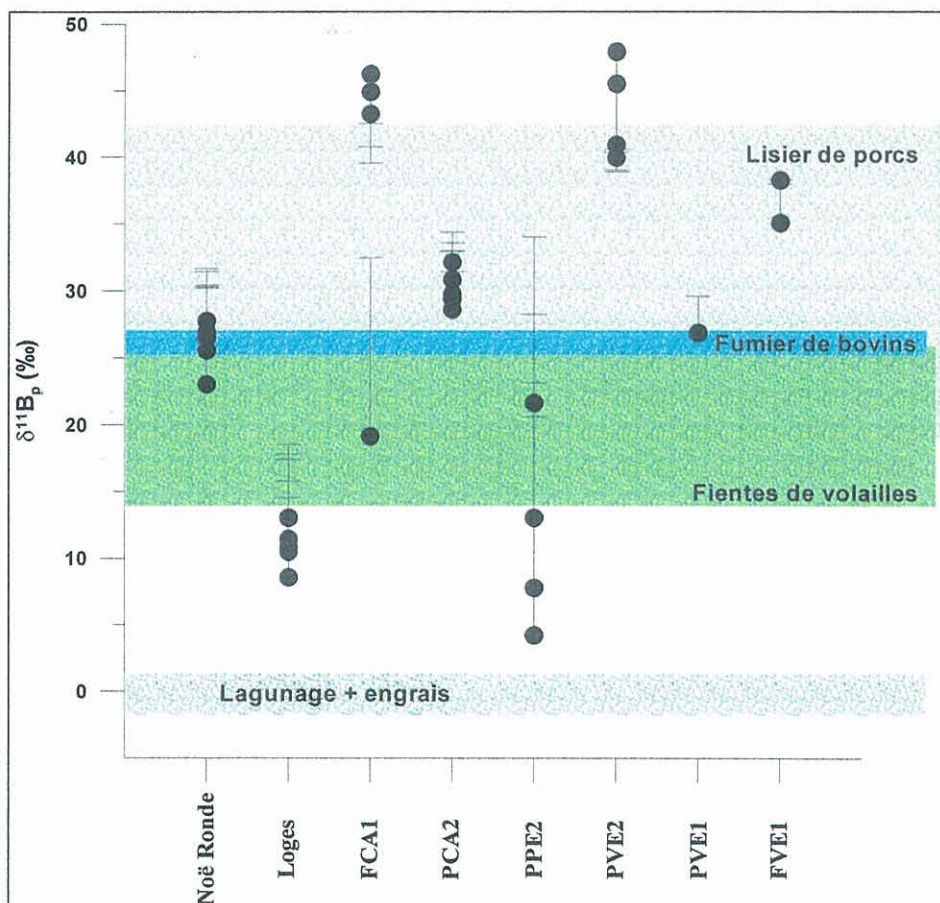


Figure 28. Gamme de compositions isotopiques en bore dans les sources de pollution pour chaque point

Exutoire de la Noë Ronde

Les points de prélèvement présentent des valeurs de $\delta^{11}\text{B}_p$ assez proches (moyenne basse de 26 ‰). Aucune variation au cours du cycle hydrologique n'est observée. Une influence du lagunage ou des engrais n'est pas perceptible, mais il n'est pas possible de discriminer celle des différents lisiers (bovins, porcs et volailles).

Exutoire des Loges

Les données de bore indiquent une source de pollution constante. La valeur de $\delta^{11}\text{B}_p$ est intermédiaire entre les différentes déjections animales et le pôle constitué par le lagunage et les engrais (les trop faibles concentrations en bore mesurées dans les engrais utilisés sur le bassin innocentent *pour l'instant* cette source). Mais de nombreux produits du marché contiennent du bore qui se caractérise systématiquement par des compositions isotopiques proches de 0 ‰ ou négatives. L'influence du lagunage est confortée par un léger enrichissement en phosphore.

Forage FCA1

Les conclusions du rapport de phase 1 mettaient en évidence l'influence de deux sources concernant ce puits (basé sur les mesures de tritium) : une composante d'eau souterraine profonde dépourvue de nitrates (correspondant à une faible valeur de ^3H) et une eau plus superficielle chargée en nitrates.

Les compositions isotopiques en bore montrent une grande variation (d'environ 20-25 ‰). Les données semblent s'organiser en 2 groupes distincts. L'échantillon de mars 2000 présente le $\delta^{11}\text{B}_p$ le plus bas (même en tenant compte de la gamme importante possible) compatible avec l'ensemble des déjections animales. Les échantillons de juin 1999 et juin 2000 ont des compositions isotopiques très similaires (i.e. pollution d'origine constante) et ne sont compatibles qu'avec les lisiers de porcs de type SOLEPUR, très enrichis en ^{11}B ($\delta^{11}\text{B} > 40$ ‰) comme source de nitrates. Il semble tout de même y avoir un changement de source de pollution au cours du cycle hydrologique. Pour le point de prélèvement ayant le pôle de pollution le plus bas, il est possible d'évoquer la présence en amont du forage d'une parcelle drainée ayant subi des épandages de fientes de volailles. Le $\delta^{11}\text{B}$ bas observé correspondrait donc à une influence ponctuelle de ce type de source, à la suite du ruissellement (après de fortes pluies) de la parcelle drainée vers la tête de pompage.

Malgré le pompage longue durée et l'arrivée d'une eau moins nitratée, entre le 21 et le 22 juin 1999 (les 2 $\delta^{11}\text{B}_p$ les plus élevés), aucune différence significative n'est observée. Il convient néanmoins de constater que dans le cas de FCA1, les compositions isotopiques du pôle polluant potentiel (lisier SOLEPUR) et du composant non pollué (Bonne Fontaine) sont très similaires (figure 27) et que la dilution joue donc très peu sur la composition isotopique du mélange.

Puits PCA2, bassin de la Noë Ronde

Les résultats du modèle de mélange donnent une valeur moyenne de $\delta^{11}\text{B}_p$ autour de 30 ‰, indiquant une source de pollution cohérente avec une signature de lisier de porcs (bien que la composition isotopique la plus basse se rapproche aussi de celle des deux autres types de déjections animales). Bien que très proche de l'exutoire de la Noë Ronde, les compositions isotopiques en bore recalculées sont tout de même légèrement supérieures par rapport à ce dernier. Aucune évolution n'est observée au cours du cycle hydrologique.

Puits PPE2, amont du bassin des Loges

Ce point se situe en amont du bassin des Loges, sous prairie sans trop d'apports azotés. De plus sa teneur en tritium signale un transfert rapide.

L'écart observé (sur la période d'observation) sur les valeurs de compositions isotopiques potentielles du polluant est important (environ 30 ‰). Les points (Figure 27) se situent sur une droite de mélange bien définie dont le pôle dilué est légèrement différent de Bonne fontaine et le pôle contaminé est compatible avec l'échantillon d'eau de lagunage le plus riche en bore ($909 \mu\text{g.l}^{-1}$). Le léger écart de la composition isotopique du pôle non pollué de l'eau de Bonne Fontaine suffit, à lui seul, à expliquer

la large gamme des $\delta^{11}\text{B}_p$ calculés. Il est donc probable qu'une seule source de bore (de type eau de lagunage) domine les eaux de PPE2.

Les sources domestiques possibles pour ce puits sont au nombre de 2 : soit un puisard situé à proximité, soit les effluents domestiques provenant du bourg voisin, S^t Igneuc (mais difficile étant donné sa situation géographique).

De plus, l'existence de concentrations en fer et sulfates relativement élevées couplée à une faible concentration en nitrates semble indiquer que ce point d'eau est sous influence de la dénitrification naturelle. Ceci est appuyé par les $\delta^{15}\text{N}$. En effet PPE2 possède parmi les concentrations en NO_3 les plus faibles associées aux compositions isotopiques en azote les plus élevés (figure 26), en accord avec un processus de dénitrification naturelle dominant.

Source PVE2, bassin des Loges

Les compositions isotopiques calculées en bore désignent de manière nette le pôle lisier de porcs comme source principale de bore et donc en toute probabilité des nitrates. Néanmoins, tout comme pour le site FCA1, certains échantillons donnent des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ supérieures à la gamme actuellement mesurée sur les échantillons de lisier de porcs. Cette différence peut s'expliquer par une légère différence de composition isotopique du pôle non pollué par rapport à Bonne Fontaine.

Puits PVE1, bassin de la Noë Ronde

La composition isotopique recalculée du pôle de pollution ($\delta^{11}\text{B}_p$) du puits PVE1 est très similaire à celle du fumier de bovins, mais aussi cohérente avec les autres déjections animales. Il est donc difficile de prédire la source dominante, même s'il apparaît de manière sûre que l'influence du pôle borates des lessives (pôle lagunage appauvri en ^{11}B) et d'un éventuel pôle engrais est négligeable pour ce point de prélèvement.

Du fait du faible nombre de mesures, 1 seul échantillon pour ce point, il est impossible d'apprécier la variabilité de la source de nitrates de ce puits. Néanmoins la valeur de $\delta^{11}\text{B}_p$ est à comparer avec celles très similaires obtenues pour l'exutoire de la Noë Ronde.

Forage FVE1

Les deux prélèvements du forage FVE1 indiquent, pour le bore, une source unique de pollution : le lisier de porcs.

L'apport des isotopes stables du bore permet de discriminer l'origine des sources potentielles de pollution. A la différence des isotopes stables de l'azote qui sont soumis à des processus de fractionnement, l'aspect conservatif de cet élément est favorable par rapport aux objectifs fixés au départ.

9. Conclusions & perspectives

Le site choisi, le Bassin de l'Arguenon et dans un cadre plus général la Bretagne, du fait de la faible perméabilité de son sous-sol (héritée de son contexte géologique) et de son importante activité agricole, présente des concentrations en nitrates dans ses eaux souterraines souvent supérieures à la norme en vigueur pour l'usage AEP, c'est-à-dire de 50 mg.l⁻¹. Cette étude a donc été engagée pour tester la viabilité et l'intérêt potentiel de l'utilisation de traceurs isotopiques (tritium, strontium, bore et azote) dans la détermination et la quantification des sources de nitrates dans les eaux souterraines.

Dans un premier temps, la modélisation Gardenia effectuée sur l'Arguenon, à l'aval du site d'étude met en évidence qu'il est nécessaire de distinguer 2 types d'eau : l'eau superficielle et une eau plus profonde. Les résultats de la modélisation montrent que **la lame d'eau écoulee à la station hydrométrique est alimentée par les eaux souterraines à hauteur de 42,5 %**. Pendant la période d'étiage, la totalité de l'écoulement provient du réservoir profond. Aux deux exutoires des 2 sous-bassins étudiés la forte baisse des teneurs en nitrates est expliquée par une forte diminution de l'écoulement rapide combiné à l'influence croissante des réservoirs souterrains (arène et partie fissurée plus profonde). Ces phénomènes de ruissellement sont justifiés par la présence importante de parcelles drainées favorisant ces écoulements rapides sub-superficiels.

La première partie du traçage de sources a permis de caractériser chimiquement et isotopiquement les différents pôles en présence :

- ⇒ Le pôle non-pollué, c'est à dire dont probablement les nitrates sont d'origine naturelle : source Bonne Fontaine et forage FJH1.
- ⇒ Les différents pôles de pollution, comprenant l'ensemble des sources anthropogéniques de nitrates présentes sur le site d'étude : déjections animales (porcins, bovins et volailles), lagunage (et/ou pollution domestique) et engrais.

La source Bonne Fontaine a été choisie comme référence de l'eau souterraine dans sa partie superficielle, non perturbée par des apports anthropiques, pour sa faible concentration en NO₃, de l'ordre de 10 mg.l⁻¹. Ses compositions isotopiques associées ($\delta^{11}\text{B}$ et $\delta^{15}\text{N}$) sont caractéristiques de celles rencontrées dans des contextes similaires.

La source PVE2 située à mi-pente dans le bassin versant des Loges semble représentative des fortes teneurs en nitrates rencontrées, liées principalement au drainage agricole sur les parcelles soumises à épandage, teneurs stables dans le temps, bien que parfois diluées en période de pluies. La poursuite du suivi de cette source pourrait permettre de délimiter le bassin versant réel de celle-ci, de quantifier la part d'écoulement rapide, de regarder les variations saisonnières dans les sources de pollution. Son suivi constituerait un exemple concret et permettrait d'approcher les temps de transfert.

L'étude démontre l'utilité des isotopes du strontium, de l'azote et du bore comme traceurs conjoints permettant de contraindre des sources de contamination par les nitrates. Les différentes sources potentielles de nitrates, *naturelles* (minéralisation du sol) et *anthropiques* (lagunage, lisiers de porcs, fientes de volailles, fumiers de bovins, engrais) ont été caractérisées individuellement pour obtenir des échantillons représentatifs des lixiviats d'azote d'origine animale ; des parcelles expérimentales ont été utilisées, chacune ne recevant qu'un seul type d'épandage de déjections, parallèlement à la récupération des rejets directs.

Les sources de pollution sont isotopiquement discernables, de manière non ambiguë, à l'exception des déjections de type « fientes de volailles » et « fumiers de bovins » qui, bien que présentant des différences, apparaissent assez similaires.

Dans les 2 sous-bassins, les 2 exutoires (les Loges et la Noë Ronde), les 3 puits (PCA2, PPE2, PVE1), la source (PVE2) et un forage (FCA1) ont été analysés pour caractériser l'état initial des eaux du bassin. **La signature des points échantillonnés est influencée majoritairement par les sources d'apport de déjections animales.** Certains points semblent plus marqués par la signature type « lisiers de porcs », alors que les autres points ont une signature moyenne entre celle de type « bovins-volailles » et celle de type « lisiers de porcs ». L'exutoire du sous-bassin des Loges sur lequel est situé le dispositif d'assainissement du bourg de Saint Igneuc est significativement influencé par la signature de type « lagune et effluents domestiques », tout comme le point PPE2 influencé lui aussi par une source de type lagune et/ou effluent domestique.

Au cours du suivi sur une année hydrologique complète, on n'observe que très peu de variation dans l'origine de sources, à l'exception des points PPE2 et FCA1 pour lesquels la source de pollution semble varier au cours du temps (de type « déjections animales » à type « lagunage » pour PPE2, et de type « lisiers de porcs » à « fientes de volaille » pour FCA1).

L'apport des isotopes stables du bore permet de discriminer plus aisément l'origine des sources potentielles de pollution, à la différence des isotopes stables de l'azote qui sont soumis à des processus de fractionnement, l'aspect conservatif de cet élément est favorable pour les objectifs fixés au départ.

La caractérisation des points de prélèvements montre en effet, aussi bien sur le bassin versant de la Noë Ronde que sur celui des Loges, que **les concentrations en nitrates sont généralement tamponnées par un processus de dénitrification naturelle.** Cette dénitrification est assez rapide puisque le facteur de fractionnement obtenu est de $-3.1 \pm 0.5 \text{ ‰}$. Cette valeur d'enrichissement isotopique est comparable à celle obtenue pour des contextes géologiques similaires en Bretagne (bassin de Naizin, département du Morbihan).

Les différentes méthodes utilisées, hydrogéologiques et géochimiques, montrent une convergence des résultats. Ces conclusions témoignent de l'interdépendance entre l'eau souterraine et les écoulements superficiels dans l'acquisition de la minéralisation des eaux aux exutoires des deux sous bassins. Ces études confirment que l'eau souterraine

présente des concentrations non négligeables de nitrates, teneurs proches en moyenne de 30 à 40 mg/l, ce qui confirme l'importance de la pression anthropique sur ces bassins.

Cette étude exploratoire conduit à des résultats prometteurs qui permettent d'acquérir des informations sur les concentrations en nitrates dans l'eau en discernant les différentes origines de ceux-ci sur la base d'analyses permettant l'identification de chacune des sources de pollution nitratée.

Plus globalement, il est possible d'envisager à court terme d'étendre cette application (des projets sont en cours en Mayenne et en Alsace) dans le cadre de l'estimation de la vulnérabilité des points d'eau destinés à la consommation humaine, et d'aider à la mise en évidence de la hiérarchisation locale des sources effectives de pollution.

Du point de vue analytique, le BRGM va développer dans un futur proche la mesure des compositions isotopiques en oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) des nitrates. Couplé à la mesure actuelle du $\delta^{15}\text{N}$, ceci permettra de pouvoir discriminer l'influence de la pollution de celui de la dénitrification naturelle sur l'enregistrement isotopique observé. Il sera alors possible de définir précisément les pôles de pollution en nitrates pour chaque échantillon (de manière analogue au bore dans cette étude).

Références

- ARAVENA,R., Evans,M.L.et Cherry,J.A. 1993, Stable isotopes of oxygen and nitrogen in sources identification of nitrate from septic systems, *Groundwater*, **31**, 180-186.
- ARAVENA,R. et Robertson,W.D. 1998, Use of multiple isotope tracers to evaluate denitrification in ground water : Study of nitrate from a large-flux septic system plume, *Ground Water*, **36**, 975-982,
- BARTH,S. 1993, Boron isotope variations in nature : a synthesis, *Geol Rundsch*, **82**, 640-651,
- BARTH,S. 1998, Application of boron isotopes for tracing sources of anthropogenic contamination in groundwater, *Water Research*, **32**, 685-690,
- BEN HALIMA,A. 1977, Apport de la géochimie isotopique de l'azote à la connaissance des sources de pollution azotées des eaux par les nitrates sur l'exemple de la Brie, *Thèse*, Université Paris 6.
- BERGER,G., Bosch,B., Letolle,R., Marcé,A., Mariotti,A., et Megnien,C. 1976, Recherches sur l'origine des nitrates dans les eaux souterraines de la Beauce, **BRGM 76 SGN 444 BDP**,
- BERGÉ,P. 1983, Détection par le traçage isotopique de l'origine des pollutions azotées d'un aquifère alluvial de la vallée de la Garonne, *Thèse*, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- BERNARD,D., Blin,F., Leclercq,S., Ouddane,B., et Maillot,H. 1996, Apport du traçage naturel du bore dans l'évaluation de la pollution des eaux souterraines : cas de la nappe de la craie dans le bassin Artois-Picardie. Premiers résultats, *Techniques Sciences Méthodes*, **6**, 401-407,
- CANTANZARO,E.J., Champion,C.E., Garner,E.L., Marienko,O., Sappenfield,K.M., et Shields,W.R. 1970, Boric acid, isotopic and assay standard reference materials, **260-17**, U.S.National Bureau of Standards.
- CHERY,L., Talbo,H., Jegou,J.P., Brach,M., Bonin,J., Plancard,D., et Rochdi-Ghandour,H. 2000, Apport de l'hydrogéochimie isotopique à la connaissance des sources de pollution azotée sur un site du bassin versant de l'Arguenon (Côtes d'Armor), **BRGM/RP 40911-FR**,
- DONVILLE,B. et Bergé,P. 1985, Impact de l'assainissement individuel sur les teneurs en nitrates des eaux souterraines, *Sciences et Techniques de l'eau*, **18**, 159-163,

- FAILLAT, J.P., Corre, S., Sicard, T., et Somlette, L. 1999, Influence de l'hydrogéologie et des bactéries dans l'élimination du nitrate des nappes de fissure en Finistère, *Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral*, IFREMER, 179-197,
- FREYER, H.D. et Aly, A.I.M. 1975, Nitrogen-15 variations in fertilizer nitrogen, *Journal of Environmental Quality*, **3**, 405-406,
- HEATON, T.H.E., Talma, A.S., et Vogel, J.C. 1983, Origin and history of nitrate in confined groundwater in the western Kalahari, *Journal of Hydrology*, **62**, 243-262,
- HEATON, T.H.E. 1986, Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere : a review, *Chemical Geology*, **59**, 87-102,
- JUNK, G. et Svec, H.J. 1958, The absolute abundance of the nitrogen isotopes in the atmosphere and compressed gas from various sources, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **14**, 234-243,
- KOMOR, S.C. 1997, Boron contents and isotopic compositions of hog manure, selected fertilizers, and water in Minnesota, *Journal of Environmental Quality*, **26**, 1212-1222,
- KREITLER, C.W. 1975, Determining the sources of nitrate in groundwater by nitrogen isotopes studies, *Thèse*, University of Texas, Austin.
- LANDREAU, A., Mariotti, A., et Simon, B. 1988, La dénitrification naturelle dans les eaux souterraines, *Hydrogéologie*, **1**, 35-43,
- LEENHOUTS, J.M., Bassett, R.L., et Maddock III, T. 1998, Utilization of intrinsic boron isotopes as co-migrating tracers for identifying potential nitrate contamination sources, *Ground Water*, **36**, 240-250,
- MARIOTTI, A. 1982, Apports de la géochimie organique à la connaissance du cycle de l'azote, *Thèse*, Université Paris 6.
- MARIOTTI, A. 1984, Utilisation des variations naturelles d'abondance isotopique en ^{15}N pour tracer l'origine des pollutions des aquifères par les nitrates, Colloque International Isotope Hydrology, Vienna, 605-633,
- MARIOTTI, A. 1986, La dénitrification dans les eaux souterraines, principes et méthodes de son identification : une revue, *Journal of Hydrology*, **88**, 1-23,
- MARIOTTI, A., Landreau, A., et Simon, B. 1988, ^{15}N isotope biogeochemistry and natural denitrification process in groundwater : Application to the chalk aquifer of northern France, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **52**, 1869-1878,
- MARTINEZ, J. et Peu, P. 1999, Etude de suivi d'un dispositif expérimental (biologique et physico-chimique) de surépandage de lisiers de porcs ($1000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$), CEMAGREF.

- MOSSADIK, H. 1997, Les isotopes du bore, traceurs naturels dans les eaux : mise au point de l'analyse en spectrométrie de masse à source solide et applications à différents environnements, *Thèse*, Université d'Orléans.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES 1980, Boron mineral tolerance of domestic animals, Subcommittee on mineral toxicity in animals, 71-79, Washington, D.C.
- NÉGREL, P. 1999, Geochemical study of a granitic area-The Margeride Mountains, France : Chemical element behaviour and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ constraints, *Aquatic Geochemistry*, **5**, 125-165,
- PANNO, S.V., Hackley, K.C., Hwang, H.H., et Kelly, W.R. 2001, Determination of the sources of nitrate contamination in karst springs using isotopic and chemical indicators, *Chemical Geology*, **179**, 113-128,
- PAUWELS, H., Foucher, J.C., et Kloppmann, W. 2000, Denitrification and mixing in a schist aquifer : influence on water chemistry and isotopes, *Chemical Geology*, **168**, 307-324,
- RENNIE, D.A., Paul, E.A., et Johns, L.E. 1976, Natural nitrogen-15 abundance of soil and plant samples, *Canadian Journal of Soil Science*, **56**, 43-50,
- SHEARER, G.B., Kohl, D.H., et Commoner, B. 1974, The precision of determination of the natural abundance of nitrogen-15 in soils, fertilizers, and shelf chemicals, *Soil Science*, **118**, 308-316,
- SHOWERS, W.J., Eisenstein, D.M., Paerl, H.W., et Rudek, J. 1990, Stable isotope tracers of nitrogen sources to the Neuse river, NC, **253**, UNC Water Resources Research Institute.
- STUMM, W. et Morgan, J.J. 1981, Aquatic chemistry-An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters, Wiley-interscience.
- VENGOSH, A. 1998, Boron isotopes and groundwater pollution, *Water & Environment News*, **3**, 15-16,

Annexe 1

Méthodes analytiques des différents laboratoires d'analyse

BRGM

Élément	Méthode	Remarques	Limite de Détection Inférieure
NO ₃	NF EN ISO 10304		0.1 mg.l ⁻¹
NO ₂	NF EN ISO 26777		0.01 mg.l ⁻¹
Fe	NF EN ISO 11885		0.02 mg.l ⁻¹
Na	NF EN ISO 11885		0.1 mg.l ⁻¹
Si	NF EN ISO 11885		0.1 mg.l ⁻¹
Ca	NF EN ISO 11885		0.1 mg.l ⁻¹
K	NF EN ISO 11885		0.1 mg.l ⁻¹
Mg	NF EN ISO 11885		0.1 mg.l ⁻¹
F	M0018	Selon T 90-004	0.1 mg.l ⁻¹
Cl	M0028	Selon T 90-042	0.1 mg.l ⁻¹
SO ₄	M0028	Selon T 90-042	0.1 mg.l ⁻¹
Al	M0108	ICP/MS	0.03 mg.l ⁻¹
Cu	M0108	ICP/MS	2 µg.l ⁻¹
Li	M0108	ICP/MS	0.01 mg.l ⁻¹
Mn	M0108	ICP/MS	5 µg.l ⁻¹
Ni	M0108	ICP/MS	5 µg.l ⁻¹
Pb	M0108	ICP/MS	2 µg.l ⁻¹
Zn	M0108	ICP/MS	5 µg.l ⁻¹
NH ₄	NFT 90-015		0.1 mg.l ⁻¹
I	T90021		2 µg.l ⁻¹
PO ₄	NFT 90-023		0.1 mg.l ⁻¹
C org. Dissous	NFT 90-102		0.5 mg.l ⁻¹
Carbonates	NF EN ISO 99631		3 mg.l ⁻¹
Bicarbonates	NF EN ISO 99631		3 mg.l ⁻¹
B	M0080	ICP/MS	0.5 µg.l ⁻¹
Sr	M0080	ICP/MS	0.03 µg.l ⁻¹

Le détail des méthodes d'analyses isotopiques est décrit dans le texte au paragraphe 2.2.

DENITRAL

Analyse	Norme	Principe
Alcalinité	NF T90-036	dosage à l'acide sulfurique 0,04 N
HCO ₃		calcul suite détermination de l'alcalinité
Cl / NO ₃ / SO ₄ / NO ₂ / PO ₄	NF T90-042	chromatographie ionique
Ca / K / Mg / Na / NH ₄		chromatographie ionique
DCO		microméthode Docteur Lange : minéralisation puis dosage photométrique

Méthodes analytiques des différents laboratoires

Saint-Maurice, le 18 juin 2001

AINF
ZI BP 259 rue Marcel DASSAULT
59472 SECLIN CEDEX

A l'attention de H ROCHDI

N/Réf. : MOClients/01-001

Objet : Modes opératoires d'analyse

Madame,

- Veuillez trouver ci-joint les fiches descriptives résumant nos modes opératoires d'analyses et des performances de la méthode d'analyse des paramètres suivants :
 - Eléments minéraux
 - Détermination de l'ammonium par analyse en flux continu
 - Détermination des nitrites par analyse en flux continu
 - Détermination des fluorures par potentiométrie
 - Carbone Organique Total/Dissous
 - Bromures
 - Mesure du pH et dosage de l'alcalinité
 - Dosage des ions chlorure, nitrate et sulfate par électrophorèse capillaire

L'analyse des orthophosphates est réalisée selon la méthode de référence NF EN 1189 par analyse en flux continu

Le Laboratoire Central a rédigé des modes opératoires d'analyse selon ses dispositions d'assurance qualité mises en place selon la norme EN 45001 "critères généraux concernant le fonctionnement des laboratoires d'essais". Les fiches descriptives résumant les modes opératoires et décrivent les performances de la méthode. Elles ont été rédigées de manière suivante :

- Nom du paramètre
- Méthode de référence associée
- Domaine d'application et nature de la courbe d'étalonnage
- Molécules analysées (si nécessaire)
- Expression des résultats sur notre rapport d'analyse
- Eaux concernées par ce mode opératoire
- Description du matériel et de l'appareillage utilisés
- Description du flaconnage à utiliser et des précautions à prendre pour le prélèvement
- Description du mode de conservation des échantillons et de la préparation avant la mise en œuvre de l'analyse
- Limites de quantification et de détection
- Incertitude au niveau du point de contrôle
- Résumé du principe du mode opératoire

- Toutes les méthodes d'analyses physico-chimiques ont été validées par des essais d'évaluation de performances selon "le protocole d'évaluation des performances d'une méthode d'analyse" qui évalue les critères suivants :
 - étude du domaine d'application et notamment de la linéarité (si régression linéaire)
 - détermination des limites de détermination
 - étude de la spécificité
 - étude de la fidélité
 - étude de la reproductibilité interne
 - justesse (si nécessaire ou possible) (obligatoire dans le cas d'une méthode interne non normalisée)
- Ce protocole a été établi d'après la norme XP T 90-210 (essais des eaux) de décembre 1999 "Protocole d'évaluation d'une méthode alternative physico-chimique quantitative par rapport à une méthode de référence".
- L'objectif de l'étude de la linéarité est :
 - de vérifier la validité du modèle de régression et du domaine d'étalonnage.
 - d'en déduire les caractéristiques de la fonction d'étalonnage et son intervalle de confiance.
- La limite de quantification a été déterminée selon la méthode par vérification d'une limite de quantification choisie :
 - l'objectif est de vérifier qu'une limite de quantification choisie LQ est acceptable. Le choix est réalisé en fonction de l'expérience du responsable de la validation.
 - Les essais sont réalisés dans l'eau d'Evian, si l'analyte recherché y est absent. Sinon prendre de l'eau pure (eau déionisée).
 - Préparer un volume suffisant de matrice (eau d'Evian ou eau déionisée) et la doper à la valeur de la limite de quantification choisie LQ . Fractionner ce volume en $n = 10$ prises d'essais équivalentes.
 - Réaliser une analyse complète (en déroulant toutes les étapes du mode opératoire) sur chacune des prises d'essais dans des conditions de répétabilité.
 - A partir des $n = 10$ résultats, calculer les statistiques suivantes sur les valeurs mesurées :

$\overline{u_{LQ}}$	grandeur moyenne calculée
s_{LQ}	écart type calculé
 - Deux conditions doivent être respectées :
 - a) s'assurer que la grandeur moyenne calculée n'est pas différente de la limite de quantification choisie LQ .

$$\text{si } \frac{|LQ - \overline{u_{LQ}}|}{\frac{s_{LQ}}{\sqrt{n}}} < 10 \text{ alors la limite de quantification } LQ \text{ est jugée exacte (n = 10)}$$
 - b) s'assurer que la valeur 0 n'est pas acceptable comme limite de quantification :
 - si $5 s_{LQ} < LQ$ alors la valeur 0 n'est pas acceptable comme limite de quantification
 - cela revient à vérifier que le coefficient de variation par rapport à LQ est inférieur à 20%

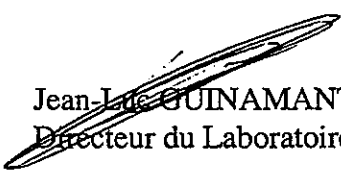
- L'étude de la reproductibilité interne de la méthode est l'étude de sa fidélité lorsque les répétitions sont faites par plusieurs opérateurs ou à des intervalles de temps importants au regard de la méthode :
 - La reproductibilité interne est fonction du niveau de concentration où elle est calculée ainsi que l'incertitude calculée qui lui est associée.
 - Cette incertitude a été calculée au niveau de la concentration du point de contrôle et n'est donc pas une donnée constante sur tout le domaine d'application.
 - De plus, cette incertitude peut varier dans le temps comme le montrent les cartes de contrôle.
 - L'incertitude donnée dans la fiche descriptive a été calculée à partir de 20 ou 30 valeurs du point de contrôle qui ont permis de définir les premières limites des cartes de contrôle. Cependant, ces limites vont faire l'objet d'une étude sur 3 à 6 mois.

Par ailleurs, en ce qui concerne la filtration des échantillons :

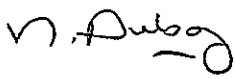
- Dénitral a réalisé la filtration des échantillons jusqu'au 11 juillet 2000, date de livraison d'une série de 21 échantillons
- Après cette date, Le Laboratoire Central d'Anjou Recherche a réalisé la filtration des échantillons

Nous restons à votre disposition pour tous renseignements complémentaires.

