

Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT) par le traçage isotopique des sources d'azote

Rapport final

BRGM/RP- 53114-FR
Octobre 2004



Lot



Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT) par le traçage isotopique des sources d'azote

Rapport final

BRGM/RP- 53114-FR
Octobre 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM - 02EAU722

Ladouche B., Ghyselinck M. ,
Avec la collaboration de
Chery L.



Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT)

Mots Clés : pollution, karst, nitrates, traçage isotopique, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{11}\text{B}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

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

Ladouche B., Ghyselinck M. avec la collaboration de L. Chery **2004**. Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques du Causse du Quercy (LOT).. Rapport final BRGM/RP- 53114-FR, 99p., 52 Fig., 15 tab., 2 annexes.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Des études réalisées par la DDAF du Lot et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne entre 1999 et 2002 ont permis de caractériser globalement les teneurs en nitrates des eaux souterraines de quelques aquifères karstiques des Causses du Quercy dans le cadre des suivis du Réseau Patrimonial de Bassin. Ces études et suivis ont mis en évidence une contamination diffuse chronique des eaux souterraines avec des teneurs en nitrate pouvant dépasser 30 mg/l sur certains systèmes, en particulier pour le captage AEP de Nadaillac.

Dans le but d'identifier l'origine des nitrates des quelques sources karstiques suivies, une étude environnementale préalable a été demandée au BRGM afin d'éprouver la méthodologie récemment développée pour les aquifères de socles (Argenon, Bretagne, Widory et al. 2001) et poreux (Plio-Quaternaire, Rousillon, Ladouche et al. 2003) et système alluviaux (Widory et al, 2003).

La recherche de l'origine de la contamination en nitrate des eaux souterraines des systèmes karstiques des Causses du Quercy a été abordée par une approche géochimique reposant sur l'utilisation des isotopes du milieu (isotopes de l'azote $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, du bore $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$, du strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) couplée à une étude hydrochimique « classique » (éléments majeurs).

Cette étude a bénéficié de plusieurs financements : participation financière de la MISE du Lot (pour la 1^{ère} phase de l'étude) et du Conseil Général du Lot (2^{ème} phase), et financement lié à l'action de Service Public du BRGM pour les deux phases de travaux.

Dans cette étude, des éléments de réponse ont été apportés aux deux questions fondamentales qui se posaient sur la qualité des eaux des aquifères karstiques :

- Quelle est l'origine de la pollution par les nitrates des eaux du secteur ?
- Est-il possible de quantifier les proportions respectives des différentes origines de nitrate?

Pour répondre à ces deux interrogations, un diagnostic précis de la situation sur 5 systèmes karstiques différents a été effectué au travers d'un suivi temporel (4 campagnes de prélèvements) afin d'appréhender le mécanisme de la contamination azotée et son origine. En parallèle à cette étude, une caractérisation de la signature isotopique des déjections de moutons et de canard a été effectuée avec le concours de la Chambre d'Agriculture du Lot dans le but d'obtenir des informations sur ces amendements, représentatifs du secteur d'étude.

La confrontation et la synthèse des informations apportées par les isotopes du bore et de l'azote des nitrates ont permis de montrer que la pollution azotée des sources karstiques est multiple. Les eaux des sources sont influencées à des degrés divers par les amendements minéraux (engrais) et organiques (déjections animales) d'azote, et pour certaines sources, par une contribution significative d'azote provenant des eaux usées (STEP et assainissements autonomes).

Sommaire

1. Contexte	8
2. Objectifs	9
3. Introduction	10
3.1. Contexte GEOLOGIQUE et hydrogéologique Général	10
3.2 Méthodologie utilisée pour déterminer l'origine de la contamination des sources par les nitrates	12
4. Présentation des secteurs d'étude	13
4.1. Caractéristiques hydrogéologiques des Causses de Limogne et de Gramat (cf. fig. 2 – Carte géologique schématique du secteur d'étude)	13
4.2. Caractéristiques des sources étudiées	14
4.2.1. Critères de sélection des sources	14
4.2.2. Descriptif des points d'eau	18
5) Méthodes de prélèvements	39
5.1. Protocoles de prélèvement	39
5.1.1. Analyses physico-chimiques	39
5.1.2. Analyses isotopiques	39
5.2. Organisation des prélèvements	41
5.3. POSITIONNEMENT DES PRELEVEMENTS DANS LE CYCLE HYDROLOGIQUE ..	41
6. Résultats d'analyse sur les points d'eau	45
6.1. Résultats des mesures in-situ	45
6.2. Résultats des analyses physico-chimiques	50
7. Méthodes d'investigation isotopiques	52
7.1 Généralités : informations apportées par les isotopes du milieu	52
7.1.1 les isotopes stables de l'azote ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)	52
7.1.2 les isotopes stables du bore ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$)	53
7.1.3 les isotopes du strontium (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	53
8. Identification des sources de pollution	55
8.1 Caractérisation du pôle non pollué de la zone d'étude	55
8.2 Caractérisation des sources de pollutions de la zone d'étude	55
8.2.1. Les eaux usées d'origine domestique.	56
8.2.2. Les engrais.	56
8.2.3. Les différentes signatures des déjections animales.	57
9. Origine de la pollution dans les eaux souterraines des systèmes karstiques	59
9.1 Faciès chimiques et analyse multivariée (ACP)	59
9.2 Système karstique de Font Polémie	62
9.3 Système karstique de St-Jean de Laur	67
9.4 Système karstique de Font d'Ente	70
9.5 Système karstique de Nadaillac	73
9.6 Informations apportées par les isotopes du strontium	76
9.7 Informations sur les conditions d'écoulements au sein des systèmes karstiques	77
10. Quantification des contributions relatives des sources de pollution dans les eaux souterraines des systèmes karstiques	79
11. Conclusions et perspectives d'applications	86
Références bibliographiques	89
ANNEXE 1	91
ANNEXE 2	96
RESULTATS D'ANALYSE	96

Liste des figures

Fig.1 – Carte de localisation des sources karstiques étudiées	16
Fig. 2 – Carte géologique schématique du secteur.....	17
Fig 3. et 4. – Photographies de la source d'Anglanat	19
Fig 5. - CONTEXTE GEOLOGIQUE (extrait de la carte géologique BRGM Saint Géry)	19
Fig 6. - OCCUPATION DU SOL DANS LE SECTEUR DE LA SOURCE D'ANGLANAT	20
Fig. 7 – Schéma spéléologique de la Grotte-émergence d'Anglanat.....	21
Fig. 8 et 9 – Photographies de la source de Saint Jean de Laur	23
Fig 10. - CONTEXTE GEOLOGIQUE (extrait de la carte géologique BRGM Villefranche)	23
Fig. 11 - OCCUPATION DU SOL DANS LE SECTEUR DE LA SOURCE DE	24
Fig. 12 et 13 – Photographies de la source de Font Polémie	26
Fig. 14 - CONTEXTE GEOLOGIQUE (extrait de la carte géologique BRGM Saint Géry)	26
Fig. 15 - OCCUPATION DU SOL DANS LE SECTEUR DE LA SOURCE DE FONT POLEMIE	27
Fig. 18 - CONTEXTE GEOLOGIQUE (extrait de la carte géologique BRGM Gourdon)	30
Fig. 19 - OCCUPATION DU SOL DANS LE SECTEUR DE LA SOURCE DE FONT D'ENTE	31
Fig. 20 - Coupe géologique schématique de direction sud-sud-ouest/nord-nord-est, passant par le captage et la Raufi (échelle des hauteurs dilatée).....	32
Fig. 21 – Bassins versant d'alimentation supposé de la source de Font d'Ente.....	33
Fig. 22 - CONTEXTE GEOLOGIQUE (extrait de la carte géologique BRGM Gourdon)	34
Fig 23 - OCCUPATION DU SOL DANS LE SECTEUR DE LA SOURCE DE NADAILLAC	35
Fig. 24 - Coupe schématique sud-ouest/nord-est passant par Nadaillac et Pech Lagarde : scenarii hydrogéologiques envisageables :	37
Fig. 25 – Evolution des hauteurs d'eau dans le puits de Font Del Pito en 2002 (données de la D.D.A.F. du Lot)	43
Fig. 26 – Evolution des hauteurs d'eau dans le puits de Font Del Pito en 2003 (données de la D.D.A.F. du Lot)	44
Fig. 27 – Evolution de la conductivité lors des 4 campagnes de prélèvement	47
Fig. 28 – Evolution de la température lors des 4 campagnes de prélèvement.....	48
Fig. 29 – Evolution du pH lors des 4 campagnes de prélèvement.....	48
Fig. 30 – Evolution des teneurs en O ₂ dissous lors des 4 campagnes de prélèvement	49
Fig. 31 – Evolution de la dureté totale permanente lors des 4 campagnes de prélèvement	50
Fig. 32 – Evolution de l'alcalinité lors des 4 campagnes de prélèvement.....	51
Fig. 33 – Evolution des teneurs en nitrates lors des 4 campagnes de prélèvement.....	51
Fig. 34 – Diagramme de piper des eaux de 5 sources karstiques du Quercy (LOT).....	60
Fig. 35 – Analyse en composantes principales (ACP) sur les éléments.....	61
majeurs et mineurs analysés dans les eaux des sources karstiques et dans les sources de pollution.61	
Fig. 36 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ en fonction du rapport 1/NO ₃ de la source karstique de Font Polémie.....	63
Fig. 37 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ en fonction du rapport B/NO ₃ de la source karstique de Font Polémie	63
Fig. 38 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de l'inverse des teneurs en bore des eaux de la source karstique de Font-Polémie	65
Fig. 39 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ versus $\delta^{15}\text{NO}_3$ des eaux de la source karstique de Font-Polémie	66
Fig. 40 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ en fonction du rapport 1/NO ₃ de la source karstique de St-Jean de Laur	68
Fig. 41 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction du rapport 1/B de la source karstique de St-Jean de Laur	68
Fig. 42 -Relation $\delta^{11}\text{B}$ versus $\delta^{15}\text{NO}_3$ des eaux de la source karstique de St-Jean-de-Laur.	69
Fig. 43 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ en fonction du rapport B/NO ₃ de la source karstique de Font d'Ente	71
Fig. 44 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction du rapport 1/B de la source karstique de Font d'Ente.....	71
Fig. 45 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ versus $\delta^{15}\text{NO}_3$ des eaux de la source karstique de Font d'Ente.	72
Fig. 46 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ en fonction du rapport B/NO ₃ de la source karstique de Nadaillac.....	74
Fig. 47 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction du rapport 1/B de la source karstique de Nadaillac	74
Fig. 48 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction du $\delta^{15}\text{N}$ des eaux de la source karstique de Nadaillac.....	75
Fig. 49 - Evolution du rapport isotopique du strontium en fonction de l'inverse des teneurs en strontium des sources karstiques.....	76
Fig. 50 - Relation $\delta^{15}\text{N}/\text{NO}_3 \cdot \text{Cl}$ versus $\delta^{11}\text{B}/\text{B} \cdot \text{Cl}$ des eaux des systèmes karstiques du Quercy.	81
Fig. 51 - Schéma de principe d'une parcelle expérimentale de collecte de solution de sol.....	91
Fig. 51 – Photographies de la mise en place des parcelles expérimentales	92
Fig. 52 - Photographies des	93
pièges à lixiviats	93

Liste des tableaux

Tableau 1 : Echelle des temps géologiques.....	11
Tableau 2. Critères de sélection des sources karstiques étudiées	14
Tableau 3 : résultats des mesures in-situ sur les six points de prélèvement	45
Tableau 4 : contribution relative des différents pôles de pollution.....	82
Tableau 5 : Paramètres analysés et protocole de prélèvement	94
Tableau 6 : Calendrier des prélèvements et des aspersiones	94
Tableau 7 – Campagne n°1 : résultats des analyses in situ	97
Tableau 8 – Campagne n°1 : Résultats des analyses réalisées au laboratoire du BRGM	97
Tableau 9 – Campagne n°2 : résultats des analyses in situ	98
Tableau 10 – Campagne n°2 : Résultats des analyses réalisées au laboratoire du BRGM ..	98
Tableau 11 – Campagne n°3 : résultats des analyses in situ	99
Tableau 12 – Campagne n°3 : Résultats des analyses réalisées au laboratoire du BRGM ..	99
Tableau 13 – Campagne n°4 : résultats des analyses in situ	100
Tableau 14 – Campagne n°4 : Résultats des analyses réalisées au laboratoire du BRGM	100
Tableau 15 – Résultats d'analyse des lixiviats issus de deux parcelles micro-expérimentales (mouton et canard)	101

1. Contexte

Les Causses du Quercy et en particulier les Causses de Gramat et de Limogne se développent dans les calcaires karstiques du Jurassique moyen et supérieur. La ressource en eau peut y être abondante, mais également très vulnérable du fait des vitesses de circulations très importantes des eaux depuis la surface et de l'absence de filtration naturelle. Bien que la pression polluante globale exercée sur les Causses du Quercy soit relativement peu importante, des pratiques locales peuvent ponctuellement contaminer la ressource en eau.

C'est donc dans un souci d'anticipation et de réduction des concentrations actuelles en nitrates que le Conseil Général et la Mission Inter-Services du Lot ont demandé au BRGM d'entreprendre une étude sur l'origine des pollutions nitratées observées sur cinq sources karstiques du Causse du Quercy, en utilisant le traçage isotopique de l'origine de l'azote. Ces sources ont été sélectionnées pour être les plus représentatives possibles des différents contextes hydrogéologiques et de pression polluante observés dans le Causse. L'étude de leur fonctionnement et des mécanismes de pollution permettra d'améliorer la connaissance globale des Causses du Quercy.

Cette étude est divisée en deux phases :

- la 1^{ère} phase vise à caractériser les différentes sources potentielles de pollution nitratée par analyse de leur composition isotopique et chimique, en relation avec le contexte hydrogéologique,
- la 2^{nde} phase vise à caractériser l'aquifère du Jurassique par l'étude de cinq sources karstiques sélectionnées (dont une utilisée comme source de « référence »). Pour cela, une analyse du contexte géologique et hydrogéologique du secteur est effectuée et complétée par la caractérisation chimique et isotopique des points d'eau et de trois sources de pollution potentielles.

La 1^{ère} phase a été réalisée au cours de l'année 2002 avec la participation financière de la MISE du Lot et de BRGM. Elle a abouti à la rédaction du rapport intermédiaire de référence RP-52062-FR.

La seconde phase a été réalisée au cours de l'année 2003 et du premier semestre 2004, avec le soutien financier du Conseil Général du Lot, désigné comme maître d'ouvrage de l'opération, et du BRGM.

Le présent rapport reprend l'étude dans son intégralité et notamment les résultats des quatre campagnes d'analyses physico-chimiques et isotopiques, ainsi que leur interprétation.

2. Objectifs

L'étude a pour objectif de déterminer l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques du Réseau Patrimonial de Bassin, exutoire de l'aquifère du Jurassique, au niveau des Causses du Quercy. L'étude doit permettre de discerner les causes des concentrations élevées des pollutions diffuses « nitrates » au sein de l'aquifère.

La recherche des causes de contamination de l'eau par les nitrates peut être réalisée en partie à l'aide des isotopes de l'azote (rapport isotopique $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$), du strontium (rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) et de ceux du bore (rapport isotopique $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$), mais également grâce à une étude hydrochimique permettant de caractériser l'origine de la minéralisation. Cette recherche vient en appui à l'étude hydrogéologique classique.

3. Introduction

3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE GENERAL

Géologie et hydrogéologie :

Le secteur d'étude englobe le Causse de Gramat et le nord du Causse de Limogne, situés dans les Causses du Quercy. Ces deux causses appartiennent aux formations jurassiques qui bordent l'Est du bassin aquitain.

Le Causse de Gramat forme un plateau de 350 m d'altitude en moyenne et le Causse de Limogne constitue un vaste plateau calcaire orienté vers le Nord-Ouest, en direction de la vallée du Lot.

Les causses se sont essentiellement développés dans les formations du Jurassique Supérieur (Malm), constituées principalement de calcaires oolithiques, micritiques et argileux. Le substratum de l'aquifère est constitué par les terrains calcaréo-marneux du Toarcien, qui s'enfoncent globalement vers l'ouest.

Les réserves souterraines constituées dans ces formations calcaires constituent la première ressource en eau souterraine du département.

Les couches géologiques présentent donc un pendage orienté d'Est en Ouest et en direction de la vallée du Lot, avec affleurement des terrains suivants d'Est en Ouest (cf. Figure 1) :

- Dogger : calcaires oolithiques, argileux, et marneux,
- Malm – Oxfordien : calcaires oolithiques et micritiques
- Malm - Oxfordien et Kimméridgien inférieur : brèches polygéniques
- Malm – Kimmeridgien : alternances marno-calcaires
- Malm – Portlandien : Dolomicrite et calcaires micritiques
- Crétacé supérieur : calcaires crayeux, gréseux, puis bioclastiques
- Placages de formations tertiaires : galets, sables, limons, argiles.

Eléments structuraux :

Les éléments structuraux observés dans la zone d'étude s'intègrent dans le cadre tectonique de la plate-forme nord-aquitaine, où les sédiments ont subi un enfouissement très faible, traduit par un style tectonique cassant. On distingue ainsi l'accident ouest-quercynois d'orientation nord-ouest/sud-est, la faille de Gourdon et la faille de Bourg d'orientation Est-Ouest, la faille de Villefranche d'orientation sud-sud-ouest/nord-nord-est. On constate également la présence d'un anticlinal à St-Martin-Labouval.

Cette forte densité de fracturation a largement favorisé la karstification des terrains calcaires.

Histoire géologique de la zone d'étude :

Tableau 1 : Echelle des temps géologiques

QUATERNAIRE				
TERTIAIRE	PLIOCENE			
	MIOCENE			
	OLIGOCENE			
	EOCENE			
	PALEOCENE			
	CRETACE	SUPERIEUR	Maastrichtien	
			Campanien	
			Santonien	
			Coniacien	
			Turonien	
			Cénomanién	
		INFERIEUR	Albien	
			Aptien	
			Barrémien	
			Hauterivien	
			Valangien	
			Berriasien	
SECONDAIRE	JURASSIQUE	MALM	Tithonien	
			Kimméridgien	
			Oxfordien	
		DOGGER	Callovien	
			Bathonien	
			Bajocien	
			Aalénien	
		LIAS	Toarcién	
			Pliensbachien	
			Sinémurien	
		Hettangien		
	TRIAS			

Au Trias et au début de l'Hettangien (Lias inférieur, tableau 1), on assiste à une érosion du socle du Massif Central et les dépôts détritiques ont été formé par un épandage fluvial.

A la fin de l'Hettangien et jusqu'au Sinémurien (Lias inférieur) une transgression marine débute et des vases évaporitiques, puis carbonatées se déposent sous une fine tranche d'eau. Puis la mer devient plus profonde et au Pliensbachien et au Toarcién (Lias moyen), des vases argilo-calcaires se déposent.

Au Dogger et pendant presque tout le Malm, le secteur devient une grande plate-forme marine carbonatée.

A la fin du Jurassique, au Portlandien, la mer devient régressive jusqu'aux alentours de la Bouriane, où il y a création d'un golfe.

Au Crétacé inférieur, tout le Quercy est émergé, ce qui favorise l'érosion des formations carbonatées et provoque une discordance des terrains du Crétacé supérieur avec les terrains du Jurassique.

Au Crétacé supérieur, il se produit une transgression marine provoquant le dépôt de roches carbonatées jusqu'au Campanien où la mer quitte définitivement le Quercy.

Au Tertiaire (Paléocène et Eocène inférieur), la surrection de la bordure nord-est du bassin aquitain provoquée par l'orogénèse pyrénéenne soumet le Quercy à une phase importante d'érosion et de karstification.

A l'Eocène moyen et jusqu'au milieu du Miocène, une nouvelle phase de surrection Pyrénéenne provoque une érosion intense des massifs montagneux dont les débris viennent combler le bassin Aquitain, dans un climat tropical et une subsidence d'ensemble. L'environnement est alors favorable à l'altération des matériaux magmatiques et métamorphiques, libérant une fraction argileuse importante à l'origine des formations molassiques.

Ces molasses bloquent les écoulements du réseau hydrographique, et provoquent la formation de lacs et de vastes étendues d'eau au pied des reliefs karstiques. Cette augmentation du niveau de base provoque la fossilisation partielle du karst.

Au Pliocène et au Quaternaire, un nouveau soulèvement entraîne l'érosion de la faible couverture molassique du Quercy, puis la karstification des massifs calcaires, au nord et au sud.

3.2 METHODOLOGIE UTILISEE POUR DETERMINER L'ORIGINE DE LA CONTAMINATION DES SOURCES PAR LES NITRATES

La recherche de l'origine de la contamination en nitrate des eaux des sources karstiques a été réalisée à l'aide d'une approche géochimique reposant sur l'utilisation des isotopes du milieu (isotopes de l'azote $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, du bore $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$, du strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) couplée à une étude hydrochimique « classique » (éléments majeurs). L'utilisation des systématiques isotopiques en tant que traceurs environnementaux est une voie en plein essor et permet de discerner dans une qualité d'eau globale les principales causes des concentrations élevées en nitrates (Chery et al., 2000, Pauwels et al., 2000 ; Widory et al., 2001 ; Ladouche et al., 2003, Widory et al., 2003). Cette approche vient naturellement en appui à l'approche hydrogéologique (caractéristiques géologiques et hydrogéologiques).

Pour identifier l'origine des teneurs en nitrates des eaux souterraines, quatre campagnes de prélèvement sur 5 systèmes karstiques ont été effectuées entre octobre 2002 et décembre 2003 en contexte de basses eaux, hautes eaux et moyennes eaux.

4. Présentation des secteurs d'étude

4.1. Caractéristiques hydrogéologiques des Causses de Limogne et de Gramat (cf. fig. 2 – Carte géologique schématique du secteur d'étude)

4.1.1. Causse de Limogne

Le Causse de Limogne s'étend au sud de la rivière Lot.

Dans ce secteur, la karstification affecte à des degrés différents tous les horizons du Jurassique supérieur et moyen. Le karst noyé peut alors attendre des profondeurs relativement importantes comme à Lantouy où il est observé à plus de 45 m.

Le karst développé dans ces formations réagit rapidement aux fortes pluviométries, avec activation des trop pleins, et en période de décrue, la vitesse de vidange augmente avec le degré général de karstification.

Une étude réalisée sur l'infiltration dans la zone non saturée, ainsi que sur le tarissement des sources montre que le Causse de Limogne apparaît comme une formation affectée de vides importants, mais de faible porosité secondaire : son faible pouvoir d'emmagasinement en fait ainsi un médiocre réservoir potentiel d'eau.

En période estivale, les faibles réserves cumulées induisent des débits relativement faibles aux exutoires. A l'inverse, de forts gradients hydrauliques peuvent être observés, en fonction de l'architecture géologique et morphologique des réservoirs, et sont fortement inclinés vers le nord-ouest.

4.1.2. Causse de Gramat

Le Causse de Gramat est limité au nord par la Dordogne et par le Célé au sud.

Ce causse est entièrement constitué par les calcaires du Jurassique moyen et supérieur, soit entre l'Aalénien et le Kimméridgien basal, constituant une épaisseur de 400 m environ. L'ensemble de ce corps-couche qui s'appuie sur le Lias et lui-même sur le socle, plonge vers l'ouest avec un faible pendage général de quelques degrés et est recoupé par la surface topographique, offrant ainsi différents types de faciès calcaires à l'altération et à la karstification.

Les rivières Dordogne et Célé/Lot constituent les points bas Nord et Sud du Causse de Gramat : c'est donc dans ces directions que se sont constitués, le cas échéant, les axes de drainage des systèmes karstiques. La ligne de séparation des eaux souterraines entre Dordogne et Célé/Lot est la ligne de séparation des systèmes karstiques de l'Ouyse et du sud du Causse de Gramat.

4.2. Caractéristiques des sources étudiées

4.2.1. Critères de sélection des sources

L'étude porte sur 5 sources karstiques dont :

- 1 source de référence (e. g. sans indice de pollution) permettant d'identifier le fond géochimique naturel du secteur (source d'Anglanat),
- 4 sources atteintes à différents degrés par des pollutions azotées (Font Polémie, Font d'Ente, Nadaillac, Saint Jean de Laur).

Ces sources ont été sélectionnées sur la base de six critères principaux, avec pour objectif d'obtenir un panel de sources représentatives de l'hétérogénéité du système.

Les 6 critères pris en compte sont :

- La qualité des eaux et notamment l'intensité et la répartition des pollutions par les nitrates et les phosphates,
- L'occupation du sol sur le bassin versant et la présence de sources de pollution potentielle,
- Les enjeux associés à ces sources et notamment leur utilisation actuelle ou potentielle (utilisation pour l'AEP, nombre d'habitants desservis, unicité de la ressource, système de secours de la collectivité...),
- Le débit des sources et l'étendue de leur aire d'alimentation,
- Le contexte géologique des sources (karst Jurassique du Quercy ou karst du Crétacé) avec présence ou absence d'un terrain de couverture,
- La qualité des informations disponibles sur ces sources (mesures qualitatives, quantitatives, traçages, rapport hydrogéologiques...)

Les cinq sources sélectionnées présentent les caractéristiques suivantes :

		Anglanat	St Jean de Laur	Font Polémie	Font d'Ente	Nadaillac
Qualité des eaux	Pollution par NO₃⁻	Inexistante (source de référence)	Forte en été	Forte en été et hiver	Très forte en été	Très forte toute l'année
	Pollution par PO₄³⁻	Inexistante (source de référence)	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne à faible
Occupation du sol / Pollutions potentielles		Secteur boisé - Pas d'influence anthropique	Bourg en amont avec assainissement non collectif (puisards)	Cultures + porcherie en amont	Cultures	Cultures + Step de Gourdon
Enjeux associés		Faibles (vu le débit peu important, malgré excellente qualité)	Très faibles (débit peu important et qualité moyenne)	Possibilité d'alimenter le syndicat de Francoules	Alimentation du SIAEP de Peyrilles	Alimentation de la commune de Gourdon
Débits / Aire d'alimentation		Faible (< 5 l/s)	Faible (< 5 l/s)	Moyen (5 < Q < 25 l/s)	Moyen (5 < Q < 25 l/s)	Fort (25 < Q < 80 l/s)
Contexte géologique		Karst du Quercy (Jurassique) - Sans couverture	Karst du Quercy (Jurassique) - Sans couverture	Karst du Quercy (Jurassique) - Sans couverture	Crétacé sous couverture	Crétacé sous couverture
Qualité des informations recueillies		Bonne	Moyenne	Moyenne à mauvaise	Mauvaise	Très bonne

Tableau 2. Critères de sélection des sources karstiques étudiées

Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT)

Chacune de ces sources présente des singularités, notamment de part le type de pollution auxquelles elles sont exposées. Cette répartition permettra d'étudier l'origine des pollutions nitratées et plus globalement leur processus de minéralisation de ces eaux, dans des contextes différents et représentatifs du milieu karstique local.

Ces sources sont localisées en figure 1, page 16.