Nous vous prions d'agréer, Madame, l'expression de nos sentiments les meilleurs.



Jean-Luc GUINAMANT
Directeur du Laboratoire



Muriel AUBAY
Responsable Assurance Qualité

Description du mode opératoire et des performances de la méthode

01/02/2000

Paramètre	Eléments minéraux		Accrédité : Oui ☒ Non ☐		
Méthode de référence	NF EN ISO 11885 (T 90-136) (mars 1998)		Qualité de l'eau. Dosage de 33 éléments par spectroscopie d'émission atomique avec plasma couple par induction.		
Domaine d'application (selon XP T 90-210)	Dépend de l'élément considéré		Régression linéaire pondérée		
Expression des résultats	µg /L ou mg /L (dépend de l'élément considéré)				
Types d'eaux	Eaux de surface, eaux brutes, eaux en cours de traitement et eaux destinées à la consommation humaine				
Matériel et appareillage	Matériel		Appareillage		
	- Matériel courant de laboratoire - Plaques chauffantes - Système de filtration nalgène		- Spectromètre d'émission atomique à couplage inductif		
Echantillonnage, préparation et conservation des échantillons	Echantillonnage		Conservation /Préparation		
	Flacons en polyéthylène bouchés hermétiquement		- Filtration sur membrane de 0,45µm pour analyser l'élément dissous - Acidification à réception à 10% avec de l'acide nitrique - Attaque acide à chaud si la turbidité > 0,70 NTU		
Principe	Dosage par spectrométrie d'émission atomique avec plasma couplé par induction (ICP) • Cette méthode consiste à mesurer l'émission atomique par une technique spectroscopique optique. • Les échantillons sont nébulisés et l'aérosol ainsi produit est transporté dans une torche à plasma où se produit l'excitation. • Les spectres d'émission atomique des raies caractéristiques sont produits par un plasma induit par haute fréquence. • Les spectres sont dispersés par un spectromètre à réseau et l'intensité des raies est évaluée par des détecteurs. • Les signaux des détecteurs sont traités et contrôlés par un système informatique. • Lors du dosage des éléments, une correction de bruit de fond est utilisée pour compenser les variations des contributions du bruit de fond.				
Elément	Domaine d'application (selon XPT 90-210)	Expression du résultat	Limite de quantification (selon XPT 90-210)	Point de contrôle	Incertitude (au point de contrôle)
Argent Ag	7 – 100 µg/L	µg/L	7 µg/L	50 µg/L	11%
Aluminium Al	0,02 – 2 mg/L	mg/L	0,02 mg/L	0,050/1 mg/L	20%/6 %
Bore B	50 – 1000 µg/L	µg/L	50 µg/L	500 µg/L	10%
Cadmium Cd	4 – 100 µg/L	µg/L	4 µg/L	50 µg/L	4%
Calcium Ca	5 – 150 mg/L	mg/L	5 mg/L	50 mg/L	5%
Chrome Cr	5 – 100 µg/L	µg/L	5 µg/L	50 µg/L	6%
Cuivre Cu	0,01 – 0,1 mg/L	mg/L	0,01 mg/L	0,05 mg/L	6%
Fer Fe	5 – 2000 µg/L	µg/L	5 µg/L	100/1000 µg/L	7%/5 %
Lithium Li	2 – 400 µg/L	µg/L	5 µg/L	200 µg/L	10%
Magnésium Mg	1 – 25 mg/L	mg/L	1 mg/L	10 mg/L	4%
Manganèse Mn	10 – 500 µg/L	µg/L	10 µg/L	200 µg/L	5%
Nickel Ni	5 – 100 µg/L	µg/L	5 µg/L	50 µg/L	6%
Potassium K	1 – 10 mg/L	mg/L	1 mg/L	5 mg/L	15 %
Sodium Na	1,5 – 50 mg/L	mg/L	1,5 mg/L	10 mg/L	5%
Zinc Zn	0,02 – 0,5 mg/L	mg/L	0,02 mg/L	0,2 mg/L	5%

Description du mode opératoire et des performances de la méthode

01/02/2000

Paramètre	Détermination de l'ammonium par analyse en flux continu (CFA)		Accrédité : Oui ☒ Non ☐
Méthode de référence	NF EN ISO 11732-2 (T90-080) (août 1997)		Qualité de l'eau. Détermination de l'azote ammoniacal par analyse en flux et détection spectrophotométrique
Domaine d'application (selon XP T 90-210)	0,02 - 1mg NH ₄ /l		Régression linéaire
Expression des résultats	mg NH ₄ /l		
Types d'eaux	Eaux de surface, eaux brutes, eaux en cours de traitement et eaux destinées à la consommation humaine		
Matériel et appareillage	Matériel	Appareillage	
	Matériel courant de laboratoire		Autoanalyser 3 bicanal Bran et Luebbe
Echantillonnage, préparation et conservation des échantillons	Echantillonnage	Conservation / Préparation	
	Flacons en polyéthylène remplis à ras bord		• A environ 4°C • Analysé sous 24 heures après réception
Limites de détermination (selon XP T 90-210)	Limites de quantification	Limites de détection	
	0,02 mg NH ₄ /l		0,006 mg NH ₄ ⁺ /l
Incertitude au niveau du point de contrôle	Niveau du point de contrôle	Incertitude	
	• 0,2 mg NH₄/l • 0,8 mg NH₄/l		• 8% • 4%
Principe	• Dans un courant vecteur segmenté en gaz s'écoulant continuellement, l'ammonium de l'échantillon réagit en solution alcaline avec l'hypochlorite (ClO⁻) préalablement libéré du dichloroisocyanurate. • La chloramine formée réagit, en présence d'un catalyseur de nitoprussiate, avec le salicylate à une température d'environ 37 °C pour former un colorant d'indophénol bleu-vert qui est mesuré quantitativement dans un spectrophotomètre à flux à 660 nm.		

Description du mode opératoire et des performances de la méthode

01/02/2000

Paramètre	Détermination des nitrites par analyse en flux continu (CFA)	Accrédité : Oui ☒ Non ☐
Méthode de référence	NF EN ISO 13385 (T 90-012) (octobre 1996)	Qualité de l'eau. Dosage de l'azote nitrique par analyse en flux et détection spectrophotométrique
Domaine d'application (selon XP T 90-210)	0,02 – 1 mg NO ₂ /l	Régression linéaire
Expression des résultats	mg NO ₂ /l	
Types d'eaux	Eaux de surface, eaux brutes, eaux en cours de traitement et eaux destinées à la consommation humaine	
Matériel et appareillage	Matériel	Appareillage
	Matériel courant de laboratoire	Autoanalyser 3 bicanal Bran+
Echantillonnage, préparation et conservation des échantillons	Echantillonnage	Conservation / Préparation
	Flacons remplis à ras bord.	- A 4°C - Analysé sous 24 Heures après réception.
Limites de détermination (selon XP T 90-210)	Limites de quantification	Limites de détection
	0,02 mg NO ₂ /l	0,006 mg NO ₂ /l
Incertitude au niveau du point de contrôle	Niveau du point de contrôle	Incertitude
	0,2 mg NO ₂ /l 0,8 mg NO ₂ /l	5% 3%
Principe	- Dans un courant vecteur segmenté en gaz s'écoulant continuellement, les nitrites de l'échantillon produisent une réaction de diazotation du sulfanilamide, en milieu acide, en un sel de diazonium, qui est ensuite transformé en un colorant rouge par couplage avec le dichlorure de N-(naphtyl-1) éthylenediamine. - Ce colorant est mesuré quantitativement dans un spectrophotomètre à flux à 520 nm.	

Description du mode opératoire et des performances de la méthode

01/02/2000

Paramètre	Dosage des fluorures par potentiométrie	Accrédité : Oui ☒ Non ☐
Méthode de référence	NF T 90-004 (septembre 1985)	Essais des eaux. Dosage de l'ion fluorures. Méthode potentiométrique.
Domaine d'application (selon XP T 90-210)	100 - 1500 µg/l	Régression linéaire
Expression des résultats	µg/l	
Types d'eaux	Eaux de surface, eaux brutes, eaux en cours de traitement et eaux destinées à la consommation humaine	
Matériel et appareillage	Matériel	Appareillage
	- Verrerie courante de laboratoire en polyéthylène et en verre - Gobelets à usage unique de 200 ml. - Electrode à membrane sélective de l'ion fluorure. - Electrode de référence argent / chlorure d'argent (Ag/AgCl).	Chaîne de titrage potentiométrique complète METROHM.
Echantillonnage, préparation et conservation des échantillons	Echantillonnage	Conservation / Préparation
	Flacons en polyéthylène bouchés hermétiquement	- A environ 4°C - Analysé sous une semaine après réception.
Limites de détermination (selon XP T 90-210)	Limites de quantification	Limites de détection
	100 µg/l	30 µg/l
Incertitude au niveau du point de contrôle	Niveau du point de contrôle	Incertitude
	600 µg/l	8%
Principe	Cette méthode consiste en une mesure, dans l'échantillon analysé (ou dans une dilution de cet échantillon) de la différence de potentiel entre une électrode sélective de l'ion fluorure et une électrode de référence, à température et force ionique totale du milieu constantes.	

Description du mode opératoire et des performances de la méthode

01/02/2000

Paramètre	Carbone Organique Total/Dissous	Accrédité : Oui ☒ Non ☐
Méthode de référence	NF EN 1484 (T 90 – 102) (juillet 1997)	Analyse de l'eau. Lignes directrices pour le dosage du carbone organique total (TOC) et carbone organique dissous (COD).
Domaine d'application (selon XP T 90-210)	0,3 – 40 mg C/L	Régression linéaire
Molécules analysées	Carbone Organique Total (COT) : Totalité du carbone présent dans les matières organiques dissoutes et en suspension dans l'eau. Le carbone élémentaire, les cyanates et les thiocyanates, sont également mesurés. Carbone Organique Dissous (COD) : Fraction du carbone présent dans les matières organique dissoutes dans l'eau. Le carbone des matières organiques en suspension dans l'eau est éliminé par filtration sur filtre de 0.45 µm. Les cyanates et les thiocyanates sont également mesurés.	
Expression des résultats	mg C/L	
Types d'eaux	Eaux de surface, souterraines et eaux destinées à la consommation humaine	
Matériel et appareillage	Matériel	Appareillage
	- Matériel courant de laboratoire - Filtre pour COD	- Appareil à ultrasons - Etuve réglée entre 105 et 120°C - Analyseur de COT DC 80 DOHRMANN
Echantillonnage, préparation et conservation des échantillons	Echantillonnage	Conservation / Préparation
	- Flacons en verre brun de 125 ml remplis entièrement	- Analyse dans les 24H suivant la réception au laboratoire ou acidifiés à pH 2 avec de l'acide orthophosphorique - A environ 4°C.
Limites de détermination (selon XP T 90-210)	Limites de quantification	Limites de détection
	0,3 mg C/L	0,1 mg C/L
Incertitude au niveau du point de contrôle	Niveau du point de contrôle	Incertitude
	10 mg C/L	5 %
Principe	- Le principe de la méthode, consiste à oxyder en CO₂, par voie humide, sous U.V. et en milieu persulfate de potassium, le carbone organique présent dans l'eau. - Le CO₂ formé est mesuré au moyen d'un détecteur infrarouge non dispersif. - Afin d'éliminer le carbone inorganique présent dans l'échantillon, celui ci est préalablement acidifié puis subit deux barbotages d'azote successifs de 4 à 8 minutes chaque. - Il est à noter que le fait d'éliminer le carbone inorganique total par acidification puis barbotage à l'azote, empêche de doser le carbone organique issus de composés organiques volatils tels que le benzène, le toluène ou le chloroforme.	

Description du mode opératoire et des performances de la méthode

021/02/2000

Paramètre	Bromures	Accrédité : Oui ☐ Non ☒
Méthode de référence	NF EN ISO 10304 – 1 (T90-042) (juin 1995)	Qualité de l'eau. Méthode par chromatographie des ions en phase liquide, Projet
Domaine d'application	30 – 250 µg Br ⁻ /L	Régression linéaire
Expression des résultats	mg Br ⁻ /L	
Types d'eaux	Eaux de surface, eaux brutes, eaux en cours de traitement et eaux destinées à la consommation humaine	
Matériel et appareillage	Matériel	Appareillage
	- Matériel courant de laboratoire - Support de filtration en verre avec une pompe à vide et membrane filtrante 0,45 µm	- Système de filtration automatique - Chromatographe DIONEX DX 500
Echantillonnage, préparation et conservation des échantillons	Echantillonnage	Conservation / Préparation
	Flacons plastiques	A environ 4°C
Limites de détermination (approximative)	Limites de quantification	Limites de détection
	30 µg Br ⁻ /L	9 µg Br ⁻ /L
Incertitude au niveau du point de contrôle	Niveau du point de contrôle	Incertitude
	100 µg Br ⁻ /L	10 %
Principe	Dosage des bromures par chromatographie ionique (application de la chromatographie en phase liquide à l'analyse des ions) • L'échantillon à analyser est placé à l'entrée d'une colonne contenant la phase stationnaire et, sous l'action de la phase mobile (éluant), les divers constituants (ions) migrent d'autant plus lentement qu'ils ont plus d'affinité pour la phase stationnaire. • La détection des différents ions est basée sur la mesure en continu de la conductivité, avec neutralisation ionique (aussi appelée suppression chimique) de la phase éluante. Le résultat se présente sous la forme d'un chromatogramme.	

Description du mode opératoire et des performances de la méthode

01/02/2000

Paramètre	Mesure du pH Dosage de l'alcalinité	Accrédité : Oui ☒ Non ☐
Méthode de référence	- PH : NF T 90-008 (avril 1953) - TAC : NF EN ISO 9963-1 (février 1996) (T 90-036)	Essais des eaux. Mesure électrométrique du pH avec l'électrode en verre. Détermination de l'alcalinité
Domaine d'application (selon XP T 90-210)	PH : 1 - 11 TAC : 0 - 100	
Expression des résultats	Unité de pH °F	
Types d'eaux	Eaux de surface, eaux brutes, eaux en cours de traitement et eaux destinées à la consommation humaine	
Matériel et appareillage	Matériel	Appareillage
	- Matériel courant de laboratoire - Gobelets à usage unique 200 ml - Etuve à 105°C - Dessiccateur	Chaîne de titrage potentiométrique
Echantillonnage, préparation et conservation des échantillons	Echantillonnage	Conservation // Préparation
	Flacons en polyéthylène bouchés hermétiquement	- A environ 4°C - Analysé sous 24 heures après réception.
Limites de détermination (selon XP T 90-210)	Limites de quantification	Limites de détection
	Sans objet	Sans objet
Incertitude au niveau du point de contrôle	Niveau du point de contrôle	Incertitude
	- pH : 7 - TA : 12,5 - TAC : 25,7	1% 4% 2%
Principe	pH : - La différence de potentiel existant entre une électrode de verre et une électrode de référence (AgCl - KCl saturé) plongeant dans une même solution est une fonction linéaire du pH de celle-ci. En effet, d'après les lois de NERNST, le potentiel de l'électrode est lié à l'activité des ions H⁺ présents. - La détermination du pH revient donc à la mesure exacte d'une différence de potentiel. Cette mesure s'effectue à l'aide d'un pH-mètre. Alcalinité : - L'échantillon est titré à l'aide d'une solution acide, aux points de virage de 8,3 et de 4,5. Les points de virage, qui sont déterminés visuellement ou par potentiométrie, sont les points d'équivalence sélectionnés pour les déterminations des trois composants principaux : hydrogénocarbonate, carbonate et hydroxyde. - Le point de virage pH 8,3 s'approche des concentrations équivalentes de carbonate et de dioxyde de carbone et représente le titrage d'environ tout l'hydroxyde et de la moitié du carbonate présent. - Le point de virage pH 4,5 s'approche du point d'équivalence des ions hydrogène et de l'hydrogénocarbonate et permet la détermination de l'alcalinité totale de l'échantillon.	

Description du mode opératoire et des performances de la méthode

01/02/2000

Paramètre	Dosage des ions chlorure, nitrate et sulfate par électrophorèse capillaire	Accrédité : Oui ☒ Non ☐
Méthode de référence	Méthode interne développée par le laboratoire	Méthode validée par rapport à la chromatographie ionique selon la norme XPT 90-210
Domaine d'application (selon XPT 90-210)	0,4 – 60 mg/L pour les chlorures, nitrates et sulfates	Régression linéaire
Expression des résultats	mg/l	
Types d'eaux	Eaux de surface, eaux brutes, eaux en cours de traitement et eaux destinées à la consommation humaine	
Matériel et appareillage	Matériel	Appareillage
	- Verrerie courante de laboratoire - Système de filtration sous vide (filtre : 0,22 μm)	- Analyseur CIA WATERS. - pHmètre
Échantillonnage, préparation et conservation des échantillons	Échantillonnage	Conservation / Préparation
	Flacons en polyéthylène bouchés hermétiquement	- A environ 4°C - Analysé sous 24 heures après réception.
Limites de détermination (selon XPT 90-210)	Limites de quantification	Limites de détection
	0,4 mg/l	0,1 mg/l
Incertitude au niveau du point de contrôle	Niveau du point de contrôle	Incertitude
	30 mg/l pour les chlorures, nitrates et sulfates	6% pour les chlorures, nitrates et sulfates
Principe	- Cette méthode séparative est basée sur la migration différentielle dans un capillaire de solutés ionisés sous l'effet d'un champ électrique (négatif dans le cas des anions). - L'échantillon est introduit dans le capillaire par injection hydrostatique et la détection utilisée est l'UV inverse car les anions ne présentent pas de groupements chromophores.	

Annexe 2

Résultats des analyses chimiques et isotopiques

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Tableau 7. Résultats des campagnes d'analyses du bassin de l'Arguenon

Dénomination	Nature	date prélev	Niv piézo m	Debit l/min	T °C	pH	Eh Nhe mV	Cond 25°C µS/cm	O2 dis %	O2 dis mg/l	alcal meq/l	15N/14N vs air ‰	3H en UT	incert. 3H	811B vs NBS 951	incert. 11B/10B
limite inférieure de dosabilité																
limitesupérieure de dosabilité																
erreur (%)												0.2				
source Bonne Fontaine	source	22/06/1999			12.5	5.74	405	195	55	5.7	0.296	6.7	7	2	38.50	0.36
source Bonne Fontaine	source	22/06/1999													38.66	0.29
source Bonne Fontaine	source	22/03/2000														
Exutoire Noë Ronde	rivière	22/06/1999			11.5	7.84	409	462	91	9.4	1.41	21	6	2	31.45	0.42
Exutoire Noë Ronde	rivière	23/11/1999		233	8.4	7.76	439	661	100	11.5	1.47	13.7			30.30	0.47
Exutoire Noë Ronde	rivière	23/11/1999													30.13	0.67
Exutoire Noë Ronde	rivière	21/03/2000		360	9.4	6.53	484	587	97	10.8	0.99	12.4			30.43	0.17
Exutoire Noë Ronde	rivière	21/03/2000													30.60	0.05
Exutoire Noë Ronde	rivière	21/06/2000		94	17.3	7.68	396	403	98	9.25	1.23	14.9			31.64	0.26
		21/06/2000													31.25	0.25
Exutoire Noë Ronde	rivière	07/11/2000		337	9.8	7.65	439	338	96	10.7	2.11	18.8			30.19	0.13
Exutoire des Loges	rivière	21/06/1999			16.1	7.78	389	562	110	10.4	1.16	13.4	7	2	15.81	0.31
Exutoire des Loges	rivière	21/06/1999													15.36	0.28
Exutoire des Loges	rivière	23/11/1999		1307	8.2	7.42	439	582	100	11.2	1.05	9.8			18.53	0.35
Exutoire des Loges	rivière	23/11/1999													18.79	0.41
Exutoire des Loges	rivière	21/03/2000		916	9.3	6.26	466	531	100	10.6	0.88	10.8			17.83	0.27
Exutoire des Loges	rivière	21/03/2000													17.56	0.09
Exutoire des Loges	rivière	20/06/2000		472	18.9	7.63	422	465	95	8.5	1.13	11.8			14.54	0.11
		20/06/2000													14.05	0.13
Exutoire des Loges	rivière	07/11/2000		320	9.3	7.24	464	289	96	10.8	1.16	11.3			17.43	0.08
Forage CARDIN FCA1 2 min	forage	21/06/1999	4.55	25	18.2	6.14	387	465	26	2.4	0.754	13.3	3	1	42.53	0.54
Forage CARDIN FCA1 2 min	forage	21/06/1999													42.39	0.31
Forage CARDIN FCA1 1 heure	forage	21/06/1999														
Forage CARDIN FCA1 5 heures	forage	21/06/1999														
Forage CARDIN FCA1 24 h	forage	22/06/1999	13	20	13.3	6.12	288	422	2	0.2	0.905	13.4	3	1	40.76	0.52
Forage CARDIN FCA1 24 h	forage	22/06/1999													41.09	0.28
Forage CARDIN FCA1	forage	22/03/2000			12.9	5.4	320	426	1	0.17	0.89	11.5	2	1	32.45	0.59
Forage CARDIN FCA1	forage	22/03/2000													32.53	0.73
Forage CARDIN FCA1	forage	21/06/2000			14.1	6.14	349	342	16	1.59	0.88	11.4			39.52	0.16
		21/06/2000													39.86	0.15

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Dénomination	Nature	date prélev	Niv piézo m	Debit l/min	T °C	pH	Eh Nhe mV	Cond 25°C µS/cm	O2 dis %	O2 dis mg/l	alcal meq/l	15N/14N vs air ‰	3H en UT	Incert. 3H	δ11B vs NBS 951	Incert. 11B/10B
Puits Cardin PCA2	puits	22/06/1999	1.57		13.6	5.77	441	773	48	4.9	0.24	12.5	6	2	32.93	0.51
Puits Cardin PCA2	puits	22/06/1999													33.25	0.35
Puits Cardin PCA2	puits	23/11/1999	0.37		12.2	5.94	440	744	30.8	3.3	0.708	11.2			31.40	0.19
Puits Cardin PCA2	puits	23/11/1999													31.59	0.28
Puits Cardin PCA2	puits	22/03/2000	0.3		9.8	5.49	273	501	24	2.8	0.77	11.4			33.57	0.09
Puits Cardin PCA2	puits	22/03/2000													33.12	0.09
Puits Cardin PCA2	puits	20/06/2000	0.37		12.3	5.77	425	428	21	2.13	1.11		5		32.96	0.23
		20/06/2000													32.62	0.1
Puits Cardin PCA2	puits	07/11/2000	0.3		12.4	5.56	458	444	25	2.62	0.72	15.5			34.35	0.11
Puits Peyrousse PPE2	puits	22/06/1999	3.7		13.1	6.41	271	480	38	3.9	1.4	20.8	5	2	34.00	0.67
Puits Peyrousse PPE2	puits	22/06/1999													34.80	0.65
Puits Peyrousse PPE2	puits	23/11/1999	1.62		11.6	6.3	380	468	25.4	2.9	1.37	2.7			23.14	0.19
Puits Peyrousse PPE2	puits	23/11/1999													22.75	0.22
Puits Peyrousse PPE2	puits	22/03/2000	2.01		11	6.01	346	498	20	2.23	1.63	17			ND	
Puits Peyrousse PPE2	puits	20/06/2000	1.48		13.8	6.35	413	435	21	2.09	2.2	19.4			20.61	0.11
		20/06/2000													20.14	0.38
Puits Peyrousse PPE2	puits	07/11/2000			12.5	6.02	416	415	98	10.6	1.46	16.3			28.26	0.24
Source Veron PVE2	source	22/06/1999	1.5		13.8	5.42	487	811	54	5.5	0.06	9.5	6	2	40.37	0.36
Source Veron PVE2	source	22/06/1999													40.74	0.67
Source Veron PVE2	source	23/11/1999	1.15		12.7	5.15	346	736	57	6	0.159	8.9	6	2	39.01	0.15
Source Veron PVE2	source	23/11/1999													38.60	0.14
Source Veron PVE2	source	22/03/2000	0.3		10.7	4.88	393	677	78	8.2	0.127	9.4	7	2	38.87	0.21
Source Veron PVE2	source	22/03/2000													39.52	0.12
Source Veron PVE2	source	20/06/2000	1.32		14.8	5.39	396	570	74	7.38	0.144	8.2			39.88	0.09
		20/06/2000													39.55	0.14
Source Veron PVE2	source	07/11/2000	1.32		13.1	4.99	434	519	72	7.8	0.206	8.1			40.57	0.36
Puits Veron PVE1	puits	21/06/1999	3.02		13.3	5.96	389	697	26	2.6	0.204	8.8	7	2	29.60	0.41
Puits Veron PVE1	puits	21/06/1999													29.55	0.38
Forage FJH1 des Loges	forage	23/11/1999			13.2	6.36	293	307	0	0	1.09		2	1	12.73	0.39
Forage FJH1 des Loges	forage	23/11/1999													12.22	0.72
Forage FJH1 des Loges	forage	23/11/1999													12.39	0.51
Forage FJH1 des Loges	forage	08/11/2000			13.7	5.88	388	267	5	0.5	1.11	-3.1	<1		40.50	0.36
Forage FVE1 0	forage	25/11/1999			11.3	6.01	417	605	73	7.9	0.41					
Forage FVE1 1 heure	forage	25/11/1999			12.1	5.89	426	729	74	7.8	0.305		5	2		
Forage FVE1 16 heures	forage	24/11/1999			11.3	6.03	434	630	63.1	6.8	0.367		4	1		
Forage FVE1	forage	23/03/2000			12.3	5.95	487	694	74	7.96	0.256	9			37.97	0.3
Forage FVE1	forage	23/03/2000													38.22	0.36
Forage FVE1	forage	21/06/2000			13.3	5.68	381	513	53	5.5	0.374	7.5			38.29	0.17
		21/06/2000													38.13	0.17

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Dénomination	Nature	date prélev	87Sr/86Sr	Incert 87Sr/86Sr	alin. Tot. mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	NH4 mg/l	NO2 mg/l	NO3 mg/l	PO4 mg/l	COD mg/l
limite inférieure de dosabilité						0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.1	0.1	0.5
limitesupérieure de dosabilité						10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
erreur (%)						5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
source Bonne Fontaine	source	22/06/1999			123.9	5.8	3.2	26.3	2.2	18.1	27.3	9.7	21.2	<0.1	<0.01	10.1	0.2	<0.5
source Bonne Fontaine	source	22/06/1999																
source Bonne Fontaine	source	22/03/2000	0.715944	0.000008														
Exutoire Noë Ronde	rivière	22/06/1999			396	40.4	22.4	34.1	8.4	86	59.2	29.3	11.6	<0.1	0.02	104.6	0.2	4.7
Exutoire Noë Ronde	rivière	23/11/1999			430.7	48.2	22.4	34.9	10.2	90	56.1	31.4	10.5	<0.1	0.02	127	0.2	5.1
Exutoire Noë Ronde	rivière	23/11/1999																
Exutoire Noë Ronde	rivière	21/03/2000	0.715569	0.000009	380.6	41.3	20.1	30.9	8.3	61	47.7	30.8	9.5	<0.1	0.05	131	<0.1	5.4
Exutoire Noë Ronde	rivière	21/03/2000																
Exutoire Noë Ronde	rivière	21/06/2000			371.1	38.6	19.8	30	8.6	83	45.7	29	9.9	<0.1	0.02	106.5	0.1	4.4
		21/06/2000																
Exutoire Noë Ronde	rivière	07/11/2000				35.6	17.6	30.7	9.6		46.4	28.3	5.9	0.1	0.18	39.2	1.8	6.4
Exutoire des Loges	rivière	21/06/1999			364.3	37.3	18.4	39.4	9.3	70.8	54.2	25.6	12.1	<0.1	0.1	91.7	<0.1	5.5
Exutoire des Loges	rivière	21/06/1999																
Exutoire des Loges	rivière	23/11/1999			348.4	36.1	15.9	32.9	8.1	63	52.5	30	13.8	<0.1	0.14	90.2	0.1	5.9
Exutoire des Loges	rivière	23/11/1999																
Exutoire des Loges	rivière	21/03/2000	0.71462	0.000009	351.1	34.8	17.4	32.2	8.3	55	51.1	28.2	13.5	<0.1	0.04	106	<0.1	4.6
Exutoire des Loges	rivière	21/03/2000																
Exutoire des Loges	rivière	20/06/2000			334.7	33.5	17	30.3	8.9	77	45.3	26.2	13.9	<0.1	0.09	78.2	<0.1	4.4
		20/06/2000																
Exutoire des Loges	rivière	07/11/2000				28.5	11.4	30.2	8.2		40.6	26.8	10.7	<0.1	0.09	44.9	0.03	7.9
Forage CARDIN FCA1 2 min	forage	21/06/1999			312.2	30.1	13.6	31.9	4.8	46	53.5	34.8	35.8	<0.1	0.03	59.9	<0.1	1.8
Forage CARDIN FCA1 2 min	forage	21/06/1999																
Forage CARDIN FCA1 1 heure	forage	21/06/1999			50.1											50.1		
Forage CARDIN FCA1 5 heure	forage	21/06/1999			66.3											66.3		
Forage CARDIN FCA1 24 h	forage	22/06/1999			284.4	24.7	11.5	31.7	3.9	55.2	51.6	33.5	37.3	<0.1	<0.01	33.8	0.2	1.2
Forage CARDIN FCA1 24 h	forage	22/06/1999																
Forage CARDIN FCA1	forage	22/03/2000	0.716724	0.00001	289.9	24.9	11.5	32.6	4.8	56	49.6	35.1	38.9	<0.1	0.02	35.7	<0.1	0.8
Forage CARDIN FCA1	forage	22/03/2000																
Forage CARDIN FCA1	forage	21/06/2000			283.4	24.2	11	30.1	4.8	65	45.1	34	36.6	<0.1	0.02	31.8	<0.1	0.8
		21/06/2000																

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Dénomination	Nature	date prélev	87Sr/86Sr	incert 87Sr/86Sr	Salin. Tot mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	NH4 mg/l	NO2 mg/l	NO3 mg/l	PO4 mg/l	COD mg/l
Puits Cardin PCA2	puits	22/06/1999			454.94	58.2	23	41.4	5.8	14.64	49.6	41.4	10.8	<0.1	0.02	205	<0.1	5.1
Puits Cardin PCA2	puits	22/06/1999																
Puits Cardin PCA2	puits	23/11/1999			459.6	53.7	19.9	34.5	5.8	46	42.4	41.6	10.8	<0.1	0.04	200	<0.1	4.9
Puits Cardin PCA2	puits	23/11/1999																
Puits Cardin PCA2	puits	22/03/2000	0.714983	0.000008	349.9	41.5	16.4	26.6	5.2	47	31.1	41.3	11.1	<0.1	<0.01	124	0.2	5.7
Puits Cardin PCA2	puits	22/03/2000																
Puits Cardin PCA2	puits	20/06/2000			339.4	37.2	14.7	25.2	5.5	81	37.7	38.5	11.4	<0.1	0.02	82.4	<0.1	5.8
Puits Cardin PCA2	puits	20/06/2000																
Puits Cardin PCA2	puits	07/11/2000				36.6	14.9	30.3	5.3		40.6	34.8	12.4	<0.1	<0.01	104	<0.02	3.7
Puits Peyrousse PPE2	puits	22/06/1999			301.9	26.5	12.7	31.4	4	85.4	59.9	33.9	30.6	<0.1	0.02	15.9	<0.1	1.6
Puits Peyrousse PPE2	puits	22/06/1999																
Puits Peyrousse PPE2	puits	23/11/1999			346.3	29.7	14.4	38.8	6.6	91	55.8	53.8	28.8	<0.1	0.01	25.1	<0.1	2.3
Puits Peyrousse PPE2	puits	23/11/1999																
Puits Peyrousse PPE2	puits	22/03/2000			360.8	35.9	15.8	36	6.3	108	56.7	38.9	25.7	<0.1	<0.01	34	<0.1	3.5
Puits Peyrousse PPE2	puits	20/06/2000			372.2	36.1	15.4	32.5	7	152	45	40.1	22.7	<0.1	<0.01	17.4	<0.1	4
Puits Peyrousse PPE2	puits	20/06/2000																
Puits Peyrousse PPE2	puits	07/11/2000				30.8	14.3	40.6	5.5		55.6	52.3	31.3	<0.1	<0.01	16.3	<0.02	1.3
Source Veron PVE2	source	22/06/1999			464	51.8	28.4	27.7	7.6	3.6	62.6	15.5	19.6	<0.1	0.02	245	<0.1	2.2
Source Veron PVE2	source	22/06/1999																
Source Veron PVE2	source	23/11/1999			447.2	43.6	24.7	32.8	8	11	59.4	15.6	20.5	<0.1	0.01	230	<0.1	1.6
Source Veron PVE2	source	23/11/1999																
Source Veron PVE2	source	22/03/2000	0.715398	0.000009	448.6	46.7	25	29.1	7.7	11	60.2	16.8	19.6	<0.1	<0.01	231	<0.1	1.5
Source Veron PVE2	source	22/03/2000																
Source Veron PVE2	source	20/06/2000			397.8	46.1	24.8	27.7	8	14	46.7	15.4		<0.1	0.08	213.4	<0.1	1.7
Source Veron PVE2	source	20/06/2000																
Source Veron PVE2	source	07/11/2000				44.8	23.7	33.3	8.6		58.6	14.1	21.7	<0.1	0.01	229	<0.02	1.2
Puits Veron PVE1	puits	21/06/1999			426.3	43	21.6	26.5	17.1	12.4	46.7	40	17.1	<0.1	0.02	198	0.5	3.9
Puits Veron PVE1	puits	21/06/1999																
Puits Veron PVE1	puits																	
Forage FJH1 des Loges	forage	23/11/1999			213.1	9.5	10.5	26.6	4	65	31.7	23.3	38.3	<0.1	<0.01	3.3	<0.1	0.9
Forage FJH1 des Loges	forage	23/11/1999																
Forage FJH1 des Loges	forage	23/11/1999																
Forage FJH1 des Loges	forage	08/11/2000	0.719577	0.000008		10.2	10.5	27.1	3.7		33.5	25	37.8	<0.1	<0.01	3.2	<0.02	0.9
Forage FVE1 0	forage	25/11/1999			70											70		
Forage FVE1 1 heure	forage	25/11/1999			432.7	43.5	19.4	36.6	12	24	52.4	16.8	30.7	<0.1	<0.01	196.1	<0.1	1.2
Forage FVE1 16 heures	forage	24/11/1999			427.9	41.8	18.7	35.5	11.8	26	52.5	16.3	31.3	<0.1	<0.01	192.7	<0.1	1.3
Forage FVE1	forage	23/03/2000			458	43.4	19.8	36.3	11.5	18	57.8	17	27.4	<0.1	<0.01	225	0.3	1.8
Forage FVE1	forage	23/03/2000																
Forage FVE1	forage	21/06/2000			391.8	38.8	16.9	32.8	11	24	45.3	19.4	30.3	<0.1	<0.01	172.2	<0.1	1.1
Forage FVE1	forage	21/06/2000																

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Dénomination	Nature	date prélev	F mg/l	I µg/l	Fe mg/l	Al mg/l	Br µg/l	B µg/l	Cu µg/l	Zn µg/l	Li µg/l	Mn µg/l	Pb µg/l	Ni µg/l	Sr mg/l	Sr µg/l
limite inférieure de dosabilité			0.1	2	0.02	0.03	5	"1ou 0.5	2	5	10	5	2	5	0.01	3
limitesupérieure de dosabilité			10000	10000	10000	10000			10000	10000	10000	10000	10000	10000		
erreur (%)			5	10	5	5	20	10	10	10	5	10	10	10		
source Bonne Fontaine	source	22/06/1999	<0.1	3	<0.02	<0.03	123	11	<2	<5	<10	<5	<2	<5		
source Bonne Fontaine	source	22/06/1999														
source Bonne Fontaine	source	22/03/2000														
Exutoire Noë Ronde	rivière	22/06/1999	0.1	14	<0.02	<0.03	285	32	2	<5	<10	<5	<2	<5		
Exutoire Noë Ronde	rivière	23/11/1999	<0.1	15	0.02	<0.03	<1000	35	9	<5	<10	14	<2	<5	0.27	
Exutoire Noë Ronde	rivière	23/11/1999														
Exutoire Noë Ronde	rivière	21/03/2000	0.1	13	0.2	0.15	<1000	23	17	10	<10	24	<2	6	0.24	
Exutoire Noë Ronde	rivière	21/03/2000														
Exutoire Noë Ronde	rivière	21/06/2000	0.1	23	<0.02	<0.03	60	27	<2	<5	<10	<5	<2	<5	0.25	
		21/06/2000														
Exutoire Noë Ronde	rivière	07/11/2000	0.1	13	0.02	<0.03		30.8	2	<5	<10	11	<2	<5		223
Exutoire des Loges	rivière	21/06/1999	0.1	17	0.04	<0.03	280	68	<2	<5	<10	<5	<2	<5		
Exutoire des Loges	rivière	21/06/1999														
Exutoire des Loges	rivière	23/11/1999	<0.1	12	0.04	<0.03	<1000	51	7	<5	<10	23	<2	<5	0.19	
Exutoire des Loges	rivière	23/11/1999														
Exutoire des Loges	rivière	21/03/2000	<0.1	14	0.05	<0.03	<1000	42	14	10	<10	17	<2	<5	0.2	
Exutoire des Loges	rivière	21/03/2000														
Exutoire des Loges	rivière	20/06/2000	0.1	28	<0.02	<0.03	60	55	<2	<5	<10	<5	<2	<5	0.21	
		20/06/2000														
Exutoire des Loges	rivière	07/11/2000	0.1	10	0.11	0.07		46	3	<5	<10	44	<2	<5		142
Forage CARDIN FCA1 2 min	forage	21/06/1999	0.2	15	0.19	<0.03	245	23	7	305	30	289	<2	20		
Forage CARDIN FCA1 2 min	forage	21/06/1999														
Forage CARDIN FCA1 1 heure	forage	21/06/1999														
Forage CARDIN FCA1 5 heures	forage	21/06/1999														
Forage CARDIN FCA1 24 h	forage	22/06/1999	0.2	15	1.06	<0.03	206	17	<2	21	30	278	<2	18		
Forage CARDIN FCA1 24 h	forage	22/06/1999														
Forage CARDIN FCA1	forage	22/03/2000	0.2	16	0.58	<0.03	<1000	16	13	56	40	243	<2	19		77
Forage CARDIN FCA1	forage	22/03/2000														
Forage CARDIN FCA1	forage	21/06/2000	0.2	23	0.99	<0.03	40	14	<2	40	40	286	<2	21	0.09	
		21/06/2000														

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Dénomination	Nature	date prélev	F mg/l	I µg/l	Fe mg/l	Al mg/l	Br µg/l	B µg/l	Cu µg/l	Zn µg/l	Li µg/l	Mn µg/l	Pb µg/l	Ni µg/l	Sr mg/l	Sr µg/l
Puits Cardin PCA2	puits	22/06/1999	0.1	40	<0.02	0.04	288	40	5	14	<10	<5	<2	10		
Puits Cardin PCA2	puits	22/06/1999														
Puits Cardin PCA2	puits	23/11/1999	0.1	8	<0.02	0.04	<1000	39	9	7	<10	6	<2	11	0.27	
Puits Cardin PCA2	puits	23/11/1999														
Puits Cardin PCA2	puits	22/03/2000	0.1	23	<0.02	0.03	<1000	24	19	12	<10	<5	<2	7	0.2	
Puits Cardin PCA2	puits	22/03/2000														
Puits Cardin PCA2	puits	20/06/2000	0.1	34	<0.02	0.03	60	30	<2	<5	<10	14	<2	6	0.2	
		20/06/2000														
Puits Cardin PCA2	puits	07/11/2000	<0.1	20	<0.02	<0.03		31.4	2	<5	<10	9	<2	9		211
Puits Peyrousse PPE2	puits	22/06/1999	0.2	12	0.58	<0.03	234	15	<2	<5	20	202	<2	<5		
Puits Peyrousse PPE2	puits	22/06/1999														
Puits Peyrousse PPE2	puits	23/11/1999	0.2	21	0.03	0.05	<1000	22	11	47	30	162	<2	59	0.11	
Puits Peyrousse PPE2	puits	23/11/1999														
Puits Peyrousse PPE2	puits	22/03/2000	0.1	14	0.17	<0.03	<1000	17	28	31	30	102	<2	20	0.11	
Puits Peyrousse PPE2	puits	20/06/2000	0.1	17	<0.02	<0.03	60	23	2	7	20	67	<2	20	0.13	
		20/06/2000														
Puits Peyrousse PPE2	puits	07/11/2000	0.1	10	0.06	<0.03		18.4	<2	11	30	129	<2	19		122
Source Veron PVE2	source	22/06/1999	<0.1	8	<0.02	0.06	270	15	2	10	<10	51	<2	16		
Source Veron PVE2	source	22/06/1999														
Source Veron PVE2	source	23/11/1999	<0.1	12	<0.02	0.06	<1000	17	6	13	<10	54	<2	20	0.33	
Source Veron PVE2	source	23/11/1999														
Source Veron PVE2	source	22/03/2000	<0.1	11	<0.02	0.05	<1000	13	19	27	<10	46	<2	15	0.33	
Source Veron PVE2	source	22/03/2000														
Source Veron PVE2	source	20/06/2000	<0.1		<0.02	0.05	60		<2		<10	47	<2	13		
		20/06/2000														
Source Veron PVE2	source	07/11/2000	<0.1	7	<0.02	0.05		14.1	<2	11	<10	50	<2	16		350
Puits Veron PVE1	puits	21/06/1999	<0.1	11	<0.02	<0.03	264	47	<2	56	<10	<5	<2	6		
Puits Veron PVE1	puits	21/06/1999														
Forage FJH1 des Loges	forage	23/11/1999	0.4	12	1.5	<0.03	<500	5	5	50	50	284	<2	16		
Forage FJH1 des Loges	forage	23/11/1999														
Forage FJH1 des Loges	forage	23/11/1999														
Forage FJH1 des Loges	forage	08/11/2000	0.3	9	1.48	<0.03		10.5	<2	21	40	204	<2	11		60.7
Forage FVE1 0	forage	25/11/1999														
Forage FVE1 1 heure	forage	25/11/1999	0.2	11	0.3	<0.03		7	4	91	20	396	<2	103		
Forage FVE1 16 heures	forage	24/11/1999	0.2	11	0.2	<0.03	<500	7	5	105	20	829	<2	82		
Forage FVE1	forage	23/03/2000	0.1	3	0.14	0.07	<1000	13	35	75	20	683	<2	66	0.2	
Forage FVE1	forage	23/03/2000														
Forage FVE1	forage	21/06/2000	0.2	12	0.5	0.05	12	60	<2	74	20	708	<2	71	0.17	
		21/06/2000														

Annexe 3

Résultats du suivi hydrologique des points d'eau

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**

Tableau 8. Suivi chimique sur un cycle hydrologique

Point d'eau : La Noë Ronde
Nature : exutoire

Point d'eau : La Noë Ronde
Nature : exutoire

Date	Mesures in situ						Analyses SO						Débit l/min	Résultats labo	Analyses SI										
	T °C	pH	eH mV	Cond 25 µS/cm	O2 diss mg/L	Alcal meq/L	HCO3 mg/L	Cl mg/L	Fe mg/L	NO3 mgNO3/L	SO4 mgSO4/L	Br mg/L			Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Mn µg/L	NH4 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	COD mgC/L	Al mg/L
20/05/1999	13.8	7.3	384	663	8.7			56.6	0.04	157.4	30.4		BRGM												
22/06/1999	11.5	7.8	409	462	9.4	1.41	86.0	59.2	<0,02	104.6	29.3		BRGM	0.28	40.4	8.4	22.4	34.1	11.6	<5	<0,1	0.02	0.2	4.7	<0,03
17/11/1999	8.8	7.5	200	577	8.3	2.14	130.2	66.1	0.05	58.2	23.0		Dénitral												
23/11/1999	8.4	7.8	439	661	11.5	1.47	89.7	56.1	0.02	127.0	31.4	233.0	BRGM	<1	48.2	10.2	22.4	34.9	10.5	14	<0,1	0.02	0.2	5.1	<0,03
02/12/1999	10.3	7.8	148	595	7.9	1.41	86.1	64.1	0.03	82.7	24.4		Dénitral												
10/12/1999	8.6	7.7	401	596	9.6	1.40	85.4	62.4	0.06	82.0	23.0		Dénitral												
20/12/1999	6.4	7.6	240	568	9.2	1.00	61.0	57.5	0.06	83.0	25.0		Dénitral												
06/01/2000	10.5	7.3	319	504	8.2	0.71	43.1						Dénitral												
12/01/2000	5.5	7.3	208	517	9.3	0.74	45.1						Dénitral												
19/01/2000	7.4	7.5	330	519	8.4	0.75	45.5						Dénitral												
27/01/2000	4.4	7.2	119	529	9.7	0.80	48.8						Dénitral												
27/01/2000						0.78	47.6	47.2	0.01	155.0	32.4		Anjou Re.	0.16	44.7	9	20.9	28.8	11.8	20	0.04	0.08	<0,1	5.2	<0,02
04/02/2000	7.9	7.5	318	524	9.0	0.86	52.5						Dénitral												
11/02/2000	8.4	7.7	223	514	9.9	0.92	56.1					29	Dénitral												
17/02/2000	9.1	7.6	231	507	8.3	0.94	57.2						Dénitral												
24/02/2000	10.8	7.6	223	498	7.6	0.96	58.6	43.1	0.02	128	28.4		Anjou Re.	0.13	41	8.1	18.9	26.3	10.1	20	0.03	0.08	<0,1	5.3	<0,02
02/03/2000	8.6	7.9	317	499	12.3	0.80	51.2					10	Dénitral												
02/03/2000						0.92	56.1	44.3	0.01	134	29.5		Anjou Re.												
09/03/2000	9.3	7.7	259	493	11.1	0.90	56.1					16	Dénitral												
09/03/2000						0.78	47.6	43.6	0.02	130	29.1		Anjou Re.												
16/03/2000	8.9	7.3	240	493	11.3	0.90	57.0					13	Dénitral												
16/03/2000						0.92	56.1	45.6	0.01	134	29.3		Anjou Re.												
21/03/2000	9.4	6.5	484	587	10.8	0.99	61.0	47.7	0.2	131	30.8	360	BRGM	<1	41.3	8.3	20.1	30.9	9.5	24	<0,1	0.05	<0,1	5.4	0.15
30/03/2000	9.2	8.0	305	499	11.4	1.04	63.4					364	Dénitral												
30/03/2000						0.92	56.1	42.4	0.03	124	27.9		Anjou Re.												
06/04/2000	8.3	8.0		489	11.5	1.04	63.4					120	Dénitral												
06/04/2000						1.06	64.7	47.2	0.03	132	31.2		Anjou Re.												
13/04/2000	10.5	8.0		480	10.8	0.95	58.2					13	Dénitral												
13/04/2000						0.98	59.8	47.9	0.01	128	30		Anjou Re.												
20/04/2000	10.8	7.7	215	468	10.2	1.00	61.0					140	Dénitral												
20/04/2000						1.04	63.4	44.8	0.02	113	27.4		Anjou Re.	0.16	39.8	7.1	18.3	28.4	8.2	<10	0.12	0.1	<0,1	6	0.05
27/04/2000	11.5	7.6	190	422	10.7	0.94	57.3						Dénitral												
27/04/2000						0.98	59.3	47.2	0.03	126	29.6		Anjou Re.												
05/05/2000	12.8	7.5	254	502	10.8	1.32	80.5					34	Dénitral												
05/05/2000						1.06	65.1	48.8	0.01	130	30.4		Anjou Re.												
11/05/2000	15.2	7.7	189	447	11.1	1.10	67.1					300	Dénitral												

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Date	Mesures in situ						Analyses SO					Débit l/min	Résultats labo	Analyses SI											
	T °C	pH	eH mV	Cond 25 µS/cm	O2 diss mg/L	Alcal meq/L	HCO3 mg/L	Cl mg/L	Fe mg/L	NO3 mgNO3/L	SO4 mgSO4/L			Br mg/L	Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Mn µg/L	NH4 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	COD mgC/L	Al mg/L
11/05/2000						1.12	68.3	40.8	0.06	109	26		Anjou Re.												
16/05/2000	15.7	8.0	198	468	12.4	1.00	61.0					63	Dénitral												
16/05/2000						1.08	65.8	44.8	0.01	116	28.8		Anjou Re.	0.15	40.5	7.8	19.9	28.6	11.8	<10	0.09	0.2	<0,1	6.7	<0,02
23/05/2000	14.1	7.6	226	485	9.8	1.28	78.1					36	Dénitral												
23/05/2000						1.14	66.1	43	0.03	123	26.9		Anjou Re.												
02/06/2000	14.3	7.7	241	484	9.6	1.06	64.7						Dénitral												
02/06/2000						1.20	66.2	43.1	0.02	118	27.1		Anjou Re.												
08/06/2000	14.1	7.5	192	491	9.9	1.14	69.5						Dénitral												
08/06/2000						1.20	72.6	43.7	0.02	119	27.3		Anjou Re.												
15/06/2000	15.9	7.6	81	492	9.8	1.16	70.8						Dénitral												
15/06/2000						1.24	76.0	46.7	0.01	117	28.8		Anjou Re.												
21/06/2000	17.3	7.7	396	403	9.3	1.23	75.0	45.7	<0,02	106.5	29	94	BRGM		38.6	8.6	19.8	30	9.9	<5	<0,1	0.02	0.1	4.4	<0,03
11/07/2000	14.2	7.9	221	467	9.6	1.44	87.8					188	Dénitral												
11/07/2000								46.4		88.8	28.2		Anjou Re.		40.7	8.7	20.3	31.1	8.8		0.03	<0,02	0.12	5.9	
20/07/2000	14.5	7.1	155	454	9.6	1.52	92.7						Dénitral												
20/07/2000						1.42	83.0	49.5	0.19	77.8	29.1		Anjou Re.												
27/07/2000	15.1	7.8	186	454	9.4	1.60	97.6						Dénitral												
27/07/2000						1.30	79.3	41.9	0.49	63.4	25.1		Anjou Re.												
04/08/2000	15.1	7.7	97	442	9.1	1.60	97.6						Dénitral												
04/08/2000						1.42	77.6	40.5	0.33	56.2	25.3		Anjou Re.												
10/08/2000	15.2	7.9	140	444	8.9	1.62	98.8						Dénitral												
10/08/2000						1.48	90.3	46.9	0.21	64.2	28		Anjou Re.	0.15	30.7	8.3	18.7	28	11	20	0.02	<0,02	0.15	5.2	0.16
18/08/2000	14.3	7.7	68	420	9.3	1.68	102.5						Dénitral												
18/08/2000						1.66	101.5	49.7	0.44	56.1	28.2		Anjou Re.												
24/08/2000	15.4	7.7	59	389	9.5	1.68	102.5						Dénitral												
24/08/2000						1.48	90.5	35.8	1.9	39.1	22.1		Anjou Re.												
31/08/2000	14.9	8.0	72	402	9.9	1.80	109.8						Dénitral												
31/08/2000						1.78	109.1	49.6	0.64	46.1	27.7		Anjou Re.												
07/09/2000	13.4	7.9	147	408	9.6	1.88	114.7						Dénitral												
07/09/2000						1.72	104.3	49.1	0.23	41.7	26.9		Anjou Re.												
14/09/2000	15	8.0		406	7.4	1.96	119.6						Dénitral												
14/09/2000						1.88	114.8	49.2	0.5	37.5	26.8		Anjou Re.												
21/09/2000	12.4	8.0	78	403	9.7	1.92	117.1						Dénitral												
21/09/2000						1.88	114.8	47.9	0.16	35.6	26.1		Anjou Re.	0.19	28.1	8.6	18	30.5	10.4	20	0.09	<0,02	0.11	5.9	0.08
29/09/2000	13.4	7.9	174	396	9.9	1.96	119.6						Dénitral												
29/09/2000						1.86	111.0	48.9	0.36	33.3	26.7		Anjou Re.												
05/10/2000	10.6	7.9	151	397	10.8	2.04	124.4						Dénitral												
05/10/2000						1.86	108.6	47.3	0.29	31.4	25.4		Anjou Re.												

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**

Date	Mesures in situ						Analyses SO						Débit l/min	Résultats labo	Analyses SI											
	T °C	pH	eH mV	Cond 25 µS/cm	O2 diss mg/L	Alcal meq/L	HCO3 mg/L	Cl mg/L	Fe mg/L	NO3 mgNO3/L	SO4 mgSO4/L	Br mg/L			Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Mn µg/L	NH4 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	COD mgC/L	Al mg/L	
12/10/2000	11.4	7.7	200	413	9.8	1.72	104.9						Dénitral													
12/10/2000						1.58	96.4	37.7	0.22	25.1	22.1		Anjou Re.													
20/10/2000	8.6	7.8	98	413	10.7	1.98	120.8						Dénitral													
20/10/2000						1.92	117.1	47.9	0.2	30	25.9		Anjou Re.	0.18	30.9	8.4	19.4	29.4	10.6	10	0.04	<0,02	<0,1	5.5	0.1	
27/10/2000	11.3	8.1	52	413	10.2	2.16	131.8						Dénitral													
27/10/2000						1.80	109.8	48.2	0.58	29.6	26		Anjou Re.													
31/10/2000	11.1	7.6	170	415	11.3	1.84	112.2						Dénitral													
31/10/2000						1.72	104.3	42.8	1.4	29.2	24.2		Anjou Re.													
07/11/2000	9.8	7.7	439	338	10.7	2.11	128.7	46.4	0.02	39.2	28.3	33?	BRGM		35.6	9.6	17.6	30.7	5.9	11	0.1	0.18	1.8	6.4	<0,03	
15/11/2000	8.9	7.7	121	435	13.2	1.68	102.5					267	Dénitral													
15/11/2000						1.50	91.6	47.8	0.7	65.8	28		Anjou Re.													
23/11/2000	8.3	7.3	51	425	11.4	1.24	75.6					200	Dénitral													
23/11/2000						1.08	65.8	33.9	0.54	65.6	22.7		Anjou Re.													
28/11/2000	9.9	7.5	100	433	10.8	1.28	78.1					171	Dénitral													
28/11/2000						1.10	67.6	43.7	0.43	92.2	27.7		Anjou Re.													
14/12/2000	10.4	7.5	136	408	10.8	1.00	61.0					1200	Dénitral													
14/12/2000						0.92	56.4	33.9	0.56	94	24.7		Anjou Re.	0.14	33.4	8.4	15	25	9.8	80	0.2	0.16	0.14	6.7	0.37	
moyenne	10.0	7.7	151.9	410.3	11.0	1.6	95.6	42.5	0.5	52.3	25.5	459.5		0.2	33.3	8.8	17.3	28.4	8.8	33.7	0.1	0.2	1.0	6.2	0.2	

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**

Loges	Mesures in situ					Analyses SO							Analyses SI															
	T °C	pH	eH mV	Cond 25 µS/cm	O2 diss mg/L	Alcal meq/L	HCO3 mg/L	Cl mg/L	Fe mg/L	NO3 mg/L	SO4 mg/L	Débit l/min	Résultats labo	Br mg/L	Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Mn µg/L	NH4 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	COD mgC/L	Al mg/L	B µg/L	Cu µg/l	
Date																												
20/05/1999	12.5	7.3	323	507	9.0			49	0.09	99.0	26.5		BRGM															
21/06/2000	16.1	7.8	389	562	10.4	1.16	70.8	54.2	0.04	91.7	25.6		BRGM	0.28	37.3	9.3	18.4	39.4	12.1	<5	<0,1	0.1	<0,1	5.5	<0,03	68	<2	
17/11/1999	8.7	8.1	255	468	8.0	1.58	96.4	59.1	0.09	42.5	24.6		Dénitral															
23/11/1999	8.2	7.4	439	582	11.2	1.05	64.1	52.5	0.04	90.2	30.0	1307	BRGM	<1	36.1	8.1	15.9	32.9	13.8	23	<0,1	0.14	0.1	5.9	<0,03	51	7	
02/12/1999	10.8	7.4	113	506	7.5	1.00	61.0	58.9	0.06	58.9	22.4		Dénitral															
10/12/1999	8.4	7.4	207	487	9.9	1.12	68.3	61.7	0.04	58.0	23.0		Dénitral															
20/12/1999	6.6	7.2	235	475	8.7	0.80	48.8	27.3	0.19	30.0	11.0		Dénitral															
30/12/1999		6.7	98	391		0.88	53.7	38.6	0.41	34.9	23.8		Dénitral															
06/01/2000	10.9	7.1	312	464	7.7	0.60	36.6						Dénitral															
12/01/2000	5.0	7.2	214	478	9.4	0.70	42.7						Dénitral															
19/01/2000	8.2	7.4	333	477	8.3	0.13	7.9						Dénitral															
27/01/2000	4.7	7.2	168	486	9.5	0.76	46.4						Dénitral															
27/01/2000						0.70	42.7	53.2	0.05	128.0	31.2		Anjou Re.	0.19	38.3	8.6	19	29.5	14.7	30	0.08	0.1	<0,1	4.3	<0,02	<50	<10	
04/02/2000	8.0	7.4	294	475	9.1	0.82	50.0						Dénitral															
11/02/2000	9.8	7.7	241	451	10.4	0.92	56.1					333	Dénitral															
17/02/2000	8.7	7.5	233	427	9.0	0.99	60.4						Dénitral															
24/02/2000	10.1	7.4	230	444	7.7	0.86	52.5	47.3	0.08	97.7	28.4		Anjou Re.	0.15	36.5	8.2	16.9	30	13.8	30	0.06	0.1	<0,1	5	<0,02	<50	<10	
02/03/2000	8.5	7.8	215	442	12.2	0.88	53.7					400	Dénitral															
02/03/2000						0.88	53.7	48.3	0.05	90.6	28.2		Anjou Re.															
09/03/2000	8.2	7.6	271	439	11.6	0.96	58.6					300	Dénitral															
09/03/2000						0.80	48.8	45.4	0.01	88.2	27.2		Anjou Re.															
16/03/2000	8.6	7.3	208	448	11.6	0.85	51.7					167	Dénitral															
16/03/2000						0.82	50.0	50.1	0.05	99.6	27.9		Anjou Re.															
21/03/2000	9.3	6.26	466	531	10.6	0.88	55.0	51.1	0.05	106	28.2	916	BRGM	<1	34.8	8.3	17.4	32.2	13.5	17	<0,1	0.04	<0,1	4.6	<0,03	42	14	
30/03/2000	7.9	7.8	242	406	11.4	0.96	58.6					324	Dénitral															
30/03/2000						0.88	53.7	47	0.08	86.0	26.0		Anjou Re.															
06/04/2000	7.4	7.8		392	11.8	1.12	68.3					387	Dénitral															
06/04/2000						1.00	61.0	46.6	0.14	69.6	29.8		Anjou Re.															
13/04/2000	9.2	7.8		414	11.3	0.92	56.1					240	Dénitral															
13/04/2000						0.98	59.8	48.8	0.07	86.8	28.5		Anjou Re.															
20/04/2000	10.4	7.5	240	387	10.8	1	61					720	Dénitral															
20/04/2000						1.02	62.2	43.9	0.09	75.8	28.3		Anjou Re.	0.15	31.5	6.3	13.7	28.8	11.3	30	0.14	0.08	<0,1	6.2	0.06	50	<10	
27/04/2000	13	7.7	177	491	10.0	0.96	58.6						Dénitral															
27/04/2000						1.06	64.1	46.2	0.09	86.2	28.4		Anjou Re.															
05/05/2000	12	7.6	260	454	13.7	0.8	48.8					351	Dénitral															
05/05/2000						0.92	56.5	50.2	0.04	104	28.2		Anjou Re.															
11/05/2000	13.8	7.5	199	349	10.7	1.24	75.6					600	Dénitral															
11/05/2000						1.32	80.9	35	0.28	49	25.4		Anjou Re.															
16/05/2000	14	7.5	255	425	11.0	0.96	58.6					300	Dénitral															
16/05/2000						1.02	62.5	45.2	0.07	91	27.6		Anjou Re.	0.16	35	6.8	16.9	29.4	14.3	30	0.09	0.1	<0,1		<0,02	50	<10	

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**

Loges	Mesures in situ					Analyses SO							Analyses SI														
Date	T °C	pH	eH mV	Cond 25 µS/cm	O2 diss mg/L	Alcal meq/L	HCO3 mg/L	Cl mg/L	Fe mg/L	NO3 mg/L	SO4 mg/L	Débit l/min	Résultats labo	Br mg/L	Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Mn µg/L	NH4 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	COD mgC/L	Al mg/L	B µg/L	Cu µg/L
20/05/1999	12.5	7.3	323	507	9.0			49	0.09	99.0	26.5		BRGM														
21/06/2000	16.1	7.8	389	562	10.4	1.16	70.8	54.2	0.04	91.7	25.6		BRGM	0.28	37.3	9.3	18.4	39.4	12.1	<5	<0,1	0.1	<0,1	5.5	<0,03	68	<2
17/11/1999	8.7	8.1	255	468	8.0	1.58	96.4	59.1	0.09	42.5	24.6		Dénitral														
23/11/1999	8.2	7.4	439	582	11.2	1.05	64.1	52.5	0.04	90.2	30.0	1307	BRGM	<1	36.1	8.1	15.9	32.9	13.8	23	<0,1	0.14	0.1	5.9	<0,03	51	7
02/12/1999	10.8	7.4	113	506	7.5	1.00	61.0	58.9	0.06	58.9	22.4		Dénitral														
23/05/2000	12.9	7.5	261	448	10.2	0.84	51.2					150	Dénitral														
23/05/2000						0.94	53.4	45.6	0.04	102	25.9		Anjou Re.														
02/06/2000	13.3	7.4	246	427	10.1	1.08	65.9					218	Dénitral														
02/06/2000						1.16	57	42.1	0.08	83.6	25		Anjou Re.														
08/06/2000	13.3	7.4	226	444	10.0	1.12	68.3					240	Dénitral														
08/06/2000						1.2	67.1	44.7	0.05	89.8	25.4		Anjou Re.														
15/06/2000	16.2	7.5	195	450	10.1	1.04	63.4					200	Dénitral														
15/06/2000						1.12	68.8	47.6	0.04	96.4	25.5		Anjou Re.														
20/06/2000	18.9	7.6	422	465	8.5	1.13	68.9	45.3	<0,02	78.2	26.2	472	BRGM		33.5	8.9	17	30.3	13.9	<5	<0,1	0.09	<0,1	4.4	<0,03	55	<2
11/07/2000	15.1	7.1	233	398	9.4	1.2	73.2					60	Dénitral														
11/07/2000								45.8		65.4	23.2		Anjou Re.		32.1	9.2	15.4	28.1	14.5		0.06	0.14	<0,1	6.8		70	
20/07/2000	16.2	7.6	146	429	9.4	1.36	83					82	Dénitral														
20/07/2000						1.26	68.8	46.7	0.18	64	24.4		Anjou Re.														
27/07/2000	16.7	7.6	212	425	9.1	1.4	85.4					100	Dénitral														
27/07/2000						1.36	82	50.3	0.29	64.2	24.8		Anjou Re.														
04/08/2000	16.5	7.4	133	388	9.5	1.48	90.3					100	Dénitral														
04/08/2000						1.5	91.5	46.1	0.31	45	25.6		Anjou Re.														
10/08/2000	17.1	8	150	417	9.1	1.48	90.3					113	Dénitral														
10/08/2000						1.5	91.5	49.3	0.23	52.4	25.6		Anjou Re.	0.17	30.8	9.4	15.8	29.8	13.8	70	0.03	0.07	<0,1	6.4	0.11	90	<10
18/08/2000	16	7.7	94	412	9.3	1.64	100						Dénitral														
18/08/2000						1.6	97.2	52.1	0.63	53.4	25.3		Anjou Re.														
24/08/2000	16.1	7.4	59	422	8.7	1.68	102.5					69	Dénitral														
24/08/2000						1.54	93.3	49.8	0.53	46.9	22		Anjou Re.														
31/08/2000	15.5	7.5	75	417	8.8	1.68	102.5					60	Dénitral														
31/08/2000						1.74	106.3	53.3	0.31	49.4	24.2		Anjou Re.														
07/09/2000	14.2	8.4	129	413	9.0	1.8	109.8					54	Dénitral														
07/09/2000						1.62	95.8	52.3	0.34	45.4	23.3		Anjou Re.														
14/09/2000	15.7	7.9		411	9.2	1.8	109.8					38	Dénitral														
14/09/2000						1.76	107.8	53.2	0.24	45.2	23.2		Anjou Re.														
21/09/2000	13.1	8.2	118	403	9.9	1.76	107.4					65	Dénitral														
21/09/2000						1.7	104.1	51.4	0.33	41.5	22.4		Anjou Re.	0.17	27.5	9.5	16.3	32.7	15	200	0.1	0.04	<0,1	7.5	0.08	80	<10
29/09/2000	13.8	8.4	69	399	9.7	1.8	109.8					100	Dénitral														
29/09/2000						1.68	100	52.6	0.5	37.3	23.1		Anjou Re.														
05/10/2000	11	8.4	167	396	10.4	1.84	112.2					48	Dénitral														
05/10/2000						1.64	97.6	53	1.1	38.8	22.3		Anjou Re.														