Fig. 1 – Carte de localisation des sources karstiques étudiées

Fig. 2 – Carte géologique schématique du secteur d'étude

4.2.2. Descriptif des points d'eau

Les descriptifs des cinq sources sélectionnées sont donnés dans les fiches ci-après.

SOURCE N°1 : ANGLANAT
Code BSS : 08577X0032/HY

Commune : SAULIAC/ CELE	Bassin : CELE
Coordonnées L2E : X : 548 961,7 - Y : 1 946 614,3 – Z : 143	Type de source / Géologie : Emergence – Source karstique des Causses du Quercy (Jurassique sans couverture)
Entité hydrogéologique : QUERCY	Débit : < 5 l/s
Qualité des eaux : Source de référence NO ₃ ⁻ : Excellente – Stable PO ₄ ³⁻ : Excellente – Stable	Utilisation : Néant
Occupation du sol : Bois	Qualité de l'information : Bonne

Fig 3. et 4. – Photographies de la source d'Anglanat

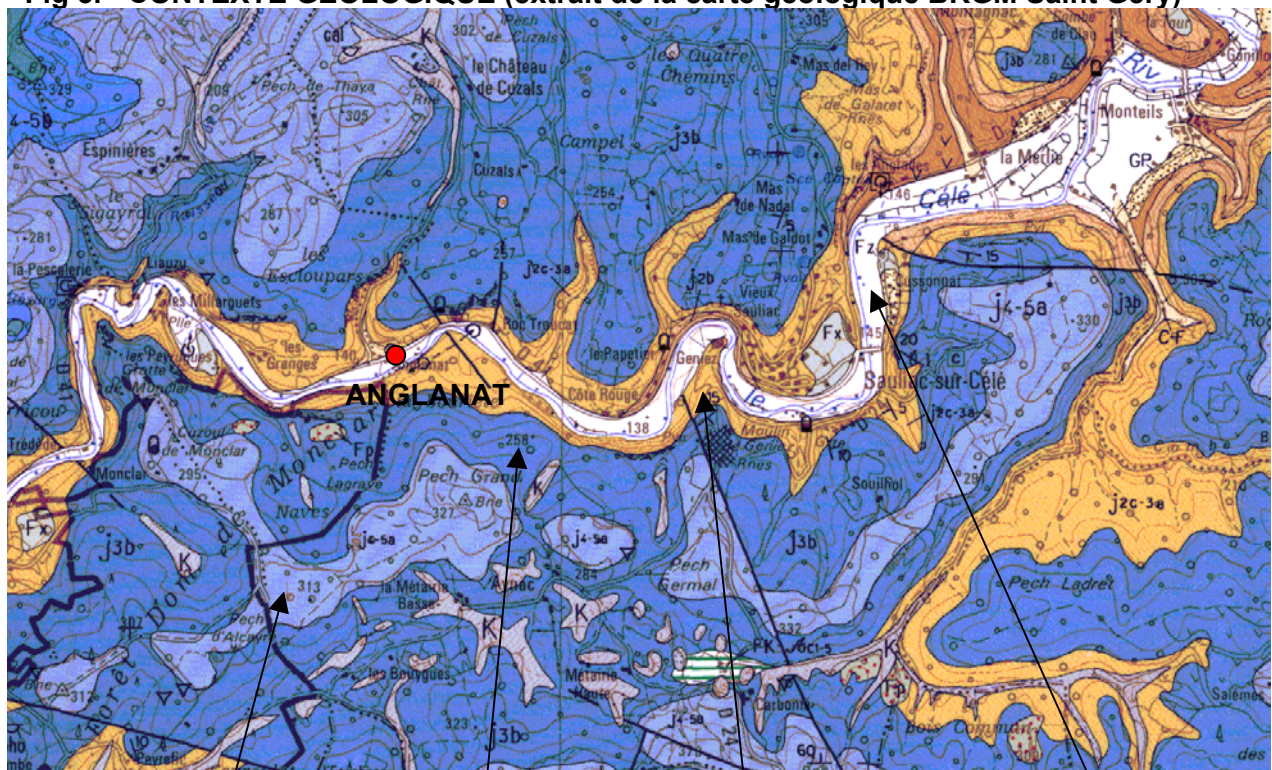


Fig 3



Fig 4

Fig 5. - CONTEXTE GEOLOGIQUE (extrait de la carte géologique BRGM Saint Géry)



BRGM/RP- 53114-FR

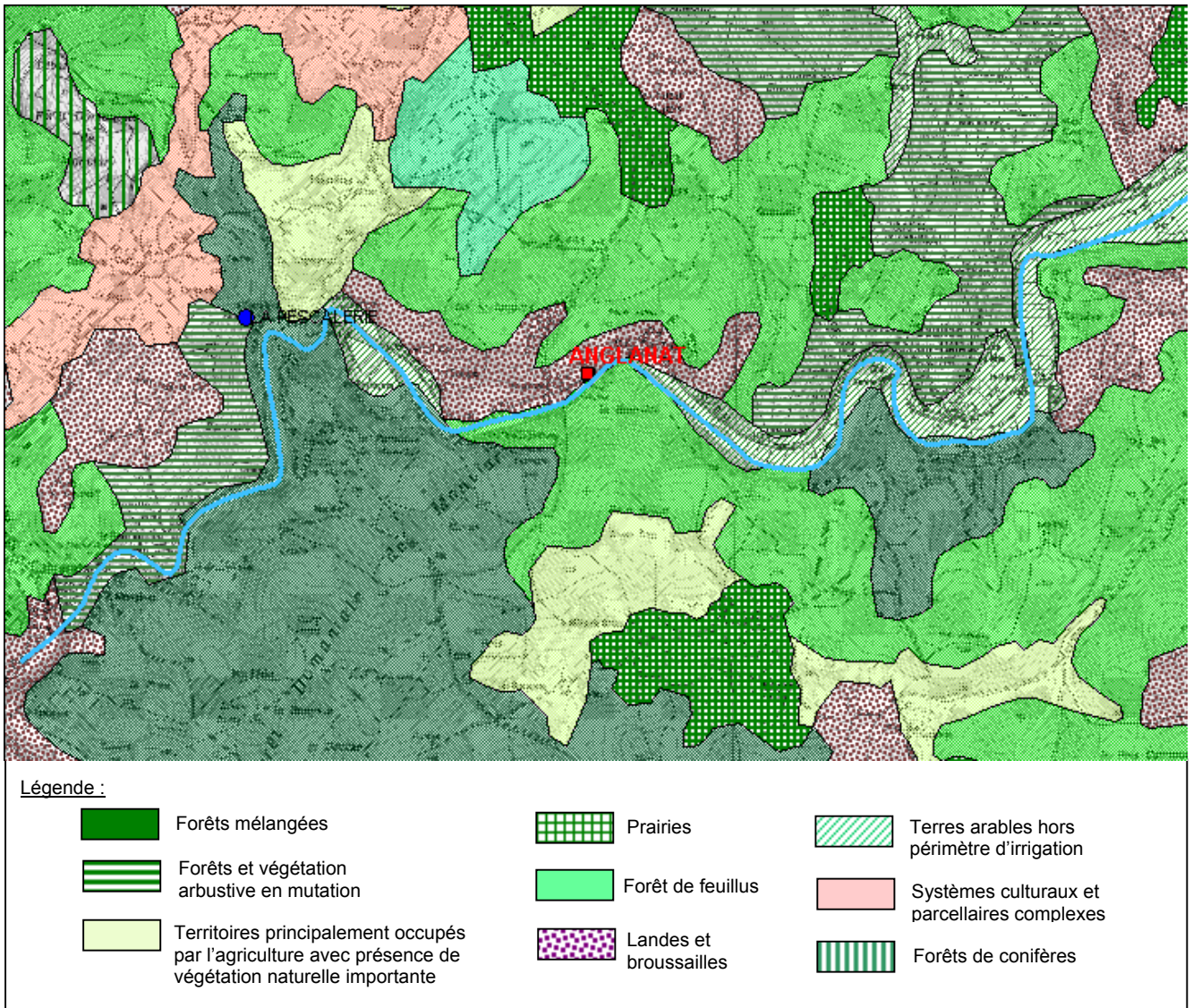
J4-5a : Oxfordien ?
(formations de St Géry) :
calcaires oolithiques massifs

J3b : Callovien ? Calcaires
micritiques en bancs

J2c-3a : Bathonien terminal et Callovien
basal ? (formations de Rocamadour) :
calcaires oolithiques surmontés de
marnes et calcaires laminés

Fz : Alluvions récentes des
basses plaines

Fig 6. - OCCUPATION DU SOL DANS LE SECTEUR DE LA SOURCE D'ANGLANAT
(d'après le Corinne Land Cover)



Géologie :

La Fontaine d'Anglanat surgit au milieu de colluvions de pentes encastrées dans une vallée sèche située sur la rive droite du Célé. Cette vallée commence à se développer au niveau du Château de Cuzals, dans les calcaires oolithiques à subcraieux de l'Oxfordien (Formation de St Gély), où elle est recouverte des cailloutis à matrice argilo-sableuse (de 1 à 20 m ?), caractéristiques des matériaux de remplissage du Causse de Gramat.

Cette vallée sèche se poursuit dans les formations du Bathonien terminal et du Callovien basal (formation de Rocamadour) constituées de marnes, calcaires et calcaires oolithiques et micritiques. Au niveau du lieu-dit les Escloupars, cette vallée présente un escarpement important témoignant d'une fracturation favorable aux circulations souterraines.

Hydrogéologie :

Bien qu'aucun traçage n'ait été effectué sur cette source, il semble que le bassin versant hydrogéologique soit drainé par cette vallée, dont la source d'Anglanat pourrait constituer l'exutoire.

La présence d'une faille de direction NW/SE passant à proximité de la grotte (et de la source) de Roc Troucat laisse penser qu'une bonne partie des écoulements souterrains de ce bassin sont dirigés plus à l'est, en direction de Roc Troucat.

Il paraît difficile de délimiter le bassin d'alimentation de cette source à partir des seules données géologiques et hydrogéologiques énoncées ci-dessus. Cependant, au vu de ces informations et du débit de la source estimé lors des campagnes de prélèvement (environ 5 l/s en avril 2003), le bassin d'alimentation ne devrait pas dépasser 2 km².

Cette source est liée à un exutoire de crue en falaise, qui constitue probablement son trop plein. Celui-ci est situé à environ 80 m avant la fontaine d'Anglanat, à 7 m au-dessus de la route D41. Cette cavité a été explorée par des spéléologues, notamment en août 2000, où un schéma du karst a pu être réalisé (cf. schéma). Ce conduit karstique, d'un développement total de 810 m, dont 370 de siphon, débute par une rivière suspendue (succession de gours formant une retenue d'eau), donnant sur une longue zone siphonnante, terminée par une galerie exondée. L'écoulement n'y est pas pérenne, et en période de crue, il semblerait que la partie amont soit alimentée uniquement par les cheminées.

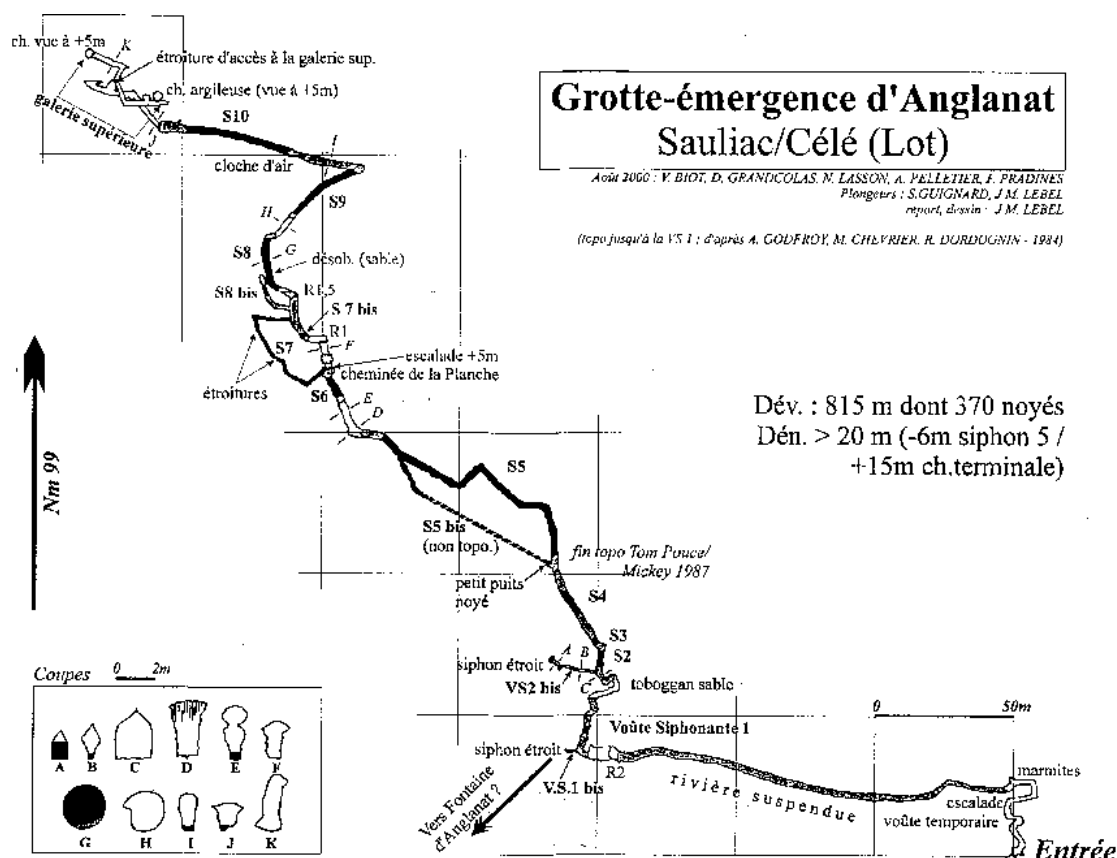


Fig. 7 – Schéma spéléologique de la Grotte-émergence d'Anglanat

Hydrochimie et occupation des sols :

La source d'Anglanat présente une eau d'excellente qualité, notamment pour les nitrates, dont les concentrations dépassent rarement 2 mg/l et pour les phosphates, inférieurs à 0,1 mg/l.

Le bassin versant hydrographique fait en effet apparaître une occupation du sol majoritairement constituée de landes et forêts. Quelques contaminations bactériologiques ont cependant été constatées et les teneurs en CO₂ dissous semblent assez importantes (karstification active).

SOURCE N°2 : SAINT JEAN DE LAUR
Code BSS : 08821X0015/HY

Commune : ST JEAN DE LAUR	Bassin : LOT
Coordonnées L2E : X : 560 016,9 - Y : 1 935 890,9 – Z : 290	Type de source / Géologie : Emergence – Source karstique des Causses du Quercy (Jurassique sans couverture)
Entité hydrogéologique : QUERCY	Débit : < 5 l/s
Qualité des eaux : Source contaminée NO ₃ ⁻ : > 25 mg/l en été PO ₄ ³⁻ : > 0,5 mg/l en été et hiver	Utilisation : Néant
Occupation du sol : Bourg avec assainissement autonome (puisards)	Qualité de l'information : Moyenne



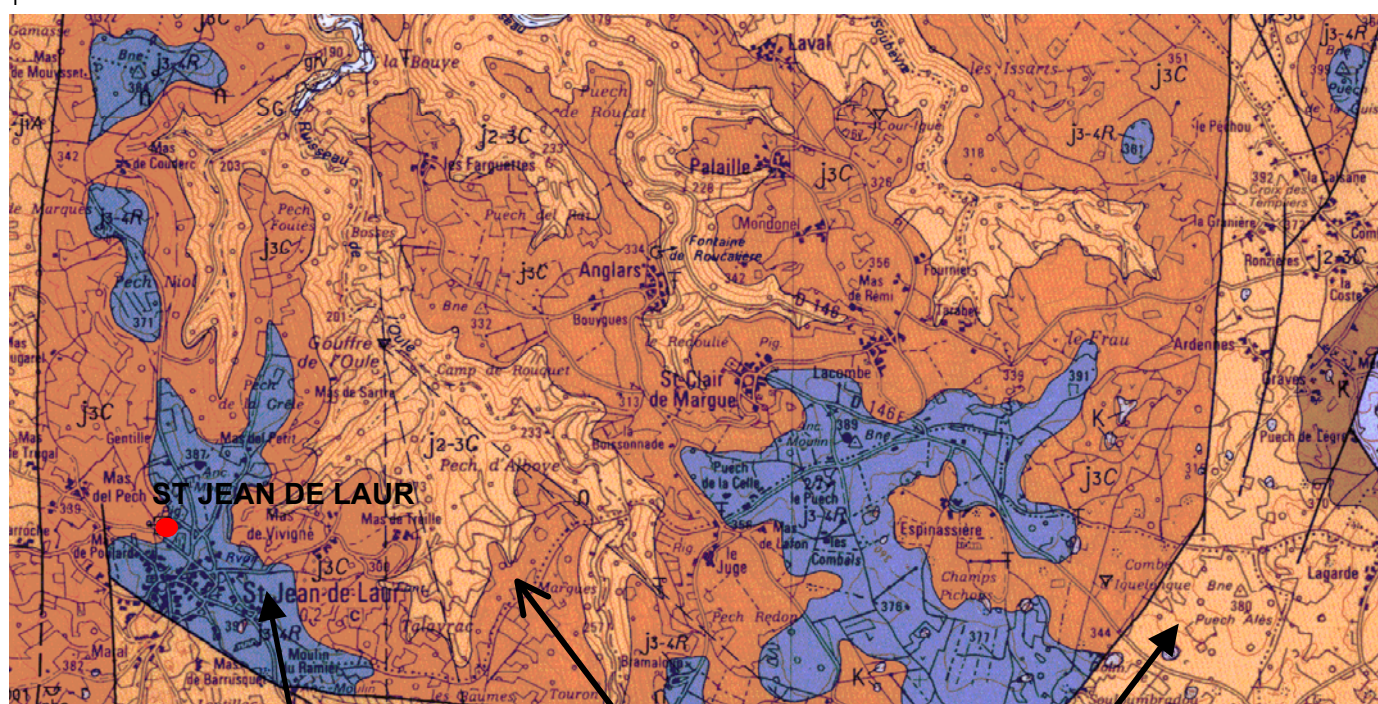
Fig. 8 et 9 – Photographies de la source de Saint Jean de Laur



Fig 8

Fig 9

Fig 10. - CONTEXTE GEOLOGIQUE (extrait de la carte géologique BRGM Villefranche)



Formation de Rocamadour :
Bathonien > et Callovien < -
Calcaires oolithiques et micritiques

Formation de Cajarc – St Chels :
Bathonien moyen et > - Calcaires à lamines,
marnes et brèches évaporitiques

Formation de Cajarc – Larnagol :
Bajocien > et Bathonien < - Calcaires
et calcaires argileux

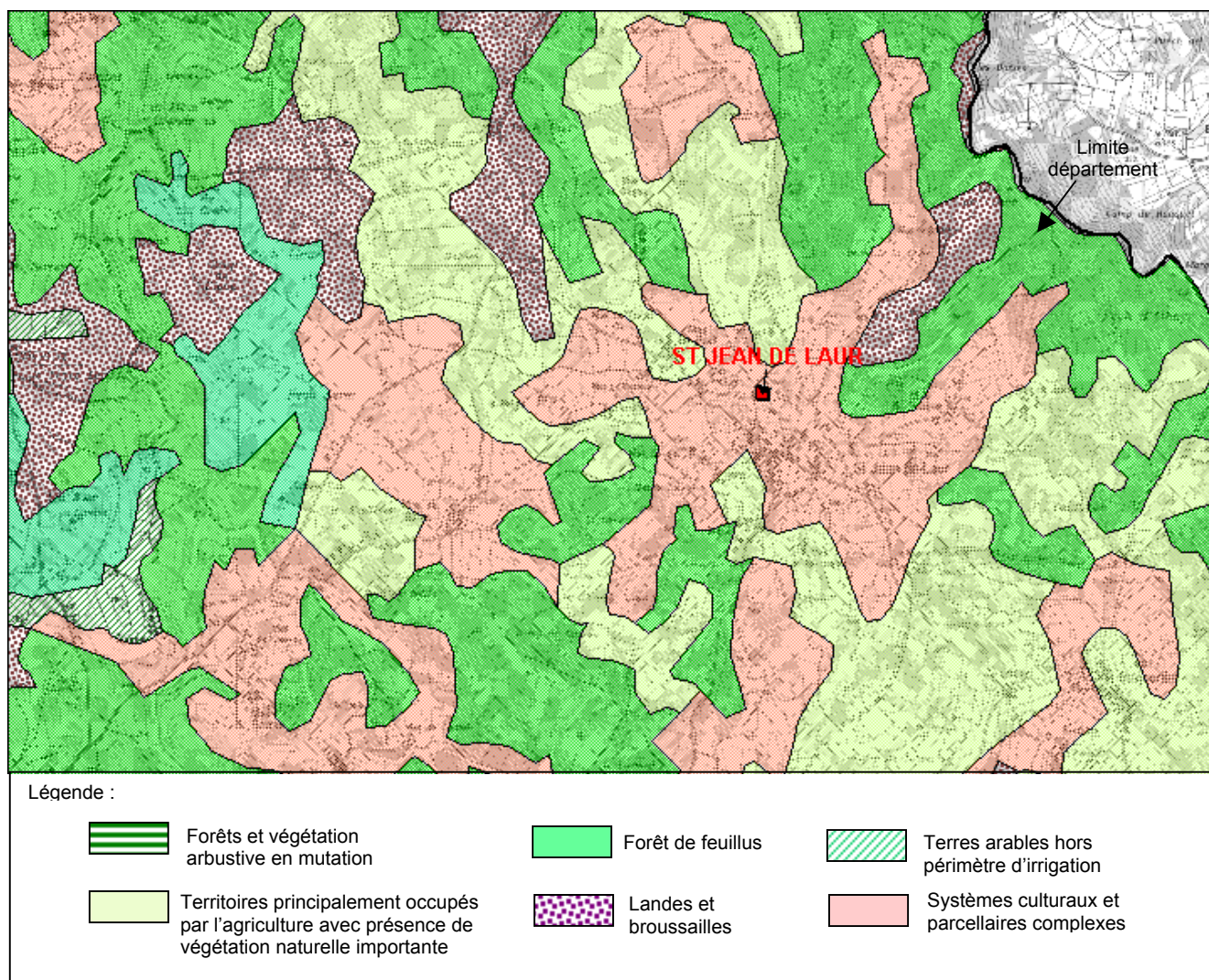
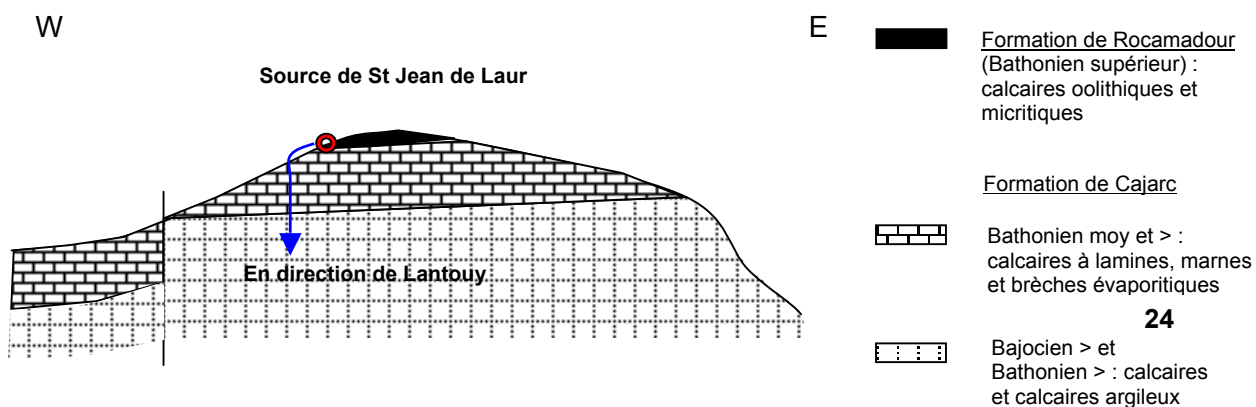


Fig. 11 - OCCUPATION DU SOL DANS LE SECTEUR DE LA SOURCE DE ST JEAN DE LAUR (d'après le Corinne Land Cover)

Géologie :

La source de Saint Jean de Laur jaillit à la base d'une falaise rocheuse du Bathonien supérieur (Dogger), constituée de calcaires en plaquettes et en dalles, surmontés de massifs calcaires de teinte grisâtres, le tout coupé de joints de stratifications et de diaclases, favorables aux écoulements karstiques.

Coupe schématique de direction E-W passant par la source de St Jean de Laur :



Hydrogéologie :

Cette source appartient au même bassin versant hydrogéologique que le gouffre de Lantouy. Le système aquifère concerné se développe dans les formations calcaires de Cajarc (Bajocien supérieur à Bathonien supérieur – Dogger – Jurassique) et dans les calcaires oolithiques et dolomitiques de la formation d'Autoire (Bajocien inférieur).

Selon la carte géologique au 1/50 000^e, la source se situe à la limite entre la formation de Rocamadour, disposée en lentille résiduelle sur le bourg de St Jean de Laur et la formation de Cajarc, et se situe également à 250 m d'une faille de direction N/S. Selon la bibliographie, cette configuration laisse envisager deux hypothèses sur l'origine des eaux d'alimentation et les mécanismes d'écoulement :

- **Hypothèse 1** (Rapport géologique de 1962 – Raymond Mirouse) :
Le système karstique est constitué de fissures béantes au tracé extrêmement irrégulier. Toutefois, certains détails structuraux particuliers sont susceptibles de favoriser le drainage suivant de petits accidents de détail, ou le long du plan axial de déformations de faibles amplitudes. C'est le cas de la Fontaine de St Jean de Laur, dont l'émergence se situe au niveau d'une zone broyée, suivant l'axe d'un petit pli synclinal faillé, orienté lui-même schématiquement en direction N-S. Ce mode d'alimentation et de circulation n'assure pas un débit très régulier : en été la source peut se tarir, alors qu'en période de hautes eaux, le débit peut s'accroître brusquement en favorisant l'apparition de turbidité.
- **Hypothèse 2** (André Tarrisse – Thèse de 1974) : La source de Saint Jean de Laur restitue à l'air libre les eaux d'un aquifère perché, installé dans les calcaires fracturés du Bathonien supérieur (formations de Rocamadour). Les écoulements émis en surface vont secondairement rejoindre l'aquifère profond du bassin de Lantouy (trop plein du lavoir rapidement infiltré). Dans ce cas, on se trouverait en présence de deux aquifères superposés, avec accumulation temporaire dans l'aquifère supérieur. Cependant, la relation entre ces deux aquifères reste à démontrer par une opération de traçage.

En novembre 1958, le débit de la source a été évalué à 1,2 l/s et en période de hautes eaux, le débit ne semble guère dépasser 50 l/s. Son bassin d'alimentation reste donc de taille modeste, ce qui permet de s'orienter vers l'hypothèse n°2.

Hydrochimie et occupation du sol :

L'eau de cette source présente des problèmes de contamination par les nitrates, avec des teneurs dépassant 25 mg/l.

En se reportant au bassin versant hydrographique, on constate que le bassin englobe la quasi-totalité du bourg de la commune, assainie par des dispositifs autonomes, avec une majorité de puisards. Le reste du secteur présente des pentes peu accusées et couvertes d'herbage et de landes.

Les fortes teneurs en nitrates, en bore et en orthophosphates observées sur la source pourraient ainsi provenir d'une contamination par des eaux usées domestiques, infiltrées directement dans le karst.

SOURCE N°3 : FONT POLEMIE
Code BSS : 08576X0022/HY

Commune : CABRERETS	Bassin : VERS - LOT
Coordonnées L2E : X : 538 936,12 - Y : 1 949 879,19– Z : 190	Type de source / Géologie : Perte / Résurgence – Source karstique des Causses du Quercy (Jurassique sans couverture)
Entité hydrogéologique : QUERCY	Débit : 5 – 25 l/s
Qualité des eaux : Source contaminée NO ₃ ⁻ : > 25 mg/l en été PO ₄ ³⁻ : > 0,1 mg/l toute l'année	Utilisation : Possibilité d'alimenter le SIAEP de Francoules
Occupation du sol : Cultures + porcherie en amont	Qualité de l'information : Moyenne à mauvaise



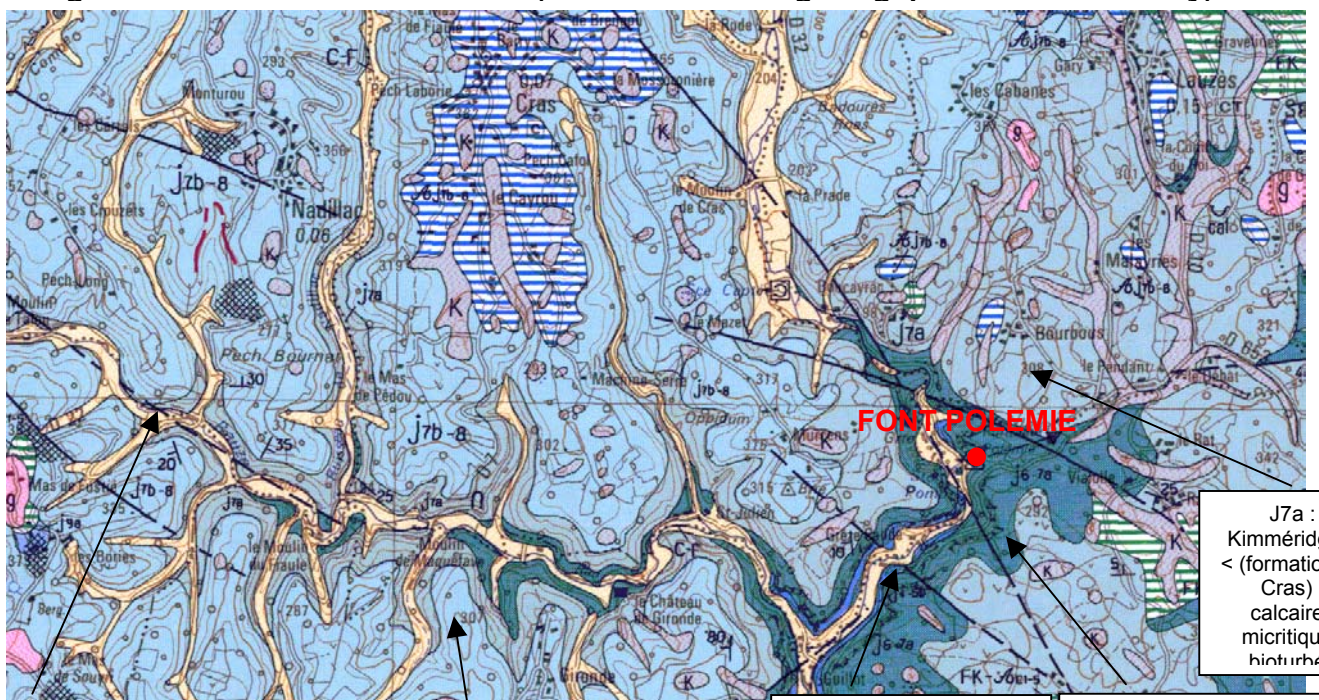
Fig 12



Fig 13

Fig. 12 et 13 – Photographies de la source de Font Polémie

Fig. 14 - CONTEXTE GEOLOGIQUE (extrait de la carte géologique BRGM Saint Gély)



J7a :
Kimméridgien
< (formation de
Cras) :
calcaires
micritiques
hémihérissés

C-F : colluvions et alluvions
des vallées secondaires

J7b-8 : Kimméridgien > :
alternances marno-calcaires

J4-5b : Oxfordien ?
(formation de Vers) :
calcaires micritiques

J6-7a : Oxfordien
< Kimméridgien <
(formation de Cras :
brèches polygéniques

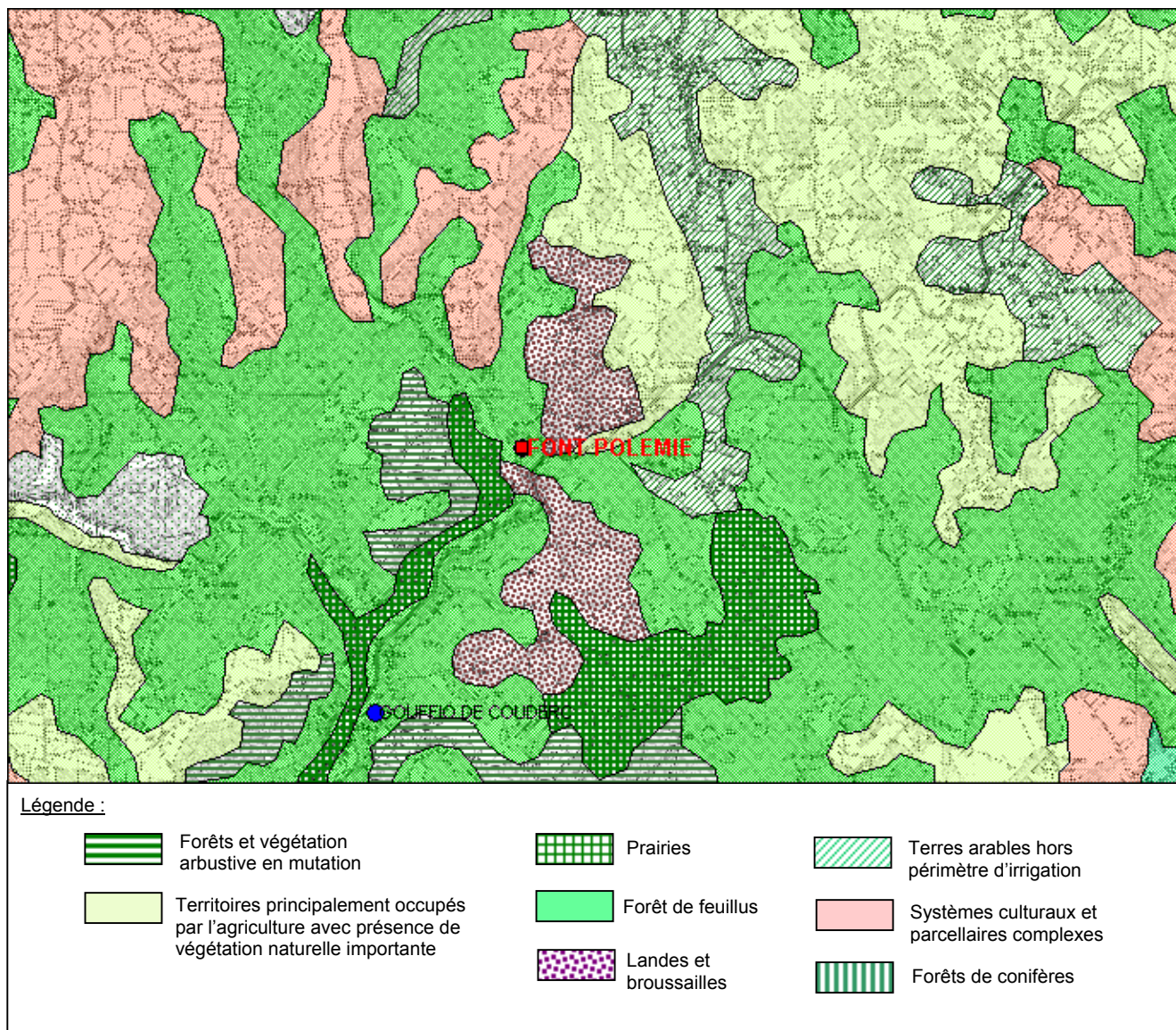


Fig. 15 - OCCUPATION DU SOL DANS LE SECTEUR DE LA SOURCE DE FONT POLEMIE

(d'après le Corinne Land Cover)

Géologie et hydrogéologie :

La source de Font Polémie est une résurgence de type vauclusienne (développement des conduits karstiques en profondeur sous le niveau d'étiage de la source) située au pied d'une falaise calcaire du Pech de Bourbou, situé sur la rive gauche du ruisseau de Vers, affluent en rive droite du Lot. Cette résurgence alimente un lavoir dont les écoulements sont ensuite repris dans une station de pompage pour l'alimentation en eau potable du secteur.

La source de Font Polémie est une petite résurgence dont la vasque à peu près circulaire, présente un diamètre d'environ 2 m et une profondeur de 5,5 m. Au-dessus de la vasque, une petite galerie se développe sur une trentaine de mètres et se termine par une étroiture (reconnaissance du G.S.Q en 1959).

Un essai de débit réalisé en 1959 par Jean Fantangié dans la vasque de Font Polémie a permis d'observer une baisse du niveau d'eau au niveau du gouffre de Pendant. Par la suite, une équipe de spéléologue découvre en bas du gouffre du Pendant un ruisseau souterrain tari. Une reconnaissance du siphon aval du gouffre du Pendant permet alors d'explorer 600 m de galerie vers l'aval et une centaine de mètres vers l'amont. L'exploration se termine par un siphon noyé, alimenté par un affluent souterrain venant de l'ouest, à environ 350 m en ligne droite de la source de Font Polémie (cf. schéma ci-dessous). Le débit de cet affluent reste inférieur à celui de la source de Font Polémie, ce qui laisse supposer une arrivée d'eau adjacente à la galerie principale, dénoyée en dehors des périodes de crue.

Ces informations indiquent qu'au moins une partie des écoulements provient de l'est de la source. La présence d'une faille courbe de direction WNW/ESE peut laisser supposer que des écoulements karstiques se sont également développés dans cette direction.

Sur la base de ces éléments, il est possible d'affirmer que la source de Font Polémie constitue l'un des exutoires de l'aquifère karstique développé dans la formation de Cras et de Vers (Oxfordien à Kimméridgien inférieur). La formation de Cras est constituée de brèches à cailloux noirs surmontés par des brèches polygéniques (sparites, calcaires, micrites sur 5 à 90 m d'épaisseur) à éléments hétérométriques dans un ciment sparitique. Au sommet de la formation, le faciès évolue vers une brèche monogénique, puis vers un calcaire micritique morcelé par un réseau de fissures à remplissage sparitique, où se développe l'essentiel du karst. La base de cette formation présente une porosité de fissures importante.

Ce niveau repose sur la formation de Vers représentée par un ensemble de brèches et poudingues polygéniques englobés dans une matrice sparitique avec parfois des lits d'argiles vertes ou grises.

Cette formation présente une perméabilité assez faible pour constituer le mur de l'aquifère karstique sus-jacent.

Le débit observé au niveau de la source varie de 7 l/s (04/10/19973) à 25 l/s (08/12/1966), avec une valeur moyenne comprise entre 10 et 15 l/s.

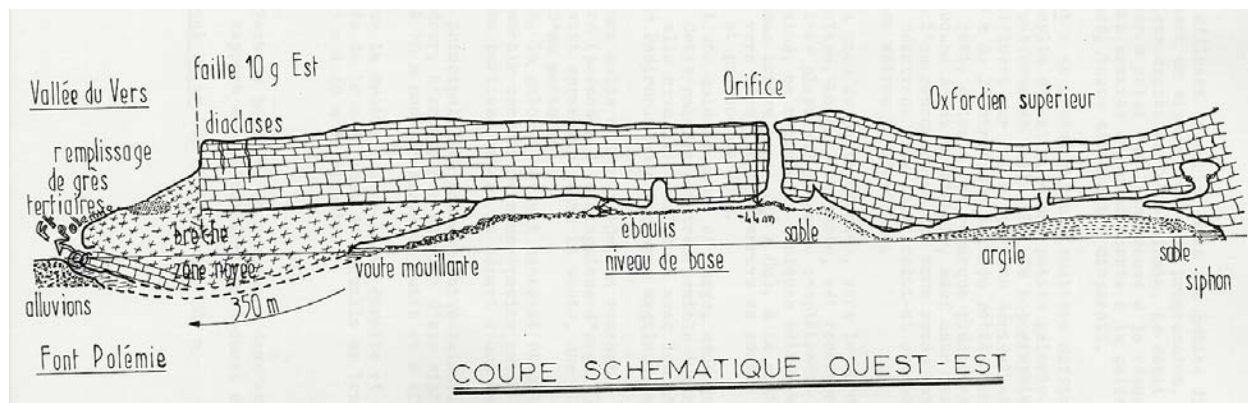


Figure extraite du Bulletin n°15 du Groupe Spéléologique du Quercy. G. Astruc - Jan-Dec 1973

Hydrochimie et occupation du sol :

L'eau de la source de Font Polémie présente des teneurs en nitrates qui peuvent dépasser les 26 mg/l et ainsi qu'une turbidité chronique.

L'amont immédiat de la source est occupé par des landes, broussailles et forêts de feuillus, mais une bande de terrains cultivés vient s'insérer entre Font Polémie et l'Igue de Pendant, pour remonter sur le Pech de Bourbou. Par ailleurs, on note la présence d'une porcherie à proximité de l'Igue de Pendant, pour lequel une relation hydraulique avec la source de Font Polémie a été démontrée par traçage (Fantangié F., 1953 – Inventaire des cavités du Lot – B.S.E.L).

La turbidité des eaux est un phénomène assez classique en région karstique, qui survient lors des périodes de crues, soit par remise en suspension des particules décantées dans des siphons ou cavités karstiques, soit par ruissellement direct depuis la surface. Dans le cas de la source de Font Polémie, ces matériaux argileux peuvent provenir du lessivage d'altérites colmatant les gouffres et dolines, ou du placage sidérolithique.

SOURCE N°4 : FONT D'ENTE
Code BSS : 08328X0001/HY

Commune : PEYRILLES	Bassin : DORDOGNE
Coordonnées L2E : X : 525 001,16 - Y : 1 960 784,18 – Z : 190	Type de source / Géologie : Emergence – Source karstique (Crétacé avec couverture)
Entité hydrogéologique : AGENAIS ET QUERCY	Débit : 5 – 25 l/s
Qualité des eaux : Source contaminée NO ₃ ⁻ : > 30 mg/l en été PO ₄ ³⁻ : > 0,1 mg/l toute l'année	Utilisation : Alimentation du SIAEP de Peyrilles
Occupation du sol : Cultures	Qualité de l'information : Mauvaise



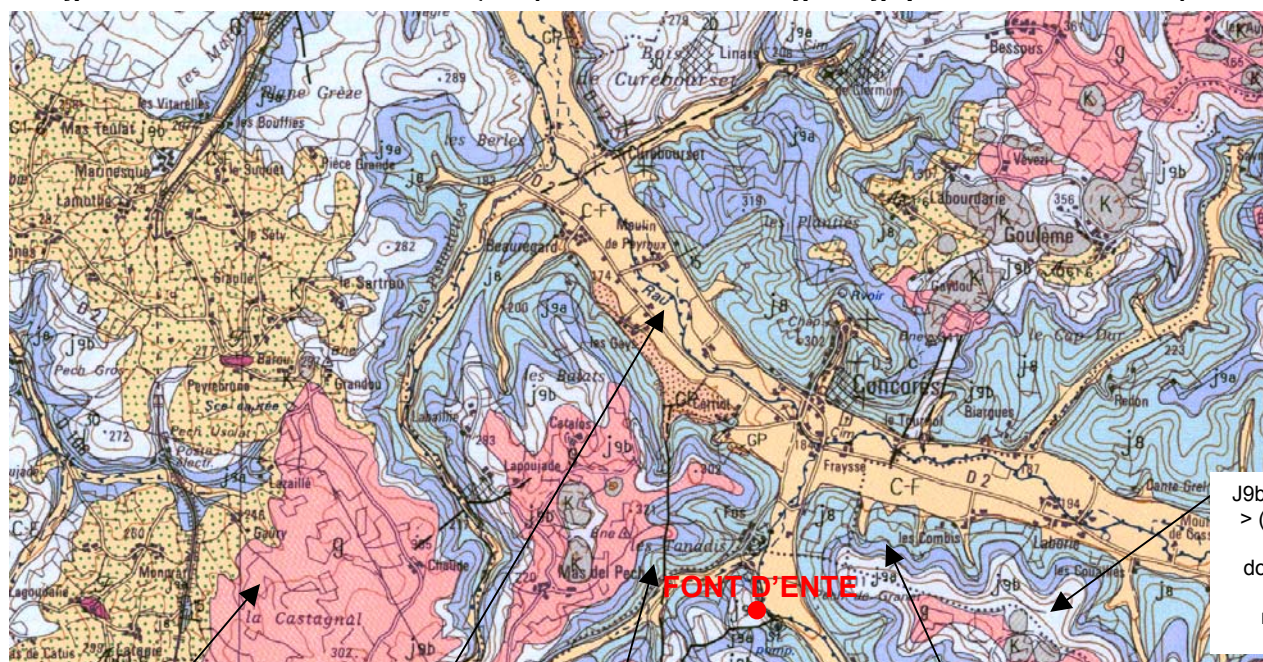
Fig. 16

Fig. 16 et 17 : Photographies de la source de Font d'Ente



Fig. 17

Fig. 18 - CONTEXTE GEOLOGIQUE (extrait de la carte géologique BRGM Gourdon)



J9b : Portlandien > (formation de Cazals) : dolomicrites et calcaires micritiques

Oligocène : galets et graviers

C-F : colluvions et alluvions des vallées secondaires

J8 : Kimméridgien > (formation de Francoulès) : alternance marno-calcaire

J9a : Portlandien < (formation de Peyrilles) : calcaires micritiques en petits bancs

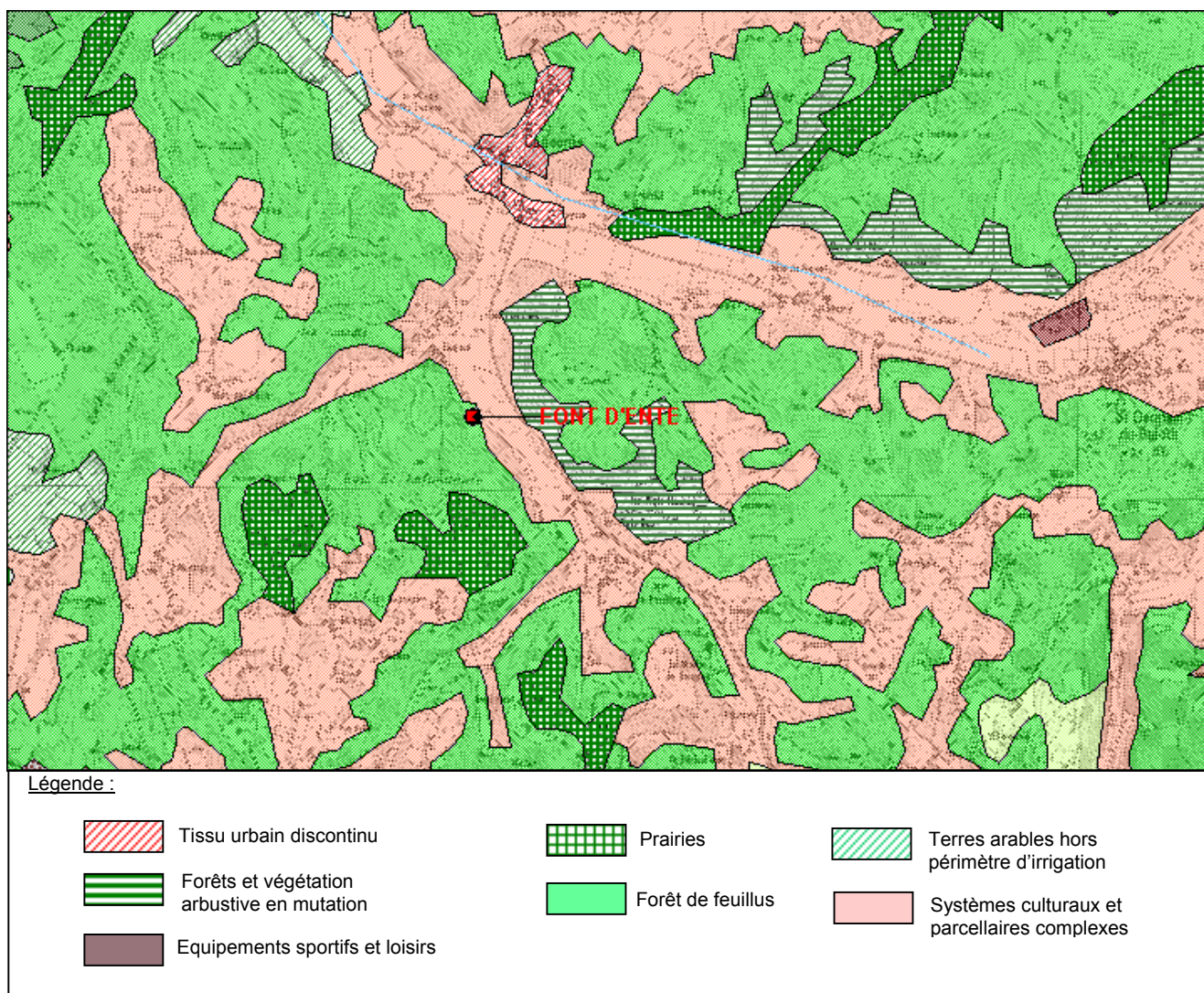


Fig. 19 - OCCUPATION DU SOL DANS LE SECTEUR DE LA SOURCE DE FONT D'ENTE

(d'après le Corinne Land Cover)

Géologie :

La source de Font d'Ente est située dans la vallée de Peyrilles, au nord-nord-ouest du village et sur le versant sud-ouest d'une colline.

Les eaux sont captées, au-dessous d'un mince placage superficiel de castine, dans le sommet du Kimmeridgien supérieur, constitué de calcaires légèrement marneux disposés en bancs décimétriques. Cette roche est hachée de diaclases orientées sud ouest-nord est, favorables aux écoulements karstiques. Ces calcaires reposent sur des marnes kimmeridgiennes plus imperméables et sont surmontés, sur toute la partie supérieure du versant, par des calcaires micritiques du Portlandien (formation de Peyrilles) disposés en petits bancs (20 à 30 m d'épaisseur).

Le plateau des Cabrairies est recouvert par des placages de sables et d'argiles sidérolithiques, principalement développés dans le secteur méridional cultivé.

Hydrogéologie :

La source de la Font d'Ente correspond à l'exurgence d'un système karstique ouvert dans les calcaires du Portlandien et du Kimméridgien sommital, à la faveur de nombreuses fissures (diaclasses, plans de stratification) qui découpent la roche. Le mur de l'aquifère est constitué par les niveaux marneux du Kimméridgien supérieur. L'origine de l'alimentation de ce système aquifère provient des infiltrations de pluie au niveau du plateau des Cabrairies et du versant sud ouest de la vallée de Peyrilles. Une petite partie de ces eaux est emmagasinée dans la porosité matricielle du Sidérolithique et l'essentiel s'infiltré rapidement dans le réseau karstique développé dans le Portlandien et le Kimméridgien. Les eaux reviennent à la surface lorsque le plan de contact marnes-calcaires est recoupé par la surface topographique (source d'affleurement).

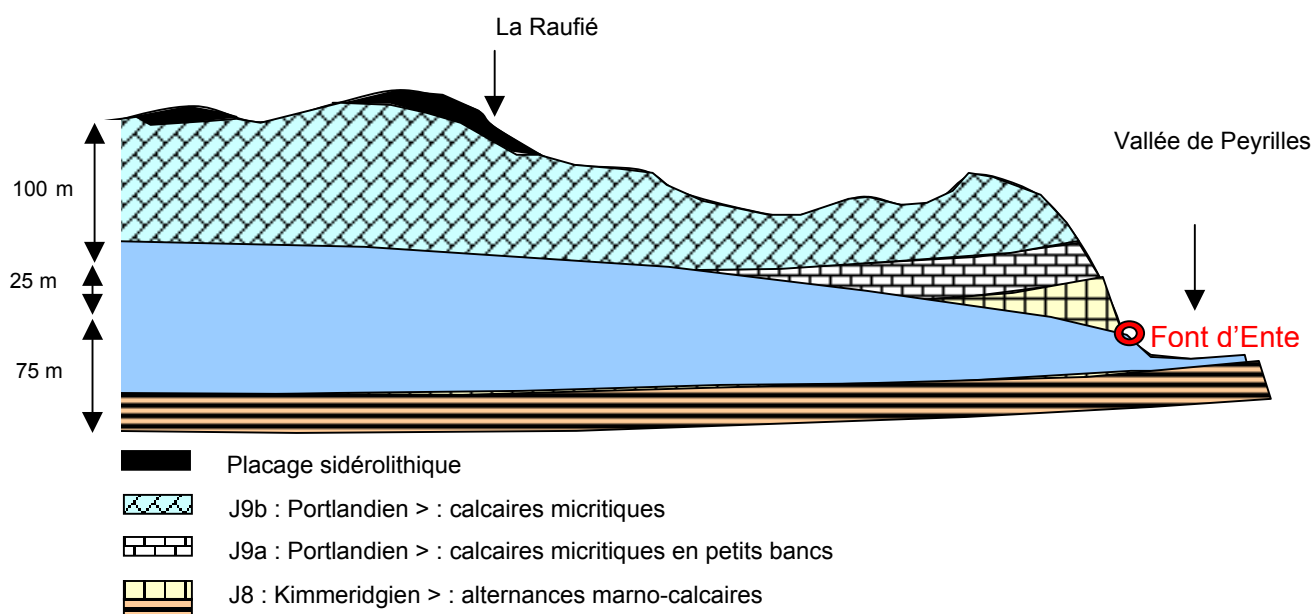


Fig. 20 - Coupe géologique schématisée de direction sud-sud-ouest/nord-nord-est, passant par le captage et la Raufi (échelle des hauteurs dilatée)

Le débit moyen de la source à l'étiage est d'environ 7-8 l/s mais peut descendre à 3 l/s (mesure du 25/10/1973) et atteindre 15 l/s en période de hautes eaux. Par ailleurs, la part des eaux stockées dans le Sidérolithique permet d'assurer une réserve favorable au maintien d'un écoulement, même faible, en période d'étiage.

En fonction de ces informations et de la géologie locale, on peut supposer que le bassin d'alimentation du captage se développe au sud/sud-ouest du captage, sur une superficie d'environ 1,5 km². Par ailleurs, la présence d'une faille d'orientation sud-ouest/nord-est à l'ouest du captage doit canaliser une partie des écoulements du bassin versant en direction du captage.