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Loges	Mesures in situ					Analyses SO							Analyses SI														
	T	pH	eH	Cond 25	O2 diss	Alcal	HCO3	Cl	Fe	NO3	SO4	Débit	Résultats	Br	Ca	K	Mg	Na	SiO2	Mn	NH4	NO2	PO4	COD	Al	B	Cu
Date	°C		mV	µS/cm	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	l/min	labo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mgC/L	mg/L	µg/L	µg/L
12/10/2000	11.4	7.8	160	384	10.8	1.56	95.2					120	Dénitral														
12/10/2000						1.6	97.6	48.1	0.62	34.2	21.1		Anjou Re.														
20/10/2000	8.9	7.2	38	400	11.0	1.68	102.5					120	Dénitral														
20/10/2000						1.6	95.2	51.6	0.35	37.9	22.7		Anjou Re.	0.18	32.8	10.2	16.6	33.5	15.7	40	0.05	0.12	<0,1	7.2	0.07	80	<10
27/10/2000	11	7.8	53	404	10.3	1.78	108.6					97	Dénitral														
27/10/2000						1.68	101.9	50.6	0.41	37.2	23.1		Anjou Re.														
31/10/2000	10.6	7.5	166	363	11.1	1.8	109.8					300	Dénitral														
31/10/2000						1.32	78.1	45.5	1.9	34.6	22		Anjou Re.														
07/11/2000	9.3	7.2	464	289	10.8	1.16	70.8	40.6	0.11	44.9	26.8	320	BRGM		28.5	8.2	11.4	30.2	10.7	44	<0,1	0.09	0.03	7.9	0.07	46	3
15/11/2000	8.2	7.2	121	409	13.3	1.0	61					600	Dénitral														
15/11/2000						0.86	51.9	39.5	0.48	70.8	26.3		Anjou Re.														
23/11/2000	8.5	7.1	48	361	11.4	0.94	57.3					1200	Dénitral														
23/11/2000						0.94	56.7	40.5	1.4	67.4	27.4		Anjou Re.														
28/11/2000	10.8	7.2	44	404	10.7	0.88	53.7					1200	Dénitral														
28/11/2000						0.8	48.8	39.5	0.32	88	26.5		Anjou Re.														
14/12/2000	10.3	7.3	43	363	10.6	0.92	56.1					>1200	Dénitral														
14/12/2000						0.92	55.5	34.5	0.93	75.8	24.5		Anjou Re.	0.12	30.8	8.1	12.7	26.4	10.8	60	0.25	0.13	0.21	7.4	0.57	50	<10
moyenne	9.9	7.4	126	375.2	11.1	1.3	76.5	43.4	0.7	54.5	24.5	494.6		0.2	30.7	8.8	13.6	30.0	12.4	48.0	0.2	0.1	0.1	7.5	0.2	58.7	3.0

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**

PVE2	Mesures in situ					Analyses SO						Analyses SI													
	Date	T °C	pH	eH mV	Cond 25 µS/cm	O2 dlss mg/L	Alcal meq/L	HCO3 mg/L	Cl mg/L	Fe mg/L	NO3 mg/L	SO4 mg/L	Résultats labo	Br mg/L	Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Mn µg/L	NH4 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	COD mgC/L	Al mg/L
18/05/1999	12.7	5.1	479	600	4.5	0.08	4.9	65.8	<0,02	76.0	41.3	BRGM													
22/06/1999	13.8	5.4	487	811	5.5	0.06	3.6	62.6	<0,02	245.0	15.5	BRGM	0.27	51.8	7.6	28.4	27.7	19.6	51	<0,1	0.02	<0,1	2.2	0.06	
17/11/1999	11.8	6.2	307	650	6.9	0.36	22.0	66.1	<0,03	145.6	9.1	Dénitral													
23/11/1999	12.7	5.2	346	736	6.0	0.16	9.7	59.4	<0,02	230.0	15.6	BRGM	<1	43.6	8	24.7	32.8	20.5	54	<0,1	0.01	<0,1	1.6	0.06	
02/12/1999	11.5	5.6	250	630	6.8	0.32	19.5	65.1	0.03	138.7	9.8	Dénitral													
10/12/1999	9.6	5.1	285	642	8.1	0.16	9.8	61.9	<0,03	140.0	10.0	Dénitral													
20/12/1999	10.3	5.2	317	580	7.1	0.12	7.3	59.7	0.05	122.0	13.0	Dénitral													
30/12/1999		5.2	288	565		0.10	6.1	57.0	0.05	104.9	14.9	Dénitral													
06/01/2000	12.0	5.2	354	535	6.8	0.08	4.9					Dénitral													
12/01/2000	8.1	5.3	270	540	7.4	0.70	42.7					Dénitral													
19/01/2000	11.0	5.4	365	543	6.4	0.72	43.9					Dénitral													
27/01/2000	10.6	5.1	254	555	6.7	0.18	11.0					Dénitral													
27/01/2000						0.18	11.0	60.8	0.01	201.0	19.6	Anjou Re.	0.2	43.4	7.3	23.3	25	9.6	50	0.04	<0,02	<0,1	2.3	0.05	
04/02/2000	11.2	5.5	338	567	6.3	0.17	10.4					Dénitral													
10/02/2000	11.4	5.4	240	571	6.3	0.12	7.3					Dénitral													
17/02/2000	11.2	5.3	272	581	6.7	0.15	9.2					Dénitral													
24/02/2000	11.9	5.3	260	571	6.6	0.16	9.8	57	<0,005	205	16.4	Anjou Re.	<0,03	45.7	7.4	24.3	25.9	5.9	50	0.04	<0,02	<0,1	2.2	0.06	
02/03/2000	11.6	5.3	310	582	6.5	0.10	6.1					Dénitral													
02/03/2000						0.12	7.3	52.6	<0,005	203	16	Anjou Re.													
09/03/2000	12.9	5.7	292	567	5.9	0.16	9.8					Dénitral													
09/03/2000						0.12	7.3	52.3	0.01	201	15.6	Anjou Re.													
16/03/2000	10.7	5.4	226	576	6.1	0.12	7.3					Dénitral													
16/03/2000						0.12	7.3	55.8	<0,005	226	16.4	Anjou Re.													
22/03/2000	10.7	4.9	393	677	8.2	0.13	8.0	60.2	<0,02	231	16.8	BRGM	<1	46.7	7.7	25	29.1	19.6	46	<0,1	<0,01	<0,1	1.5	0.05	
30/03/2000	10.3	5.4	417	583	6.3	0.16	9.8					Dénitral													
30/03/2000						0.14	8.5	53.8	0.01	222	15.6	Anjou Re.													
06/04/2000	11.2	5.4		589	5.8	0.18	11					Dénitral													
06/04/2000						0.18	11	58.4	<0,005	236	15.9	Anjou Re.													
13/04/2000	10.9	5.3		577	6.3	0.12	7.2					Dénitral													
13/04/2000						0.14	8.5	57.5	<0,005	231	16.4	Anjou Re.													
20/04/2000	11	5.2	297	561	6.4	0.10	6.1					Dénitral													
20/04/2000						0.14	8.5	56.4	0.01	223	16.8	Anjou Re.	0.18	45.7	7.2	24.1	27.8	4.9	60	0.11	<0,02	<0,1	2	0.05	
27/04/2000	11.1	5.1	302	571	6.6	0.10	6.1					Dénitral													
27/04/2000						0.14	8.2	55.6	0.01	216	17.2	Anjou Re.													
05/05/2000	11	5.2	293	577	6.8	0.16	9.8					Dénitral													
05/05/2000						0.12	7.8	58	<0,005	219	17.2	Anjou Re.													
11/05/2000	11	5.2	312	580	6.3	0.12	7.3					Dénitral													
11/05/2000						0.14	8.4	61.2	0.01	220	17.6	Anjou Re.													
16/05/2000	11.4	5.1	488	563	6.4	0.12	7.3					Dénitral													
16/05/2000						0.14	8.8	56	<0,005	208	17.6	Anjou Re.	0.17	46	7.2	25	27.3	18.9	50	0.06	<0,02	<0,1	2.2	<0,02	

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

PVE2	Mesures in situ					Analyses SO						Analyses SI													
	Date	T °C	pH	eH mV	Cond 25 µS/cm	O2 diss mg/L	Alcal meq/L	HCO3 mg/L	Cl mg/L	Fe mg/L	NO3 mg/L	SO4 mg/L	Résultats labo	Br mg/L	Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Mn µg/L	NH4 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	COD mgC/L	Al mg/L
	23/05/2000	11.4	5.2	350	568	6.1	0.14	8.5					Dénitral												
	23/05/2000						0.12	7.8	50.1	<0,005	214	17.6	Anjou Re.												
	08/06/2000	11.5	5.3	332	585	5.8	0.12	7.3					Dénitral												
	08/06/2000						0.14	8.2	52.4	0.01	230	17.2	Anjou Re.												
	15/06/2000	11.9	5.2	209	590	6.0	0.12	7.3					Dénitral												
	15/06/2000						0.14	8.3	55.7	<0,005	230	16	Anjou Re.												
	20/06/2000	14.8	5.4	396	570	7.4	0.14	8.5	46.7	<0,02	213.4	15.4	BRGM		46.1	8	24.8	27.7		47	<0,1	0.08	<0,1	1.7	0.05
	11/07/2000	14.1	5.5	243	580	5.7	0.22	13.4					Dénitral												
	11/07/2000								55.2		218	15.2	Anjou Re.		51.8	8.5	25.1	29.5	19.4		0.03	<0,02	<0,1	2	
	20/07/2000	15.2	5.5	87	582	6.0	0.22	13.4					Dénitral												
	20/07/2000						0.18	11	55.6	0.03	228	14.8	Anjou Re.												
	27/07/2000	14.6	5.4	233	592	5.8	0.20	12.2					Dénitral												
	27/07/2000						0.12	7.3	33.9	0.02	134	11.2	Anjou Re.												
	04/08/2000	15.4	5.6	150	584	5.3	0.20	12.2					Dénitral												
	04/08/2000						0.18	11	51.3	0.03	206	13.8	Anjou Re.												
	10/08/2000	14.4	5.6	173	585	5.5	0.24	14.6					Dénitral												
	10/08/2000						0.16	9.8	55.4	<0,005	222	14.6	Anjou Re.	0.11	45.9	7.4	24.2	26.9	4.1	0.04	0.08	<0,02	<0,1	1.7	0.03
	18/08/2000	15.9	5.5	110	568	4.6	0.24	14.6					Dénitral												
	18/08/2000						0.20	12.1	59	0.14	231	15.5	Anjou Re.												
	24/08/2000	16.4	5.6	78	561	4.1	0.22	13.4					Dénitral												
	24/08/2000						0.16	10	46.4	0.03	182	13.6	Anjou Re.												
	31/08/2000	16.1	5.7	77	560	5.1	0.26	15.9					Dénitral												
	31/08/2000						0.18	10.9	46	0.12	180	13	Anjou Re.												
	07/09/2000	15.4	5.7	153	567	4.4	0.24	14.6					Dénitral												
	07/09/2000						0.20	12	58	0.07	225	14.8	Anjou Re.												
	14/09/2000	15.8	5.5		526	5.7	0.22	13.4					Dénitral												
	14/09/2000						0.20	11.6	58.8	0.04	226	15.2	Dénitral												
	21/09/2000	15	5.7	134	564	5.5	0.30	18.3					Dénitral												
	21/09/2000						0.20	12.1	58.2	0.07	7.8	34.4	Anjou Re.		58.2	8.3	25	30.7	5.3	50	0.11	<0,02	<0,1	1.5	0.1
	29/09/2000	15	5.7	133	553	6.0	0.28	17.1					Dénitral												
	29/09/2000						0.20	12.2	59	0.04	233	19	Anjou Re.												
	05/10/2000	14.6	5.7	202	574	5.5	0.28	17.1					Dénitral												
	05/10/2000						0.30	18.3	62.3	0.23	228	15	Anjou Re.												
	12/10/2000	14.2	5.6	258	595	6.5	0.22	13.4					Dénitral												
	12/10/2000						0.18	11	52	0.03	202	13.5	Anjou Re.												
	20/10/2000	13	5.4	99	666	6.7	0.20	12.2					Dénitral												
	20/10/2000						0.16	9.9	60.5	0.07	233	15	Anjou Re.		49.9	8.7	23.6	30.2	15.3	50	0.05	<0,02	<0,1	1.6	0.09
	27/10/2000	13.8	5.5	88	594	7.2	0.20	12.2					Dénitral												
	27/10/2000						0.16	9.3	50.1	0.16	197	12.3	Anjou Re.												
	31/10/2000	13.6	5.6	212	591	6.4	0.24	14.6					Dénitral												

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

PVE2	Mesures in situ					Analyses SO						Analyses SI													
	Date	T °C	pH	eH mV	Cond 25 µS/cm	O2 diss mg/L	Alcal meq/L	HCO3 mg/L	Cl mg/L	Fe mg/L	NO3 mg/L	SO4 mg/L	Résultats labo	Br mg/L	Ca mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	SiO2 mg/L	Mn µg/L	NH4 mg/L	NO2 mg/L	PO4 mg/L	COD mgC/L	Al mg/L
	31/10/2000						0.20	11.6	59.7	0.07	230	13.9	Anjou Re.												
	15/11/2000	13	5.6	195	506	8.0	0.20	12.2					Dénitral												
	15/11/2000						0.12	7.2	50	0.04	193	17.8	Anjou Re.												
	23/11/2000	12.8	5.1	159	509	6.6	0.14	8.5					Dénitral												
	23/11/2000						0.16	9.3	51.3	0.07	197	17.8	Anjou Re.												
	28/11/2000	12.8	5.2	123	500	6.9	0.18	11					Dénitral												
	28/11/2000						0.14	8.2	45	0.04	171	17.4	Anjou Re.												
	07/11/2000	13.1	5.0	434	519	7.8	0.21	12.6	58.6	<0,02	229	14.1	BRGM		44.8	8.6	23.7	33.3	21.7	50	<0,1	0.01	<0,02	1.2	0.05
	14/12/2000	12	5.2	172	475	6.9	0.16	9.8					Dénitral												
	14/12/2000						0.12	7.7	45.7	<0,005	181	18.9	Anjou Re.	0.15	40.6	7.2	22.2	26.5	3	40	0.13	<0,02	<0,1	2.8	0.09
	moyenne	12.7	5.2	216.6	501.8	7.2	0.2	9.8	51.7	0.1	200.2	16.7		0.2	42.7	7.9	23.0	29.9	12.4	45.0	0.1	0.0	<0,1	2.0	0.1

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**

lagune	T	pH	eH	Cond 25	O2 diss	Alcal	HCO3	Cl	Fe	NO3	SO4	Débit	Résultats	Br	Ca	K	Mg	Na	SiO2	Mn	NH4	NO2	PO4	COD	Al
Date	°C		mV	µS/cm	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	l/min	labo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mgC/L	mg/L
24/11/1999	12.1	6.3	314	550	6.3	0.91	55.4	43.0	1.08	92.0	31.9	15	BRGM	<1	28.4	17.3	15.6	28.2	19.3	203	<0,1	0.03	0.3	4.7	<0,03
02/12/1999	12.6	6.0	129	473	4.4	0.82	50.0	49.2	0.64	60.5	26.1		Dénitral												
10/12/1999	11.0	6.0	133	480	4.9	0.80	48.8	52.1	0.47	65.0	25.0		Dénitral												
30/12/1999		5.7	163	404		0.40	24.4	40.4	0.20	50.1	20.7		Dénitral												
12/01/2000	10.6	5.8	143	415	5.4	0.50	30.5						Dénitral												
27/01/2000	9.7	5.8	163	414	4.9	0.44	26.8						Dénitral												
27/01/2000						0.44	26.8	40.8	0.15	112.0	38.0		Anjou Re.	0.16	27.6	15	16.2	21.9	12.7	20	0.05	<0,02	<0,1	4.2	<0,02
10/02/2000	10.6	6.1	104	426	4.6	0.68	41.5					8	Dénitral												
24/02/2000	11.2	6.0	204	387	4.8	0.52	31.7	41.7	0.03	89.4	35.1		Anjou Re.	0.15	26.2	14.8	15.2	22.4	12	20	0.04	<0,02	<0,1	4.2	<0,02
09/03/2000	10.9	6.7	196	401	6.5	0.60	36.6					6	Dénitral												
09/03/2000						0.60	36.6	42.1	0.13	94.6	34.7		Anjou Re.												
22/03/2000	9.9	6.2	474	487	6.3	0.78	47.6	44.9	0.29	88.4	34	4	BRGM	<1	28.6	16	15.7	26.9	18.4	53	<0,1	<0,01	<0,1	4.9	<0,02
06/04/2000	10.2	6.2		415	6.4	0.80	48.8					9	Dénitral												
06/04/2000						0.78	47.6	36.3	0.04	57.7	28.1		Anjou Re.												
20/04/2000	10.4	5.9	269	385	7.3	0.56	34.2					10	Dénitral												
20/04/2000						0.60	36.6	37.9	0.02	88.6	34.3		Anjou Re.	0.13	26.2	15	14.3	22.8	11.7	30	0.11	<0,02	<0,1	4.8	0.02
05/05/2000	11	5.9	183	422	7.1	0.48	29.3					10	Dénitral												
05/05/2000						0.54	33.1	43	0.07	99	36.8		Anjou Re.												
16/05/2000	11.8	5.8	340	412	7.3	0.56	34.2					11	Dénitral												
16/05/2000						0.58	35.6	40.2	0.03	98.8	35		Anjou Re.	0.14	29.2	15.9	17.2	23.5	18.2	20	0.08	<0,02	<0,1	4.9	<0,02
02/06/2000	12.3	5.9	251	413	6.3	0.64	39.0					7	Dénitral												
02/06/2000						0.66	40.7	38.7	0.31	91.4	35.4		Anjou Re.												
20/06/2000	15.0	6.2	366	413	4.7	0.92	60.1	43.2	0.2	69.2	34.9	2	BRGM		28.3	15.5	15.5	25.7	18.1	54	<0,1	0.01	<0,1	4	<0,03
11/07/2000	15.9	6.5	60	495	4.3	3.12	190.3					0.2	Dénitral												
11/07/2000								59.9		8.6	17.1		Anjou Re.		41.5	13.6	19.8	39.4	20.8		1.1	0.05	<0,1	7.7	
08/11/2000	9.7	6.3	294	477	7.5	3.11	189.7	63.9	9.34	3	17.5	0.18	BRGM		35.5	12.9	16.4	43.9	21.7	2582	0.5	0.05	<0,02	6.9	<0,03
23/11/2000	9.9	6.2	81	386	4.4	0.80	48.8						Dénitral												
23/11/2000						0.78	47.3	35.1	0.1	58.5	32.1		Anjou Re.												
06/12/2000	10.8	6.1	71	369	5.2	0.64	39.0					1	Dénitral												
06/12/2000						0.68	41.2	33.9	0.05	84.8	34.1		Anjou Re.	0.15	26.6	14.2	14.3	24.7	9.2	90	0.13	<0,02	<0,1	5	<0,02
moyenne	11.3	6.1	207	431	5.7	0.82	50.1	43.7	0.77	72.9	30.6	6.4		0.1	29.8	15.0	16.0	27.9	16.2	341.3	0.3	0.0	0.3	5.1	0.0

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

PPE2	T	pH	eH	Cond 25	O2 diss	Alcal	HCO3	Cl	Fe	NO3	SO4	Niv piézo	Résultats	Br	Ca	K	Mg	Na	SiO2	Mn	NH4	NO2	PO4	COD	Al	B	Cu
Date	°C		mV	µS/cm	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	m	labo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mgC/L	mg/L	µg/L	µg/L
19/05/1999	13.0	6.3	301	495	2.2	1.37	83.6	56.0	0.03	35.0	42.8		BRGM														
22/06/1999	13.1	6.4	271	480	3.9	1.40	85.4	59.9	0.58	15.9	33.9	3.70	BRGM	0.23	26.5	4	12.7	31.4	30.6	202	<0,1	0.02	<0,1	1.6	<0,03	15	<20
17/11/1999	8.5	6.2	270	436	0.8	1.50	91.5	61.0	0.03	12.5	40.3		Dénitral														
23/11/1999	11.6	6.3	380	468	2.9	1.37	83.6	55.8	0.03	25.1	53.8	1.62	BRGM	<1	29.7	6.6	14.4	38.8	28.8	162	<0,1	0.01	<0,1	2.3	0.05	22	11
02/12/1999	12.1	6.2	221	450	3.0	1.52	92.7	62.3	<0,03	15.9	40.1		Dénitral														
10/12/1999	9.8	6.2	188	453	2.3	1.56	95.2	60.9	0.05	16.0	37.0		Dénitral														
30/12/1999		6.1	225	424		1.56	95.2	52.8	0.11	12.4	30.2		Dénitral														
12/01/2000	9.5	6.3	183	431	5.4	1.68	102.5						Dénitral														
27/01/2000	9.3	6.3	167	453	4.2	1.64	100.0						Dénitral														
27/01/2000						1.62	98.8	60.8	0.17	42.8	41.6		Anjou Re.	0.16	35.7	6	17	34.5	25.1	130	0.05	<0,02	<0,1	2.7	<0,02	<50	<10
10/02/2000	9.6	6.3	170	448	1.6	1.62	98.8						Dénitral														
24/02/2000	12.3	6.4	159	430	3.2	1.68	102.5	54.1	0.17	33.3	36.7		Anjou Re.	0.15	35.2	6.1	16	32.4	23.2	110	0.06	<0,02	<0,1	3.2	0.04	<50	<10
09/03/2000	11.7	6.4		428	1.1	1.72	104.9						Dénitral														
09/03/2000						1.66	101.3	50.1	0.17	30.5	34.7		Anjou Re.														
22/03/2000	11.0	6.0	346	498	2.2	1.63	106.0	56.7	0.17	34	38.9	2.01	BRGM	<1	35.9	6.3	15.8	36	25.7	102	<0,1	<0,01	<0,1	3.5	<0,03	17	28
06/04/2000	10.9	6.5		417	0.4	1.76	107.4						Dénitral														
06/04/2000						1.8	109.8	56.5	0.14	27.6	38.1		Anjou Re.														
20/04/2000	10.3	6.4	246	428	3.2	1.76	107.4						Dénitral														
20/04/2000						1.82	111.0	55.1	0.12	23.2	35.2		Anjou Re.	0.16	34.2	5.2	14.8	35.5	18.6	120	0.12	<0,02	<0,1	2.8	0.04	<50	<10
05/05/2000	10.6	6.4	203	414	0.7	1.96	119.6						Dénitral														
05/05/2000						2.02	122.6	50.6	0.18	24.9	37.6		Anjou Re.														
16/05/2000	12.1	6.3	307	389	0.4	1.84	112.2						Dénitral														
16/05/2000						1.94	118.8	49.6	0.01	16.1	35.7		Anjou Re.	0.14	34.6	5.5	16.3	34.9	25.8	120	0.08	<0,02	<0,1	3.9	<0,02	<50	<10
08/06/2000	13.0	6.3	264	373	2.2	1.88	114.7						Dénitral														
08/06/2000						1.84	112.1	34.9	0.04	10.6	39.8		Anjou Re.														
20/06/2000	13.8	6.4	413	435	2.1	2.20	134.2	45	<0,02	17.4	40.1		BRGM		36.1	7	15.4	32.5	22.7	67	<0,1	<0,01	<0,1	4	<0,03	23	2
11/07/2000	13.7	6.5	230	433	1.3	1.96	119.6						Dénitral														
11/07/2000								55.5		18.3	35.6		Anjou Re.		34.9	5.9	15.8	35.3	26.5		<0,02	<0,02	<0,1	2.8		<50	
27/07/2000	14.6	6.5	153	432	2.5	2.00	122.0						Dénitral														
27/07/2000						1.98	120.8	52.9	0.11	20.5	38.4		Anjou Re.														
10/08/2000	15.6	6.7	132	435	3.6	2.06	125.7						Dénitral														
10/08/2000						1.98	120.8	45.2	0.12	22	37.9		Anjou Re.	0.15	36.7	6.4	15.7	28.5	14.9	30	0.04	<0,02	0.14	4.2	0.04	<50	<10
24/08/2000	16.3	6.6	56	381	3.4	1.64	100.0						Dénitral														
24/08/2000						1.46	89.2	48	0.53	11.1	30.2		Anjou Re.														
07/09/2000	15.0	6.6	131	409	1.9	1.80	109.8						Dénitral														
07/09/2000						1.84	111.8	56.3	0.28	18.7	38.2		Anjou Re.														
21/09/2000	15.4	6.5	61	365	3.5	1.40	85.4						Dénitral														
21/09/2000						1.42	86.9	57.9	0.85	7.9	34.1		Anjou Re.	0.12	22.5	4.4	13.4	38.8	13.9	140	0.1	<0,02	<0,1	1.2	0.07	<50	<10
05/10/2000	14.3	6.4	176	376	3.3	1.40	85.4						Dénitral														
05/10/2000						1.38	84.2	61	0.93	7.9	35.7		Anjou Re.														
20/10/2000	13.2	6.4	56	407	4.0	1.64	100.0						Dénitral														
20/10/2000						1.60	97.6	59.5	0.28	14.6	38.2		Anjou Re.	0.16	31.5	4.9	15	39.7	13.2	100	<0,02	<0,02	<0,1	1.5	0.04	<50	<10
07/11/2000	12.5	6.0	416	415	10.6	1.46	89.1	55.6	0.06	16.3	52.3		BRGM		30.8	5.5	14.3	40.6	31.3	129	<0,1	<0,01	<0,02	1.3	<0,03	18.4	<2
23/11/2000	12.2	6.2	85	401	0.9	1.40	85.4						Dénitral														
23/11/2000						1.48	89.5	54.4	0.43	18.6	50		Anjou Re.														
14/12/2000	11.7	6.3	126	375	0.6	1.60	97.6						Dénitral														
14/12/2000						1.42	86.5	43.6	0.73	14	35.7		Anjou Re.	0.15	28	4.2	13.5	32.2	11.6	160	0.13	0.02	<0,1	2.8	0.11	<50	<10
moyenne	12.3	6.3	212	426	2.7	1.68	102.6	54.0	0.25	20.1	38.7	2.4		0.2	32.3	5.6	15.0	35.1	22.3	121	0.1	0.0	0.1	2.7	0.1	19.1	13.7