Bassin d'alimentation potentiel (d'après la topographie et la géologie) :

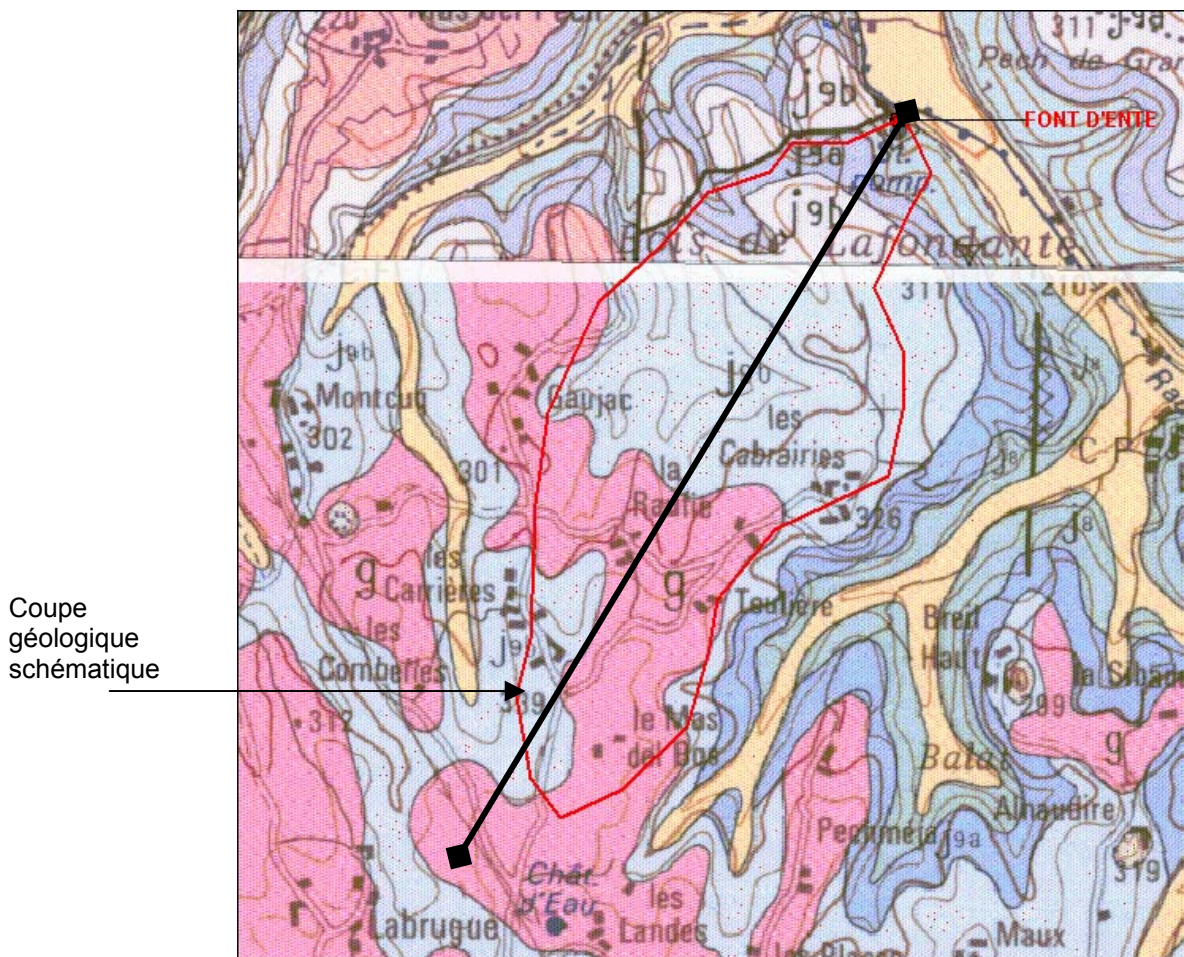


Fig. 21 – Bassin versant d'alimentation supposé de la source de Font d'Ente

Hydrochimie et occupation du sol :

La source de Font d'Ente présente des problèmes de contamination par les nitrates (jusqu'à 30 mg/l) et en octobre 2002, de fortes teneurs en Strontium 98 µg/l ont été détectées.

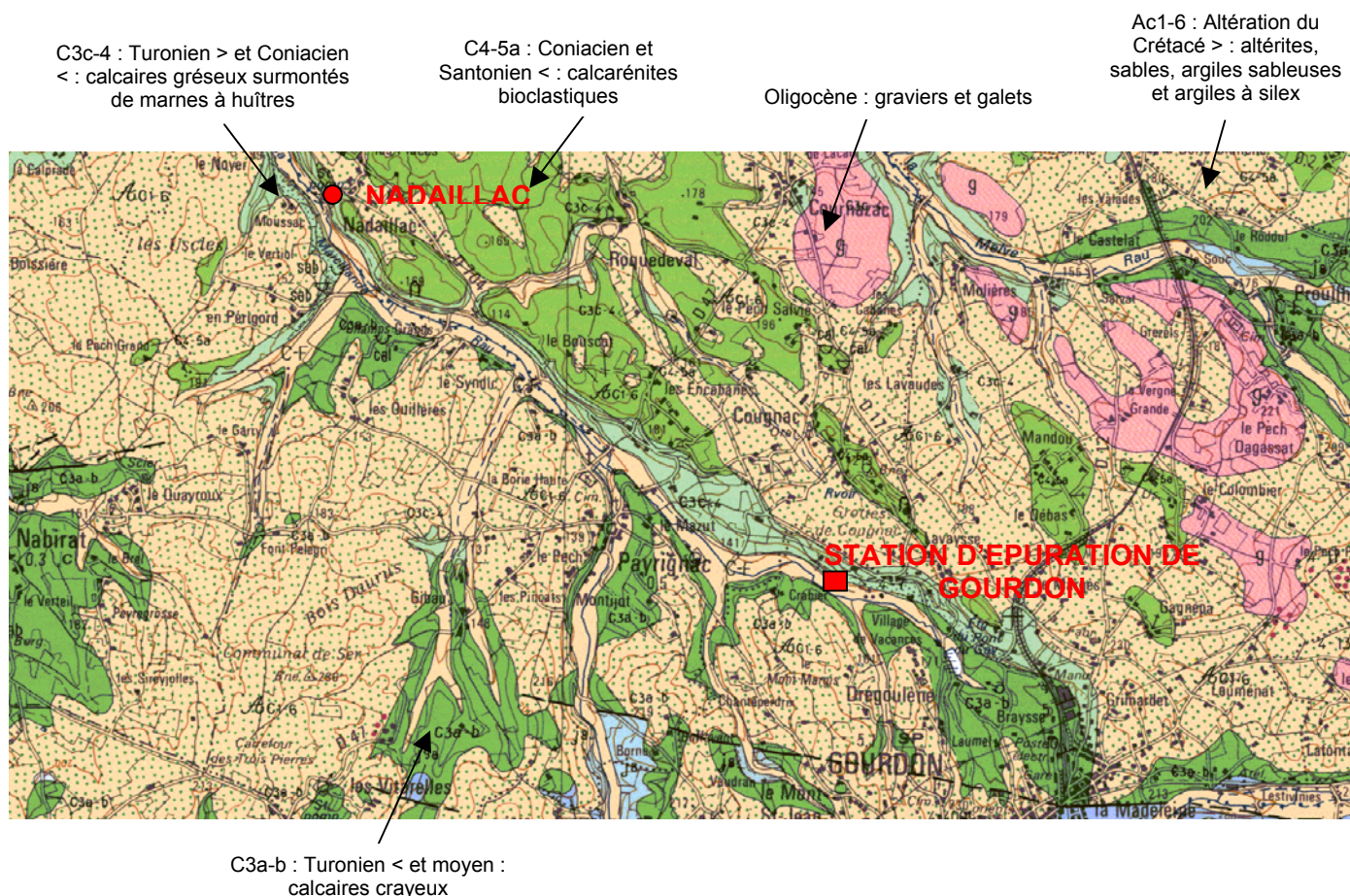
Au-dessus et au sud-ouest du captage se développe un versant boisé (bois de Lafondante), à pente moyenne de 25° et dénivelé de 50 à 60 m, jusqu'au vaste plateau des Cabrairies. Ce plateau, bien que recouvert par des landes et des bois au droit du captage, présente de nombreuses cultures dans sa partie méridionale, notamment autour des fermes de Gaujac, les Carrières, la Raufié, la Plaine et les Cabrairies, à environ 1000-1500 m au sud-ouest et au sud du captage. A 40 m au-dessus du captage, une combe sèche, orientée sud sud ouest/nord-nord-est, entaille le versant sur 200 environ et accueille également des cultures.

La contamination des eaux par les nitrates devrait donc provenir pour l'essentiel de l'activité agricole du plateau et de la combe sèche.

SOURCE N°5 : NADAILLAC
Code BSS : 08323X0201/HY

Commune : PAYRIGNAC	Bassin : DORDOGNE
Coordonnées L2E : X : 519 957,22 - Y : 1 975 506 – Z : 130	Type de source / Géologie : Emergence – Source karstique (Crétacé avec couverture)
Entité hydrogéologique : AGENAIS ET QUERCY	Débit : 25 – 80 l/s
Qualité des eaux : Source contaminée NO ₃ ⁻ : > 30 mg/l toute l'année PO ₄ ³⁻ : > 0,1 mg/l en été et hiver	Utilisation : Alimentation de la commune de Gourdon
Occupation du sol : Cultures + Station d'épuration de Gourdon	Qualité de l'information : Très bonne

Fig. 22 - CONTEXTE GEOLOGIQUE (extrait de la carte géologique BRGM Gourdon)



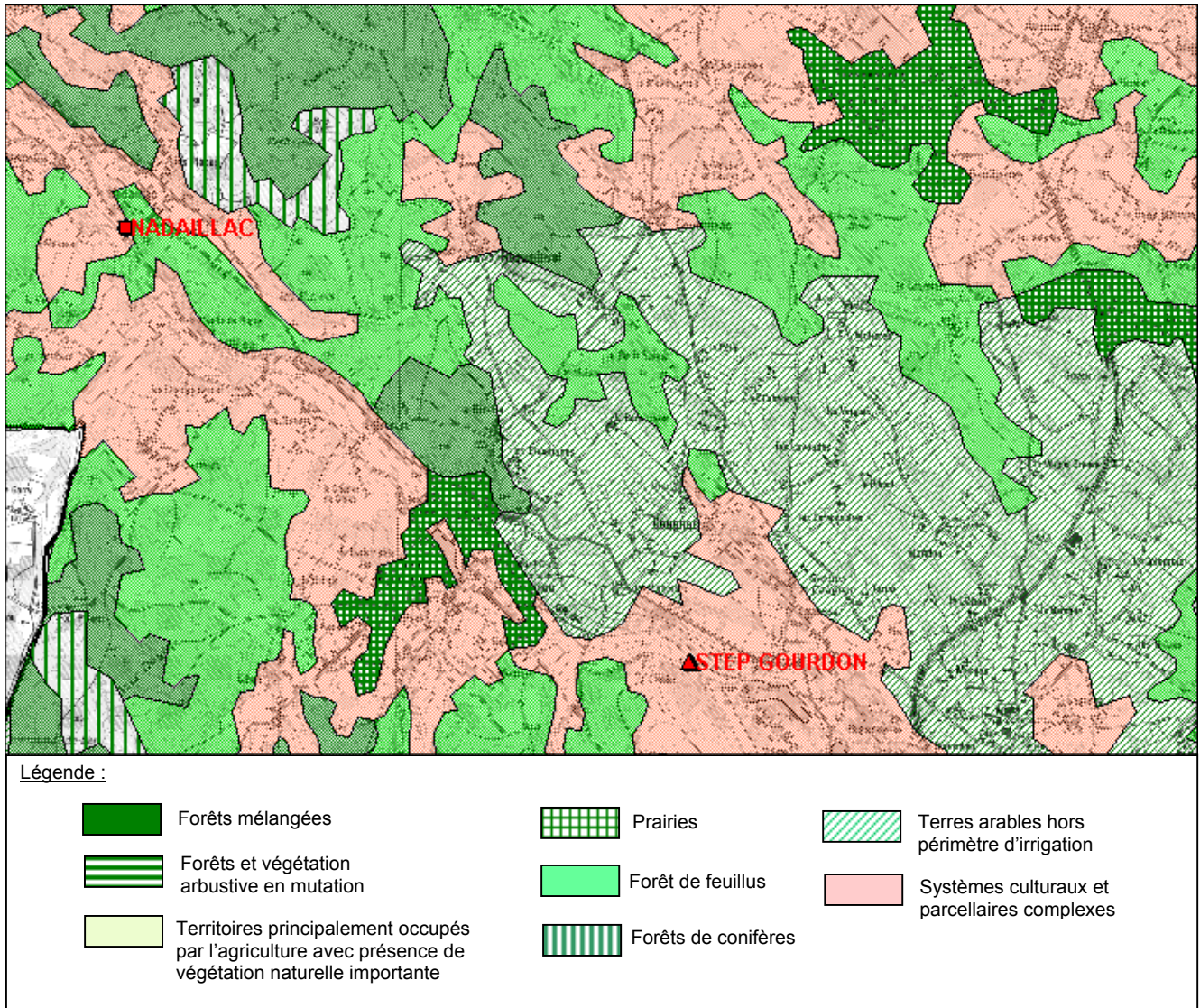


Fig 23 - OCCUPATION DU SOL DANS LE SECTEUR DE LA SOURCE DE NADAILLAC

(d'après le Corinne Land Cover)

Géologie :

La source de Nadaillac est située au débouché d'une combe sèche, située sur la rive droite du ruisseau de Marcillande. Le bourg de Nadaillac est localisé en amont du captage, au nord-est, à 30 m de dénivelé. La source est exploitée pour l'alimentation en eau potable de la commune de Gourdon.

Selon la carte géologique au 1/50 000^e du BRGM, la source de Nadaillac émerge dans les marnes et calcaires gréseux du Turonien supérieur et Coniacien supérieur (Crétacé supérieur), surmontés par les calcarénites bioclastiques et les calcaires microcristallins du Coniacien et du Santonien inférieur. Ces roches sont recouvertes par des placages de sables fins, localement argileux, dont la puissance peut atteindre 50 m, en fonction de l'épaisseur de la frange d'altération et des soutirages karstiques survenus au Tertiaire.

Hydrogéologie :

La source est une résurgence du système aquifère crétacé, relativement bien développé dans le secteur de Gourdon.

L'aquifère du Crétacé est un aquifère multi-couches, scindé en trois par les marnes de la limite Turonien-Coniacien vers la base et les marnes crayeuses du Santonien moyen vers le sommet.

N.B. : Au nord de Gourdon, les séries portlandiennes, très aquifères sur le reste du secteur, ont été complètement érodées au cours du Crétacé inférieur.

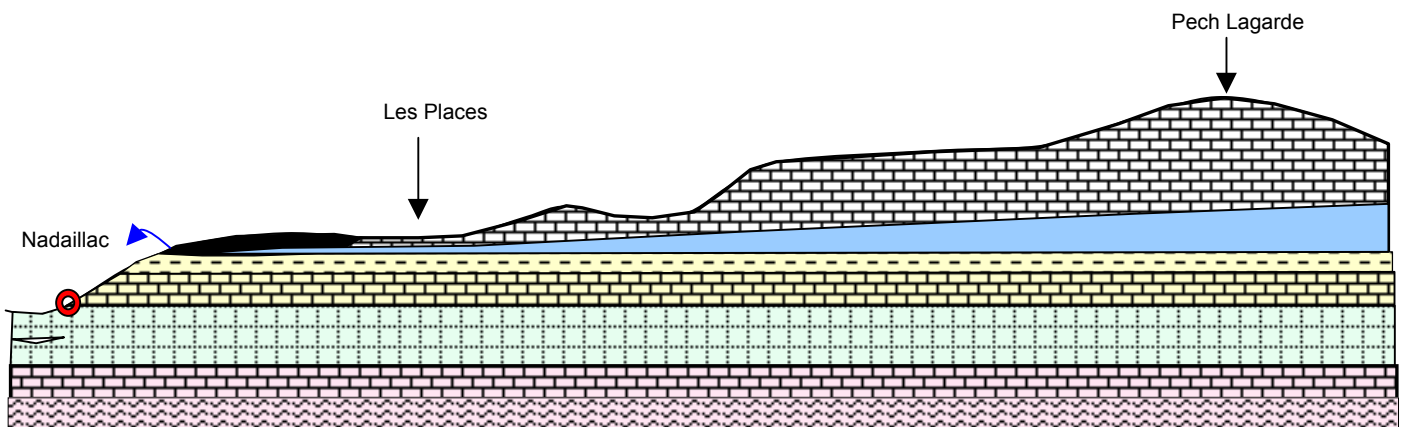
Dans le détail, le fonctionnement hydrogéologique de la source peut être interprété selon deux hypothèses :

Première hypothèse : les écoulements proviennent uniquement de l'aquifère développé dans le Coniacien et le Santonien inférieur et reposant sur les marnes du Coniacien supérieur. Dans ce cas, les eaux arriveraient en surface par rupture de la topographie (source de déversement), et formeraient soit une source perchée en haut de falaise, soit des surfaces de suintement. Or, la source de Nadaillac jaillit dans la plaine du ruisseau de Marcillande.

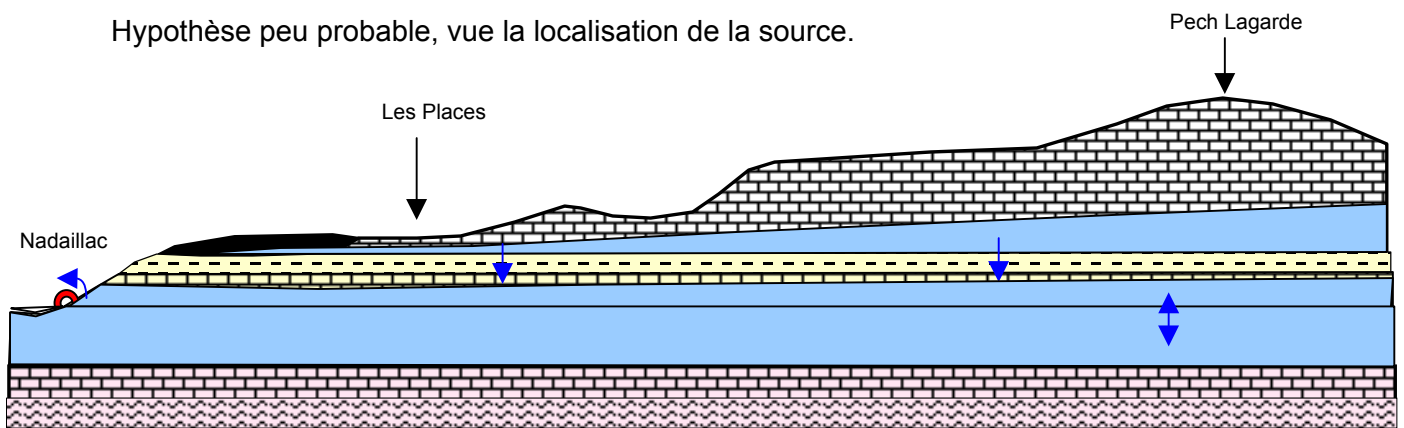
Seconde hypothèse : l'aquifère serait développé dans les niveaux à calcaires gréseux et dans les sables du Turonien supérieur, et pourrait être en relation hydraulique partielle (drainance verticale) avec l'aquifère sus-jacent et en continuité avec l'aquifère sous-jacent du Turonien inférieur et moyen (calcaires crayeux). Les eaux arriveraient également à l'émergence par rupture de pente.

L'hypothèse la plus probable est la 2 (cf. fig. 24).

Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT)



Hypothèse peu probable, vue la localisation de la source.



Hypothèse plus probable.





-  Coniacien et Santonien inférieur : calcarénites bioclastiques et calcaires microcristallins
-  Turonien supérieur à Coniacien inférieur : Marnes / Calcaire gréseux, sables et rudistes
-  Turonien inférieur et moyen : Calcaire crayeux
-  Cénomaniens : Calcaire à simplavéoline / Argile gypsifère

Fig. 24 - Coupe schématique sud-ouest/nord-est passant par Nadaillac et Pech Lagarde : scenarii hydrogéologiques envisageables :

Hydrochimie et occupation du sol :

La source de Nadaillac présente des problèmes de qualité, notamment pour les nitrates, dont les concentrations peuvent dépasser 30 mg/l. On note également des contaminations par les sulfates, les chlorures et et plus ponctuellement par le zinc et le brome.

Or, si les altérites du Coniacien et du Santonien supérieur sont occupés par des cultures (essentiellement du maïs), le reste du bassin versant hydrographique est recouvert par forêts. Mis à part les quelques maisons du lieu-dit les Places, ce bassin reste très peu urbanisé.

Cependant, on constate que la qualité du ruisseau de la Marcillande est fortement altéré par les rejets de la station d'épuration de Gourdon, située à 4 km au sud est de la source de Nadaillac. La présence d'un relation hydraulique souterraine entre la station d'épuration et le

Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT)

système aquifère de la source n'est pas démontrée, mais une étude géophysique récente a permis d'identifier la présence d'une combe avec remplissage. Ce paléorelief permet de supposer une alimentation partielle de la source par les sud-est, c'est à dire par le secteur de la station d'épuration de Gourdon.

Il peut également s'interroger sur la possibilité d'une interception de la nappe alluviale de la Marcillande au niveau du captage. Les eaux ainsi exploitées seraient alors issues d'un mélange entre les eaux de l'aquifère Turonien et des alluvions secondaires de la Marcillande.

5) Méthodes de prélèvements

Les prélèvements d'eau effectués sur les points d'eau et les sources de pollution ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques.

5.1. PROTOCOLES DE PRELEVEMENT

Les mêmes méthodes de prélèvements et de conditionnement des échantillons ont été appliquées pour les émergences karstiques (Anglanat, Font d'Ente, Font Polémie, Nadaillac, Saint Jean de Laur) et les sources de pollution (Station d'épuration de Gourdon, lixiviats des parcelles expérimentales cf. Annexe 1) .

5.1.1. Analyses physico-chimiques

Pour les analyses physico-chimiques, le protocole suivant a été appliqué :

- Pour le dosage des anions : rinçage (3 fois) des flacons de 125 ml en propylène propre par une eau filtrée, puis prélèvement de 125 ml d'eau brute préalablement filtrée *in situ* à l'aide d'une seringue munie d'un filtre à 0,45 µm.
- Pour le dosage des cations : rinçage (3 fois) des flacons de 125 ml en propylène (flacon neuf) par une eau filtrée, puis prélèvement de 125 ml d'eau brute préalablement filtrée *in situ* à l'aide d'une seringue munie d'un filtre à 0,45 µm. Acidification de l'eau par de l'acide nitrique supra pur 1 N (5 gouttes en moyenne) jusqu'à obtention d'un pH 2. Contrôle du pH à l'aide d'une bandelette à pH.
- Pour le dosage du Carbone Organique Dissous (C.O.D.) : rinçage (3 fois) des flacons de 250 ml en verre propre, puis prélèvement d'eau filtrée (*in situ* 0,45 µm) et acidification par de l'acide sulfurique 1 N jusqu'à obtention d'un pH 2 (5 gouttes en moyenne) et contrôle du pH à l'aide de bandelettes.

5.1.2. Analyses isotopiques

Pour les analyses isotopiques, le protocole suivant a été appliqué :

- Pour les isotopes stables de l'azote : la quantité minimale pour l'analyse des nitrates est de 20 mg. La quantité prélevée dépend donc de la concentration en nitrates des eaux. Des flacons de 2 litres ont été prélevés pour chaque échantillon. Le protocole d'échantillonnage est le suivant : rincer au préalable le flacon (en polyéthylène, propre et sec) de 2 litres à l'aide d'eau brute et prélever l'eau, sans filtration ni acidification, puis le remplir à ras bord. Les échantillons sont conservés à l'abri de la lumière et des sources de chaleur (température inférieure à 20°C).

Méthode d'analyse : La méthode de préparation des échantillons est adaptée de celle de Kreitler (1975). Les substances azotées sont tout d'abord concentrés par évaporation, puis réduite par l'alliage de Devarda. L'ammoniac est piégé sous forme NH₄Cl dans de l'acide Chlorhydrique, puis il se produit une réaction du NH₄Cl formé avec le LiOBr et l'azote dégagé est piégé sur charbons actifs. L'analyse se fait par spectrométrie de masse en phase gazeuse. Le rapport

isotopique $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ est exprimé en « ‰ vs Air » avec une précision de l'ordre de 0,3 ‰.

- Pour les isotopes stables du Bore B : Pour l'analyse, 20 µg de Bore sont nécessaires : les volumes prélevés dépendent donc de la concentration des eaux. Pour les sources étudiées, 2 litres d'eau ont été collectés (eau filtrée par une seringue munie d'un filtre à 0,45 µm) sauf pour la source d'Anglanat où des 10 litres d'eau filtrée était nécessaire. Pour la source d'Anglanat, 2 des 10 litres d'eau nécessaires ont filtrés sur le terrain, les 8 litres restant ont été filtré au laboratoire.

Méthode d'analyse : Les compositions isotopiques du bore sont mesurée sur un spectromètre de masse à source solide (Finnigan MAT 261). L'échantillon est introduit dans le spectromètre sous forme de borate de césium (CsBO_2) Il est donc nécessaire de transformer chimiquement les échantillon en borate de césium. La méthode utilisée au BRGM est celle de Mossadik (1997). Le rapport isotopique $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ est exprimé en « ‰ vs NBS-951(standard) » avec une précision de l'ordre de 0,3 ‰.

- Pour les isotopes stables du Strontium Sr : pour l'analyse, 2 µg de Sr sont nécessaires. Pour les sources étudiées, 125 ml d'eau ont été prélevés. Le protocole d'échantillonnage est le suivant : rincer 2 à 3 fois le flacon en polyéthylène avec l'eau de prélèvement filtrée à l'aide d'un filtre à 0.45µm puis le remplir. Acidifier l'échantillon par ajout de HNO_3 supra pur jusqu'à obtention d'un pH<2.

Méthode d'analyse : Les analyses isotopiques du Sr se font par spectrométrie de masse à source solide après séparation chimique sur résine. Le strontium est séparé du reste de la matrice de l'échantillon sur des résines échangeuses d'ions. Après séparation chimique, l'échantillon est déposé sur un mono filament de tungstène (W) et analysé sur un spectromètre de masse à multi-collection Finigan MAT 262. Les rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont normalisés à un rapport $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ de 0.1194. La précision interne de chaque rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est de $8 \cdot 10^{-6}$ (2σ). La reproductibilité des mesures du rapport $\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est testée par l'analyse répétitive du standard international NBS 987 (valeur certifiée de 0.710240).

5.2. ORGANISATION DES PRELEVEMENTS

Voici le détail des points de prélèvement pour chaque campagne :

Campagne n°1 - Fin octobre 2002 :

- Font Polémie
- Saint Jean de Laur
- Anglanat
- Font d'Ente
- Nadaillac
- Station d'épuration de Gourdon

Campagne n°3 - juillet 2003

- Font Polémie
- Saint Jean de Laur
- Anglanat
- Font d'Ente
- Nadaillac

Campagne n°2 - avril 2003

- Font Polémie
- Saint Jean de Laur
- Anglanat
- Font d'Ente
- Nadaillac
- Station d'épuration de Gourdon

Campagne n°4 - décembre 2003

- Font Polémie
- Saint Jean de Laur
- Anglanat
- Font d'Ente
- Nadaillac

Les deux campagnes d'analyses réalisées sur la station d'épuration de Gourdon permettent de définir la signature isotopique de cette source potentielle de pollution.

5.3. POSITIONNEMENT DES PRELEVEMENTS DANS LE CYCLE HYDROLOGIQUE

Afin de replacer les quatre campagnes de prélèvements dans le cycle hydrologique, nous disposons des chroniques de hauteur d'eau sur 2002 et 2003 au niveau du puits de la source de Font Del Pito, située sur la commune Saint-Sulpice (graphiques fournis par la D.D.A.F. du Lot) :



Niveau de la source du Pito - Commune de Saint-Sulpice (46)
Année 2002

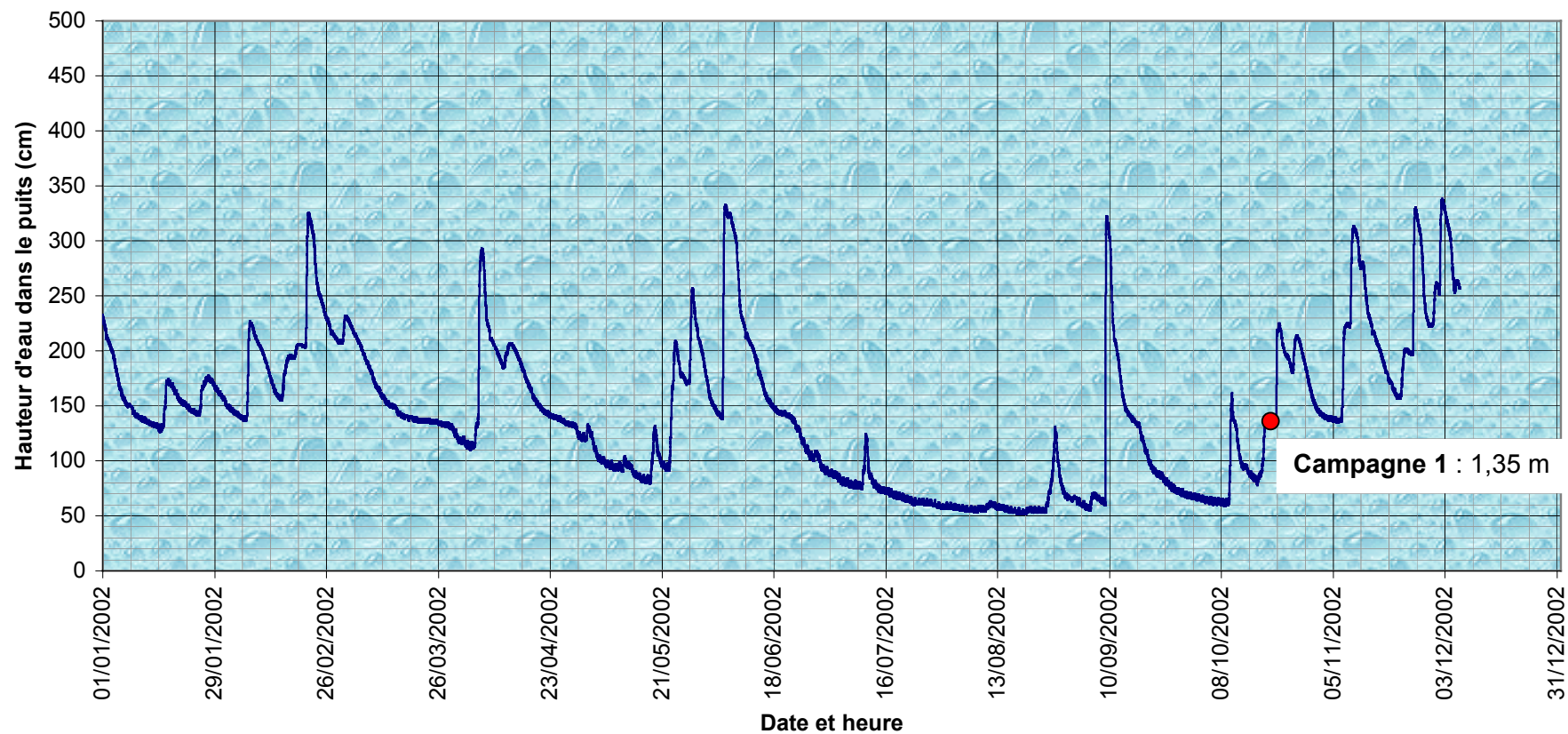


Fig. 25 – Evolution des hauteurs d'eau dans le puits de Font Del Pito en 2002 (données de la D.D.A.F. du Lot)



Evolution de la hauteur d'eau de la rivière souterraine du Pito dans le puits de captage
Commune de Saint-Sulpice (46) - Année 2003

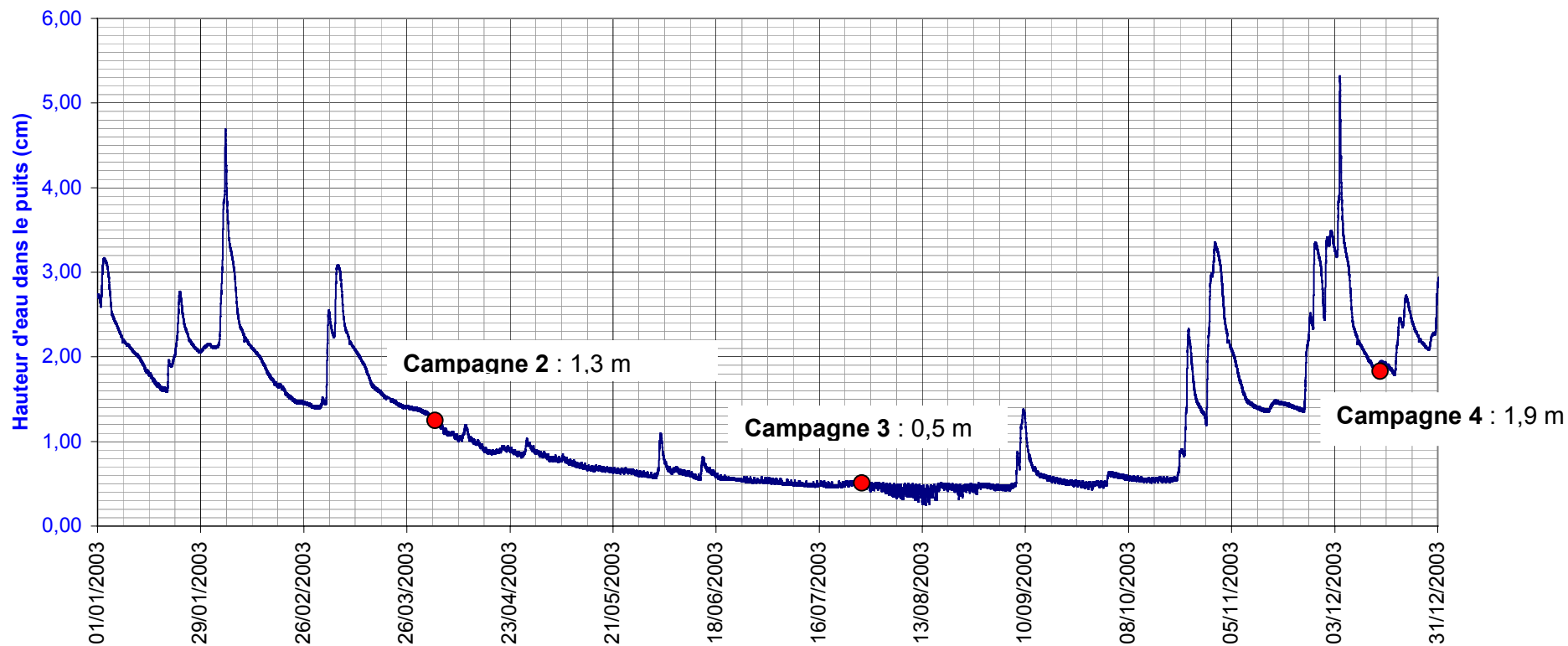


Fig. 26 – Evolution des hauteurs d'eau dans le puits de Font De Pito en 2003 (données de la D.D.A.F. du Lot)

Position des campagnes dans le cycle hydrologique :

Campagne 1 (22 oct 2002) : intermédiaire – début hautes eaux

Campagne 2 (02 avril) : intermédiaire – début basses eaux

Campagne 3 (27 juillet) : basses eaux

Campagne 4 (15 décembre) : fin de tarissement dans les hautes eaux

6. Résultats d'analyse sur les points d'eau

Le détail des résultats d'analyse pour l'ensemble des points d'eau et des sources de pollution est présenté en annexe 2.

6.1. RESULTATS DES MESURES IN-SITU

Lors des prélèvements, les paramètres instables tels que la température, le pH, l'oxygène dissous, la conductivité et le potentiel d'oxydo-réduction ont été mesurés in-situ pour chaque point d'eau (ainsi que pour la station d'épuration de Gourdon).

Les résultats des quatre campagnes sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 3 : résultats des mesures in-situ sur les six points de prélèvement

		Font Polémie			
	<i>Date prélèvement</i>	22/10/2002	01/04/2003	23/07/2003	15/12/2003
Paramètres	UNITES				
C	µS/cm	704	677	667	690
T	°C	13,4	13,3	13,5	13
pH	Unité pH	6,78	6,94	7,05	7
Eh	mV	175		295	
O2	mg/l	9,2	8,6	8,7	8,2
O2 %	%	87	83	84,4	80
Type pollution présumée		Mixte			

		St.J.de Laur			
	<i>Date prélèvement</i>	22/10/2002	02/04/2003	23/07/2003	16/12/2003
Paramètres	UNITES				
C	µS/cm	669	591	591	632
T	°C	12,8	12	12,9	12,6
pH	Unité pH	6,9	7,3	7,41	7
Eh	mV	184		190	
O2	mg/l	7,2	7,0	6,6	7,5
O2 %	%	70	66,7	65	74
Type pollution présumée		Pollution domestique			

Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT)

		Anglanat			
	<i>Date prélèvement</i>	22/10/2002	02/04/2003	23/07/2003	16/12/2003
Paramètres	UNITES				
C	μS/cm	696	693	694	698
T	°C	14	13,5	15	13,3
pH	Unité pH	7,03	7,14	7,49	7
Eh	mV	269		197	
O2	mg/l	7,3	8,3	9,0	8,2
O2 %	%	73	80,5	91,6	79
Type pollution présumée		Source de référence non polluée			

		Font d'Ente			
	<i>Date prélèvement</i>	23/10/2002	02/04/2003	23/07/2003	15/12/2003
Paramètres	UNITES				
C	μS/cm	664	616	617	634
T	°C	12,5	12,4	12,6	12,6
pH	Unité pH	6,64	7,06	7,13	6,63
Eh	mV	139		202	196
O2	mg/l	6,9	8,5	10,2	8,9
O2 %	%	65	81	97,8	86
Type pollution présumée		Surtout élevage			

		Nadaillac			
	<i>Date prélèvement</i>	23/10/2002	01/04/2003	23/07/2003	15/12/2003
Paramètres	UNITES				
C	μS/cm	613	594	605	628
T	°C	13	12,5	13,4	12,8
pH	Unité pH	6,98	7,17	7,1	7
Eh	mV	74		163	
O2	mg/l	5,2	6,4	5,7	5,9
O2 %	%	49	63,4	54,8	57
Type pollution présumée		Mixte			

		STEP Gourdon	
	<i>Date prélèvement</i>	23/10/2002	01/04/2003
Paramètres	UNITES		
C	μS/cm	1030	1165
T	°C	16,9	14,2
pH	Unité pH	7,32	7,56
Eh	mV	80	
O2	mg/l	4,8	4,9
O2 %	%	50	51

Les graphiques d'évolution de chaque paramètre en fonction du cycle hydrologique sont présentés ci-après :

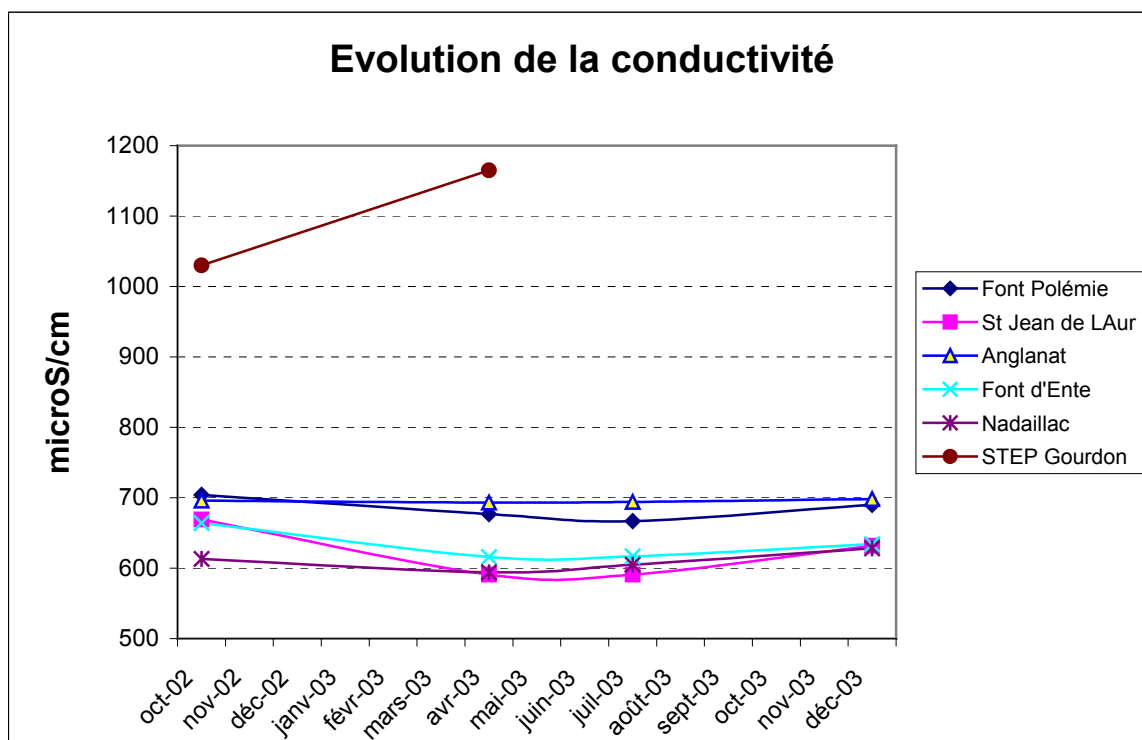


Fig. 27 – Evolution de la conductivité lors des 4 campagnes de prélèvement

L'ensemble des eaux de source est fortement minéralisé (Conductivité comprise entre 600 et 700 microS/cm) tout au long du cycle hydrologique. Malgré la variation du débit d'étiage, la conductivité ne semble pas influencée, notamment lors de la crue de décembre 2003. Cependant, les mesures ayant été réalisées une dizaine de jours après le pic de crue, il paraît difficile de conclure.

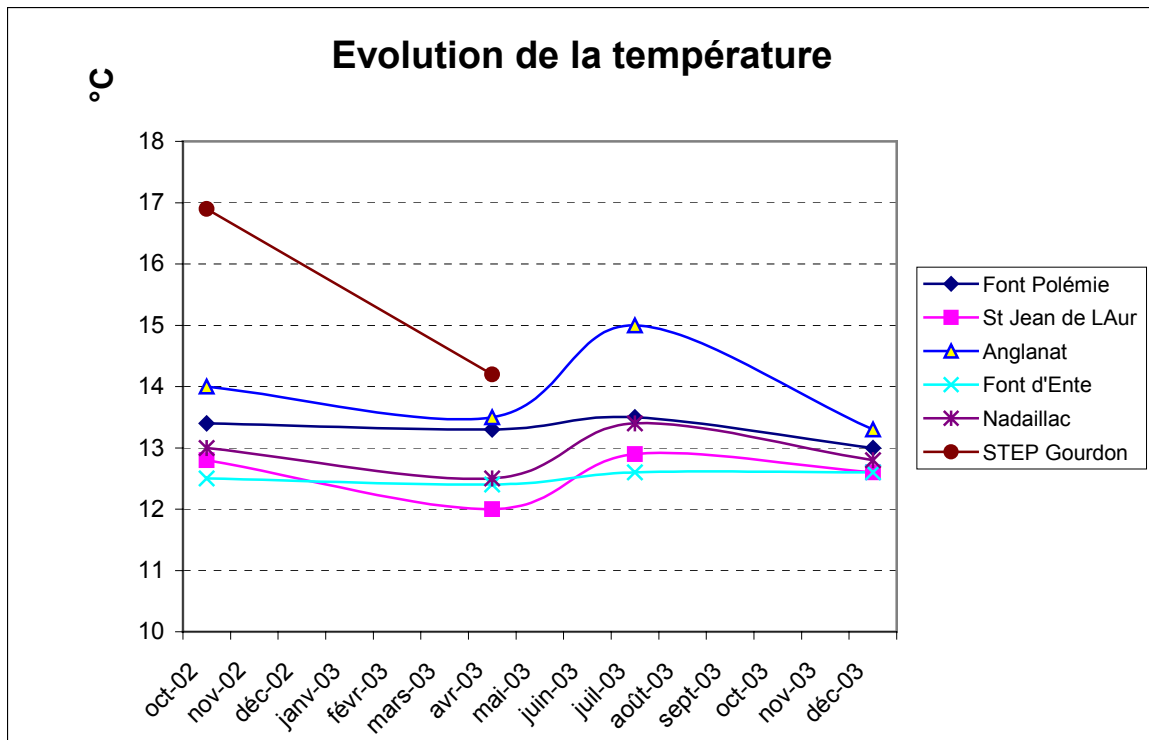


Fig. 28 – Evolution de la température lors des 4 campagnes de prélèvement

On observe une stabilité générale de la température des eaux de source entre 12 et 14°C. Les sources de Nadaillac et de St Jean de Laur ont subi une légère augmentation de température (environ 1°C) en juillet 2003, et la source d'Anglanat semble avoir été davantage influencée par le climat exceptionnellement chaud de l'été 2003.

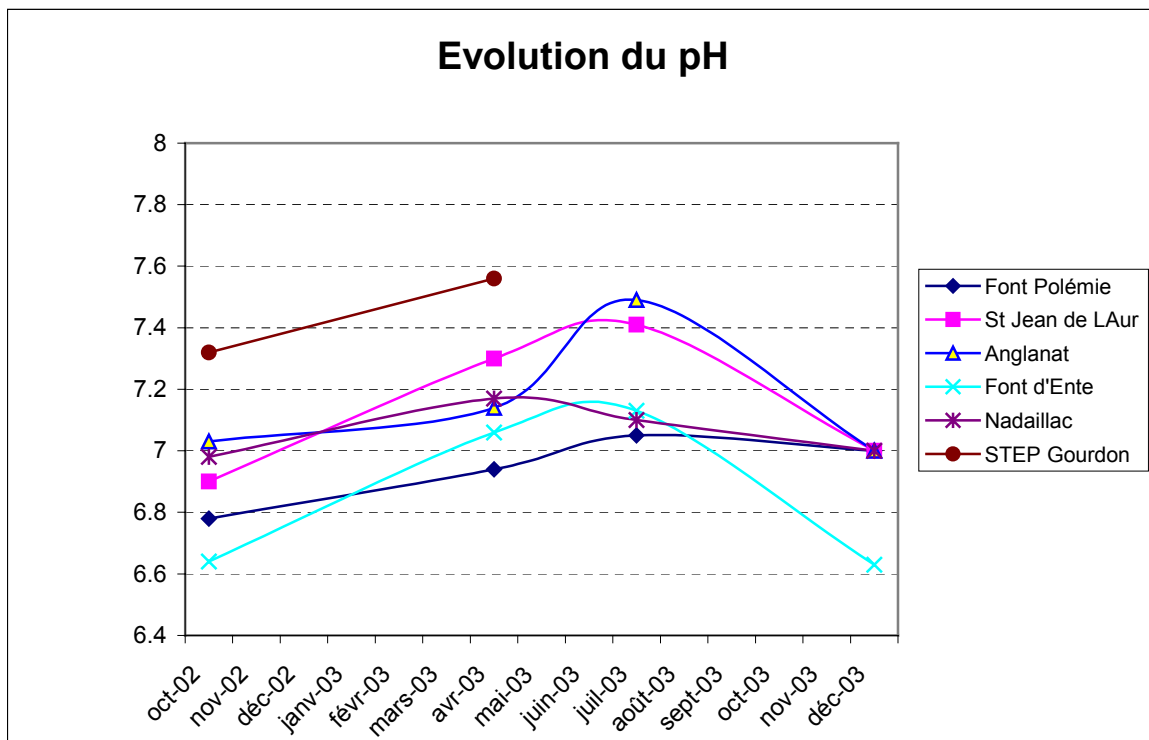


Fig. 29 – Evolution du pH lors des 4 campagnes de prélèvement

Le pH de ces eaux reste toujours très proche de la neutralité (phénomène classique en domaine karstique) mais devient légèrement plus basique en juillet 2004 (augmentation allant jusqu'à 0,4 unités pH pour Anglanat), c'est à dire en période de basses eaux. Ce phénomène est à rapprocher d'un phénomène de saturation des eaux en ions CO_3^{2-} , lié à l'augmentation de température.

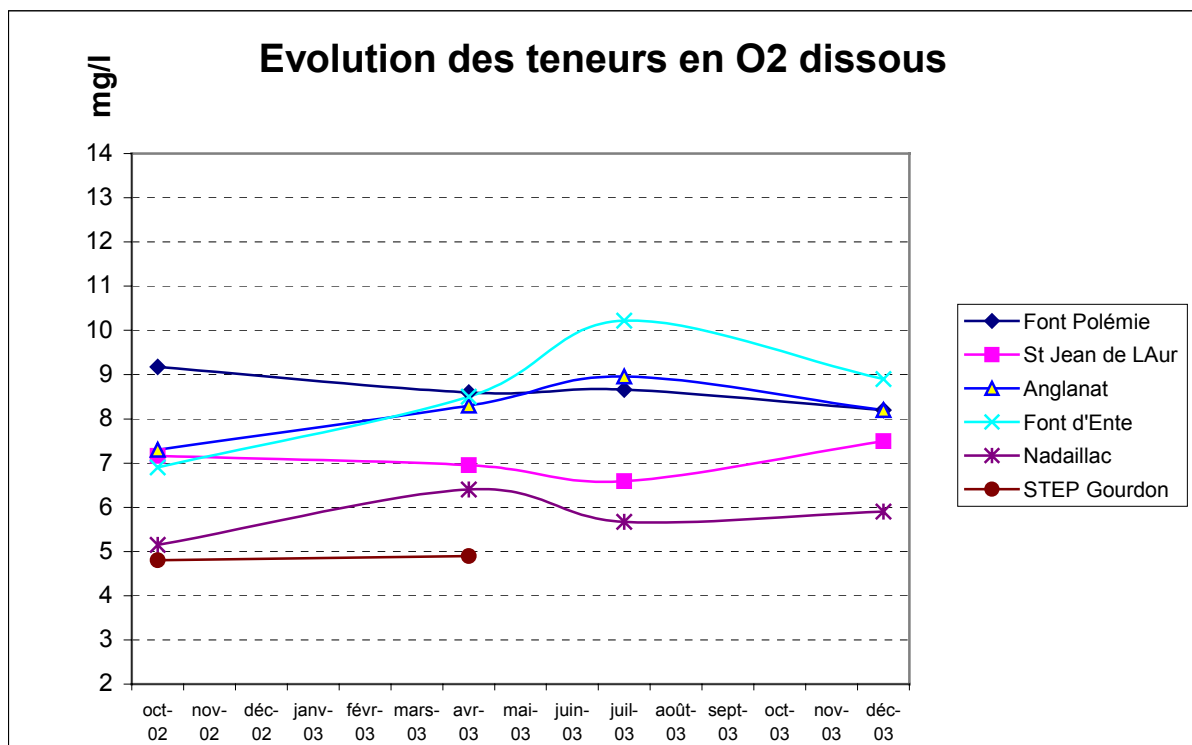


Fig. 30 – Evolution des teneurs en O2 dissous lors des 4 campagnes de prélèvement

La teneur en oxygène dissous des sources karstiques étudiées varie entre 7 et 10 mg/l, ce qui correspond à une bonne oxygénation des eaux. Seule la source de Nadaillac (et la station d'épuration de Gourdon, située en amont de cette source), présente des teneurs plus faibles en O₂ dissous, en relation avec le potentiel d'oxydo-réduction plus faible de ses eaux. On constate également une augmentation de l'oxygène dissous en juillet 2003 pour la source de Font d'Ente.

6.2. RESULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

L'ensemble des résultats des analyses physico-chimiques est présenté en annexe 2.

L'évolution de la dureté totale et de l'alcalinité des eaux de sources sont présentées dans les graphiques ci-dessous :

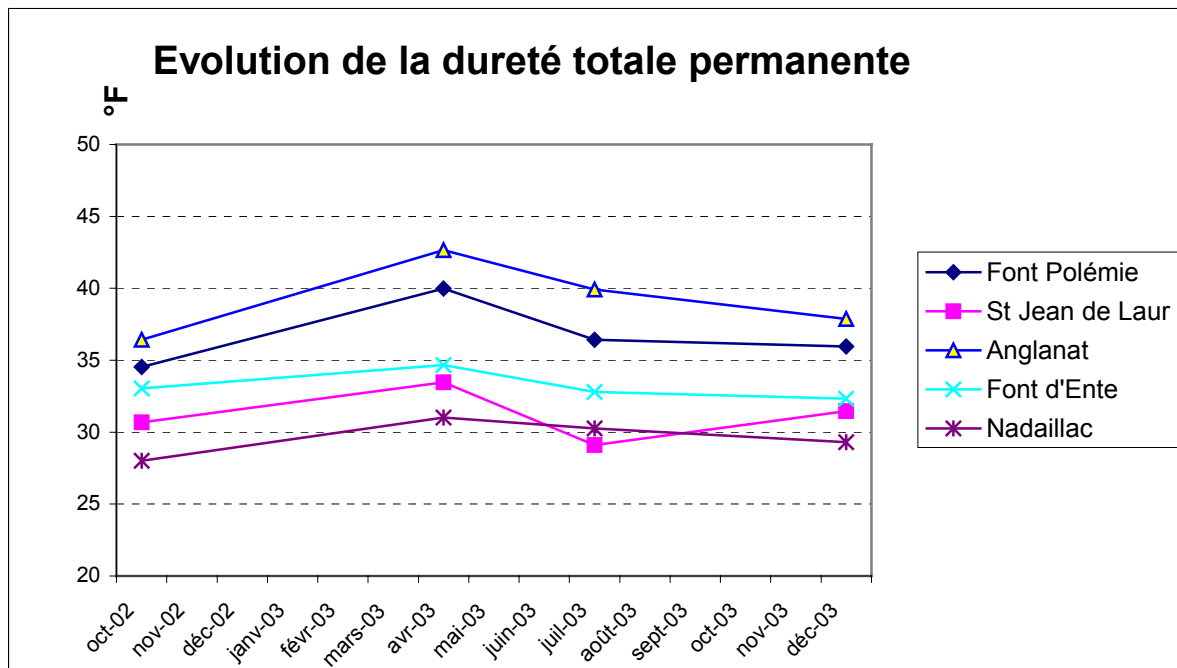


Fig. 31 – Evolution de la dureté totale permanente lors des 4 campagnes de prélèvement

Toutes ces sources présente des duretés très élevées, notamment pour Anglanat et Font Polémie dont les eaux peuvent dépasser 40 °F. On constate un pic de dureté pour l'ensemble des émergences (avec des amplitudes variables) au mois d'avril 2003. En l'absence de données pluviométriques, il paraît difficile d'expliquer cette augmentation qui survient dans une période intermédiaire du cycle hydrologique.