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

PCA2	T	pH	eH	Cond 25	O2 diss	Alcal	HCO3	Cl	Fe	NO3	SO4	Niv piézo	Résultats	Br	Ca	K	Mg	Na	SiO2	Mn	NH4	NO2	PO4	COD	Al	B	Cu	F
Date	°C		mV	µS/cm	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	m	labo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mgC/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L
18/05/1999	12	5.8	460	722	2.0	0.49	29.9	42.2	<0,02	228	42.4		BRGM															
22/06/1999	14	5.8	441	773	4.9	0.24	14.6	49.6	<0,02	205	41.4	1.57	BRGM	0.29	58.2	5.8	23	41.4	10.8	<5	<0,1	0.02	<0,1	5.1	0.04	40	5	100
23/11/1999	12	5.9	440	744	3.3	0.71	43.2	42.4	<0,02	200	41.6	0.37	BRGM	<1	53.7	5.8	19.9	34.5	10.8	6	<0,1	0.04	<0,1	4.9	0.04	39	9	100
10/12/1999	9.6	5.8	262	583	4.3	0.80	48.8	35.9	<0,03	112	30.0		Dénitral															
12/01/2000	9.9	5.7	250	477	5.1	0.78	47.6						Dénitral															
27/01/2000	9.6	5.7	205	452	4.6	0.80	48.8						Dénitral															
27/01/2000						0.80	48.8	29.6	<0,005	135	43.6		Anjou Re.	0.13	42.9	5.5	17.6	26	9.8	<10	0.03	<0,02	<0,1	6	0.03	<50	<10	144
1/02/2000	11	6.0	253	452	5.9	0.84	51.2						Dénitral															
24/02/2000	12	5.9	209	442	3.6	0.76	46.4	29.6	0.01	127	39.9		Anjou Re.	0.13	42.7	5.2	17.3	25.1	7.7	<10	0.04	<0,02	<0,1	5.9	0.04	<50	<10	146
09/03/2000	12	5.9		429	3.0	0.72	43.9						Dénitral															
09/03/2000						0.72	43.9	23.2	<0,005	104	35.6		Anjou Re.															
22/03/2000	9.8	5.5	273	501	2.8	0.77	47.0	31.1	<0,02	124	41.3	0.30	BRGM	<1	41.5	5.2	16.4	26.6	11.1	<5	<0,1	<0,01	0.2	5.7	0.03	24	19	100
06/04/2000	9.8	5.9		440	2.2	0.76	46.4						Dénitral															
06/04/2000						0.82	50.0	32.8	0.01	130	49.6		Anjou Re.															
20/04/2000	10	5.8	243	420	2.7	0.84	51.2						Dénitral															
20/04/2000						0.84	51.2	26.9	<0,005	107	40.3		Anjou Re.	0.09	37.6	4.5	14.7	23.5	6.8	<10	0.13	<0,02	<0,1	6.3	0.06	<50	<10	128
05/05/2000	10	5.8	529	417	2.3	0.96	58.6						Dénitral															
05/05/2000						1.00	61.1	26	0.01	103.0	42.8		Anjou Re.															
16/05/2000	11	5.7	224	416	2.0	0.96	58.6						Dénitral															
16/05/2000						1.08	65.3	25.2	<0,005	98.0	41.6		Anjou Re.	0.12	40.5	4.9	17	25.6	11.2	<10	0.07	<0,02	<0,1	6.8	<0,02	<50	<10	135
02/06/2000	12	5.7	303	404	1.5	1.00	61.0						Dénitral															
02/06/2000						1.12	68.3	23.6	0.01	95.8	38.7		Anjou Re.															
20/06/2000	12	5.8	425	428	2.1	1.11	67.7	37.7	<0,02	82.4	38.5	0.37	BRGM		37.2	5.5	14.7	25.2	11.4	14	<0,1	0.02	<0,1	5.8	0.03	30	<2	100
11/07/2000	13	5.7	240	428	1.4	0.96	58.6						Dénitral															
11/07/2000								32		104.0	41.2		Anjou Re.		40.8	5.5	16.6	27.3	11		<0,02	<0,02	<0,1	5.9		<50		
27/07/2000	14	5.8	212	430	0.6	0.92	56.1						Dénitral															
27/07/2000						0.90	54.9	34.1	0.03	108.0	39.1		Anjou Re.															
10/08/2000	15	5.9	164	433	1.0	0.82	50.0						Dénitral															
10/08/2000						0.28	17.1	9.5	<0,005	27.7	12.0		Anjou Re.	0.17	10.6	1.2	4.6	6.5	2.7	<10	0.02	<0,02	<0,1	4.9	<0,02	<50	<10	<100
24/08/2000	15	5.8	87	413	0.7	0.84	51.2						Dénitral															
24/08/2000						0.84	51.4	38.4	0.07	108.0	38.4		Anjou Re.															
07/09/2000	15	5.9	140	412	1.2	0.86	52.5						Dénitral															
07/09/2000						0.88	54.0	36.2	<0,005	101.0	36.2		Anjou Re.															
21/09/2000	15	5.8	109	411	1.5	0.84	51.2						Dénitral															
21/09/2000						0.86	52.6	36.8	<0,005	103.0	35.2		Anjou Re.	0.17	34.9	5.2	15.1	28.7	4.8	<10	0.09	<0,02	<0,1	4.6	<0,02	<50	<10	143
05/10/2000	14	5.8	199	414	2.1	0.88	53.7						Dénitral															
05/10/2000						0.90	54.9	38.2	0.02	106.0	35.8		Anjou Re.															
20/10/2000	13	5.8	69	434	2.4	0.84	51.2						Dénitral															
20/10/2000						0.82	50.0	39.6	0.03	105.0	35.8		Anjou Re.	0.18	40.8	5.8	16.2	28.7	10.2	<10	0.02	<0,02	<0,1	4.1	0.04	<50	<10	124
08/11/2000	12	5.6	458	444	2.6	0.72	43.9	40.6	<0,02	104.0	34.8	0.3	BRGM		36.6	5.3	14.9	30.3	12.4	9	<0,1	<0,01	<0,02	3.7	<0,03	31.4	2	<100
moyenne	12.2	5.8	269	477	2.6	0.82	50.2	33.1	0.02	118.2	38.1	0.6		0.2	39.8	5.0	16.0	26.9	9.3	9.7	0.1	0.0	0.2	5.4	0.0	32.9	8.8	122.0

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

FVE1	T	pH	eH	Cond 25	O2 diss	Alcal	HCO3	Cl	Fe	NO3	SO4	Résultats labo	Br	Ca	K	Mg	Na	SiO2	Mn	NH4	NO2	PO4	COD	Al
Date	°C		mV	µS/cm	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mgC/L	mg/L
19/05/1999	13.2	6.0	327	544	3.2	0.35	21.4	51.8	1.54	149.4	20.0	BRGM												
17/11/1999	9.2	7.2	263	420	3.3	0.88	53.7	48.7	<0,03	55.3	21.5	Dénitral												
25/11/1999	11.3	6.0	417	605	7.9	0.41	25.0	52.5	0.2	70.0	16.3	BRGM	<0,5	41.8	11.8	18.7	35.5	31.3	829	<0,1	<0,01		1.3	<0,03
02/12/1999	12.5	5.8	169	538	6.4	0.46	28.1	57.5	0.09	98.1	13.4	Dénitral												
10/12/1999	11.1	5.7	607	551	4.4	0.44	26.8	58.0	0.04	100.0	13.0	Dénitral												
30/12/1999		5.1	307	984		0.10	6.1	106.1	0.17	203.8	29.6	Dénitral												
10/02/2000	12.2	5.8	633	547	5.8	0.36	22.0					Dénitral												
24/02/2000	13.0	5.8	183	547	5.4	0.32	19.5	53.5	0.34	188	17.9	Anjou Re.	<0,03	43	10.2	19.1	32.6	13.4	720	0.03	<0,02	<0,1	1.4	0.07
09/03/2000	13.0	5.9		533	6.0	0.38	23.2					Dénitral												
09/03/2000						0.32	19.5	49.1	0.1	175	17.1	Anjou Re.												
23/03/2000	12.3	6.0	487	694	8.0	0.26	15.9	57.8	0.14	225	17.0	BRGM	<1	43.4	11.5	19.8	36.3	27.4	683	<0,1	<0,01	0.3	1.8	0.07
06/04/2000	11.9	5.8		552	4.4	0.40	24.4					Dénitral												
06/04/2000						0.32	19.5	53.8	0.21	202	18.3	Anjou Re.												
20/04/2000	12.6	5.8	315	563	5.5	0.32	19.5					Dénitral												
20/04/2000						0.34	20.7	54.9	0.3	211	18.4	Anjou Re.	<0,03	44.8	10.7	19.4	35.5	13.1	660	0.11	<0,02	0.11	1.4	0.13
05/05/2000	12.5	5.7	687	610	8.7	0.24	14.6					Dénitral												
05/05/2000						0.24	15.1	58	0.08	236.0	18.0	Anjou Re.												
16/05/2000	12.7	5.7	701	571	5.5	0.64	39.0					Dénitral												
16/05/2000						0.32	19.6	54.4	0.14	200.0	18.4	Anjou Re.	<0,03	45.5	10.8	21.1	38.2	28.7	750	0.03	<0,02	<0,1	1.6	0.02
02/06/2000	12.9	5.7	700	551	8.2	0.34	20.7					Dénitral												
02/06/2000						0.32	19.8	50.8	0.23	196.0	19.2	Anjou Re.												
21/06/2000	13.3	5.7	381	513	5.5	0.37	22.8	45.3	0.5	172.2	19.4	BRGM	12	38.8	11	16.9	32.8	30.3	708	<0,1	<0,01	<0,1	1.1	0.05
27/07/2000	14.4	6.0	123	373	5.3	0.56	34.2					Dénitral												
27/07/2000						0.54	32.9	43.7	1.5	86.2	26.0	Anjou Re.												
24/08/2000	13.8	6.1	145	362	2.9	0.52	31.7					Dénitral												
24/08/2000						0.42	25.5	34.5	1.4	63.3	21.1	Anjou Re.												
05/10/2000	12.9	6.1	652	314	6.0	0.62	37.8					Dénitral												
05/10/2000						0.50	30.5	33.8	3.3	41.3	23.1	Anjou Re.												
23/11/2000	12.6	5.6	626	514	4.9	0.34	20.7					Dénitral												
23/11/2000						0.34	21.2	54.4	0.68	174.0	18.8	Anjou Re.												
moyenne	12.5	5.9	429	544	5.6	0.40	24.4	53.6	0.61	149.8	19.3		12.0	42.9	11.0	19.2	35.2	24.0	725.0	0.1	<0,02	0.2	1.4	0.1

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

FCa1	T	pH	eH	Cond 25	O2 diss	Alcal	HCO3	Cl	Fe	NO3	SO4	Résultats	Br	Ca	K	Mg	Na	SiO2	Mn	NH4	NO2	PO4	COD	Al	B	Cu	F	Ni
Date	°C		mV	µS/cm	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	labo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mgC/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
19/05/1999	12.4	6.2	419	330	3.4	0.71	43.3	49.7	0.47	35.1	32.9	BRGM																
21/06/1999	18.2	6.1	387	465	2.4	0.75	53.7	53.5	0.19	59.9	34.8	BRGM	0.24	30.1	4.8	13.6	31.9	35.8	289	<0,1	0.03	<0,1	1.8	<0,03	23	7	200	20
17/11/1999	7.5	7.8	205	419	1.2	1.12	68.3	59.1	<0,03	27.7	27.2	Dénitral																
10/12/1999	10.9	6.1	122	392	1.9	1.00	61.0	55.9	<0,03	23.0	26.0	Dénitral																
27/01/2000	10.8	6.2	113	384	5.8	0.88	53.7					Dénitral																
27/01/2000						0.86	52.5	54.0	0.49	52.8	38.8	Anjou Re.	0.18	26.5	5.9	13	29.5	37.3	190	0.03	0.04	<0,1	1.2	<0,02	<50	<10	236	25
10/02/2000	12.7	6.2	97	371	1.6	0.86	52.5					Dénitral																
24/02/2000	13.5	6.2	95	340	1.8	0.88	53.7	51.9	1.2	29.8	33.7	Anjou Re.	0.14	23.3	4.6	11.4	29.6	22.4	310	0.04	<0,02	<0,1	1	<0,02	50	<10	241	19
09/03/2000	12.7	6.2	162	346	1.3	0.88	53.7					Dénitral																
09/03/2000						0.82	50.0	45.2	0.35	32.9	31.4	Anjou Re.																
22/03/2000	12.9	5.4	320	426	0.2	0.89	54.3	49.6	0.58	35.7	35.1	BRGM	<1	24.9	4.8	11.5	32.6	38.9	243	<0,1	0.02	<0,1	0.8	<0,03	16	13	200	19
06/04/2000	12.3	6.3		359	1.1	0.92	56.1					Dénitral																
06/04/2000						0.88	53.7	52.2	0.44	40.3	36.1	Dénitral																
20/04/2000	13.1	6.1	116	355	1.4	0.82	50.0					Dénitral																
20/04/2000						0.72	43.9	40.5	0.36	34.5	30.7	Anjou Re.	0.12	21.8	4.1	9.7	25	15.4	220	0.1	<0,02	<0,1	1.2	0.05	<50	<10	188	13
05/05/2000	13	6.2	139	367	0.3	0.80	48.8					Dénitral																
05/05/2000						0.88	53.2	50.1	0.6	34.7	35.0	Anjou Re.																
16/05/2000	13.4	6.1	122	380	1.3	0.80	48.8					Dénitral																
16/05/2000						0.86	52.0	50.2	0.36	51.3	35.7	Anjou Re.	0.15	28	5.4	13.6	31.8	36.8	270	0.07	<0,02	<0,1	1.4	<0,02	<50	<10	209	18
02/06/2000	13.4	6.1	122	368	0.5	0.84	51.2					Dénitral																
02/06/2000						0.86	52.8	47.2	0.57	38.9	33.1	Anjou Re.																
21/06/2000	14.1	6.1	349	342	1.6	0.88	53.7	45.1	0.99	31.8	34.0	BRGM		24.2	4.8	11	30.1	36.6	286	<0,1	0.02	<0,1	0.8	<0,03	14	<2	200	21
27/07/2000	13.9	6.2	97	361	0.3	0.96	58.6					Dénitral																
27/07/2000						0.90	54.9	52.1	1.4	32.0	36.4	Anjou Re.																
24/08/2000	13.8	6.3	56	346	0.1	0.88	53.7					Dénitral																
24/08/2000						0.82	50.3	45.6	1.9	26.8	33.6	Anjou Re.																
05/10/2000	13.2	6.1	126	339	0.7	0.96	58.6					Dénitral																
05/10/2000						0.78	47.6	39.7	1.4	22.4	32.0	Anjou Re.																
23/11/2000	12.3	6.0	51	359	1.8	0.88	53.7					Dénitral																
23/11/2000						0.88	53.7	50.5	1.3	39.9	37.1	Anjou Re.																
moyenne	12.8	6.2	172	371	1.5	0.87	53.1	49.6	0.79	36.1	33.5		0.2	25.5	4.9	12.0	30.1	31.9	258	0.1	0.0	<0,1	1.2	0.1	25.8	10.0	211	19.3

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**

FJH1	T	pH	eH	Cond 25	O2 diss	Alcal	HCO3	Cl	Fe	NO3	SO4	Résultats	Br	Ca	K	Mg	Na	SiO2	Mn	NH4	NO2	PO4	COD	Al	B	Cu	F	Ni	Zn	
Date	°C		mV	µS/cm	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	labo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mgC/L	mg/L	µg/l	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
21/05/1999	14	6.2	271	283	0.1			34.4	1.31	1.6	23.2	BRGM																		
17/11/1999	14	7.2	200	249	3.0	1.32	53.7	33.9	0.03	1.0	17.8	Dénitral																		
23/11/1999	13	6.4	293	307	0.0	1.09	66.5	31.7	1.50	3.3	23.3	BRGM	<0,5	9.5	4	10.5	26.6	38.3	284	<0,1	<0,01	<0,1	0.9	<0,03	5	5	400	16	50	
02/12/1999	12	6.3	182	250	2.6	1.14	69.5	34.7	<0,03	1.5	18.0	Dénitral																		
10/12/1999	9.6	6.2	125	252	1.9	1.08	65.9	33.8	0.03	2.0	18.0	Dénitral																		
27/01/2000	13	6.2	121	246	1.5	1.02	62.2					Dénitral																		
27/01/2000						1.04	63.4	35.3	0.15	3.3	25.8	Anjou Re.	0.14	9.3	3.9	10.9	23.9	37.8	220	0.03	<0,02	<0,1	0.7	<0,02	<50	<10	378	10	50	
11/02/2000	14	6.5	49	248	1.6	1.16	70.8					Dénitral																		
09/03/2000	15	6.7	113	239	0.6	1.08	65.9					Dénitral																		
09/03/2000						1.02	62.2	33.6	1.10	2.5	23.8	Anjou Re.																		
06/04/2000	12	6.5		240	2.6	1.08	65.9					Dénitral																		
06/04/2000						1.04	63.4	35.5	1.6	1.9	25.3	Anjou Re.																		
05/05/2000	13	6.4	68	251	0.4	1.04	63.4					Dénitral																		
05/05/2000						1.04	63.4	34.9	1.1	2.6	25.0	Anjou Re.																		
11/07/2000	14	6.2	91	248	2.5	1.02	62.2					Dénitral																		
11/07/2000								35.2		1.6	25.0	Anjou Re.		9.8	3.5	11.7	25.9	37.6		0.14	<0,02	<0,1	1		<50					
27/07/2000	16	6.6	108	251	1.0	1.12	68.3					Dénitral																		
27/07/2000						1.08	65.9	36	0.66	1.2	25.7	Anjou Re.																		
10/08/2000	14	6.5	76	252	0.3	1.12	68.3					Dénitral																		
10/08/2000						1.06	64.7	35.3	0.88	1.6	25.5	Anjou Re.	0.12	9.7	3.7	11.2	23.5	11.8	170	0.02	<0,02	<0,1	0.6	<0,02	<50	<10	354	11	<20	
24/08/2000	14	6.5	43	244	0.0	1.08	65.9					Dénitral																		
24/08/2000						1.08	65.9	35.7	1.6	1.7	26.2	Anjou Re.																		
07/09/2000	15	6.4	51	245	1.5	1.08	65.9					Dénitral																		
07/09/2000						1.02	62.6	36.5	3.6	<0,4	25.3	Anjou Re.																		
21/09/2000	14	6.3	44	238	0.1	1.02	62.2					Dénitral																		
21/09/2000						1.06	64.1	33.8	2.1	1.1	24.5	Anjou Re.	0.13	9.2	3.3	12.3	25.8	12.9	150	0.09	<0,02	<0,1	0.5	0.02	<50	<10	364	<5	<20	
05/10/2000	14	6.3	91	249	0.1	1.12	68.3					Dénitral																		
05/10/2000						1.04	63.4	34.6	1.7	1.7	25.1	Anjou Re.																		
20/10/2000	13	6.3	68	249	2.6	1.04	63.4					Dénitral																		
20/10/2000						1.04	63.4	35.8	1.6	1.5	25.7	Anjou Re.	0.14	10.8	4	11.2	26.2	13.4	200	0.03	<0,02	<0,1	0.5	<0,02	<50	<10	348	11	80	
08/11/2000	14	5.9	388	267	0.5	1.11	67.7	33.5	1.48	3.2	25.0	BRGM		10.2	3.7	10.5	27.1	37.8	204	<0,1	<0,01	<0,02	0.9	<0,03	11	<2	300	11	21	
23/11/2000	12	6.3	60	247	2.8	1.00	61.0					Dénitral																		
23/11/2000						1.04	63.3	35.6	0.1	2.6	25.7	Anjou Re.																		
06/12/2000	14	6.3	56	249	1.8	1.04	63.4					Dénitral																		
06/12/2000						1.02	62.1	32.6	3.7	2.4	23.9	Anjou Re.	0.13	9.6	4	11.2	26.1	11.6	270	0.12	<0,02	<0,1	0.6	<0,02	<50	<10	345	15	<20	
moyenne	13.4	6.4	125	253	1.3	1.07	64.5	34.6	1.35	2.0	23.9		0.1	9.8	3.8	11.2	25.6	25.2	214.0	0.1	<0,02	<0,1	0.7	0.0	7.8	5.0	356	12.3		

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**

ent. étang	T	pH	eH	Cond 25	O2 diss	Alcal	HCO3	Cl	DCO	NO3	SO4	Résultats	Br	Ca	K	Mg	Na	SiO2	Mn	NH4	NO2	PO4	COD	Al	B	Cu	F	Ni
Date	°C		mV	µS/cm	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	labo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mgC/l	mg/L	µg/L	mg/L	µg/L	µg/L
05/05/2000	11.4	6.9	312	519	9.3	1.08	65.9	42.3	24.6	71.7	22.9	Dénitral		40.4	5.4	14	29.9			3.5	0	0						
16/05/2000	12.7	6.8	172	521	7.8	1.16	70.8	38.5	35.7	64.2	22.7	Dénitral		38.1	4.3	13.1	29.8			2.3	0	0						
23/05/2000	12.7	7.0	237	547	7.8	1.20	73.2	41.2		72.6	26.2	Dénitral		35.3	11.6	14.2	29.3			7.6	8.5	0						
02/06/2000	14.7	6.8	250	502	7.6	1.24	75.6	18.4		30.8	12.0	Dénitral		20.9	2.9	8.6	15.2			3.2	0	0						
08/06/2000	13.7	6.9	243	522	7.8	1.20	73.2	42.7	29.7	67.4	23.0	Dénitral		41.2	5.8	15	32			4.5	0	0						
15/06/2000	14.5	6.8	225	555	7.5	0.96	58.6	45.4		70.2	18.8	Dénitral		40.2	6.1	15.6	34.3			5.5	0	0						
11/07/2000	14.5	7.0	166	506	7.2	1.16	70.8	49.5	78	108.2	18.1	Dénitral		36.3	10.8	14.6	28.3			5.7	0	0						
20/07/2000	18.7	6.7	126	474	7.0	0.72	43.9	55	81.8	119.0	17.3	Dénitral		34.1	6.1	13.1	31.8			0.6	0	0						
27/07/2000	20.8	7.7	167	488	6.9	1.80	109.8	47.6		99.7	19.9	Dénitral		35.5	6.4	13.4	33.5			0.1	0	0						
04/08/2000	17.8	7.0	117	485	0.7	1.12	68.3	49.5	101	91.8	18.1	Dénitral		35.4	7.5	13.5	32.7			0.6	0	0						
10/08/2000	17.4	7.2	135	462	6.5	0.90	54.9	53		88.7	17.1	Dénitral		33.4	4.3	14.7	25.2			0	0	0						
24/08/2000	18.5	7.3	69	400	4.6	1.80	109.8	37		25.7	12.1	Dénitral		28.1	24.8	9.3	21			10.3	12.9	0						
15/11/2000	10.3	6.8	132	463	11.0	0.88	53.7	76.4	30	146.8	21.0	Dénitral		36	5.4	11.4	27.2			2.6	0	0						
23/11/2000	10.1	6.5	105	430	9.5	0.92	56.1	47.4	43.4	114.0	18.0	Dénitral		34.5	7.8	10.3	27.8			0.03	0	0						
28/11/2000	11.2	6.6	83	431	9.4	0.88	53.7	40.4	20	116.9	16.4	Dénitral		35.6	6	12	25.5			0+	0	0						
06/12/2000	10.9	6.6	56	414	9.3	0.92	56.1	45.2	85	107.9	16.2	Dénitral		28.3	7.1	10.2	28.7			0.5	0	0						
moyenne	14.4	6.9	162	482	7.5	1.12	68.4	45.6	52.9	87.2	18.7			34.6	7.6	12.7	28.3			3.1	1.3	0						

sort. étang	T	pH	eH	Cond 25	O2 diss	Alcal	HCO3	Cl	DCO	NO3	SO4	Résultats	Br	Ca	K	Mg	Na	SiO2	Mn	NH4	NO2	PO4	COD	Al	B	Cu	F	Ni
Date	°C		mV	µS/cm	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	labo	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mgC/l	mg/L	µg/L	mg/L	µg/L	µg/L
05/05/2000	14.2	7.6	273	508	14.9	1.08	65.9	44.0	23.3	67.3	22.4	Dénitral		37.0	5.4	15.0	29.2			3.2	0	0						
16/05/2000	17.7	8.3	200	471	14.9	1.12	68.3	38.7	46.1	58.9	20.9	Dénitral		34.6	6.1	13.4	27.5			2.7	0	0						
23/05/2000		7.6	244	491	11.2	1.12	68.3	41.4		62.4	22.3	Dénitral		36.0	5.8	13.6	28.1			4.8	0	0						
02/06/2000	19.5	7.2	236	491	6.8	1.16	70.8	19.1		28.2	10.9	Dénitral		20	3.1	8.8	13.2			1.7	0	0						
08/06/2000	18.4	7.2	234	501	6.2	1.24	75.6	43.8	36.4	62.0	20.7	Dénitral		38.9	8.0	16.7	30.8			4.6	0	0						
15/06/2000	20.2	8.4	191	502	7.5	1.28	78.1	42.4		60.1	21.4	Dénitral		41.3	9.4	16.9	32.7			5.4	0	0						
11/07/2000	16.5	7.8	195	493	6.7	1.66	101.3	49.3	163	92.4	17.4	Dénitral		36.9	8	15.9	30.1			3.5	0	0						
20/07/2000	23.6	8.1	120	491	8.7	1.78	108.6	52	53.5	81.4	16.9	Dénitral		39	7.4	15.1	27.7			0	0	0						
27/07/2000	20.8	7.7	167	488	6.9	1.80	109.8	46.4		70.5	18.2	Dénitral		38.2	7.5	14.8	28			0	0	0						
04/08/2000	21	8.4	103	468	8.4	1.84	112.2	45.8	75.8	61.9	16.0	Dénitral		36.5	7.4	14.4	30.9			0.9	0	0						
10/08/2000	21.5	9.1	129	465	9.5	1.88	114.7	48		55.7	15.4	Dénitral		32.9	6.2	16.4	24.7			0	0	0						
24/08/2000	22.1	8.3	68	440	8.8	1.88	114.7	46.4		43.4	9.7	Dénitral		7.2	7.2	16.1	26			0	0	0						
15/11/2000	8.7	7.2	116	428	5.7	1.88	114.7	75.7	42	60.2	17.9	Dénitral		33.4	11.8	12.6	26.1			3.2	0	0						
23/11/2000	9	6.9	95	429	6.4	1.44	87.8	54.4	33.3	89.2	17.7	Dénitral		32.2	9	11.9	28			0.29	0	0						
28/11/2000	9.6	6.8	76	431	7.1	1.36	83.0	45.6	22	88.9	16.2	Dénitral		33.7	8.5	11.4	29			0.3	0	0						
06/12/2000	10.1	6.7	58	436	7.1	1.10	67.1	49.5	35	99.5	16.2	Dénitral		30.3	8.1	12.7	29.6			0.3	0	0						
moyenne	16.9	7.7	157	471	8.5	1.48	90.1	46.4	53.0	67.6	17.5			33.0	7.4	14.1	27.6			1.9	0.0	0						

Annexe 4

Résultats des analyses chimiques et isotopiques des sources de nitrates

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Tableau 9. Analyses chimiques et isotopiques des sources de nitrates.

Dénomination	Nature	date prélev	Nlv piézo m	Debit l/min	T °C	pH	Eh Nhe mV	Cond 25°C µS/cm	O2 dis %	O2 dis mg/l	alcal meq/l	15N/14N vs air ‰	3H en UT	Incert. 3H	81TB vs NBS 951
limite inférieure de dosabilité												0.2			
limite supérieure de dosabilité															
erreur (%)															
Lagune Aval		22/06/1999		1.33	17.4	7.59	366	895	42	3.9	3.31	7.5	8	2	0.18
Lagune Aval		22/06/1999													0.80
lagune aval entrée		24/11/1999		39.92	5.9	7.69	361	844	50.6	5.3	3.84				
lagune aval sortie		24/11/1999		15	12.1	6.32	314	550	60.1	6.3	0.908	8.7			32.97
lagune aval sortie		24/11/1999													32.64
lagune aval sortie		22/03/2000		4	9.9	6.2	474	487	56	6.3	0.78	9.7			34.78
lagune aval sortie		22/03/2000													34.85
lagune aval sortie		20/06/2000		2	15	6.17	366	413	47	4.74	0.924	10.4			35.11
lagune aval sortie		20/06/2000													35.18
lagune aval sortie		08/11/2000		0.18	9.7	6.27	294	477	65	7.47	3.11	4.3			31.21
Pluviomètre		19/05/1999											16	3	
Pluviomètre		22/06/1999											14	2	
Pluviomètre		février 2000											4	1	
		*mars 2000													
Pluviomètre		oct-novembre 2000										ND	3	1	29.95
												(pas suffisamment de NO3)			
SOURCES															
Ammonitrate (granulés)		-										-1.6			
Parcelles expérimentales 1999:															
Fientes de volaille		02/09/99 14H25-14H31										13.8			25.88
															25.41
fumier de bovin		03/09/99 14H45-14H57										14			25.95
															25.95
lisier de porc(SOLEPUR)		28/04/95-03/05/95										33.2			42.04
															41.88
															42.39
lisier de porc(SOLEPUR)		08/11/95 au 14/11/95													
Sources directes :															
Lisier fosse exploitation agricole															19.34
												ND : qité insuffisante			19.46
Lixiviation fumier bovin												expédié par COOPERL février			28.69
															28.60
lixiviation fientes de volaille															15.29
															14.79
Parcelles expérimentales 2000:															
Fientes de volaille												10.9			27.61
															27.68
fumier de bovin												4.3			27.31
															27.57
lisier de porc												14.1			19.64
															19.28

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*

Dénomination	Nature	date prélev	87Sr/86Sr	Incert 87Sr/86Sr	Salin. Tot. mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	NH4 mg/l	NO2 mg/l	NO3 mg/l	orthophos mg/l
limite inférieure de dosabilité						0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.1	0.1
limitesupérieure de dosabilité						10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
erreur (%)						5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Lagune Aval		22/08/1999			545.1	41.6	14.5	82.1	18.1	202	102.9	56.3	18	20.7	6	9.6	10
Lagune Aval		22/08/1999															
lagune aval entrée		24/11/1999															
lagune aval sortie		24/11/1999			329.7	28.4	15.6	28.2	17.3	54	43	31.9	19.3	<0.1	0.03	92	0.3
lagune aval sortie		24/11/1999															
lagune aval sortie		22/03/2000	0.714498	0.000009	317.9	28.6	15.7	28.9	16	45	44.9	34	18.4	<0.1	<0.01	88.4	<0.1
lagune aval sortie		22/03/2000															
lagune aval sortie		20/08/2000			313.4	28.3	15.5	25.7	15.5	63	43.2	34.9	18.1	<0.1	0.01	69.2	<0.1
lagune aval sortie		20/08/2000															
lagune aval sortie		08/11/2000				35.5	16.4	43.9	12.9		63.9	17.5	21.7	0.5	0.05	3	<0.02
Pluviomètre		19/05/1999															
Pluviomètre		22/08/1999			23.6	1.5	0.3	2	1.5	4	2.9	3.5	<0.1	0.6	0.07	5.5	0.2
Pluviomètre		fevrier 2000															
Pluviomètre		"mars 2000	0.708727	0.000009													
Pluviomètre		oct-novembre 2000	0.710698	0.000011		0.3	0.3	2.8	<0.3		4.5	1.5	<0.5	1	<0.01	1.6	0.02
SOURCES																	
Ammonitrate (granulés)		-	0.707876	0.000008													
Parcelles expérimentales 1999:																	
Fientes de volaille		02/09/99 14H25-14H31			1013.1	129	55.7	70.1	8.9	42	119	129	13.1	0.2	0.57	448	0.1
fumier de bovin		03/09/99 14H45-14H57			845.3	99.1	46.7	78.1	7.7	85	152	161	13.6	0.1	0.3	203	0.2
lisier de porc(SOLEPUR)		28/04/95-03/05/95			836.7	76.9	24.6	51.5	85.5	8	101	205	5.7	<0.1	<0.01	268	<0.1
lisier de porc(SOLEPUR)		08/11/95 au 14/11/95			375											375	
Sources directes :																	
Lisier fosse exploitation agricole			0.709707	0.000009		102	16.8	368	1519		847	12	73.7	1300	<0.5	<0.5	60.3
Lixiviation fumier bovin			0.710922	0.000008		60.3	69	55.7	1773	1770	801	27.1	6.4	71.1	<0.01	<1	294
lixiviation fientes de volaille			0.709195	0.000001		185.7	164.1	307.8	1665	2283	707	395	17.9	334.5	<0.01	<1	783
Parcelles expérimentales 2000:																	
Fientes de volaille			0.712061	0.000001		77.2	33.7	73.3	7.7		119	137	8.8	0.2	0.01	208	0.7
fumier de bovin			0.712201	0.000009		15.1	6.9	10	1.4		18.4	40	22	<0.1	0.01	15.5	0.4
lisier de porc			0.712153														
			0.712416	0.000008		36.1	15.4	41.3	2.6		46.8	47.5	8.9	<0.1	0.04	149	<0.02

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**

Dénomination	Nature	date prélev	COD mg/l	F mg/l	I µg/l	Fe mg/l	Al mg/l	Br µg/l	B µg/l	Cu µg/l	Zn µg/l	Li µg/l	Mn µg/l	Pb µg/l	Ni µg/l	Sr mg/l
limite inférieure de dosabilité			0.5	0.1	2	0.02	0.03	5	"1 ou 0.5	2	5	10	5	2	5	0.01
limitesupérieure de dosabilité			10000	10000	10000	10000	10000			10000	10000	10000	10000	10000	10000	
erreur (%)			5	5	10	5	5	20	10	10	10	5	10	10	10	
Lagune Aval		22/06/1999	15.1	0.1	24	0.26	<0.03	261	909	<2	<5	<10	35	<2	<5	
Lagune Aval		22/06/1999														
lagune aval entrée		24/11/1999														
lagune aval sortie		24/11/1999	4.7	0.1	41	1.08	<0.03	<1000	51	8	<5	<10	203	<2	10	0.19
lagune aval sortie		24/11/1999														
lagune aval sortie		22/03/2000	4.9	0.1	28	0.29	<0.03	<1000	38	22	15	<10	53	<2	5	0.18
lagune aval sortie		22/03/2000														
lagune aval sortie		20/06/2000	4	0.1	44	0.2	<0.03	60	38	<2	<5	<10	54	<2	<5	0.2
lagune aval sortie		20/06/2000														
lagune aval sortie		08/11/2000	6.9	0.1	125	9.34	<0.03		130	<2	<5	<0.01	2582	<2	14	
Pluviomètre		19/05/1999														
Pluviomètre		22/06/1999	2.4	<0.1	3.6	<0.02	<0.03	70	7	3	39	<10	14	<2	<5	
Pluviomètre		fevrier 2000							24							
		"mars 2000							4							
Pluviomètre		oct-novembre 2000	0.7	<0.1	<2	<0.02	<0.03		2.4	<2	9	<0.01	<5	<2	<5	
SOURCES																
Ammonitrate (granulés)		-							<0.1(µg/g)							
Parcelles expérimentales 1999:																
Fientes de volaille		02/09/99 14H25-14H31	13.4	0.1	194	<0.02	<0.03	1.1	46	23	35	<10	174	<2	120	
fumier de bovin		03/09/99 14H45-14H57	14.7	0.1	32.7	0.02	0.03	1.8	47	20	74	10	150	<2	107	
lisier de porc(SOLEPUR)		28/04/95-03/05/95	16.2	0.1	184	<0.02	<0.03	0.7	28	2	41	<10	11159	<2	9	
lisier de porc(SOLEPUR)		08/11/95 au 14/11/95							43							
Sources directes :			COT													
Lisier fosse exploitation agricole			440	0.2	<100	1.52	0.64		497	781	1273	60	319	<10	117	0.32
Lixiviation fumier bovin			4565	0.1	<500	6.39	1.43	<1000	1.84	569	600	<10	420	166	69	1.79
lixiviation fientes de volaille			1105	0.2	<500	4.55	0.49	<1000	13.4 mg/kg	889	1776	<10	1140	98	259	3.85 mg/kg
Parcelles expérimentales 2000:																
Fientes de volaille			10.6	<0.1	9	<0.02	0.11		37.9	69	196	0.01	477	<2	223	
fumier de bovin			2.2	<0.1	2	<0.02	<0.03		7	31	61	<0.01	72	<2	59	
lisier de porc			2.2	<0.1	3	<0.02	<0.03		25.1	18	45	<0.01	71	<2	60	

Annexe 5

Dispositifs expérimentaux de prélèvements sur les sources de nitrates (COOPERL HUNAUDAYE)

- Mise en place du dispositif de drainage : ces parcelles ont reçu de la terre considérée comme vierge, c'est à dire qu'elle n'a reçu aucune culture ou engrais minéral et organique.
 - Irrigation des parcelles pour "rinçage" avec de l'eau de pluie récupéré dans une fosse en béton d'une teneur en nitrates de 2 mg de NO_3^- /l et réalisation d'une première analyse d'eau (annexe 2).
 - Ressuyage des parcelles pendant deux jours.
- ↳ Avant d'étaler les produits (fumier de bovin, fiente de volaille et lisier de porc), nous avons recommencé les opérations d'irrigation et de ressuyage.