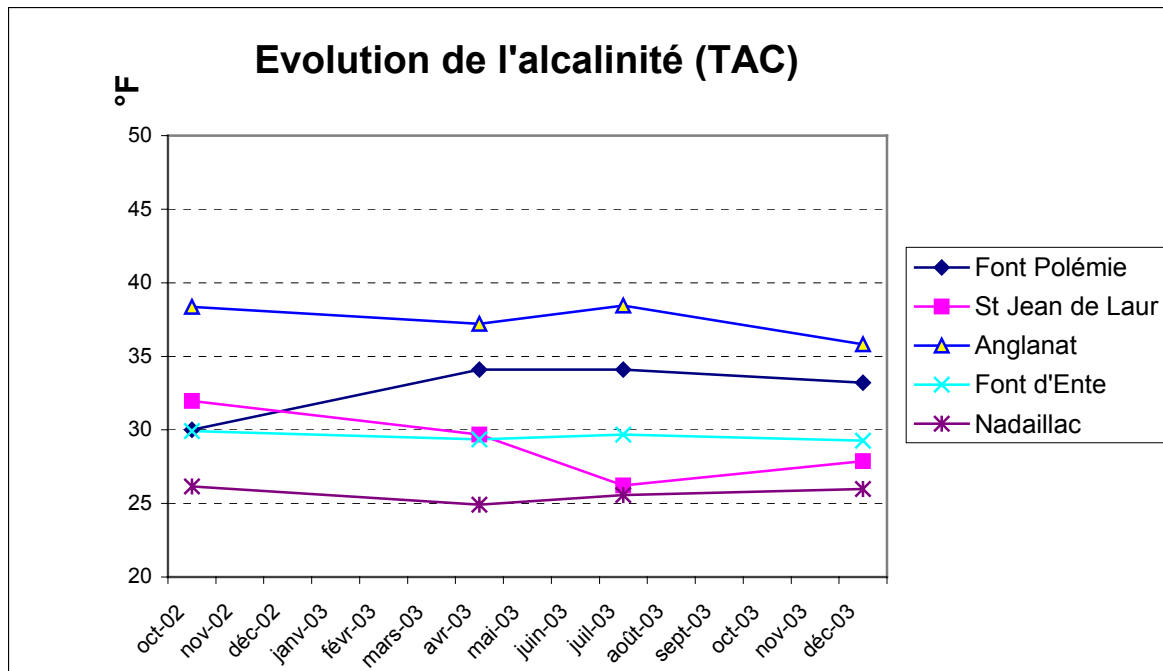


Fig. 32 – Evolution de l'alcalinité lors des 4 campagnes de prélèvement

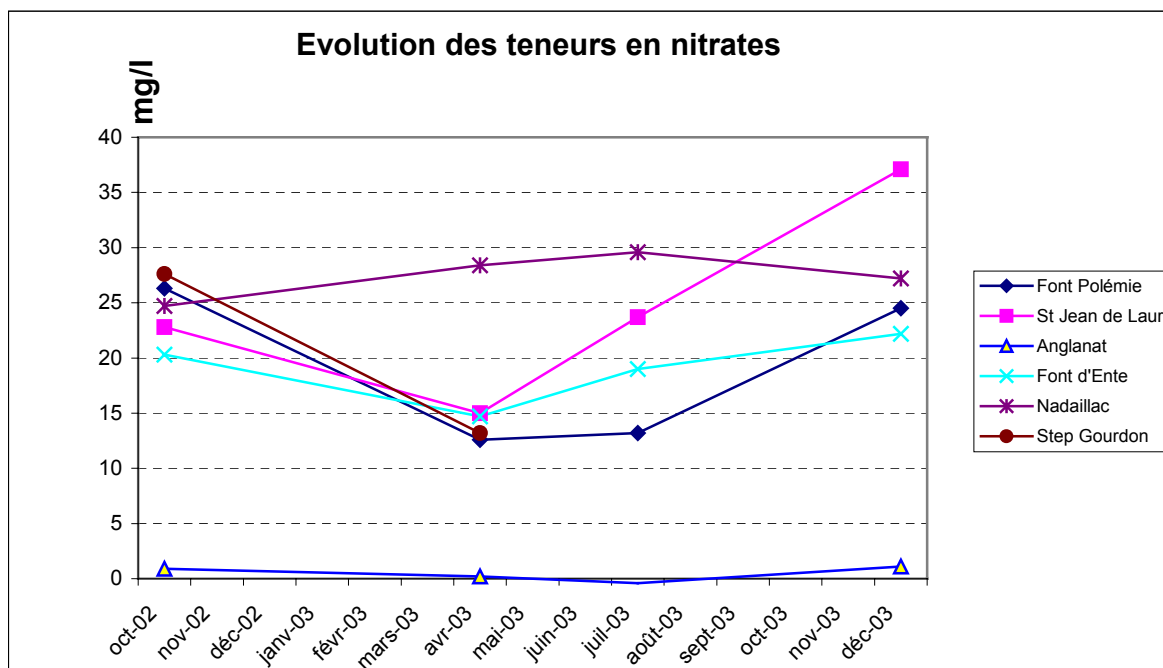


Fig. 33 – Evolution des teneurs en nitrates lors des 4 campagnes de prélèvement

On constate que toutes les sources étudiées (sauf Anglanat, source de référence) présentent une contamination plus ou moins importante aux nitrates.

La source la plus touchée de manière chronique est Nadaillac, et la source de St Jean de Laur présente des contaminations ponctuelles importantes pouvant atteindre 37 mg/l de NO_3^- . Par ailleurs, on constate que les sources de Font Polémie, Font d'Ente et St Jean de Laur présentent une augmentation significative des teneurs en nitrates à partir d'avril 2003, pour atteindre un maximum en décembre 2003.

Il paraît difficile d'établir une corrélation entre cette croissance régulière et les variations de débit du cycle hydrologique.

La source de Nadaillac connaît des teneurs plus stables, avec cependant un léger pic en juillet 2003 (concentration en période d'étiage ?).

Concernant les autres paramètres chimiques, on constate une contamination chronique de la source de Saint Jean de Laur au bore, cuivre et potassium.

On observe également des teneurs ponctuelles importantes en brome au niveau de la source de Font Polémie, et de la source de Nadaillac, notamment en octobre 2002 et juillet 2003.

Enfin, les teneurs en aluminium les plus importantes sont observées sur la source de Font d'Ente en avril et juillet 2003.

7. Méthodes d'investigation isotopiques

7.1 GENERALITES : INFORMATIONS APORTEES PAR LES ISOTOPES DU MILIEU

7.1.1 les isotopes stables de l'azote ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)

L'origine des nitrates dans un aquifère est souvent multiple, les sources potentielles de pollution par les nitrates sont les suivantes :

- les précipitations atmosphériques apportent de l'azote (NO_3 , NH_4 , NO_2) mais en quantité relativement faible (de 5 à 15 kg N/Ha/an),
- la nitrification de l'azote ammoniacal des engrais organiques, des déchets agricoles, des amendements organiques et des précipitations atmosphériques,
- la minéralisation de l'azote organique par les micro-organismes du sol,
- les engrais minéraux nitritiques,
- les eaux usées domestiques (STEP et assainissement autonome).

Les nitrates sont des sels très solubles qui ne subissent pratiquement pas d'interaction avec les particules du sol, contrairement à l'azote ammoniacal et à l'azote organique. Les nitrates non consommés par les systèmes racinaires des plantes sont entraînés vers la nappe par les eaux de drainage.

La recherche des causes d'une contamination de l'eau par les nitrates peut être réalisée en partie à l'aide des concentrations en nitrates et des isotopes de l'azote (rapport isotopique $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) car la plupart des sources d'azote dans le milieu présentent des signatures isotopiques différentes.

Les isotopes stables font l'objet de mesures différentielles car leurs variations relatives sont suffisamment indicatives, les résultats sont exprimés en parts pour milles à l'aide de la notation « δ » dans un souci de simplification :

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = \left[\left(\frac{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_{\text{échantillon}}}{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] * 1000$$

Le standard de référence dont la teneur en ^{15}N est stable est l'azote de l'air.

D'un point de vue analytique, la technique de préparation utilisée au laboratoire du BRGM est celle de Kreitler (1975). Les substances azotées sont concentrées par évaporation puis réduites par l'alliage de Devarda. L'ammoniac libéré est alors piégé sous forme de NH_4Cl dans de l'acide chlorhydrique. Ce chlorure d'ammonium est mis à réagir avec du LiOBr afin de libérer l'azote gazeux. L'azote est ensuite piégé sur du charbon actif puis analysé à l'aide d'un spectromètre de masse à phase gazeuse. La précision analytique de la méthode est de 0.3 ‰.

7.1.2 les isotopes stables du bore ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$)

Les isotopes stables du bore sont mesurés par spectrométrie de masse par thermoionisation à source solide. De manière similaire aux isotopes de l'azote, les résultats sont exprimés en parts pour milles à l'aide de la notation « δ » :

$$\delta^{11}\text{B}(\text{‰}) = \left[\left(\frac{^{11}\text{B}/^{10}\text{B}_{\text{échantillon}}}{^{11}\text{B}/^{10}\text{B}_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] * 1000$$

Le standard de référence dont la teneur en ^{11}B est stable est l'acide borique (NBS-951) distribué par le National Bureau of Standards. Les rapports isotopiques du bore sont très différents pour les eaux souterraines, les eaux issues d'eaux résiduares urbaines ou d'eaux d'irrigation par exemple. Les concentrations et les rapports isotopiques du bore ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$) sont donc susceptibles de tracer des contaminations ponctuelles de différentes origines.

Le bore est un traceur conservatif en raison de sa forte solubilité en solution aqueuse (sous forme d'acide borique) et de l'absence d'effets associés à l'évaporation, l'oxydo-réduction et la volatilisation. Des fractionnements peuvent être liés cependant à des phénomènes de adsorption sur les minéraux argileux. Pour de faibles variations de concentration en bore, les rapports isotopiques évoluent de façon hyperbolique et donc les écarts sont significatifs et marqués. Le bore présente ainsi un fort potentiel de signature en terme de mélange ou de processus spécifiques.

7.1.3 les isotopes du strontium (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$).

L'élément strontium peut être utilisé comme traceur dans les études environnementales puisqu'il est naturellement présent dans le milieu. Il possède 4 isotopes stables : ^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr et ^{84}Sr , seul le strontium 87 (^{87}Sr) est radiogénique c'est à dire qu'il est issu de la désintégration radioactive d'un isotope père, en l'occurrence le rubidium 87 (^{87}Rb) par désintégration β^- .

L'abondance des isotopes ^{88}Sr , ^{86}Sr et ^{84}Sr reste constante au cours du temps alors que l'abondance de l'isotope ^{87}Sr va augmenter dans le temps suite à la production via la désintégration du ^{87}Rb . En Sciences de la Terre et dans les études environnementales on utilise le rapport de l'isotope radiogénique sur un isotope stable soit : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Le strontium (Sr) est un élément chimique de type alcalino-terreux dont les propriétés physico-chimiques sont proches de celles du calcium. Cette similarité permet au Sr de se substituer au Ca dans les réseaux cristallins.

D'une manière générale, **les eaux qui drainent les roches acquièrent la composition isotopique en Sr (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des minéraux de cette roche les plus sensibles à la**

dissolution. Ainsi, les eaux qui drainent des roches silicatées (granite par exemple) présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativement élevés, celles qui drainent des roches carbonatées ont des signatures plus faibles (moins radiogéniques). Ces variations isotopiques peuvent être utilisées pour mettre en évidence et quantifier des mélanges d'eaux de diverses origines.

Le strontium n'est pas modifié par des processus tels que l'évaporation ou la précipitation de minéraux. Sa composition isotopique reflète donc un terme source soit celui du strontium de l'eau initiale, soit celui d'un minéral qui s'est dissous. Les variations du rapport isotopique du strontium dans un aquifère donnent ainsi des informations sur l'origine et les proportions de mélange des différents composants naturels (interaction eau-roche) et anthropogéniques.

8. Identification des sources de pollution

8.1 CARACTERISATION DU POLE NON POLLUE DE LA ZONE D'ETUDE

Pour caractériser un état pollué il peut être utile de définir les caractéristiques de l'état non pollué. Dans cette étude, nous avons cherché à identifier le caractère non pollué des eaux karstiques à l'aide des eaux de la source d'Angranat. L'eau de ce petit système karstique présente de très faibles teneurs en nitrates (inférieures à 1 mg/l) et bore (inférieures à 5 µg/l) et pas de phosphate (<0.1 mg/l).

La détermination des rapports isotopiques de l'azote n'a pas été possible en raison d'une trop faible teneur en nitrates des eaux (< 1 mg/l) de cette source. Par ailleurs, compte tenu du potentiel redox (+197 à 269 mV), des teneurs en oxygène dissous (81% en moyenne) et des très faibles teneurs en fer des eaux (<20 µg/l) on peut exclure le phénomène de dénitrification qui se produit en milieu réducteur et qui aurait pu expliquer de si faibles valeurs en nitrates. Dans ce contexte, nous avons supposé que la composition isotopique en azote était similaire à celle rencontrée dans les sols où le nitrate est issu uniquement de la minéralisation de l'azote du sol, soit $\delta^{15}\text{N} = +6.7 \text{ ‰} \pm 0.2 \text{ ‰}$ vs air (Mariotti 1986 ; Heaton 1986 ; Widory et al., 2001).

Les eaux de la source d'Angranat présentent de très faibles teneurs en bore (comprise entre 2 et 5 µg/l), valeurs qui paraissent compatibles avec celles rencontrées dans les précipitations (Blum et al., 2002). L'eau de cette source ne semble donc pas affectée par des pollutions anthropiques.

Les compositions isotopiques en bore mesurées ($\delta^{11}\text{B} = +15.8 \text{ ‰}$ en avril 2003 et $+ 21.2 \text{ ‰}$ vs NBS 951 en juillet 2003) apparaissent faibles au regard de la valeur que l'on peut attendre des précipitations (identique à l'eau de mer, $\delta^{11}\text{B} = 39.5 \text{ ‰}$ vs NBS 951; Barth 1993). Néanmoins, des valeurs basses de composition isotopiques de pluie ($\delta^{11}\text{B} = +10 \text{ ‰}$) ont déjà été constatées dans la littérature (Mossadik, 1997). Les valeurs mesurées à la source d'Angranat ont été prises en compte dans cette étude ainsi que les valeurs rencontrées dans la littérature (pluie, $\delta^{11}\text{B} = 39.5 \text{ ‰}$ vs NBS 951).

Dans cette étude, la signature isotopique en nitrate et en bore du pôle naturel non pollué a été définie par les valeurs suivantes :

Isotopes de l'azote : $\delta^{15}\text{N} = 6.7 \text{ ‰}$ vs air Isotopes du bore : $\delta^{11}\text{B} =$ compris entre 15.8 et 39.5 ‰

8.2 CARACTERISATION DES SOURCES DE POLLUTIONS DE LA ZONE D'ETUDE

Les sources potentielles de pollution considérées dans cette étude sont les suivantes :

- Eaux usées domestiques des réseaux collectifs. L'échantillonnage des eaux usées a été réalisé au niveau de la station d'épuration (STEP) de Gourdon.
- Eaux usées domestiques des assainissements autonomes. Les valeurs considérées sont celles rencontrées dans la littérature.
- Source d'engrais minéral : le produit utilisé comme référence est de l'ammonitrate fabriqué dans l'usine AZF de Toulouse. Les valeurs considérées sont celles répertoriées dans le cadre des études précédentes réalisées par le BRGM (Widory et al. 2001), pour

la composition chimique de l'engrais utilisé : 33,5% d'azote, avec 50 % de NH_4 et 50 % de NO_3 .

- Sources organiques issues des déjections animales. Les valeurs considérées sont celles rencontrées dans la littérature ainsi que celles déterminées expérimentalement dans cette étude (mouton, canard).

8.2.1. Les eaux usées d'origine domestique.

Les eaux de la station d'épuration de Gourdon ont été échantillonnées à deux reprises dans cette étude (octobre 2002 et avril 2003). Les eaux en sortie de STEP apparaissent relativement minéralisées (conductivité >1 mS/cm) et chargées en chlorures (>150 mg/l) et sodium (>120 mg/l). Le faciès des eaux est du type chloruré sodique et potassique (figure 34). Les teneurs en nitrates mesurées en sortie de STEP sont comprises entre 13 et 28 mg/l, les teneurs en bore étant comprises entre 0.49 et 0.62 mg/l, ce qui constitue des valeurs importantes. Outre les fortes teneurs en bore, les eaux présentent également des teneurs élevées en sulfates (entre 38 et 42 mg/l), en zinc (entre 140 et 160 $\mu\text{g/l}$), en phosphates (11 mg/l) et en matière organique (COD = 7 mg/l).

Les eaux en sortie de STEP alimentent le ruisseau de Marcillande. Il est supposé que la source de Nadaillac soit alimentée en partie par les eaux du ruisseau de Marcillande. Nous chercherons ultérieurement à vérifier la pertinence de cette hypothèse.

Les signatures isotopiques en azote montrent des $\delta^{15}\text{N}$ compris entre 10.1 et 28.4 ‰ vs air et sont conformes à celles rencontrées dans la littérature (Bergé 1983, Donville et Bergé, 1985 ; Aravena et al. 1993).

Les signatures isotopiques en bore montrent des $\delta^{11}\text{B}$ compris entre -2.1 et -0.7 ‰ vs NBS 951 et sont conformes à celles rencontrées dans la littérature (Barth, 1998, Widory et al., 2001 ; Ladouche et al., 2003). Les teneurs en bore et les signatures isotopiques sont caractéristiques des agents blanchissants (perborate de sodium) utilisés dans les détergents et lessives. Les signatures isotopiques en nitrates et bore des eaux usées issues d'assainissements autonomes présentent des valeurs similaires à celles rencontrées dans les STEP (Modassik, 1997, Barth, 1998, Ladouche et al., 2003) : exemple : $\delta^{11}\text{B} = -5.4$ ‰, B = 1411 $\mu\text{g/l}$ après traitement, d'après Modassik, 1997).

Dans cette étude, la signature isotopique en nitrates et en bore du pôle eaux usées domestiques a été définie par les valeurs suivantes :

Isotopes de l'azote $\delta^{15}\text{N}$ = compris entre +10 ‰ et +28 ‰ vs air
Isotopes du bore $\delta^{11}\text{B}$ = compris entre -2.1 ‰ et +3.8 ‰ vs NBS 951

Le rapport isotopique moyen en strontium de l'eau à la sortie de la STEP Gourdon est de 0.70869 ($2\sigma = 0.00016$).

8.2.2. Les engrais.

Les engrais minéraux utilisés en agriculture sont synthétisés à partir de l'azote de l'air suivant des processus fractionnant très peu les isotopes stables de l'azote. Les divers types d'engrais qui existent sur le marché (nitrates de chaux, de potasse, de soude, ammonitrates et sulfates d'ammonium) présentent par conséquent des $\delta^{15}\text{N}$ proche de 0 (compris entre -5 ‰ et + 5 ‰ vs air, Shearer et al. 1974 ; Freyer et Aly 1975 ; Berger et al. 1976 ; Bergé 1983 ; Mariotti 1984 ; Widory et al., 2001 ; Ladouche et al., 2003).

Les signatures isotopiques en bore ($\delta^{11}\text{B}$) des engrais rencontrées dans la littérature, bien que moins nombreuses que pour les nitrates, apparaissent également proche de 0 (+0.7‰ vs NBS 951, Komor 1997 ; +2.5 ‰ vs NBS 951, Ladouche et al. 2003) mais présentent des teneurs plus faibles (quelques $\mu\text{g/l}$ à quelques dizaines de $\mu\text{g/l}$).

Dans cette étude, la signature isotopique en nitrate et en bore du pôle « engrais minéral » a été définie par les valeurs suivantes :

Isotopes de l'azote $\delta^{15}\text{N}$ = compris entre -5 ‰ et +5 ‰ vs air
Isotopes du bore $\delta^{11}\text{B}$ = compris entre 0.7 ‰ et +2.5 ‰ vs NBS 951

D'après les données de la littérature, le rapport isotopique en strontium des engrais minéraux est faible (peu radiogénique). Quelques valeurs sont données à titre indicatif : 0.707876 (± 0.000008), Widory et al. (2001) ; 0.706399 (± 0.000009), Ladouche et al. 2003.

8.2.3. Les différentes signatures des déjections animales.

Dans le cadre de cette étude, deux parcelles expérimentales de 30 m² environ ont été réalisées par la Chambre d'Agriculture du Lot, sur une parcelle enherbée appartenant à Monsieur Pinquié, propriétaire d'une exploitation agricole au lieu-dit Bédard, sur la commune de Durbans (Lot). Ces parcelles ont été mises en place afin de caractériser les signatures isotopiques des fientes de canards et des déjections de moutons. Le descriptif des parcelles expérimentales ainsi que les protocoles d'échantillonnages des eaux sont décrits en détails dans l'annexe 1. La méthodologie utilisée est similaire à celle adoptée par Widory et al. (2001) pour caractériser les signatures isotopiques des fumiers de bovins et de fientes de volailles.

8.2.3.1 Fientes de canards

Les eaux échantillonnées à la sortie de la parcelle expérimentale « canard » ont présenté des teneurs élevées en nitrates (jusqu'à 168 mg/l) et des charges organiques importantes (COD = .1 mg/l). Les teneurs en bore sont moyennement importantes (0.074 mg/l) par rapport aux valeurs des eaux usées (jusqu'à 0.62 mg/l pour la STEP Gourdon). Les eaux ne présentent pas de teneurs importantes en éléments métalliques (Cu=5.2 $\mu\text{g/l}$; Zn=5 $\mu\text{g/l}$, Mn= 2.1 $\mu\text{g/l}$ **cf résultats d'analyses, tableau 15 en annexe 2**).

Les signatures isotopiques en nitrate et en bore de la source organique « fientes de canard » sont les suivantes :

Isotopes de l'azote $\delta^{15}\text{N}$ = 7.9 ‰ (± 0.3) vs air
Isotopes du bore $\delta^{11}\text{B}$ = 20.7 ‰ (± 0.2) vs NBS 951

La signature isotopique en nitrates des fientes de canard apparaît légèrement appauvrie en azote 15 par rapport à celles mesurées sur des poulets par Widory et al., 2001 ($\delta^{15}\text{N}$ compris entre 10.9 et 13.8 (± 0.2) vs air. La signature isotopique du bore mesurée dans cette étude est compatible avec celle également déterminée Widory et al., 2001 ($\delta^{11}\text{B}$ = compris entre 14.8 et 25.9 ‰ vs NBS 951).

Le rapport isotopique en strontium de l'eau à la sortie de la parcelle « canard » est de 0.708953 (± 0.000009).

8.2.3.2 déjections de Mouton

Les eaux échantillonnées à la sortie de la parcelle expérimentale « Moutons » ont également présenté des teneurs élevées en nitrates (jusqu'à 178 mg/l), des charges organiques importantes (COD = 6.1 mg/l) et de manière plus surprenante, des teneurs élevées en chlorures (123 mg/l). De manière similaire à la source organique « fientes de canard », les teneurs en bore sont moyennement importantes (0.067mg/l) et les eaux ne présentent pas de teneurs importantes en éléments métalliques (Cu = 4.2 µg/l ; Zn = 2.4 µg/l, Mn = 3.5 µg/l cf. tableau 15 en annexe 2).

Les signatures isotopiques en nitrates et en bore de la source organique « Mouton » sont les suivantes :

Isotopes de l'azote $\delta^{15}\text{N} = 10.3 \text{ ‰} (\pm 0.3)$ vs air Isotopes du bore $\delta^{11}\text{B} = 18.4 \text{ ‰} (\pm 0.2)$ vs NBS 951

Le rapport isotopique en strontium de l'eau à la sortie de la parcelle « moutons » est de 0.709049 (± 0.000008).

Les autres sources organiques prises en considération dans l'interprétation des résultats sont les sources « fumiers de bovins » et « lisiers de porcs ».

8.2.3.3 fumiers de Bovin et lisiers de porcs

Les signatures isotopiques en nitrate et en bore de la source organique « fumiers de bovins » caractériser par Widory et al., 2001 sont les suivantes :

Isotopes de l'azote $\delta^{15}\text{N} = 14.0 \text{ ‰} (\pm 0.2)$ vs air Isotopes du bore $\delta^{11}\text{B} = 26.0 \text{ ‰} (\pm 0.3)$ vs NBS 951

Les signatures isotopiques en nitrates et en bore de la source organique « lisiers de porcs » caractériser par Widory et al., 2001 et les auteurs dans la littérature (Heaton et al., 1983 ; Showers et al., 1990) sont les suivantes :

Isotopes de l'azote $\delta^{15}\text{N} =$ compris entre 14 et 33.2 ‰ vs air Isotopes du bore $\delta^{11}\text{B} =$ compris entre 19.6 et 42 ‰ vs NBS 951

En résumé, les sources organiques de pollution se distinguent nettement des autres sources de pollution (eaux usées et engrais minéral) par des $\delta^{11}\text{B}$ élevés et dans une moindre mesure, des $\delta^{15}\text{N}$ importants.

9. Origine de la pollution dans les eaux souterraines des systèmes karstiques

Les gammes de variation mesurées pour les isotopes de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et du bore ($\delta^{11}\text{B}$) dans les sources karstiques échantillonnées sont importantes (respectivement de 6.5 ‰ à 28.9 ‰ et de 7.5 ‰ à 19.9 ‰) ce qui indique la présence de sources de nitrates et de bore multiples dans les hydrosystèmes. Dans un souci de clarté, nous avons cherché, dans un premier temps, à expliquer les résultats en terme d'origine en considérant chaque type d'eau indépendamment les uns des autres et en considérant les résultats des différentes sources de pollution identifiées (cf. § 4.2 et 4.3). Cette étude a été abordée à l'aide de graphiques caractéristiques $\delta^{15}\text{N}$ versus $1/\text{NO}_3$; $\delta^{11}\text{B}$ versus $1/\text{B}$, $\delta^{15}\text{N}$ versus B/NO_3 et $\delta^{11}\text{B}$ versus $\delta^{15}\text{N}$. Au préalable à la présentation des résultats isotopiques, les caractéristiques générales des eaux ont été évaluées. Les résultats sont présentés ci-dessous.

9.1 FACIES CHIMIQUES ET ANALYSE MULTIVARIABLE (ACP)

L'analyse globale du faciès chimique des eaux des sources peut être réalisée à partir d'un diagramme de piper. Les types d'eau des systèmes karstiques ainsi que celle des sources de pollution peuvent ainsi être identifiés (**figure 34**) :

- Les eaux usées échantillonnées à la sortie de la STEP de Gourdon présentent un faciès chloruré sodique et sont chargées en nitrates,
- Les eaux (lixiviats) des parcelles de mouton et de canard présentent un faciès chloruré calcique et magnésien et sont également chargées en nitrates,
- Les eaux des sources karstiques sont globalement de types bicarbonatés calciques. On peut néanmoins observer que les eaux des sources semblent évoluer entre les deux pôles de pollution : pôles "eaux usées" et pôle "organique" (canard, mouton).

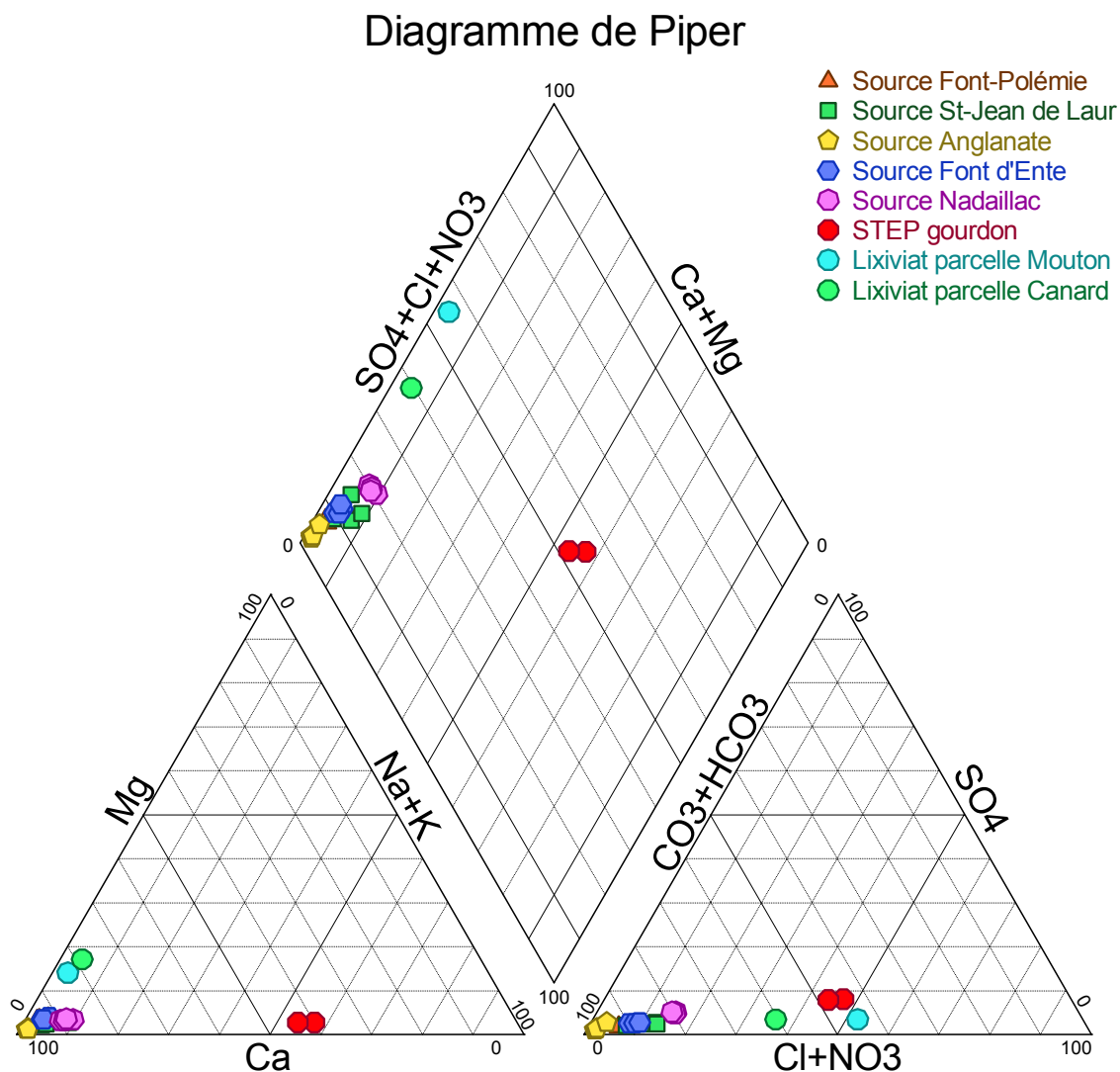


Fig. 34 – Diagramme de piper des eaux de 5 sources karstiques des Causses du Quercy (LOT).

L'analyse en composante principale (ACP) est, selon la définition de F. Cailliez et J-P. Pagès de 1976, « une analyse multidimensionnelle, c'est à dire une méthode statistique de description d'un tableau de données. Elle synthétise et classe les données et révèle les facteurs qui sont à l'origine de l'évolution des variables et de leurs relations. Si l'on cherche les ressemblances entre variables ou leur variation, l'ACP est la méthode la plus adaptée. »

L'analyse en composante principale permet de corroborer la différenciation des types d'eau en présence au sein des différents systèmes karstiques (**figure 35**). Les eaux usées des STEP se distinguent nettement des autres eaux par une minéralisation plus importante (Cl, Na, Ca, K, B, Zn, SO₄) tandis que les eaux des lixiviat des parcelles (mouton canard) se caractérisent par des teneurs en NO₃ et Mg plus élevées. Cette analyse permet en outre de montrer que les eaux des sources karstiques sont globalement influencées par les pollutions organiques et par les rejets de STEP pour Nadaillac en particulier. L'influence des engrais minéraux ne peut pas être évaluée dans cette analyse en raison de l'absence de caractérisations chimiques détaillées. Ces premiers résultats permettent de mettre en évidence l'effet de la pression anthropique sur la qualité des eaux karstiques du Quercy.

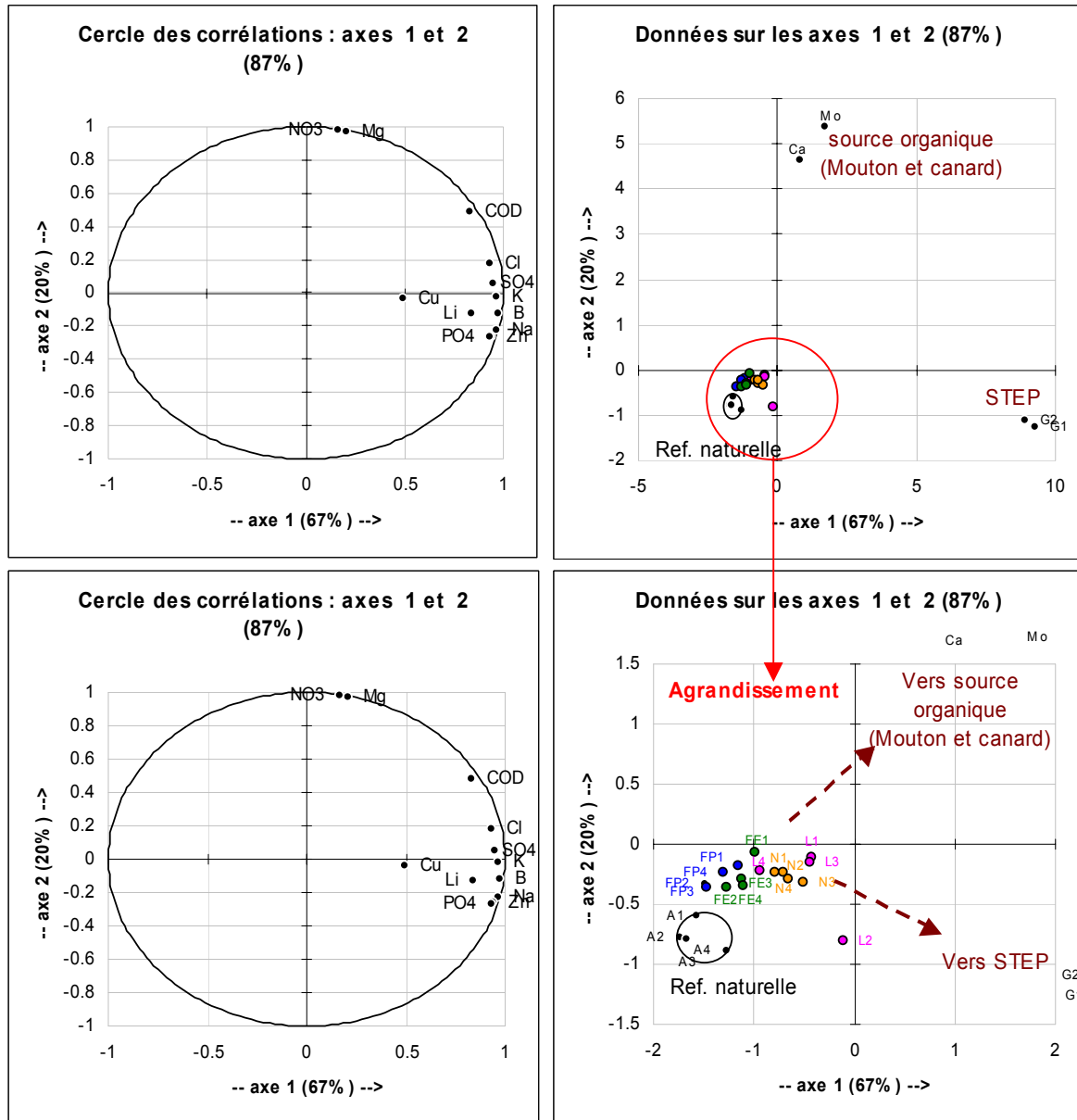


Fig. 35 – Analyse en composantes principales (ACP) sur les éléments majeurs et mineurs analysés dans les eaux des sources karstiques et dans les sources de pollution.

(FP= Font polémie ; FE = Font d’Ente ; N=Nadaillac ; L=St-Jean de Laur ; A = Anglantat)

9.2 SYSTEME KARSTIQUE DE FONT POLEMIE

Nous présentons dans les paragraphes suivants l'approche méthodologique mise en œuvre dans cette étude pour tenter d'identifier l'origine des pollutions des sources karstiques. Les différentes étapes du raisonnement sont décrites dans le détail pour cette source. Dans la suite du rapport, les étapes du raisonnement seront décrites plus rapidement afin d'éviter les redondances inutiles.

La **figure 36** présente les compositions isotopiques en nitrates ($\delta^{15}\text{N}$) en fonction de l'inverse des teneurs en nitrates des eaux de la source karstique de Font-Polémie. Les signatures géochimiques des différentes sources de pollution sont également reportées. Dans la représentation semi-logarithmique adoptée, les droites de mélange sont représentées par des courbes plus ou moins incurvées. La courbe 1 représente la droite de mélange calculée entre le pôle naturel et le pôle engrais minéral. Les courbes 2 et 2' représentent les droites de mélange calculées entre le pôle eaux usées et le pôle engrais minéral. Les courbes 3 et 3' représentent les droites de mélange calculées entre le pôle eaux usées et le pôle naturel.

Il apparaît, sur la base des isotopes stables de l'azote, que l'origine de **la pollution nitraté des eaux de la source karstique de Font-Polémie soit multiple** dans la mesure où les points ne s'alignent sur aucune des droites de mélange définies précédemment. Les résultats suggèrent que la signature isotopique en nitrate résulte d'un mélange à trois composantes : engrais minéral, eaux usées et pôle naturel, dans la mesure où les points s'inscrivent dans le triangle de mélange défini par ces pôles.

Une autre interprétation possible serait de considérer une source organique enrichie en azote 15 (lisiers de porcs par exemple) en lieu et place du pôle « eaux usées ». Sur la seule base des isotopes stables de l'azote et de l'inverse des teneurs en nitrates, il est donc difficile de conclure.

Nous avons souligné dans la présentation des sources de pollution que les eaux usées étaient particulièrement chargées en bore. Sur la **figure 37** qui présente les compositions isotopiques en nitrates ($\delta^{15}\text{N}$) en fonction du rapport molaire B/NO_3 , il est maintenant possible de distinguer et de différencier les pôles « Eaux usées » et « sources organiques ». La position moyenne du pôle « engrais minéral » sur la **figure 36** correspond à une charge polluante de : $\text{NO}_3 = 40 \text{ mg/l}$ et $\text{B} = 0.05 \text{ mg/l}$. A titre d'information, nous avons reporté les positions extrêmes que pourrait avoir la charge polluante qui contribue à la recharge des aquifères karstiques pour des concentrations de 10 et 100 mg/l en NO_3 . La courbe 1 représente la droite de mélange entre le pôle naturel et le pôle engrais minéral. Les courbes 2 et 2' représentent les droites de mélange entre le pôle engrais minéral et le pôle organique « lisiers de Porcs ». Les courbes 3 et 3' représentent les droites de mélange entre le pôle organique « lisiers de Porcs » et le pôle naturel.

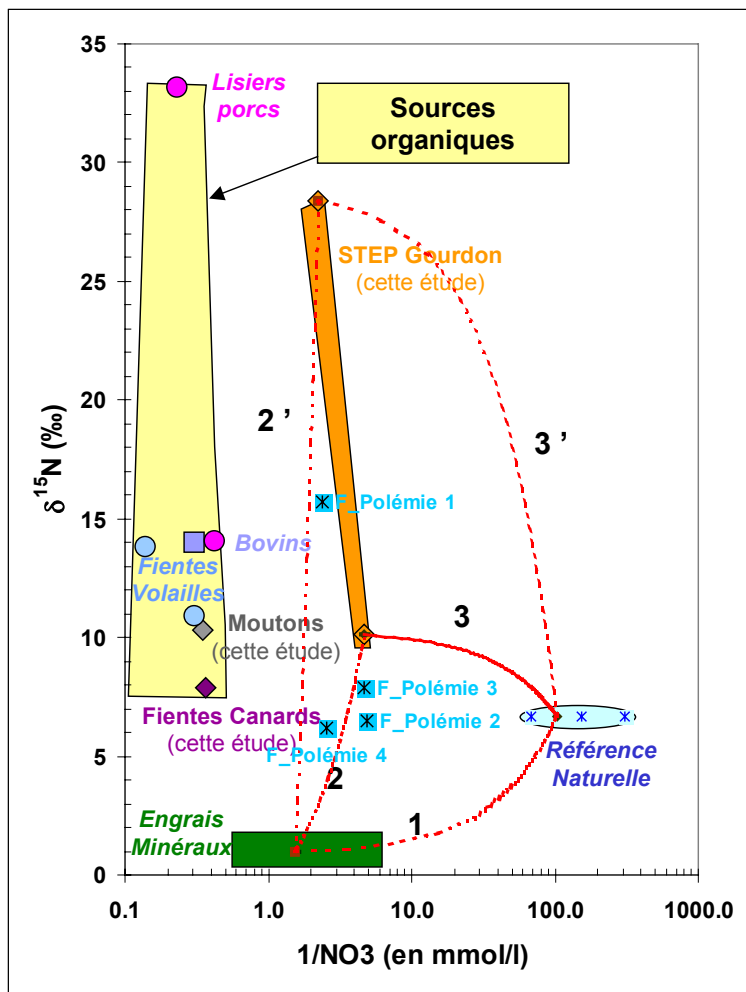


Fig. 36 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ en fonction du rapport 1/NO₃ de la source karstique de Font Polémie

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

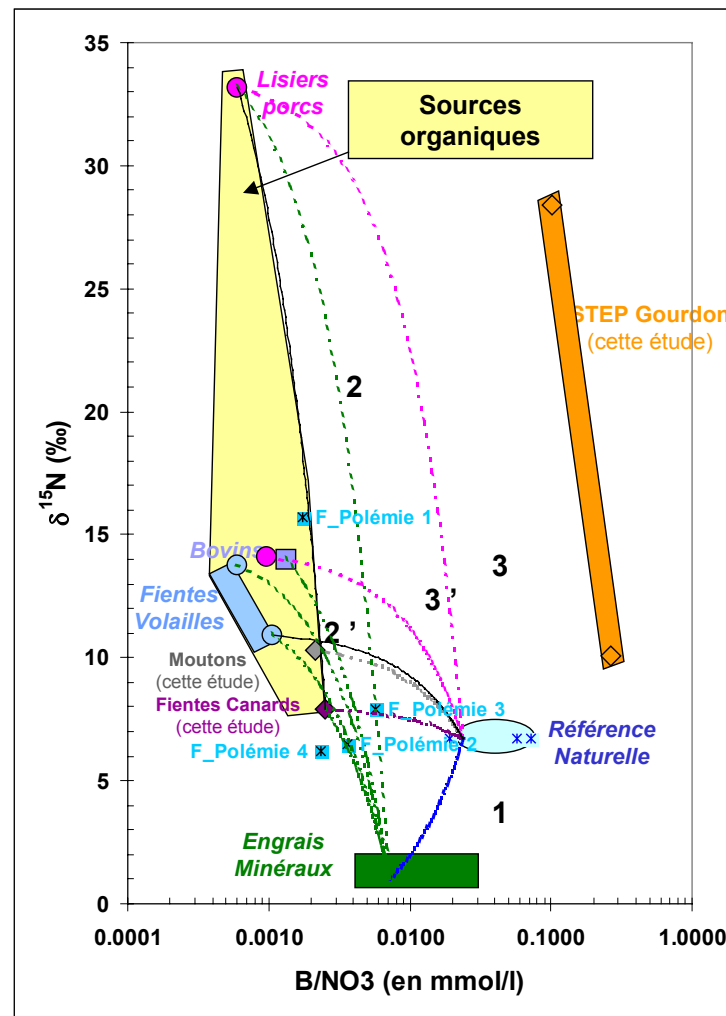


Fig. 37 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ en fonction du rapport B/NO₃ de la source karstique de Font Polémie

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

Sur la **figure 37**, la signature isotopique de l'échantillon « Font-Polémie-1 » prélevé en octobre 2002 en contexte de début des hautes eaux (intermédiaire) apparaît très nettement influencé par une source organique enrichie en azote 15 de type « lisiers de Porcs » compte tenu de la valeur isotopique de l'azote des nitrates (+15.7 ‰). A l'inverse, la signature isotopique des échantillons « Font-Polémie-2 et 4 » prélevé en avril 2003 et décembre 2003 (contexte de moyennes et hautes eaux) apparaissent nettement plus appauvri en azote 15 ce qui indique une contribution majoritaire du pôle engrais minéral. La signature isotopique de l'échantillon « Font-Polémie-3 » prélevé en juillet 2003 (contexte de basses eaux) est intermédiaire aux précédentes.

Il convient maintenant de s'intéresser aux informations apportées par les isotopes du bore afin de conforter ou non les résultats obtenus à l'aide des isotopes du nitrate.

La **figure 38** présente les compositions isotopiques en bore ($\delta^{11}\text{B}$) en fonction de l'inverse des teneurs en bore des eaux de la source karstique de Font-Polémie. Les signatures géochimiques des différentes sources de pollution sont également reportées. Dans la représentation semi-logarithmique adoptée, les droites de mélange sont représentées par des courbes plus ou moins incurvées. Les courbes 1 et 1' représentent les droites de mélange entre le pôle naturel et/ou la pluie et le pôle engrais minéral. Les courbes 2 et 2' représentent les droites de mélange entre le pôle « engrais minéral » et le pôle « sources organiques ». Les courbes 3 et 3' représentent les droites de mélange entre le pôle « sources organiques » et le pôle naturel.

Les signatures isotopiques du bore de la source de Font-Polémie sont globalement homogènes (autour de 15 ‰) et sont nettement enrichies en bore par rapport aux pôles « engrais minéral » et « eaux usées ». Les signatures de l'eau des sources ne peuvent pas être expliquées comme le résultat d'un simple mélange à deux composantes : « référence naturelle et/ou eau de pluie » et « engrais minérale » ou « eaux usées ». Il faut faire intervenir une source organique de bore pour expliquer les compositions isotopiques des eaux de la source. Néanmoins, il paraît impossible de différencier les sources sur la seule base des résultats isotopiques du bore.

La **figure 39** qui représente l'évolution des signatures isotopiques du bore en fonction des signatures isotopiques du nitrate apporte des informations intéressantes et permet de faire une synthèse des interprétations précédentes. La position des points dans le diagramme suggère que le système karstique est influencé par les trois types de pollution : engrais, eaux usées et sources organiques.

En conclusion, la confrontation et la synthèse des informations apportées par les isotopes du bore et du nitrate permettent de montrer que la pollution azotée de la source de Font-Polémie est multiple. Les eaux de la source karstique apparaissent à la fois influencées par le pôle « engrais minéral » et une source organique, (vraisemblablement de type « lisiers de porcs » compte tenu de la signature isotopique du nitrate ($\delta^{15}\text{N} = 15.7 \text{ ‰}$) et du rapport B/NO₃ des eaux en période d'eaux intermédiaires. On ne peut cependant pas exclure la participation des eaux usées à la contamination de cette source.

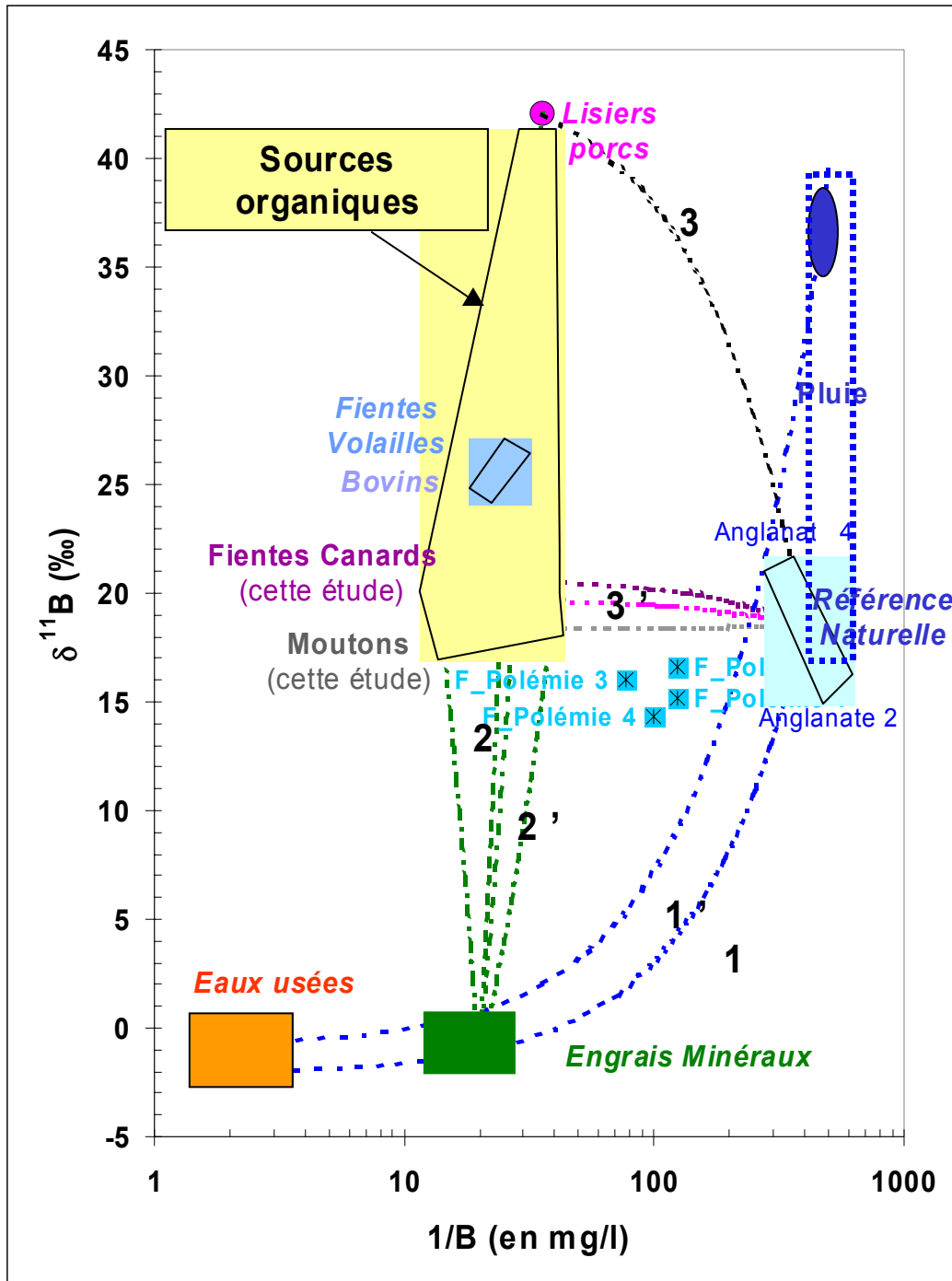


Fig. 38 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de l'inverse des teneurs en bore des eaux de la source karstique de Font-Polémie

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

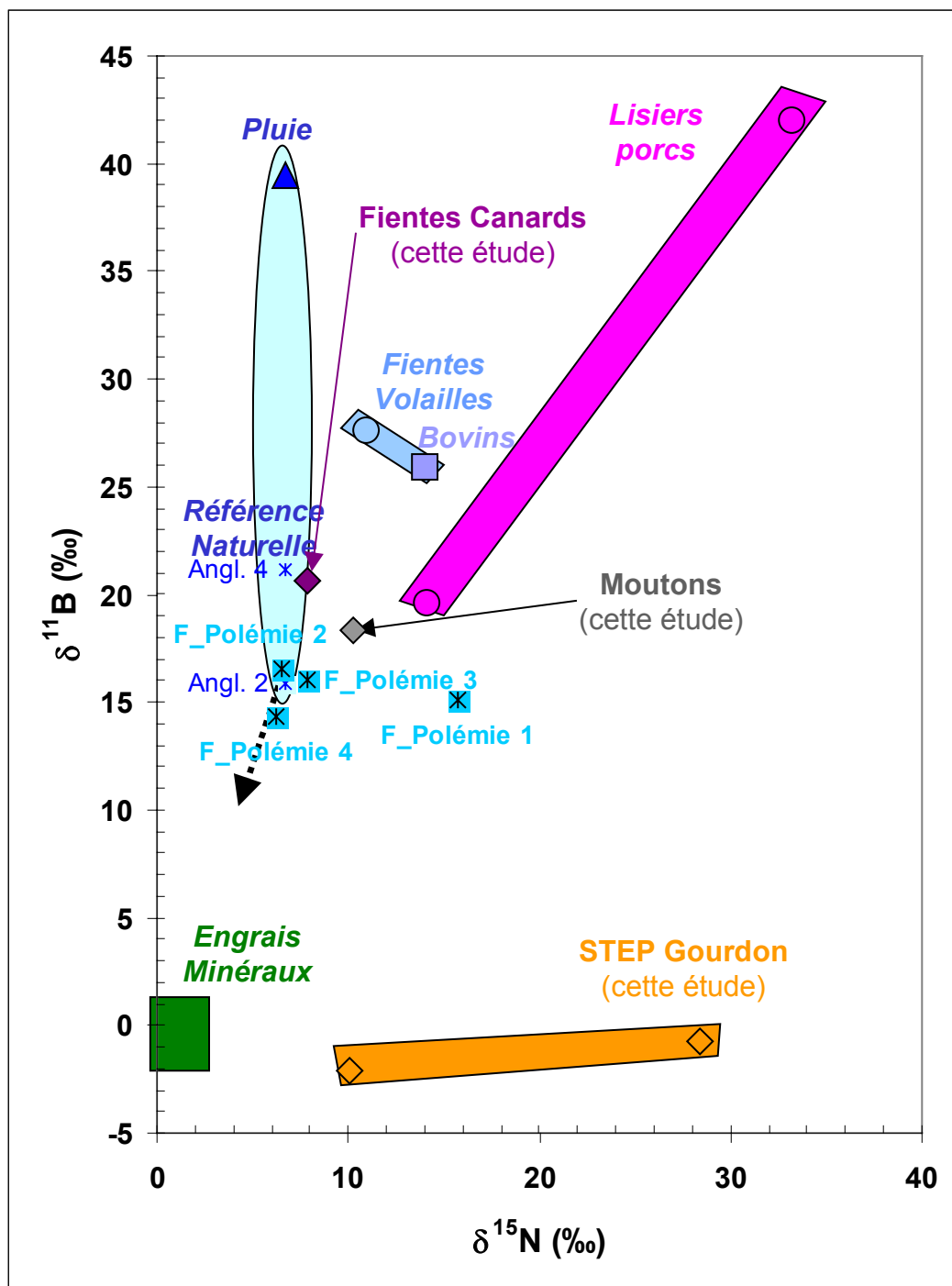


Fig. 39 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ versus $\delta^{15}\text{NO}_3$ des eaux de la source karstique de Font-Polémie
Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

9.3 SYSTEME KARSTIQUE DE ST-JEAN DE LAUR

La **figure 40** présente les compositions isotopiques en nitrates ($\delta^{15}\text{N}$) en fonction du rapport B/NO_3 des eaux de la source karstique de St-Jean de Laur. Les signatures géochimiques des différentes sources de pollution sont également reportées. La courbe 1 représente la droite de mélange entre le pôle naturel et le pôle engrais minéral. Les courbes 2 et 2' représentent les droites de mélange entre le pôle eaux usées et le pôle engrais minéral. Les courbes 3 et 3' représentent les droites de mélange entre le pôle eaux usées et le pôle naturel.