12. Epandage des produits

- Le 22 août, nous avons épandu les différents produits correspondant à environ 250 kg d'azote à l'hectare. Après l'épandage, les produits ont été enfouis aussitôt (analyses des produits : annexe n° 3).
- Nous avons irrigué les parcelles; puis régulièrement nous avons réalisé des analyses de contrôle de l'évolution de la teneur en nitrate.

13. Irrigation et prélèvements

La pluviométrie est enregistrée chaque semaine depuis l'étalement des produits (annexe n°6)

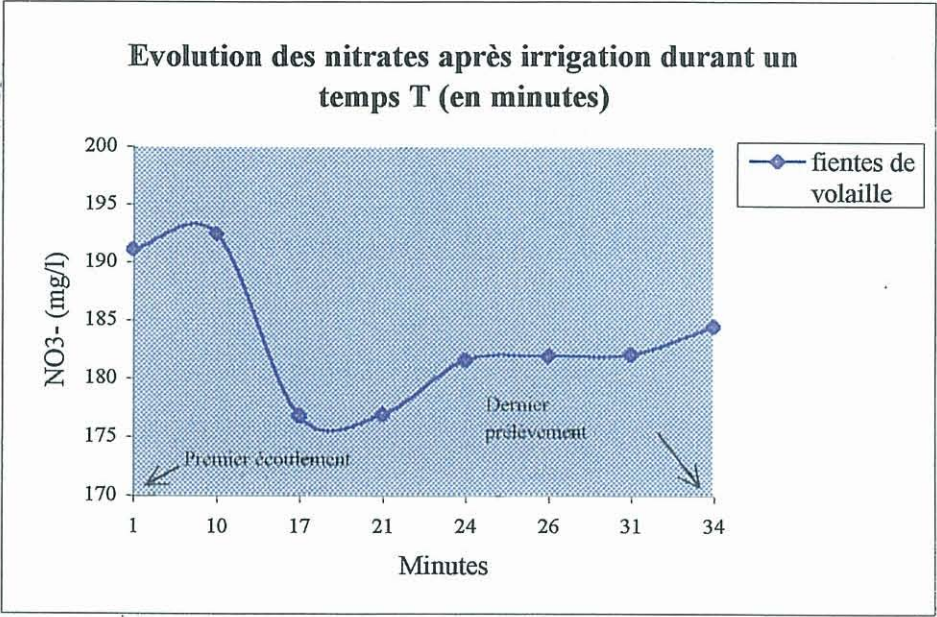
- Sur trois jours, nous avons irrigué les parcelles, pour obtenir une pluviométrie de 25 mm par jour.
- Nous avons prélevé environ 130 litres d'eau sur les 500 litres irrigués sur une période variant de 20 à 60 minutes, soit 5 à 6 prélèvements par jour (cf. annexe 5).

14. Résultats

Les différents résultats de ces trois jours sont répertoriés en annexe n°5.

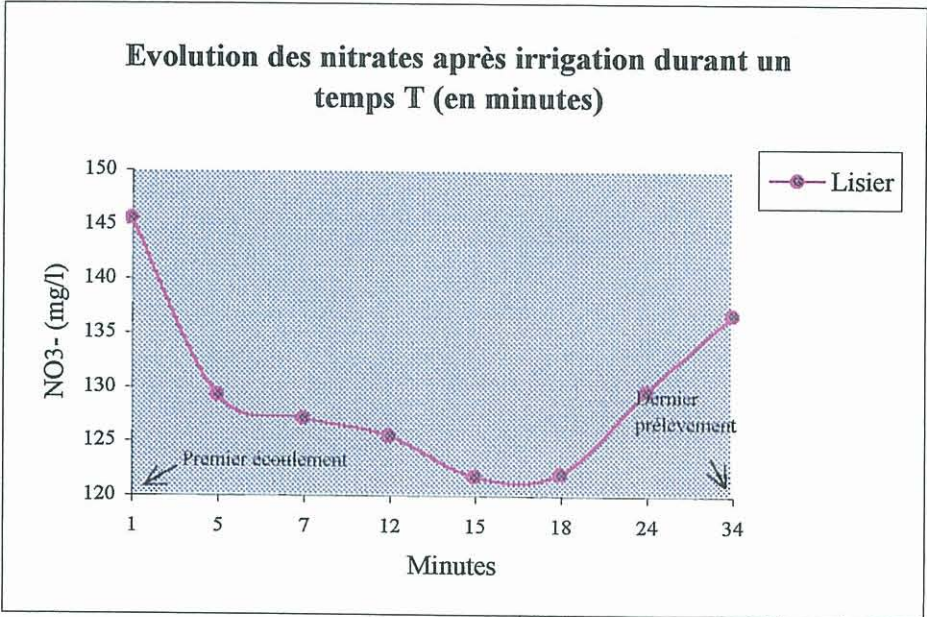
Pour l'analyse isotopique, les prélèvements envoyés au laboratoire du BRGM sont ceux du 9 octobre pour la fiente et le lisier et du 11 octobre pour le fumier.

Ci-dessous et page suivante, les courbes montrent l'évolution des nitrates après irrigation.

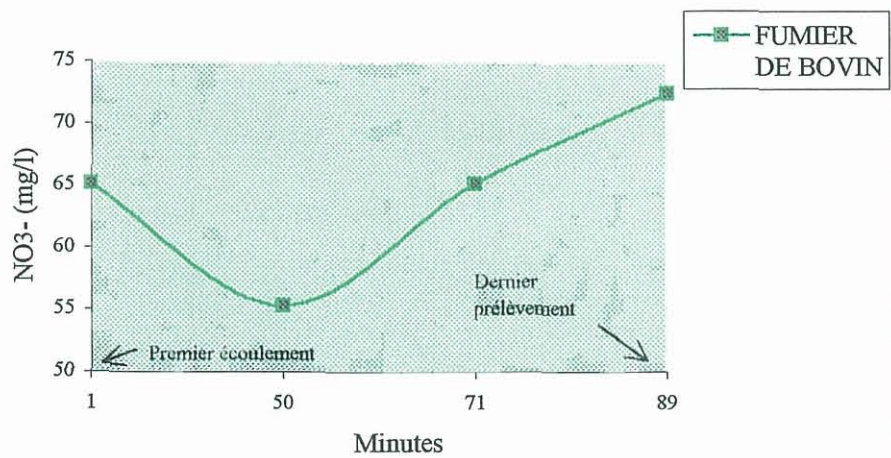


Résultat du 9 octobre

Résultat du 9 octobre



Evolution des nitrates après irrigation durant un temps T (en minutes)



Résultat du 11 octobre

Annexe 5.1.

*Analyses de la qualité d'eau en nitrates
avant épandage des produits*

Date : 2000

BULLETIN D'ANALYSES

Référence client COOPERL HUNAUDAYE - Etude Nitrates LANJOUAN -

Prélevés le 8/8/00

Référence échantillon

référence échantillon	Temp	pH	NO ₃ mg/l	NO ₂ mg/l
Parcelle 1 (volaille)	01h05	6.2	0	8.7
Parcelle 2 (Porc)		6.8	0	29.4
Parcelle 3 (bovin)	50min	6.8	0	10.8
eau de pluie		8.6	0	1.2

Annexe 5.2.

*Analyses de la fiente de volaille, du fumier de bovin
et du lisier de porc*

RESULTAT D'ANALYSE DE LA VALEUR AGRONOMIQUE

DETERMINATION		Resultats
pH		10,0
HUMIDITE	% p.b	57,7
MATIERE SECHE	% p.b	42,3
RAPPORT C/N (total)		10,4
CARBONE ORGANIQUE	% M.S	42,1
MATIERE ORGANIQUE	% M.S	72,6
P2O5 total	‰ M.S	18,9
K2O total	‰ M.S	89,6
MgO total	‰ M.S	8,7
CaO total	‰ M.S	21,9
AZOTE total	‰ M.S	40,4
AZOTE AMMONIACAL	‰ M.S	0,3
AZOTE NITRIQUE	‰ M.S	4,3
AZOTE ORGANIQUE	‰ M.S	35,9

**EQUIVALENT EN KG TONNE DE
PRODUIT BRUT A L'HUMIDITE DE
L'ECHANTILLON**

MATIERE ORGANIQUE	307,0
P2O5 total	8,0
K2O total	37,9
MgO total	3,7
CaO total	9,3
AZOTE total	17,1
AZOTE AMMONIACAL	0,1
AZOTE NITRIQUE	1,8
AZOTE ORGANIQUE	15,2

RESULTAT D'ANALYSE DES OLIGO-ELEMENTS

DETERMINATION		Resultats
BORE	mg/kg MS	
COBALT	mg/kg MS	
CUIVRE	mg/kg MS	
FER	mg/kg MS	
MANGANESE	mg/kg MS	
MOLYBDENE	mg/kg MS	
ZINC	mg/kg MS	

**EQUIVALENT EN G/TONNE DE
PRODUIT BRUT A L'HUMIDITE DE
L'ECHANTILLON**

BORE	
COBALT	
CUIVRE	
FER	
MANGANESE	
MOLYBDENE	
ZINC	

RESULTAT D'ANALYSE DE LA VALEUR AGRONOMIQUE

DETERMINATION		Resultats
pH		9,3
HUMIDITE	% p.b	40,5
MATIERE SECHE	% p.b	59,5
RAPPORT C/N (total)		11,6
CARBONE ORGANIQUE	% M.S	39,6
MATIERE ORGANIQUE	% M.S	68,2
P2O5 total	‰ M.S	65,3
K2O total	‰ M.S	69,0
MgO total	‰ M.S	15,8
CaO total	‰ M.S	80,7
AZOTE total	‰ M.S	34,1
AZOTE AMMONIACAL	‰ M.S	1,2
AZOTE NITRIQUE	‰ M.S	0,1
AZOTE ORGANIQUE	‰ M.S	32,8

**EQUIVALENT EN KG/TONNE DE
PRODUIT BRUT A L'HUMIDITE DE
L'ECHANTILLON**

MATIERE ORGANIQUE	405,8
P2O5 total	38,8
K2O total	41,1
MgO total	9,4
CaO total	48,0
AZOTE total	20,3
AZOTE AMMONIACAL	0,7
AZOTE NITRIQUE	0,1
AZOTE ORGANIQUE	19,5

RESULTAT D'ANALYSE DES OLIGO-ELEMENTS

DETERMINATION		Resultats
BORE	mg/kg MS	
COBALT	mg/kg MS	
CUIVRE	mg/kg MS	
FER	mg/kg MS	
MANGANESE	mg/kg MS	
MOLYBDENE	mg/kg MS	
ZINC	mg/kg MS	

**EQUIVALENT EN G/TONNE DE
PRODUIT BRUT A L'HUMIDITE DE
L'ECHANTILLON**

BORE	
COBALT	
CUIVRE	
FER	
MANGANESE	
MOLYBDENE	
ZINC	

DATE : 13-février-2001

BULLETIN D'ANALYSES

Référence client Etude Nitrates - Parcelles de Lanjouan -

Références échantillons Prélèvements du 24/08/2000

Désignation	Mes g/l	Nk g/l	FO
Lisier	2.14	1.8	
Fumier de bovin			oui
Fiente			oui

Annexe 5.3.

Pluviométrie

Tableau récapitulatif de la pluviométrie relevée

Date	Pluviométrie en mm
4/09	1
11/09	0
20/09	12
27/09	0
5/10	10
9/10	0
17/10	5
25/10	18

Annexe 5.4.

*Tableau récapitulatif des concentrations en nitrates
avant irrigation intense (250 mm/jour)*

Date : 13-févr 2000

BULLETIN D'ANALYSES

Référence client

COOPERL HUNAUDAYE - Etude Nitrates LANJOUAN .

Prélevés le

05/10/2000

Référence échantillon

Référence échantillon	Volume	NO ₃ mg/l	NO ₂ mg/l
Parcelle 1 (volaille)	483 l,	0	140.6
Parcelle 2 (Porc)	375 l,	0	172.7
Parcelle 3 (bovin)	558 l,	0	125
eau de pluie			

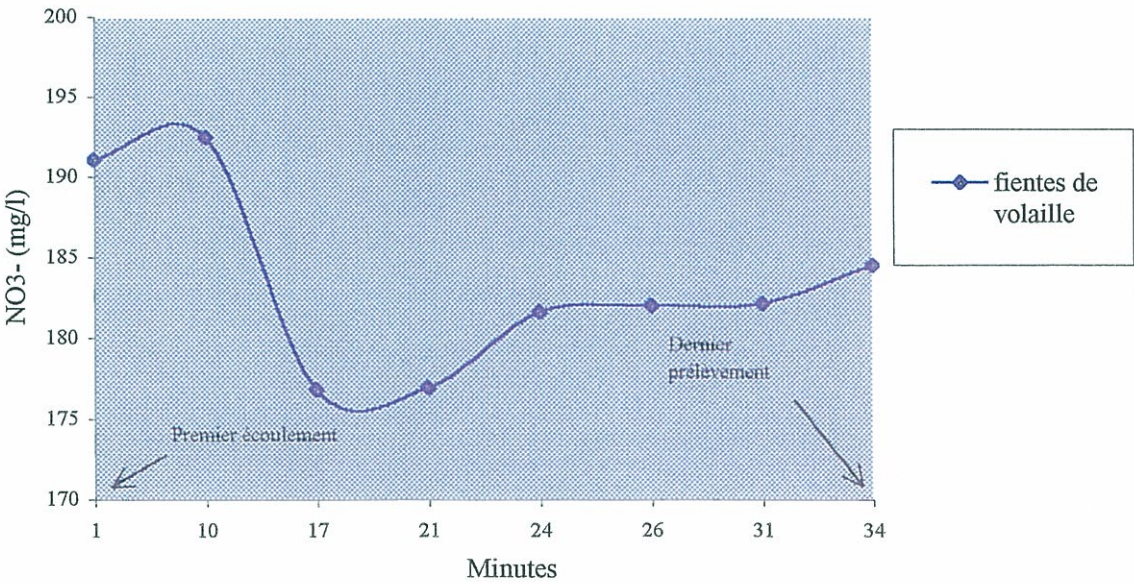
Annexe 5.5.

*Tableaux et graphes récapitulatifs des concentrations
en nitrates du 9 au 11 octobre 2000*

VOLAILLE			
Drainage Parcelle 1			
Temps (min)	pH	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	5.6	0	191.1
10	5.6	0	192.5
17	5.9	0	176.8
21	6.1	0	176.9
24	6.1	0	181.6
26	6.2	0	182
31	6.3	0	182.1
34	6.3	0	184.5

Lamballe, le 12/02/01

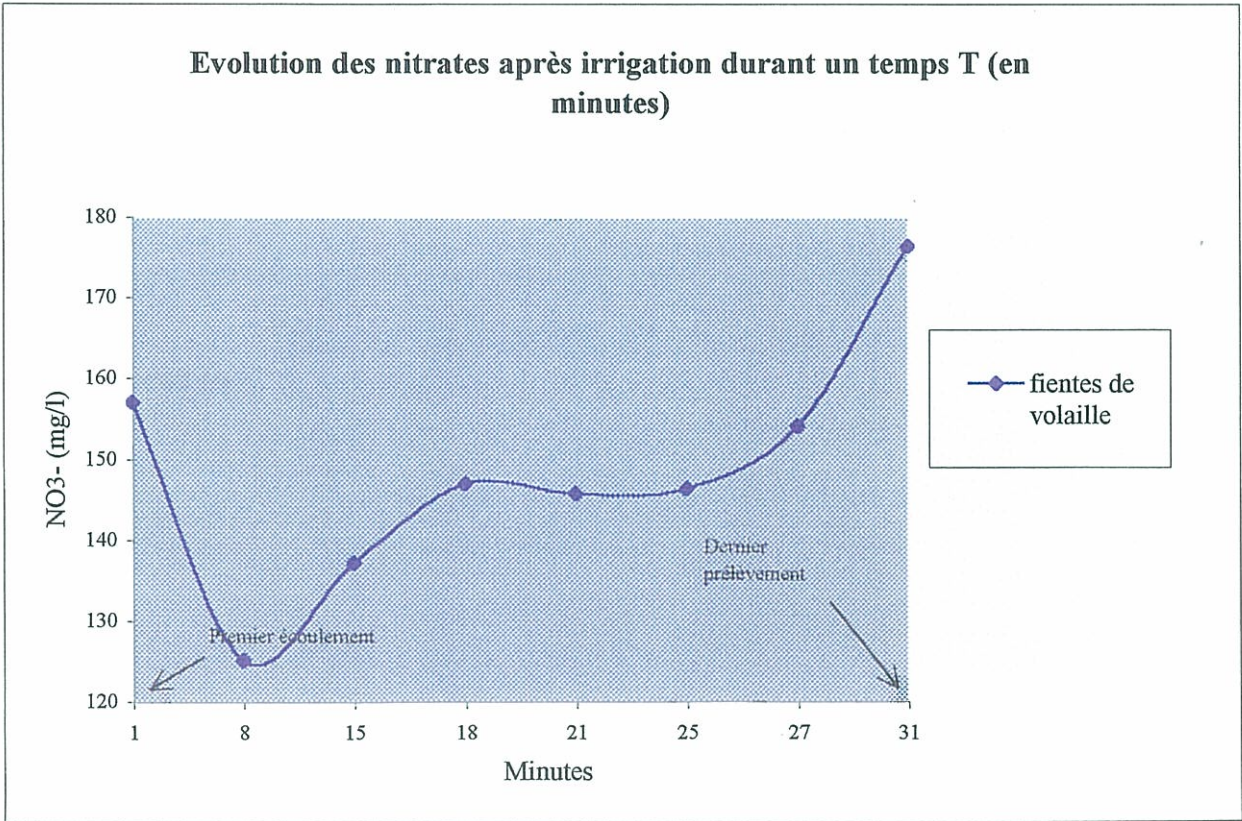
Evolution des nitrates après irrigation durant un temps T (en minutes)



LANJOUAN ESSAI 1 du 10/10/00

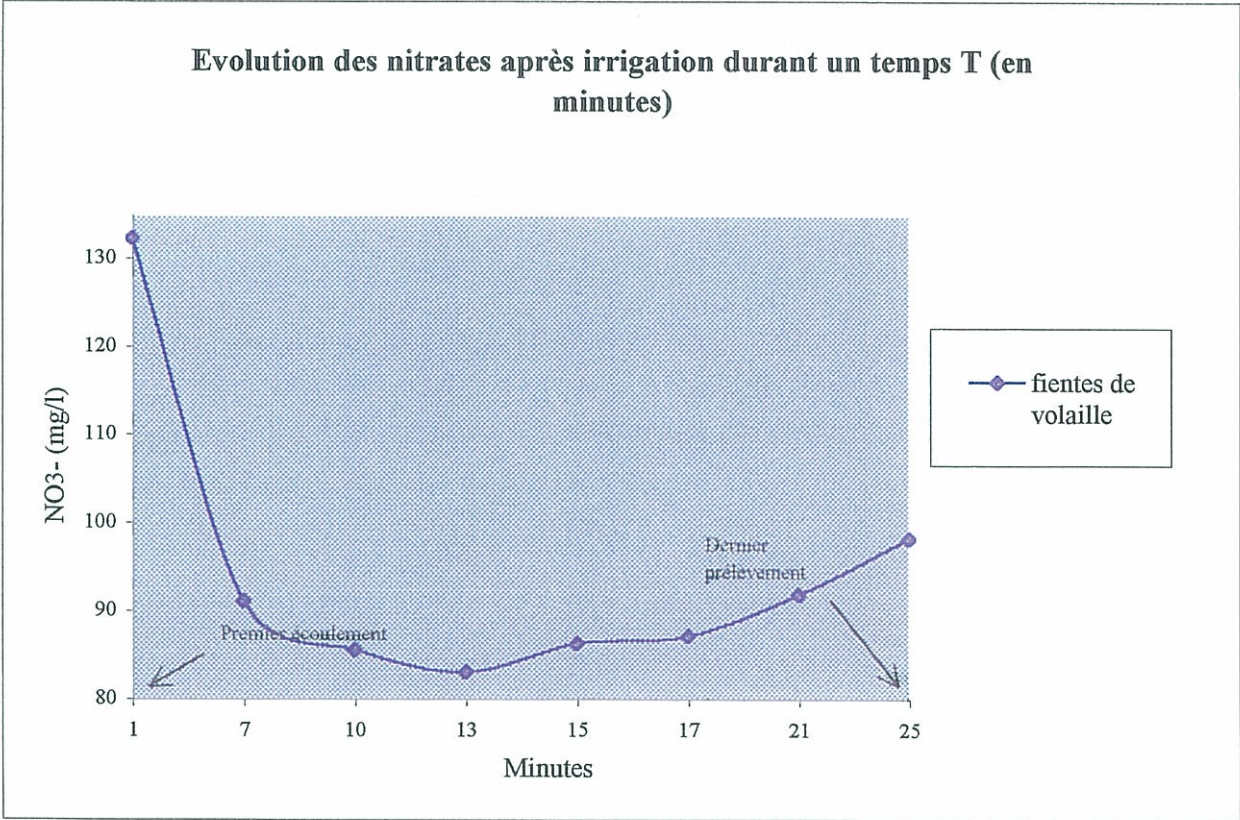
VOLAILLE Préchauffage Parcelle 1			
minutes	pH	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	6.0	0	157.1
8	6.3	0	125.1
15	6.3	0	137.2
18	6.4	0	146.9
21	6.3	0	145.7
25	6.3	0	146.4
27	6.4	0	154.0
31	6.4	0	176.4

Lamballe, le 12/02/01



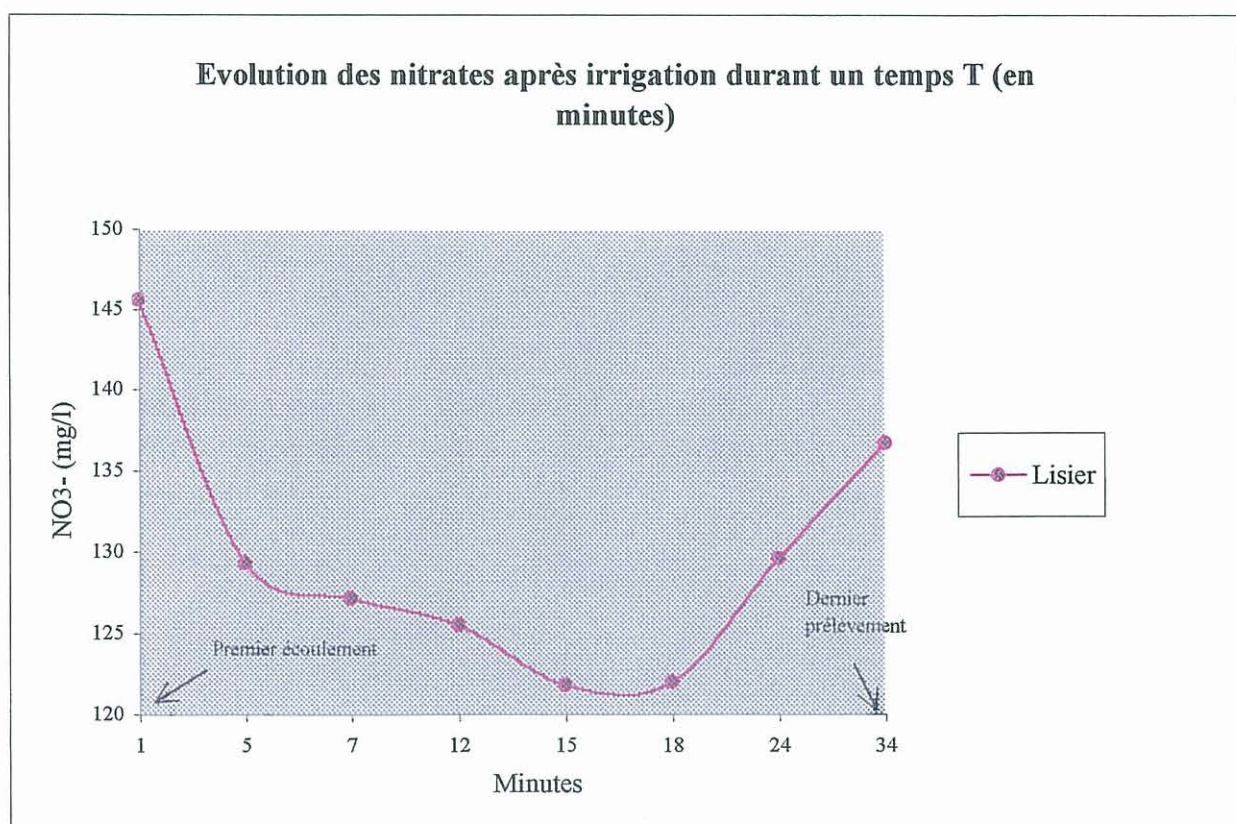
VOLAILLE			
Première Parcelle 1			
minutes	pH	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	6.3	0	132.4
7	6.5	0	91.1
10	6.3	0	85.6
13	6.4	0	83.1
15	6.3	0	86.3
17	6.4	0	87.2
21	6.5	0	91.9
25	6.5	0	98.2

Lamballe, le 12/02/01



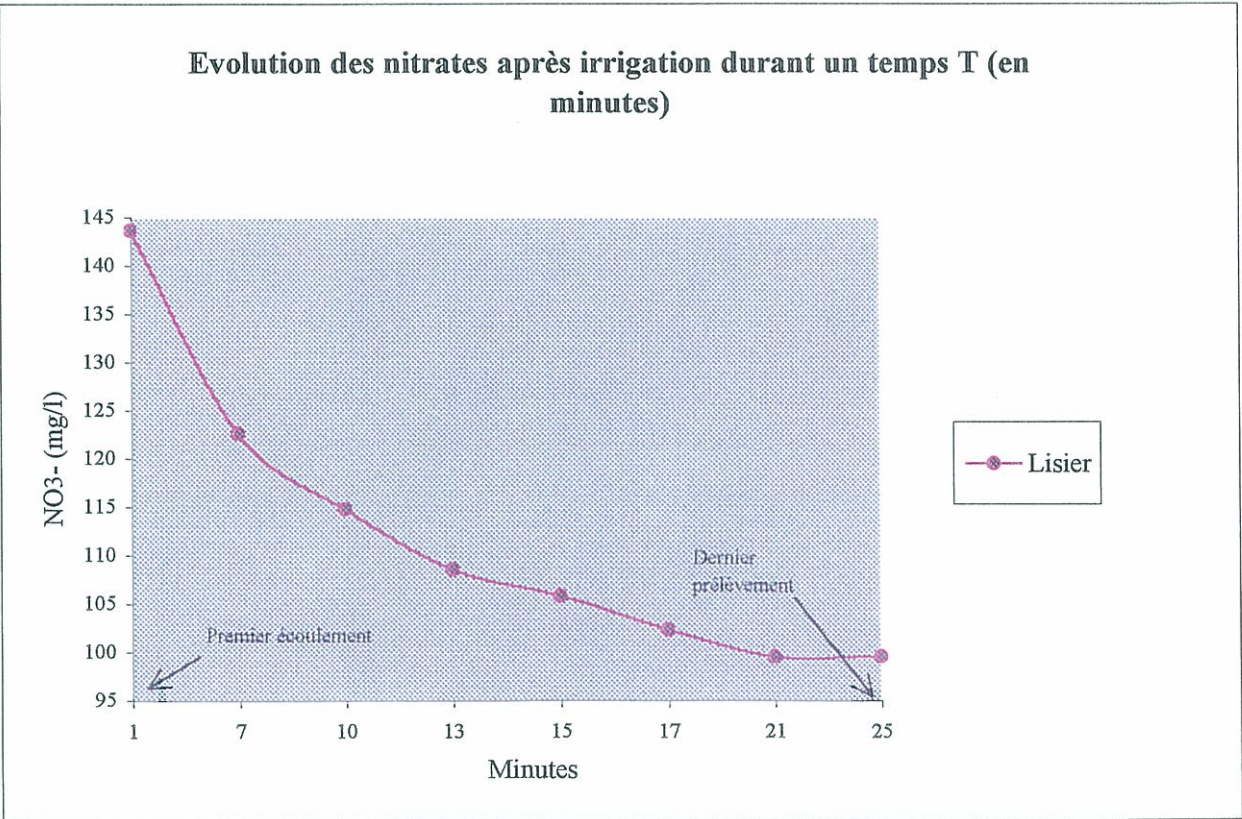
	LISER Bratunac Danilov 2		
Station	pH	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	5.7	0	145.6
5	5.7	0	129.3
7	5.5	0	127.1
12	5.3	0	125.5
15	5.3	0	121.8
18	5.3	0	122
24	5.1	0	129.6
34	4.9	0	136.7

Lamballe, le 12/02/01



LISIER			
Drainage Entelle 2			
minutes	pH	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	5.5	0	143.7
7	5.7	0	122.6
10	5.9	0	114.7
13	5.9	0	108.5
15	5.8	0	105.8
17	5.8	0	102.3
21	5.8	0	99.5
25	5.7	0	99.6

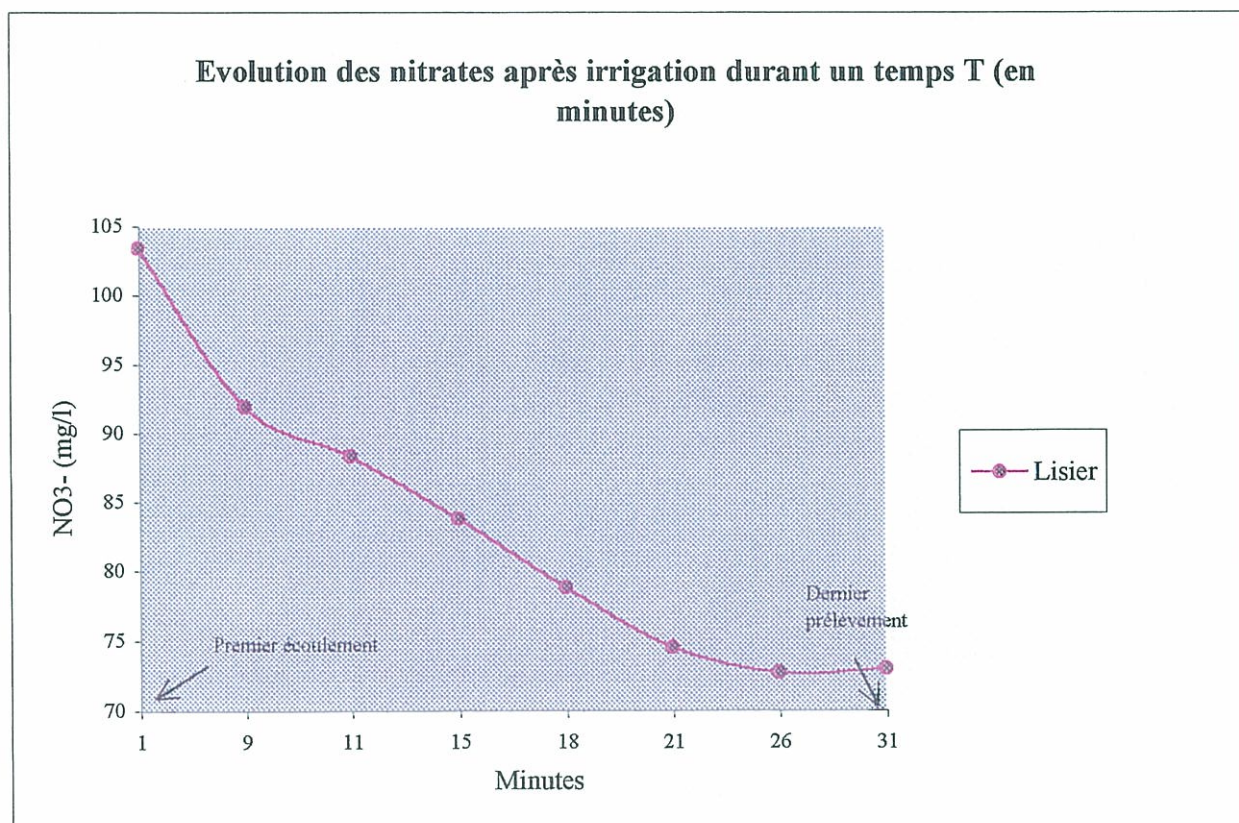
Lamballe, le 12/02/01



LANJOUAN ESSAI 2 du 11/10/00

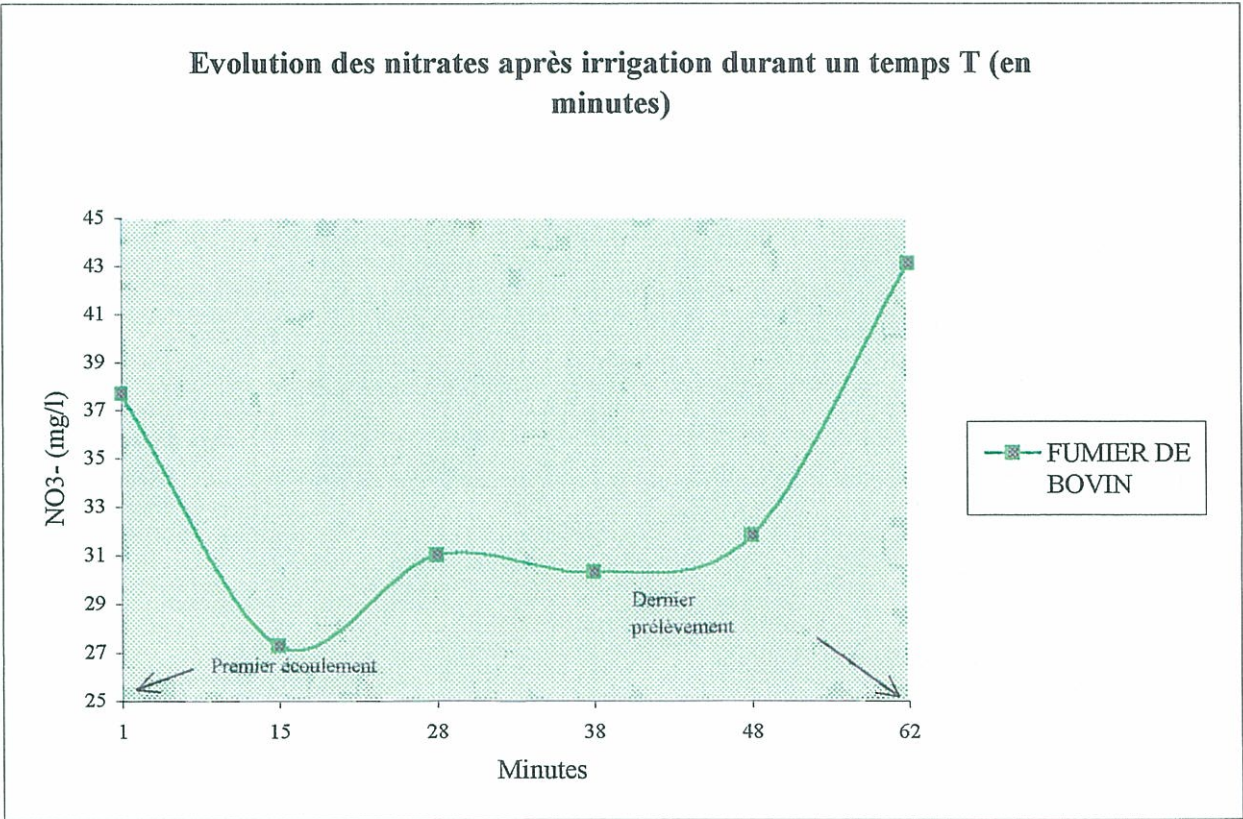
LISIER Première Parcelle 2			
Minutes	pH	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	6.3	0	103.4
9	6.3	0	91.9
11	6.2	0	88.3
15	6.2	0	83.8
18	6.2	0	78.8
21	6.2	0	74.5
26	6.2	0	72.7
31	6.1	0	73

Lamballe, le 12/02/01



BOVIN			
Drainage Parcelle 3			
Minutes	pH	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	6	0	37.7
15	6.3	0	27.3
28	6.4	0	31
38	6.4	0	30.3
48	6.4	0	31.8
62	6.4	0	43.1

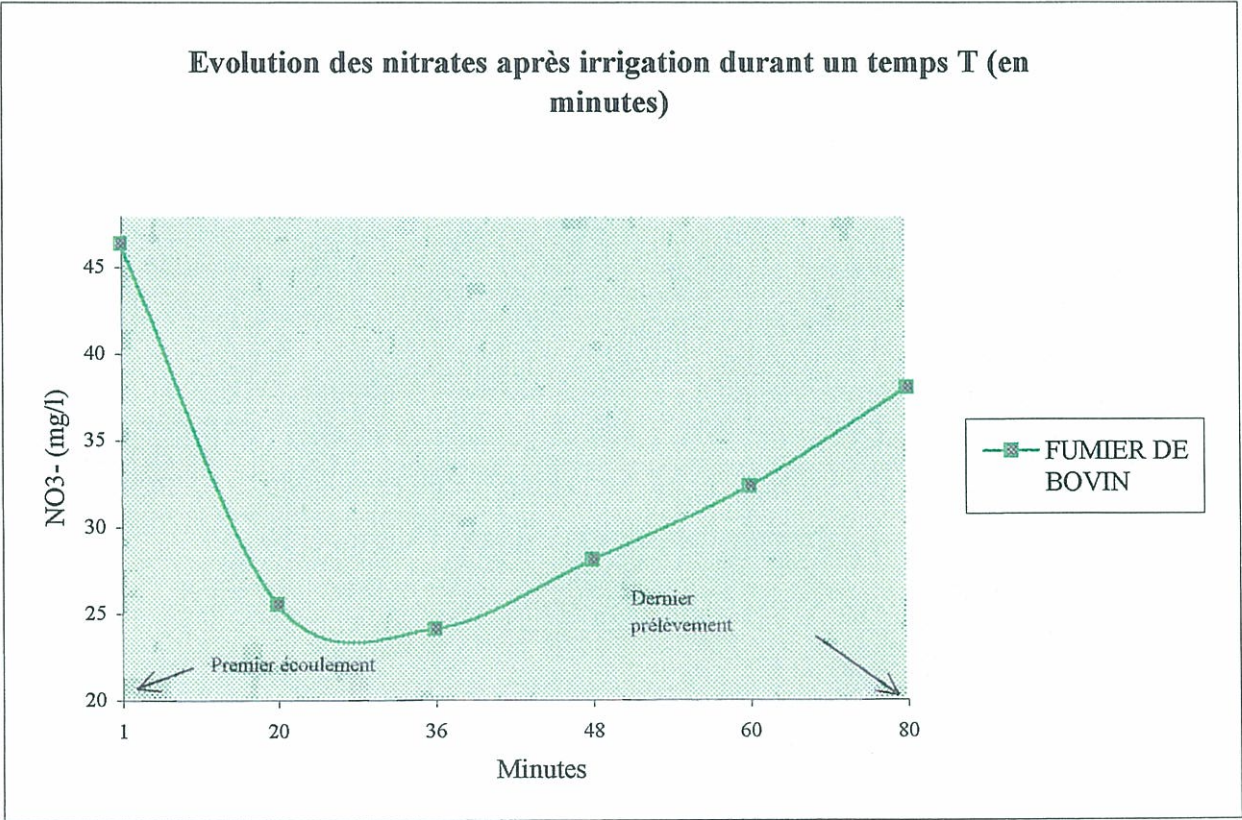
Lamballe, le 12/02/01



LANJOUAN ESSAI 3 du 10/10/00

BOVIN			
Drainage Parcelle 3			
minutes	pH	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	6.3	0	46.4
20	6.5	0	25.5
36	6.5	0	24.1
48	6.6	0	28.1
60	6.6	0	32.3
80	6.4	0	38

Lamballe, le 12/02/01

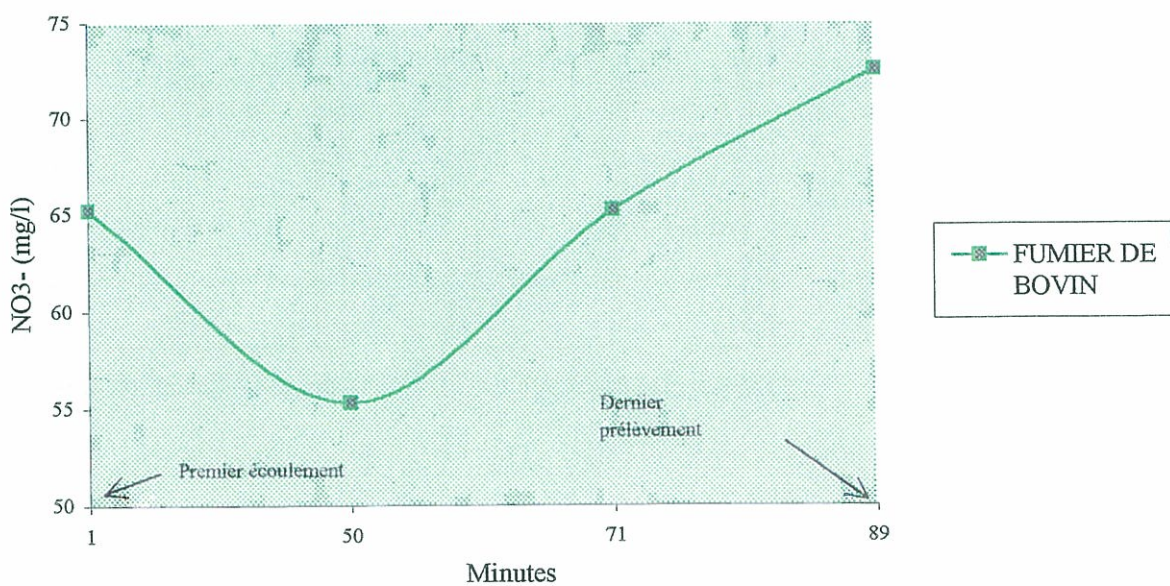


LANJOUAN ESSAI 3 du 11/10/00

BOVIN Fumier - Portelle 3			
minutes	pH	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	6.3	0	65.2
50	6.1	0	55.3
71	6.1	0	65.2
89	6	0	72.5

Lamballe, le 12/02/01

Evolution des nitrates après irrigation durant un temps T (en minutes)



IDENTIFICATION DES SIGNATURES ISOTOPIQUES SUR LE FUMIER DE BOVIN, LA FIENTE DE VOLAILLE ET LE LISIER DE PORC

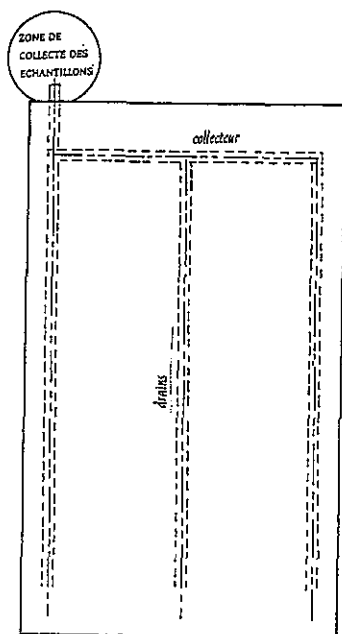
La COOPERL HUNAUDAYE a réalisé un ensemble de dispositifs permettant une identification séparée des signatures isotopiques du fumier de bovin, de la fiente de volaille et du lisier de porc.

Pour cela, nous avons réalisé sur la zone de LANJOUAN (située à 20 km du bassin de l'Arguenon), trois parcelles d'environ 28 m² n'ayant aucune connexion entre elles.

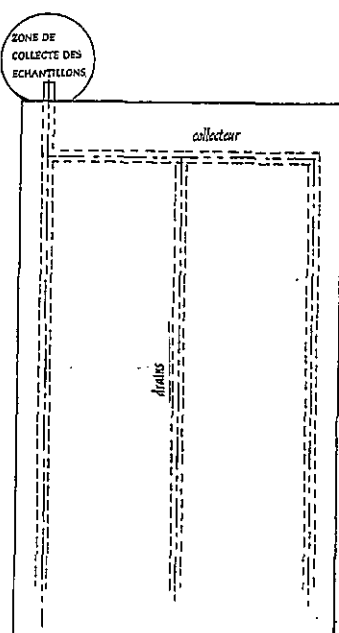
I - Protocole

11. Mise en place des micro parcelles

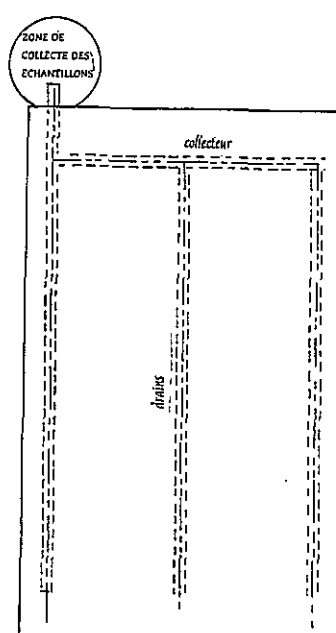
- Aménagement de trois parcelles (28 m² chacune) avec un réseau de drainage protégé par des graviers (voir figure ci-dessous et photo ci-après).



ESSAI 1 : FIENTE DE VOLAILLE



ESSAI 2 : LISIER DE PORC



ESSAI 3 : FUMIER DE BOVIN



Annexe 6

Historique des épandages

Campagne culturale 2000

HISTORIQUE DES EPANDAGES

Suite à une enquête menée sur le terrain concernant l'historique du site, nous avons pu recueillir quelques données concernant le suivi d'épandage de quelques parcelles avec les produits épandus, les quantités, les dates d'épandage, les engrais et fertilisants utilisés. (Cf. Tableaux)

Listes des sigles

Amo : Ammonitrate NH_4NO_3 , il renferme généralement 33,5 % d'azote réparti de façon égale entre la forme nitrique et la forme ammoniacale ; il est utilisé sur toutes cultures.

Le 18-46, il contient 18 % d'azote et 46 % de phosphore et est utilisé comme engrais "starter" sur le maïs.

Lisier naissance (porc) : lisier provenant de l'atelier maternité, post sevrage, gestante verraterie.

Lisier engrai^{ss} (porc) : lisier provenant de l'atelier engraissement.

Campagne culturelle 2000

[illegible]

Campagne culturelle 2000

[illegible]

Campagne culturale 2000

n° d'îlot ou parcelle			Date de l'épandage	Surface fertilisée en ha	AZOTE MINERAL		AZOTE ORGANIQUE						
					Formule	Quantités totales d'azote épandues	Type (lisier, fumier, litières)	Origine du produit	Quantités totales épandues T ou m3	Concen- tration estimée ou mesurée	Valeur fertilisante quantité x concentration	Modalités d'apport	
												Enfouis- sement oui/non	Désodori- sation oui/non
9	Culture : RGI Référence cadastrale ZC 58	1	05/02/00	3,28	Azoph	131 uN							
		2	24/05/00	3,28			lisier	naissage	140 m3	3 uN/m3	420 uN	12 h	
		3											
	Total îlot ou parcelle												
10	Culture : RGA Référence cadastrale	1	05/02/00	env 3 ha	Azoph	120 uN							
		2	15/03/00	env 3 ha			lisier	naissage	28 m3	3 uN/m3	84 uN	12 h	
			05/06/00	env 3 ha			lisier	naissage	33 m3	3 uN/m3	99 uN	12 h	
		3	05/09/00	env 3 ha			lisier	Engrai ^{sst}	28 m3	4 uN/m3	112 uN	12 h	
	Total îlot ou parcelle												
11	Culture : Colza Référence cadastrale ZC 1	1	24/02/00	1,25	Amo	156 uN							
		2											
		3	13/10/00	1,25			lisier	maternité	28 m3	3 uN/m3	84 uN	12 h	
	Total îlot ou parcelle												
12	Culture : RGA Référence cadastrale ZC 1-53	1	07/04/00	1,60			lisier	maternité	50 m3	3 uN/m3	150 uN	12 h	
		2	05/06/00	1,60			lisier	maternité	33 m3	3 uN/m3	99 uN	12 h	
		3	13/10/00	1,60			lisier	maternité	20 m3	3 uN/m3	60 uN	12 h	

Campagne culturelle 2000

[illegible]

Campagne culturelle 2000

[illegible]

Annexe 7

Débits journaliers et mensuels de l'Arguenon

à la station de Jugon-les-Lacs

Données Banque-Hydro

1999-2001



J1103010 L'Arguenon à Jugon-les-Lacs - 104 km2
Zone hydrographique : J1103010 Altitude : 31 m Département : 22 Côtes-d'Armor
Producteur : DIREN Bretagne Tél. : 2.99.65.35.97
E-Mail : yves.hery@bretagne.environnement.gouv.fr



DEBITS JOURNALIERS ET MENSUELS 1999-00

	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr
1	0.778	0.361	0.200	0.052	0.068	0.309	0.787	0.869	6.600	1.050	1.350	0.983
2	0.895	0.364	0.207	0.050	0.072	0.246	0.962	0.845	5.090	1.080	1.080	0.861
3	0.779	0.374	0.200	0.048	0.069	0.215	0.668	0.786	4.020	0.962	1.020	1.250
4	0.793	0.356	0.178	0.114	0.061	0.192	0.609	1.020	3.800	0.960	1.430	1.330
5	0.738	0.376	0.396	0.753	0.070	0.169	0.664	0.929	3.490	0.894	1.050	1.210
6	0.688	0.437	0.461	0.189	0.068	0.155	0.825	0.839	3.190	0.977	0.949	1.030
7	0.776	0.359	0.211	0.143	0.060	0.148	0.649	0.858	2.890	0.973	0.929	0.864
8	0.705	0.548	0.200	0.288	0.057	0.153	0.634	0.805	2.710	1.100	0.883	0.832
9	0.647	0.378	0.186	0.376	0.056	0.168	0.629	0.926	2.410	0.937	0.854	0.812
10	0.605	0.350	0.164	0.401	0.054	0.183	0.576	0.803	2.190	1.020	0.852	0.790
11	0.616	0.295	0.154	0.209	0.062	0.182	0.564	1.350	2.040	1.190	0.840	0.769
12	0.663	0.299	0.151	0.165	0.052	0.162	0.538	3.330	1.950	1.030	0.816	0.854
13	0.617	0.274	0.143	0.137	0.045	0.143	0.510	4.380	2.170	1.320	0.799	0.791
14	0.578	0.259	0.112	0.133	0.049	0.140	0.528	2.240	2.130	1.150	0.771	0.809
15	0.554	0.240	0.106	0.102	0.059	0.237	0.521	1.920	1.960	1.100	0.740	2.950
16	0.517	0.327	0.103	0.106	0.055	0.215	0.457	1.890	1.700	1.180	0.720	1.980
17	0.513	0.469	0.105	0.103	0.064	0.176	0.861	2.000	1.660	1.200	0.729	2.110
18	1.460	0.281	0.108	0.526	0.175	0.173	1.720	2.130	1.640	1.150	0.716	2.000
19	1.020	0.247	0.099	0.210	1.440	0.166	2.250	2.030	1.530	1.020	0.689	2.000
20	0.820	0.238	0.089	0.140	0.398	0.179	1.500	1.600	1.460	0.926	0.671	2.690
21	0.694	0.230	0.073	0.119	0.228	0.260	1.720	1.770	1.410	0.938	0.625	3.450
22	0.591	0.200	0.064	0.114	0.200	0.953	1.280	2.270	1.400	1.050	0.625	2.280
23	0.523	0.190	0.068	0.098	0.194	1.830	1.230	3.420	1.320	0.989	0.636	2.050
24	0.526	0.193	0.067	0.102	0.339	1.650	1.140	3.590	1.260	0.979	0.711	2.280
25	0.488	0.198	0.068	0.143	0.236	1.480	1.120	9.550	1.140	0.940	0.639	2.510
26	0.449	0.317	0.069	0.249	0.268	1.100	1.020	8.900	1.040	0.878	0.667	2.200
27	0.459	0.262	0.065	0.108	0.402	0.744	1.120	10.800	1.030	0.872	0.729	1.840
28	0.428	0.209	0.053	0.090	0.787	0.630	1.080	21.800 #	1.100	1.030	0.726	1.650
29	0.415	0.223	0.057	0.079	0.483	0.622	0.963	11.300	1.280	1.220	0.944	1.500
30	0.397	0.206	0.052	0.079	0.436	0.688	0.875	8.730	1.200		0.907	1.400
31	0.379		0.051	0.072		0.983		7.710	1.110		1.140	

Codes de validité
< Inconnu
faible
> Inconnu
fort
Estimé
! Reconst.
Bon

V
a
l
e
u
r
s

A
n
n
u
e
l
l
e
s

Ecoulements mesurés de l'année

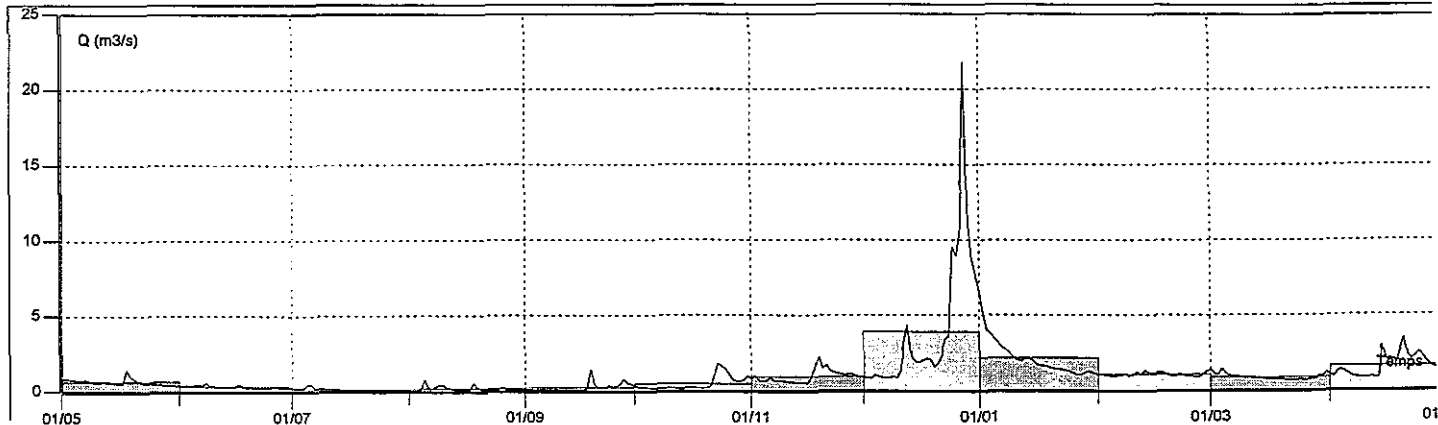
Hmax (cm)	41.1	23.4	28.3	37.1	38.6	46.7	53.2	176.0	80.0	36.5	37.9	60.4	176.0
QIX (m3/s)	2.220	0.784	1.120	1.810	1.970	2.790	3.460	31.300 #	6.700	1.750	1.900	4.200	31.300 #
QM (m3/s)	0.649	0.302	0.138	0.177	0.220	0.473	0.933	3.910 #	2.190	1.040	0.846	1.600	1.050 #

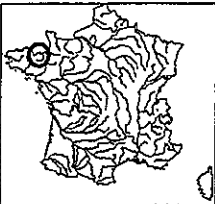
Ecoulements naturels de l'année

m3/s	0.649	0.302	0.138	0.177	0.220	0.473	0.933	3.910 #	2.190	1.040	0.846	1.600	1.050 #
l/s/km2	6.2	2.9	1.3	1.7	2.1	4.6	9.0	37.6 #	21.1	10.0	8.1	15.4	10.1 #
mm	17	8	4	5	6	12	23	101 #	57	25	22	40	318 #

Ecoulements mensuels de référence sur la période connue de 1972 - 2001

m3/s	0.781 #	0.394 #	0.228 #	0.114 #	0.153 #	0.357 #	0.654 #	1.260 #	1.910 #	1.990 #	1.290 #	1.090 #	0.845
mm	20 #	9 #	5 #	2 #	3 #	9 #	16 #	32 #	49 #	47 #	33 #	27 #	257
Hydraulicité	0.83	0.77	0.61	1.55	1.44	1.32	1.43	3.10	1.15	0.52	0.66	1.47	1.24





J1103010 L'Arguenon à Jugon-les-Lacs - 104 km2
Zone hydrographique : J1103010 Altitude : 31 m Département : 22 Côtes-d'Armor
Producteur : DIREN Bretagne Tél. : 2.99.65.35.97
E-Mail : yves.hery@bretagne.environnement.gouv.fr



DEBITS JOURNALIERS ET MENSUELS 2000-01

	Avr	Mai	Jun	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	
1	0.983	1.330	1.100	0.341	0.351	0.108	0.130	0.611	1.800	4.870	3.270	1.440	Codes de validité < Inconnu faible > Inconnu fort # Estimé ! Reconst. Bon
2	0.861	1.210	0.978	0.324	0.337	0.114	0.135	0.721	2.040	8.100	3.060	1.360	
3	1.250	1.190	0.896	0.288	0.320	0.117	0.110	0.823	1.580	7.620	2.860	1.310	
4	1.330	1.190	0.810	0.278	0.312	0.108	0.107	0.695	2.650	9.010	2.910	1.500	
5	1.210	1.170	0.778	0.342	0.281	0.106	0.110	0.731	2.700	18.200 #	4.270	1.270	
6	1.030	1.410	0.759	0.393	0.271	0.104	0.092	4.210	2.250	23.700 #	5.300	1.220	
7	0.864	1.420	0.741	1.960	0.270	0.102	0.087	2.250	4.120	9.840	3.850	1.330	
8	0.832	1.320	0.710	1.260	0.266	0.100	0.119	1.610	6.170	8.150	4.500	1.200	
9	0.812	1.240	0.737	0.600	0.264	0.098	0.182	1.310	4.860	6.690	6.310	1.160	
10	0.790	5.190	0.700	0.650	0.237	0.091	0.566	1.100	5.400	7.720	5.880	1.200	
11	0.769	5.200	0.636	0.470	0.229	0.080	0.848	0.984	4.770	8.210	3.860	1.240	V a l e u r s A n n u e l l e s
12	0.854	10.000	0.614	0.388	0.220	0.084	0.377	3.350	6.110	10.400	3.510	1.290	
13	0.791	5.090	0.579	0.384	0.208	0.087	0.252	5.020	11.800	9.350	3.290	1.510	
14	0.809	3.030	0.543	0.359	0.222	0.083	0.212	1.990	8.760	7.190	3.030	2.330	
15	2.950	2.570	0.504	0.319	0.212	0.080	0.219	1.630	7.670	5.710	2.780	1.660	
16	1.980	2.270	0.507	0.297	0.200	0.095	0.218	1.700	5.750	4.620	2.530	1.460	
17	2.110	1.980	0.455	0.285	0.195	0.093	0.196	1.560	4.470	4.000	2.280	2.100	
18	2.000	1.840	0.422	0.253	0.177	0.089	0.192	1.370	4.830	3.540	2.030	4.910	
19	2.000	1.680	0.382	0.236	0.201	0.199	0.290	1.310	6.320	3.100	1.860	5.290	
20	2.690	1.550	0.466	0.228	0.184	0.153	0.285	1.390	3.910	2.770	1.750	5.640	
21	3.450	1.560	0.440	0.220	0.210	0.126	0.754	1.540	3.320	3.040	1.650	7.780	V a l e u r s A n n u e l l e s
22	2.280	1.390	0.382	0.210	0.188	0.109	0.494	2.070	2.950	3.380	1.580	8.550	
23	2.050	1.340	0.388	0.205	0.156	0.101	0.355	2.130	2.680	5.730	1.550	7.330	
24	2.280	1.430	0.379	0.288	0.151	0.107	0.286	1.920	2.480	10.100	1.470	5.750	
25	2.510	1.460	0.396	0.392	0.145	0.121	0.266	3.030	2.320	6.740	1.430	6.790	
26	2.200	1.240	0.370	0.395	0.157	0.109	0.248	2.990	2.280	5.680	1.510	4.360	
27	1.840	1.260	0.328	0.353	0.169	0.097	0.230	2.190	2.290	6.570	2.220	4.250	
28	1.650	2.040	0.332	1.040	0.135	0.331	0.226	2.020	2.000	5.780	1.590	5.710	
29	1.500	1.250	0.317	1.050	0.129	0.231	0.313	1.860	1.890	4.960		7.020	
30	1.400	1.200	0.344	0.511	0.119	0.156	1.180	1.680	1.800	3.760		5.000	
31		1.380		0.420	0.121		1.520		1.730	3.690		3.730	

Écoulements mesurés de l'année

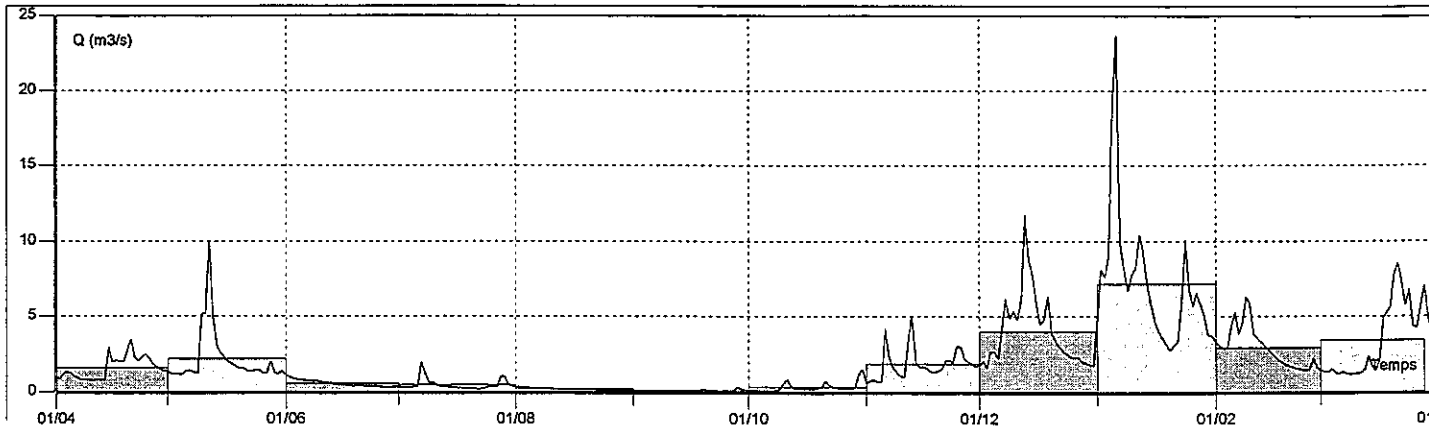
Hmax (cm)	60.4	141.0	28.2	55.3	16.4	20.5	51.7	88.4	145.0	212.0	102.0	124.0	212.0
QIX (m3/s)	4.200	14.500	1.110	3.670	0.364	0.610	3.300	7.440	15.900	51.200 #	8.620	10.600	51.200 #
QM (m3/s)	1.600	2.180	0.567	0.476	0.214	0.119	0.342	1.860	3.990	7.170 #	2.930	3.440	2.080 #

Écoulements naturels de l'année

m3/s	1.600	2.180	0.567	0.476	0.214	0.119	0.342	1.860	3.990	7.170 #	2.930	3.440	2.080 #
l/s/km2	15.4	21.0	5.4	4.6	2.1	1.1	3.3	17.9	38.4	68.9 #	28.2	33.1	20.0 #
mm	40	56	14	12	6	3	9	46	103	185 #	68	89	629 #

Écoulements mensuels de référence sur la période connue de 1972 - 2001

m3/s	1.090 #	0.781 #	0.394 #	0.228 #	0.114 #	0.153 #	0.357 #	0.654 #	1.260 #	1.910 #	1.990 #	1.290 #	0.845
mm	27 #	20 #	9 #	5 #	2 #	3 #	9 #	16 #	32 #	49 #	47 #	33 #	257
Hydraulicité	1.47	2.79	1.44	2.09	1.88	0.78	0.96	2.84	3.17	3.75	1.47	2.67	2.46



Annexe 8

Données Météo France de précipitations

Station Trémeur (22)

1999-2000

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**



DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Valeurs quotidiennes de précipitations et évapotranspiration Penman du 01/01/99 au 31/12/00

Station : TREMEUR (22)

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/01/1999	4.8	0.7
02/01/1999	4.2	1.1
03/01/1999	1.6	1.1
04/01/1999	0.8	0.1
05/01/1999	0.2	0.9
06/01/1999	6.4	0.5
07/01/1999	6.4	0.5
08/01/1999	0.8	0.8
09/01/1999	0.4	0.5
10/01/1999	1.6	0.6
11/01/1999	0.6	0.7
12/01/1999	2.0	0.6
13/01/1999	0.8	0.5
14/01/1999	0.4	0.7
15/01/1999	5.6	0.9
16/01/1999	7.4	0.6
17/01/1999	2.0	0.7
18/01/1999	2.2	0.6
19/01/1999	8.4	0.3
20/01/1999	4.2	0.6
21/01/1999	3.4	0.2
22/01/1999	0.0	0.4
23/01/1999	0.2	0.7
24/01/1999	0.0	0.2
25/01/1999	8.0	0.6
26/01/1999	4.8	1.1
27/01/1999	0.6	0.8
28/01/1999	0.6	0.8
29/01/1999	0.0	0.6
30/01/1999	0.0	0.6
31/01/1999	0.0	0.7
01/02/1999	0.2	0.2
02/02/1999	0.0	0.7
03/02/1999	0.0	0.4
04/02/1999	0.2	1.0
05/02/1999	0.0	1.3
06/02/1999	3.6	1.4
07/02/1999	1.4	1.1
08/02/1999	30.0	0.8
09/02/1999	9.0	0.6
10/02/1999	0.2	0.8
11/02/1999	1.0	0.7
12/02/1999	0.8	0.5
13/02/1999	0.8	0.5
14/02/1999	0.8	0.9
15/02/1999	0.4	0.5
16/02/1999	0.6	1.0
17/02/1999	1.2	0.8
18/02/1999	0.2	1.2
19/02/1999	2.4	1.2
20/02/1999	1.8	0.7
21/02/1999	1.6	1.2
22/02/1999	1.4	1.7
23/02/1999	5.4	1.1
24/02/1999	0.0	0.4
25/02/1999	0.0	0.7
26/02/1999	0.2	0.8
27/02/1999	2.8	1.2
28/02/1999	0.0	1.4

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/03/1999	0.0	1.6
02/03/1999	2.6	1.7
03/03/1999	1.4	1.8
04/03/1999	9.0	1.3
05/03/1999	2.8	1.3
06/03/1999	10.8	1.1
07/03/1999	8.0	1.5
08/03/1999	2.0	0.9
09/03/1999	0.0	1.2
10/03/1999	0.2	1.0
11/03/1999	0.2	1.5
12/03/1999	1.6	1.1
13/03/1999	0.0	1.5
14/03/1999	0.0	1.6
15/03/1999	0.6	1.2
16/03/1999	0.0	1.1
17/03/1999	0.2	1.4
18/03/1999	0.0	1.3
19/03/1999	0.0	1.5
20/03/1999	0.0	0.8
21/03/1999	2.2	1.4
22/03/1999	0.0	1.6
23/03/1999	0.0	1.5
24/03/1999	0.0	2.0
25/03/1999	3.0	0.6
26/03/1999	0.8	1.8
27/03/1999	1.6	1.3
28/03/1999	0.6	1.7
29/03/1999	0.2	1.7
30/03/1999	0.0	2.3
31/03/1999	0.0	2.5
01/04/1999	0.4	2.0
02/04/1999	7.6	1.1
03/04/1999	0.0	2.5
04/04/1999	0.0	1.1
05/04/1999	0.0	2.3
06/04/1999	1.8	2.6
07/04/1999	0.0	2.5
08/04/1999	0.4	2.2
09/04/1999	0.2	1.2
10/04/1999	1.2	1.6
11/04/1999	1.8	2.2
12/04/1999	3.8	2.3
13/04/1999	8.6	2.5
14/04/1999	10.6	0.9
15/04/1999	0.8	1.7
16/04/1999	11.0	1.4
17/04/1999	3.0	1.5
18/04/1999	1.6	2.2
19/04/1999	6.4	1.2
20/04/1999	12.2	0.4
21/04/1999	1.4	3.0
22/04/1999	1.2	2.7
23/04/1999	0.4	1.8
24/04/1999	0.0	2.7
25/04/1999	4.0	0.8
26/04/1999	4.8	2.3
27/04/1999	0.0	2.2
28/04/1999	0.0	3.2
29/04/1999	0.0	2.6
30/04/1999	13.4	2.3

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*



DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Valeurs quotidiennes de précipitations et évapotranspiration Penman du 01/01/99 au 31/12/00

Station : TREMEUR (22)

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/05/1999	0.6	2.1
02/05/1999	0.2	3.5
03/05/1999	0.6	2.8
04/05/1999	0.4	2.6
05/05/1999	0.2	2.3
06/05/1999	2.4	3.2
07/05/1999	2.0	2.5
08/05/1999	0.2	3.0
09/05/1999	0.0	3.9
10/05/1999	0.8	2.7
11/05/1999	3.2	2.4
12/05/1999	0.2	2.4
13/05/1999	0.0	2.2
14/05/1999	0.2	2.3
15/05/1999	0.0	2.5
16/05/1999	0.2	2.9
17/05/1999	19.0	2.8
18/05/1999	1.2	2.9
19/05/1999	5.8	1.2
20/05/1999	0.0	1.9
21/05/1999	0.0	2.7
22/05/1999	0.0	3.8
23/05/1999	0.0	1.6
24/05/1999	0.0	2.1
25/05/1999	0.0	3.7
26/05/1999	0.0	3.5
27/05/1999	0.2	3.6
28/05/1999	0.0	4.1
29/05/1999	0.0	3.6
30/05/1999	0.0	3.3
31/05/1999	0.0	3.3
01/06/1999	4.6	3.3
02/06/1999	4.2	2.6
03/06/1999	1.8	2.7
04/06/1999	3.4	2.9
05/06/1999	7.6	2.9
06/06/1999	0.2	3.7
07/06/1999	3.4	2.4
08/06/1999	0.0	2.1
09/06/1999	0.4	2.5
10/06/1999	0.0	3.4
11/06/1999	0.0	2.0
12/06/1999	0.2	3.1
13/06/1999	0.0	3.4
14/06/1999	0.0	3.8
15/06/1999	0.0	4.1
16/06/1999	0.4	3.6
17/06/1999	0.0	3.7
18/06/1999	0.0	3.6
19/06/1999	0.0	3.6
20/06/1999	1.0	3.2
21/06/1999	0.0	3.6
22/06/1999	0.0	3.0
23/06/1999	0.0	3.6
24/06/1999	0.0	4.5
25/06/1999	0.4	4.7
26/06/1999	4.4	2.9
27/06/1999	0.4	3.5
28/06/1999	2.6	2.6
29/06/1999	0.6	3.6
30/06/1999	0.0	3.0

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/07/1999	0.2	3.5
02/07/1999	0.0	5.4
03/07/1999	0.0	4.6
04/07/1999	0.2	3.1
05/07/1999	18.8	2.7
06/07/1999	0.0	3.6
07/07/1999	0.0	2.3
08/07/1999	0.0	4.0
09/07/1999	0.2	4.7
10/07/1999	0.0	4.0
11/07/1999	1.4	4.1
12/07/1999	0.2	3.6
13/07/1999	0.0	4.3
14/07/1999	0.2	4.7
15/07/1999	0.2	3.7
16/07/1999	0.0	3.0
17/07/1999	0.2	3.8
18/07/1999	0.0	4.5
19/07/1999	0.0	3.3
20/07/1999	0.0	4.3
21/07/1999	0.0	4.2
22/07/1999	0.0	2.3
23/07/1999	0.0	3.8
24/07/1999	0.0	4.2
25/07/1999	0.0	5.2
26/07/1999	0.2	4.9
27/07/1999	0.0	5.3
28/07/1999	0.0	4.1
29/07/1999	0.0	4.3
30/07/1999	0.0	4.1
31/07/1999	0.0	3.6
01/08/1999	0.0	5.3
02/08/1999	1.2	4.1
03/08/1999	0.0	4.0
04/08/1999	22.4	1.2
05/08/1999	2.0	3.4
06/08/1999	1.2	2.3
07/08/1999	15.2	4.0
08/08/1999	9.2	2.2
09/08/1999	5.4	2.2
10/08/1999	7.2	2.9
11/08/1999	0.0	2.1
12/08/1999	0.0	3.1
13/08/1999	3.0	3.4
14/08/1999	0.2	4.0
15/08/1999	1.0	2.2
16/08/1999	0.4	2.9
17/08/1999	17.8	2.3
18/08/1999	0.2	3.5
19/08/1999	0.2	3.6
20/08/1999	0.0	2.0
21/08/1999	0.0	3.4
22/08/1999	0.0	4.7
23/08/1999	1.4	2.5
24/08/1999	0.2	4.1
25/08/1999	18.4	2.3
26/08/1999	0.0	3.3
27/08/1999	0.4	2.9
28/08/1999	0.2	3.5
29/08/1999	0.2	2.7
30/08/1999	0.0	3.1
31/08/1999	0.0	2.5

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**



DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Valeurs quotidiennes de précipitations et évapotranspiration Penman du 01/01/99 au 31/12/00

Station : TREMEUR (22)

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/09/1999	0.2	2.5
02/09/1999	0.2	3.2
03/09/1999	0.0	3.7
04/09/1999	0.2	3.0
05/09/1999	0.2	3.3
06/09/1999	0.0	2.4
07/09/1999	0.0	2.4
08/09/1999	0.4	2.9
09/09/1999	0.0	1.9
10/09/1999	0.0	3.1
11/09/1999	0.2	4.4
12/09/1999	0.2	3.3
13/09/1999	3.6	2.4
14/09/1999	1.2	1.7
15/09/1999	0.0	2.4
16/09/1999	0.2	2.6
17/09/1999	0.2	2.5
18/09/1999	43.2	1.0
19/09/1999	0.8	2.3
20/09/1999	1.0	1.6
21/09/1999	1.6	0.9
22/09/1999	3.8	2.5
23/09/1999	7.2	2.1
24/09/1999	0.4	2.9
25/09/1999	2.6	2.1
26/09/1999	8.0	2.0
27/09/1999	7.6	1.7
28/09/1999	2.0	1.1
29/09/1999	3.6	1.9
30/09/1999	0.0	1.9
01/10/1999	0.2	2.1
02/10/1999	1.2	1.9
03/10/1999	0.8	2.3
04/10/1999	0.4	2.0
05/10/1999	0.2	1.3
06/10/1999	0.0	1.3
07/10/1999	0.2	0.9
08/10/1999	0.0	1.1
09/10/1999	2.0	1.3
10/10/1999	1.6	1.0
11/10/1999	0.8	0.7
12/10/1999	0.0	1.5
13/10/1999	0.0	1.1
14/10/1999	5.2	0.8
15/10/1999	0.4	1.1
16/10/1999	0.2	0.6
17/10/1999	0.2	0.7
18/10/1999	0.2	1.1
19/10/1999	0.4	0.7
20/10/1999	3.6	0.2
21/10/1999	8.4	0.8
22/10/1999	26.2	0.8
23/10/1999	13.4	1.4
24/10/1999	14.6	1.3
25/10/1999	2.4	1.0
26/10/1999	0.4	0.8
27/10/1999	0.2	0.9
28/10/1999	0.4	0.9
29/10/1999	0.0	0.8
30/10/1999	5.8	1.1
31/10/1999	0.0	1.4

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/11/1999	6.6	0.5
02/11/1999	0.0	0.9
03/11/1999	0.4	0.7
04/11/1999	0.2	0.5
05/11/1999	6.8	1.7
06/11/1999	1.0	1.2
07/11/1999	0.0	0.5
08/11/1999	1.2	0.6
09/11/1999	0.0	1.0
10/11/1999	0.8	0.9
11/11/1999	0.0	1.7
12/11/1999	0.0	1.2
13/11/1999	0.0	1.4
14/11/1999	0.4	0.3
15/11/1999	0.0	1.0
16/11/1999	8.8	0.7
17/11/1999	6.4	1.0
18/11/1999	10.6	0.9
19/11/1999	3.4	1.2
20/11/1999	2.6	0.8
21/11/1999	0.8	0.7
22/11/1999	2.8	0.3
23/11/1999	1.4	0.2
24/11/1999	0.0	0.1
25/11/1999	0.2	1.1
26/11/1999	2.8	0.8
27/11/1999	0.2	0.6
28/11/1999	0.0	0.9
29/11/1999	0.0	0.8
30/11/1999	0.0	0.4
01/12/1999	0.8	0.1
02/12/1999	0.0	0.9
03/12/1999	9.4	0.3
04/12/1999	1.6	0.5
05/12/1999	0.2	0.8
06/12/1999	0.2	0.8
07/12/1999	0.2	1.5
08/12/1999	3.2	0.5
09/12/1999	0.2	1.4
10/12/1999	5.6	1.3
11/12/1999	14.2	0.2
12/12/1999	8.2	0.7
13/12/1999	2.4	1.0
14/12/1999	5.6	0.7
15/12/1999	3.6	0.9
16/12/1999	7.2	0.8
17/12/1999	3.0	0.6
18/12/1999	4.0	manquant
19/12/1999	0.0	manquant
20/12/1999	0.6	manquant
21/12/1999	3.6	manquant
22/12/1999	9.8	0.2
23/12/1999	3.2	0.7
24/12/1999	30.0	0.7
25/12/1999	13.0	2.0
26/12/1999	8.8	1.3
27/12/1999	44.6	0.7
28/12/1999	2.4	0.5
29/12/1999	1.2	0.6
30/12/1999	3.0	0.5
31/12/1999	0.4	0.4

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**



DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Valeurs quotidiennes de précipitations et évapotranspiration Penman du 01/01/99 au 31/12/00

Station : TREMEUR (22)

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/01/2000	1.4	0.3
02/01/2000	0.2	0.4
03/01/2000	1.4	1.1
04/01/2000	1.2	0.8
05/01/2000	0.2	0.5
06/01/2000	3.0	0.6
07/01/2000	0.2	0.3
08/01/2000	1.6	0.3
09/01/2000	2.0	0.7
10/01/2000	0.2	0.6
11/01/2000	0.2	0.5
12/01/2000	0.8	0.6
13/01/2000	2.6	0.1
14/01/2000	2.4	0.3
15/01/2000	0.2	0.7
16/01/2000	0.2	0.8
17/01/2000	0.2	0.2
18/01/2000	0.0	0.6
19/01/2000	0.0	0.9
20/01/2000	0.0	0.6
21/01/2000	0.0	0.7
22/01/2000	0.6	1.4
23/01/2000	0.2	0.9
24/01/2000	1.4	0.5
25/01/2000	0.2	0.6
26/01/2000	0.0	0.9
27/01/2000	0.2	0.5
28/01/2000	1.4	0.5
29/01/2000	0.0	0.8
30/01/2000	0.0	1.2
31/01/2000	0.0	1.0
01/02/2000	3.2	0.9
02/02/2000	0.0	0.9
03/02/2000	0.2	0.6
04/02/2000	0.0	1.0
05/02/2000	0.2	0.8
06/02/2000	0.8	0.8
07/02/2000	1.0	0.8
08/02/2000	0.6	1.8
09/02/2000	0.0	1.5
10/02/2000	7.8	1.6
11/02/2000	0.2	0.7
12/02/2000	5.8	0.6
13/02/2000	0.6	0.9
14/02/2000	2.8	0.6
15/02/2000	3.8	1.2
16/02/2000	3.0	1.3
17/02/2000	1.0	1.0
18/02/2000	0.6	1.1
19/02/2000	1.8	1.5
20/02/2000	0.2	0.7
21/02/2000	3.6	0.4
22/02/2000	0.0	0.9
23/02/2000	0.2	0.7
24/02/2000	0.8	1.3
25/02/2000	0.0	1.2
26/02/2000	0.2	0.4
27/02/2000	3.6	1.3
28/02/2000	5.0	1.7
29/02/2000	5.4	1.7

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/03/2000	1.2	1.6
02/03/2000	0.0	1.1
03/03/2000	5.4	1.3
04/03/2000	0.0	1.2
05/03/2000	0.2	1.3
06/03/2000	0.0	1.4
07/03/2000	0.0	1.6
08/03/2000	0.0	2.0
09/03/2000	0.2	1.1
10/03/2000	0.2	1.4
11/03/2000	0.2	0.8
12/03/2000	0.2	1.3
13/03/2000	0.0	1.6
14/03/2000	0.2	1.5
15/03/2000	0.0	1.7
16/03/2000	0.0	0.6
17/03/2000	0.0	1.4
18/03/2000	0.0	1.8
19/03/2000	0.2	0.8
20/03/2000	0.0	1.5
21/03/2000	0.2	1.8
22/03/2000	3.0	2.6
23/03/2000	4.0	1.1
24/03/2000	2.2	1.7
25/03/2000	1.8	1.6
26/03/2000	4.8	1.8
27/03/2000	5.4	1.4
28/03/2000	5.4	1.1
29/03/2000	5.6	1.0
30/03/2000	5.2	0.6
31/03/2000	2.4	0.9
01/04/2000	0.8	1.4
02/04/2000	8.4	1.1
03/04/2000	5.6	1.6
04/04/2000	6.0	0.7
05/04/2000	1.0	1.3
06/04/2000	0.0	1.8
07/04/2000	0.2	2.5
08/04/2000	0.0	2.5
09/04/2000	0.2	1.3
10/04/2000	0.0	2.0
11/04/2000	4.0	1.1
12/04/2000	3.8	1.9
13/04/2000	0.4	2.0
14/04/2000	16.4	0.7
15/04/2000	2.2	1.7
16/04/2000	8.6	0.9
17/04/2000	6.4	2.3
18/04/2000	5.8	1.4
19/04/2000	8.0	1.1
20/04/2000	7.8	1.2
21/04/2000	0.6	2.9
22/04/2000	0.0	2.1
23/04/2000	4.6	2.2
24/04/2000	6.0	0.8
25/04/2000	5.0	2.4
26/04/2000	3.4	2.1
27/04/2000	0.0	1.8
28/04/2000	0.2	2.7
29/04/2000	0.2	2.8
30/04/2000	0.0	3.1

*Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)*



DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Valeurs quotidiennes de précipitations et évapotranspiration Penman du 01/01/99 au 31/12/00

Station : TREMEUR (22)

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/05/2000	0.0	3.3
02/05/2000	0.0	1.3
03/05/2000	0.2	1.4
04/05/2000	0.0	1.7
05/05/2000	10.0	2.5
06/05/2000	17.6	2.7
07/05/2000	9.8	1.8
08/05/2000	5.8	2.2
09/05/2000	10.4	2.2
10/05/2000	14.2	1.5
11/05/2000	18.4	1.1
12/05/2000	0.4	2.0
13/05/2000	0.4	2.7
14/05/2000	0.0	3.6
15/05/2000	0.2	3.7
16/05/2000	0.2	3.7
17/05/2000	2.2	3.0
18/05/2000	0.2	2.5
19/05/2000	0.0	2.3
20/05/2000	4.2	2.1
21/05/2000	0.2	2.6
22/05/2000	0.0	1.5
23/05/2000	7.2	2.2
24/05/2000	5.0	1.1
25/05/2000	0.0	3.8
26/05/2000	3.0	2.0
27/05/2000	13.0	2.2
28/05/2000	0.0	4.1
29/05/2000	4.2	2.9
30/05/2000	8.4	1.0
31/05/2000	0.0	2.8
01/06/2000	0.0	3.6
02/06/2000	0.0	3.7
03/06/2000	0.0	3.3
04/06/2000	0.0	2.9
05/06/2000	0.0	2.7
06/06/2000	0.6	2.5
07/06/2000	0.2	3.6
08/06/2000	4.6	4.6
09/06/2000	1.2	3.5
10/06/2000	0.0	3.9
11/06/2000	0.0	3.5
12/06/2000	0.2	4.2
13/06/2000	0.0	4.0
14/06/2000	0.0	4.4
15/06/2000	0.2	3.9
16/06/2000	0.0	5.0
17/06/2000	0.0	7.0
18/06/2000	0.0	6.6
19/06/2000	2.0	5.1
20/06/2000	0.2	3.1
21/06/2000	0.0	4.6
22/06/2000	0.4	3.4
23/06/2000	0.0	2.6
24/06/2000	2.4	2.7
25/06/2000	0.0	3.8
26/06/2000	0.0	4.1
27/06/2000	3.2	5.6
28/06/2000	0.0	4.7
29/06/2000	0.0	2.7
30/06/2000	0.2	3.1

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/07/2000	3.6	4.4
02/07/2000	0.0	3.2
03/07/2000	0.6	3.6
04/07/2000	1.4	3.4
05/07/2000	4.2	2.5
06/07/2000	40.2	3.2
07/07/2000	5.0	1.7
08/07/2000	2.2	3.1
09/07/2000	7.4	1.6
10/07/2000	3.4	3.1
11/07/2000	2.0	3.3
12/07/2000	0.0	2.6
13/07/2000	0.8	3.7
14/07/2000	0.0	3.7
15/07/2000	0.0	3.6
16/07/2000	0.0	2.9
17/07/2000	0.2	3.9
18/07/2000	0.0	3.9
19/07/2000	0.0	3.9
20/07/2000	0.0	4.4
21/07/2000	0.0	5.1
22/07/2000	0.0	5.4
23/07/2000	6.0	3.7
24/07/2000	4.0	1.1
25/07/2000	13.0	2.1
26/07/2000	2.6	2.6
27/07/2000	23.8	2.2
28/07/2000	14.0	2.8
29/07/2000	0.0	3.0
30/07/2000	0.2	2.9
31/07/2000	0.2	4.9
01/08/2000	0.0	2.8
02/08/2000	4.8	3.4
03/08/2000	0.8	3.2
04/08/2000	0.0	3.6
05/08/2000	0.0	3.0
06/08/2000	0.0	2.0
07/08/2000	0.0	3.2
08/08/2000	0.0	2.6
09/08/2000	0.2	4.4
10/08/2000	0.0	2.1
11/08/2000	0.0	3.8
12/08/2000	0.0	3.2
13/08/2000	1.4	1.9
14/08/2000	0.2	3.1
15/08/2000	0.0	3.7
16/08/2000	1.8	2.7
17/08/2000	0.2	3.6
18/08/2000	1.2	1.1
19/08/2000	0.2	3.3
20/08/2000	4.2	1.2
21/08/2000	2.2	2.3
22/08/2000	0.0	3.6
23/08/2000	0.2	5.1
24/08/2000	3.4	3.5
25/08/2000	6.0	4.7
26/08/2000	8.8	2.9
27/08/2000	0.6	3.2
28/08/2000	0.0	2.8
29/08/2000	0.0	2.3
30/08/2000	0.2	3.1

**Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines :
cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)**



DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Valeurs quotidiennes de précipitations et évapotranspiration Penman du 01/01/99 au 31/12/00

Station : TREMEUR (22)

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/09/2000	0.6	2.8
02/09/2000	0.0	3.0
03/09/2000	0.4	2.2
04/09/2000	0.2	2.2
05/09/2000	0.2	2.3
06/09/2000	0.2	3.0
07/09/2000	0.0	3.1
08/09/2000	0.0	3.7
09/09/2000	0.0	3.0
10/09/2000	0.2	2.9
11/09/2000	0.0	3.2
12/09/2000	0.2	2.2
13/09/2000	0.0	2.6
14/09/2000	0.0	2.2
15/09/2000	3.0	2.2
16/09/2000	0.0	2.5
17/09/2000	0.2	1.9
18/09/2000	13.2	1.5
19/09/2000	3.8	1.0
20/09/2000	1.0	2.1
21/09/2000	1.0	1.9
22/09/2000	4.0	2.2
23/09/2000	2.6	3.2
24/09/2000	5.4	2.1
25/09/2000	0.2	1.5
26/09/2000	1.0	2.7
27/09/2000	14.3	1.5
28/09/2000	0.8	2.0
29/09/2000	0.2	2.3
30/09/2000	0.4	1.7
01/10/2000	1.2	1.2
02/10/2000	0.0	2.5
03/10/2000	0.2	1.7
04/10/2000	0.0	2.0
05/10/2000	0.2	1.9
06/10/2000	0.0	1.8
07/10/2000	7.4	0.7
08/10/2000	1.4	1.9
09/10/2000	14.8	0.8
10/10/2000	14.0	1.6
11/10/2000	0.8	2.0
12/10/2000	0.2	1.6
13/10/2000	1.8	1.2
14/10/2000	1.2	0.2
15/10/2000	1.8	0.5
16/10/2000	1.2	1.5
17/10/2000	1.8	0.8
18/10/2000	4.4	0.1
19/10/2000	0.4	0.9
20/10/2000	20.8	0.1
21/10/2000	0.8	0.7
22/10/2000	0.0	1.1
23/10/2000	0.4	1.7
24/10/2000	0.0	1.4
25/10/2000	0.8	0.8
26/10/2000	0.0	1.3
27/10/2000	0.0	0.9
28/10/2000	7.6	1.3
29/10/2000	4.4	1.9
30/10/2000	24.4	1.2
31/10/2000	0.6	1.6

Date	Précipitations (en mm et 1/10)	Evapotranspiration Penman (en mm et 1/10)
01/11/2000	3.2	1.4
02/11/2000	6.2	1.5
03/11/2000	6.8	1.0
04/11/2000	0.4	1.1
05/11/2000	34.0	0.4
06/11/2000	5.2	1.0
07/11/2000	4.0	0.7
08/11/2000	2.0	0.9
09/11/2000	0.2	1.0
10/11/2000	0.2	0.7
11/11/2000	21.2	1.3
12/11/2000	16.8	0.5
13/11/2000	2.0	0.6
14/11/2000	0.4	0.7
15/11/2000	1.0	0.9
16/11/2000	4.6	0.8
17/11/2000	0.4	0.7
18/11/2000	2.4	0.2
19/11/2000	4.0	0.7
20/11/2000	1.2	1.0
21/11/2000	10.4	1.0
22/11/2000	8.2	1.6
23/11/2000	0.6	0.5
24/11/2000	10.8	0.4
25/11/2000	5.0	0.8
26/11/2000	0.2	1.4
27/11/2000	2.0	0.4
28/11/2000	0.4	1.3
29/11/2000	0.8	1.2
30/11/2000	3.2	0.4
01/12/2000	4.8	1.2
02/12/2000	0.4	0.5
03/12/2000	9.6	0.7
04/12/2000	5.8	1.0
05/12/2000	1.4	1.1
06/12/2000	11.2	1.1
07/12/2000	9.4	0.7
08/12/2000	5.6	1.3
09/12/2000	9.2	1.1
10/12/2000	0.8	1.2
11/12/2000	14.2	0.8
12/12/2000	21.0	1.1
13/12/2000	6.2	1.7
14/12/2000	2.4	0.7
15/12/2000	2.0	0.8
16/12/2000	1.2	0.5
17/12/2000	4.4	0.3
18/12/2000	8.0	0.4
19/12/2000	0.2	0.3
20/12/2000	0.4	0.6
21/12/2000	0.2	0.6
22/12/2000	0.2	0.8
23/12/2000	0.0	0.8
24/12/2000	0.2	0.4
25/12/2000	1.6	0.2
26/12/2000	2.8	0.3
27/12/2000	0.8	0.5
28/12/2000	0.0	0.5
29/12/2000	3.4	0.5
30/12/2000	1.2	0.4
31/12/2000	17.0	1.6

**BRGM
SERVICE EAU
Unité GRI**

BP 6009 – 45060 Orléans cedex 2 – France – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34