Il apparaît, sur la base des isotopes stables de l'azote, que l'origine de **la pollution nitratée des eaux de la source karstique de St-Jean de Laur soit multiple**. Les résultats suggèrent que la signature isotopique en nitrate résulte d'un mélange entre le pôle engrais minéral, le pôle eaux usées et le pôle organique.

Il convient maintenant de s'intéresser aux informations apportées par les isotopes du bore afin de conforter ou non les résultats obtenus à l'aide des isotopes du nitrate. Les signatures isotopiques des eaux de la source apparaissent enrichies en bore par rapport aux eaux usées (**figure 41**) et ne peuvent pas être expliquées par le simple mélange entre l'eau du « pôle naturel et/ou pluie » et du pôle minérale et/ ou eaux usées (mélange 1 et 1', **figure 8**). Il faut donc faire intervenir une source organique de bore (enrichi en ^{11}B) pour expliquer les compositions isotopiques des eaux de la source. Néanmoins, la différenciation des sources organiques est impossible sur la seule base des résultats isotopiques du bore.

La **figure 42** qui représente l'évolution des signatures isotopiques du bore en fonction des signatures isotopiques du nitrate apportent des informations intéressantes. La position des points dans le diagramme suggère que le système karstique est majoritairement influencé par les rejets d'eaux usées et également par le pôle engrais. La position du point St-Jean-de-Laur n°3 suggère néanmoins une participation du pôle organique.

En conclusion, la confrontation et la synthèse des informations apportées par les isotopes du bore et du nitrate permettent de montrer que la pollution azotée de la source de St-Jean de Laur est multiple. Les eaux de la sources apparaissent à la fois influencée par le pôle « eaux usées » (majoritairement), le pôle « engrais minéral » et par une source organique, qu'il n'est malheureusement pas possible d'identifier sur la base de ces résultats.

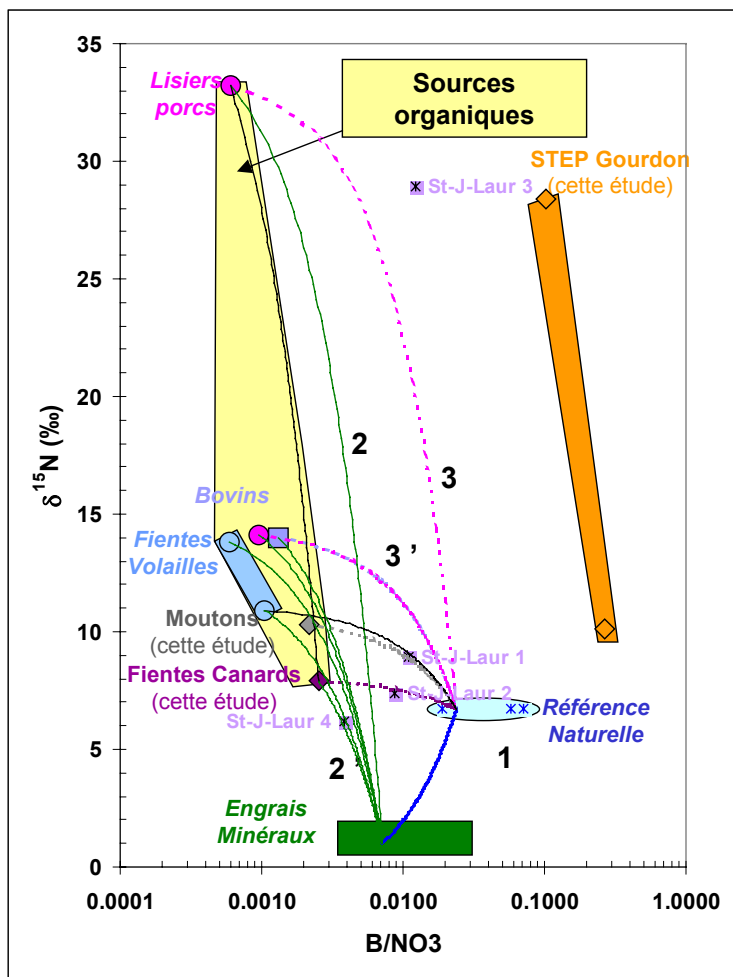


Fig. 40 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ en fonction du rapport $1/\text{NO}_3$ de la source karstique de St-Jean de Laur

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

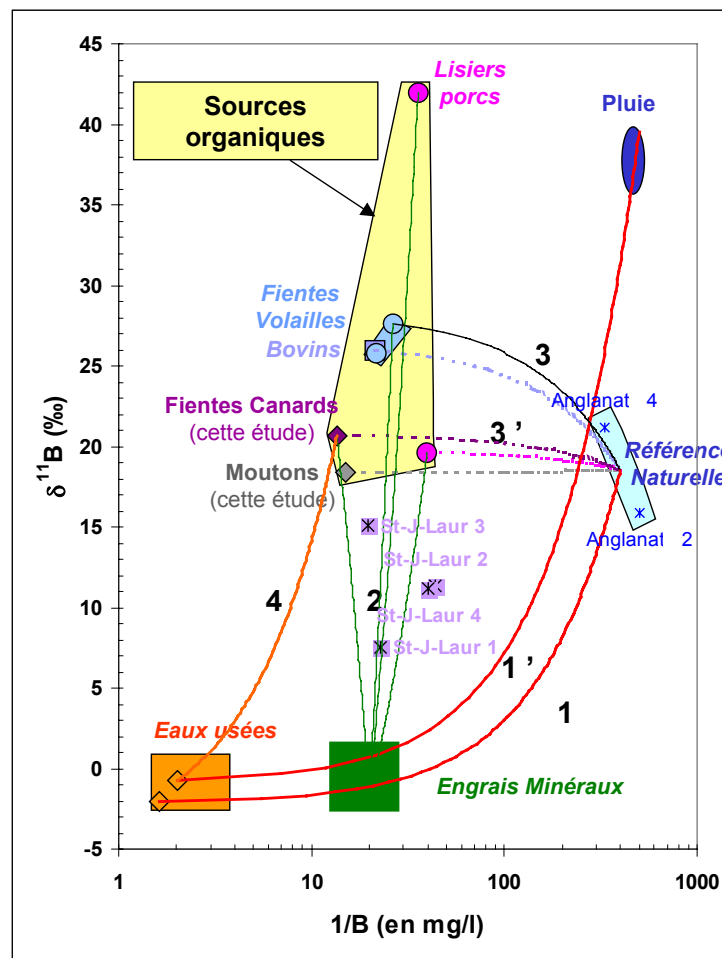


Fig. 41 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction du rapport $1/\text{B}$ de la source karstique de St-Jean de Laur

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

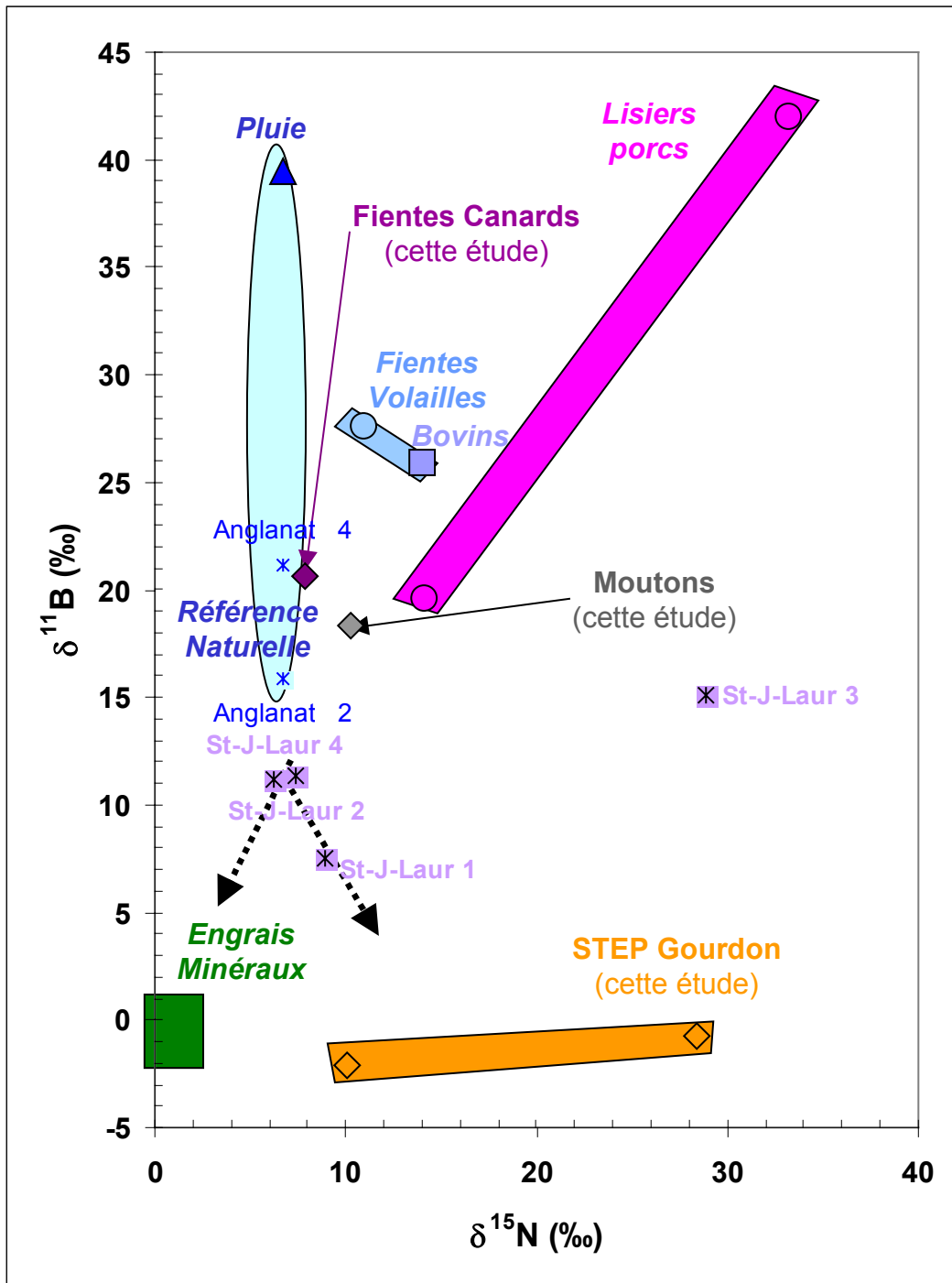


Fig. 42 -Relation $\delta^{11}\text{B}$ versus $\delta^{15}\text{NO}_3$ des eaux de la source karstique de St-Jean-de-Laur.

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

9.4 SYSTEME KARSTIQUE DE FONT D'ENTE

La **figure 43** présente les compositions isotopiques en nitrates ($\delta^{15}\text{N}$) en fonction du rapport molaire B/NO_3 des eaux de la source karstique de Font d'Ente. Les signatures géochimiques des différentes sources de pollution sont également reportées. Les courbes '1' (en rouges) représentent les droites de mélange entre le pôle « eaux usées » et le pôle « engrais minéral ». Les courbes '2' (en noires) représentent les droites de mélange entre le pôle « eaux usées » et le pôle « référence naturelle ». Les courbes '3' (en roses) représentent les droites de mélange entre le pôle « eaux usées » et le pôle « organique ». Les courbes '4' (en bleues) représentent les droites de mélange entre le pôle « référence naturelle » et le pôle « organique ». Enfin, les courbes '5' (en verts) représentent les droites de mélange entre le « engrais minéral » et le pôle « organique »

Il apparaît, sur la base des isotopes stables de l'azote et des rapports molaires (B/NO_3), que l'origine de **la pollution nitratée des eaux de la source karstique de Font-d'Ente soit multiple**. Les résultats suggèrent que la signature isotopique en nitrate résulte d'un mélange à trois composantes : Engrais minéral, source organique et pôle naturel, dans la mesure où les points s'inscrivent dans le triangle de mélange défini par ces pôles. Les résultats permettent par ailleurs de suggérer l'absence du rôle joué dans la contamination de la source.

Il convient maintenant de s'intéresser aux informations apportées par les isotopes du bore afin de conforter ou non les résultats obtenus à l'aide des isotopes du nitrate. Les signatures isotopiques des eaux de la source apparaissent enrichies en bore par rapport aux eaux usées et aux engrais minéraux (**figure 44**) ce qui confirme le rôle joué par le pôle organique dans la pollution de la source de Font d'Ente. Les signatures isotopiques des eaux de la source ne peuvent pas être expliquées par le simple mélange entre l'eau du « pôle naturel et/ou pluie » et du pôle minérale (mélange 1 en rouge, **figure 44**). De la même façon, les signatures des eaux ne peuvent pas être expliquées par le simple mélange entre l'eau du « pôle naturel » et du pôle « organique » (mélange 3 en rose, **figure 44**). En effet, la signature isotopique des échantillons « Font-d'Ente-2 et Font-d'Ente 4 » prélevés en avril 2003 et décembre 2003 ne peuvent pas être expliquée si l'on ne considère pas une source appauvrie en bore 11 (engrais minéral ou eaux usées).

La **figure 45** qui représente l'évolution des signatures isotopiques du bore en fonction des signatures isotopiques du nitrate apportent des informations intéressantes. La position des points dans le diagramme suggère que le système karstique est majoritairement influencé par la source organique compte tenu des signatures isotopiques.

En conclusion, la confrontation et la synthèse des informations apportées par les isotopes du bore et du nitrate permettent de montrer que la pollution azotée de la source de Font d'Ente est multiple. Les eaux de la source apparaissent majoritairement influencée par une source organique, qu'il n'est malheureusement pas possible d'identifier sur la base de ces résultats. Il apparaît également que le pôle « engrais minéral » contribue également à la pollution de ce système. Les résultats suggèrent par ailleurs que le système est peu ou pas influencé par les contaminations par les eaux usées.

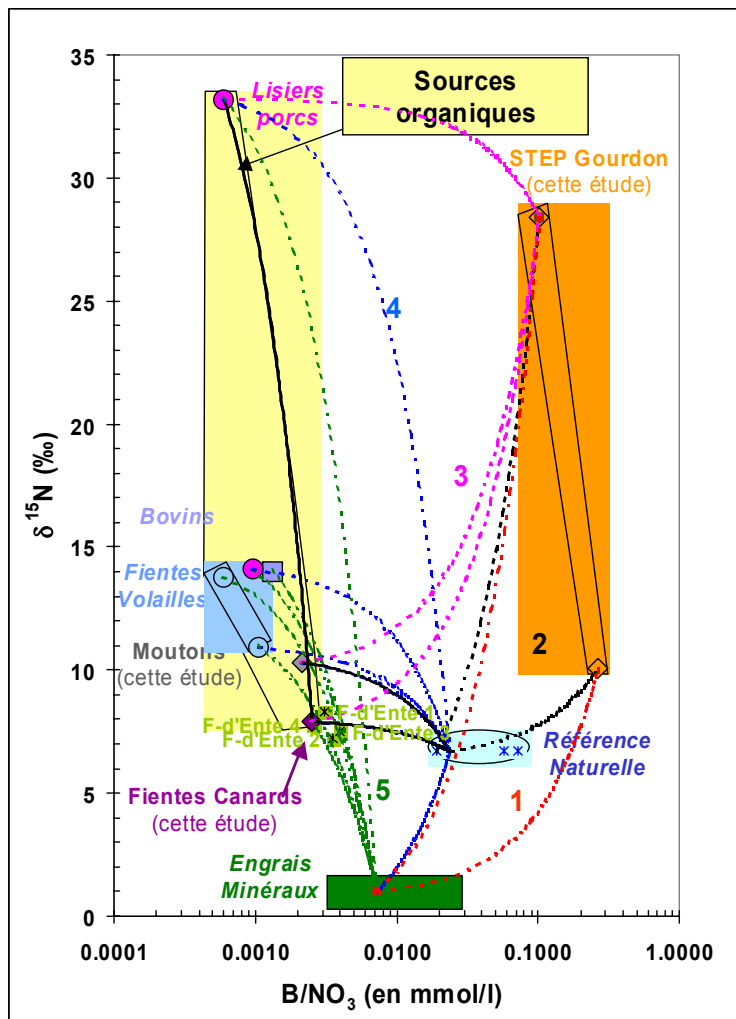


Fig. 43 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ en fonction du rapport B/NO_3 de la source karstique de Font d'Ente

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

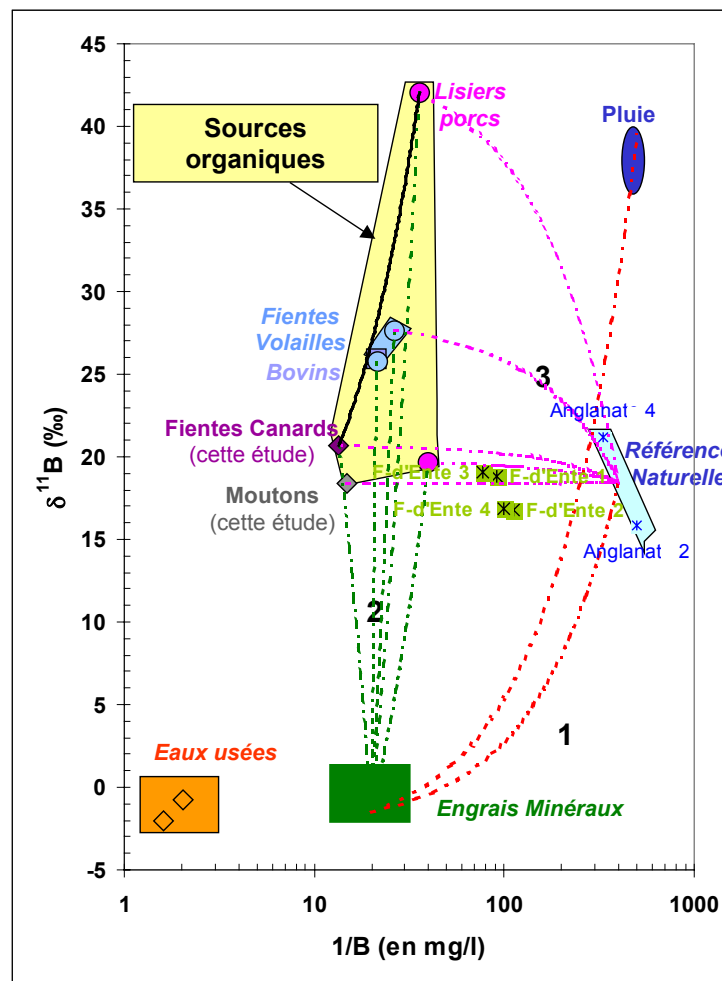


Fig. 44 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction du rapport $1/\text{B}$ de la source karstique de Font d'Ente

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

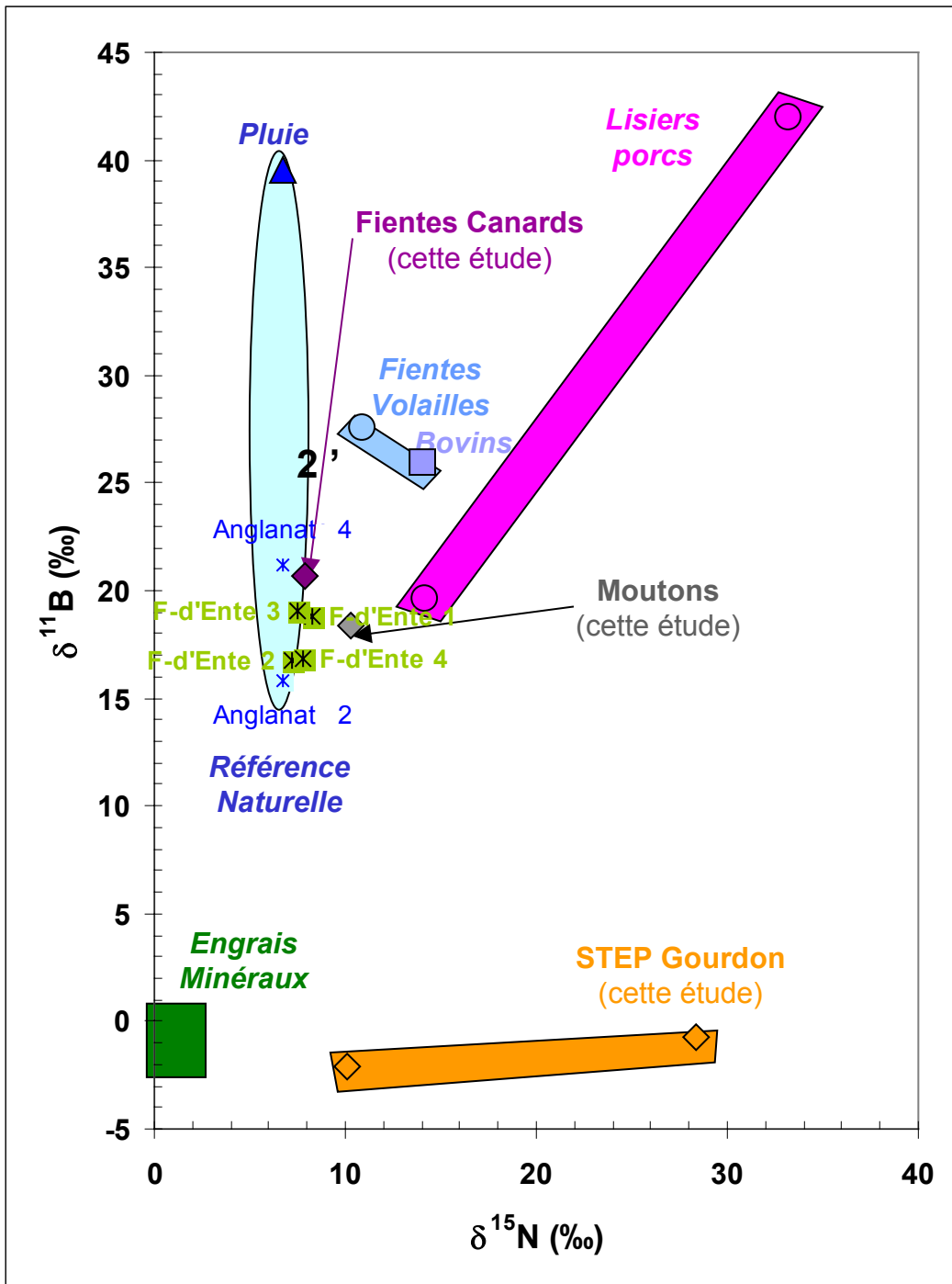


Fig. 45 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ versus $\delta^{15}\text{NO}_3$ des eaux de la source karstique de Font d'Ente. Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

9.5 SYSTEME KARSTIQUE DE NADAILLAC

La **figure 46** présente les compositions isotopiques en nitrates ($\delta^{15}\text{N}$) en fonction du rapport molaire B/NO_3 des eaux de la source karstique de Nadaillac. Les signatures géochimiques des différentes sources de pollution sont également reportées. Les courbes '1' (en rouges) représentent les droites de mélange entre le pôle « eaux usées » et le pôle « engrais minéral ». Les courbes '2' (en noires) représentent les droites de mélange entre le pôle « eaux usées » et le pôle « référence naturelle ». Les courbes '3' (en roses) représentent les droites de mélange entre le pôle « eaux usées » et le pôle « organique ». Les courbes '4' (en bleues) représentent les droites de mélange entre le pôle « référence naturelle » et le pôle « organique ». Enfin, les courbes '5' (en verts) représentent les droites de mélange entre le « engrais minéral » et le pôle « organique »

Il apparaît, sur la base des isotopes stables de l'azote et des rapports molaires (B/NO_3), que l'origine de **la pollution nitratée des eaux de la source karstique de Nadaillac soit de nouveau multiple**. La signature isotopique des eaux pourrait être en effet expliquée comme le résultat d'un mélange « tri-polaire » avec ces composantes : engrais minéral, source organique et pôle naturel. Néanmoins, les points semblent s'organiser autour d'une droite qui recoupe le pôle « eaux usées » ce qui laisser suggérer que ce pôle contribue également à la pollution de ce système. Ceci demande à être vérifié à l'aide d'autres traceurs car les isotopes du nitrate ne permettent pas de trancher.

Il convient maintenant de s'intéresser aux informations apportées par les isotopes du bore afin de conforter ou non les résultats obtenus à l'aide des isotopes du nitrate. Les signatures isotopiques en bore des eaux de la source apparaissent enrichies en bore par rapport aux eaux usées et/ou engrais minéraux (**figure 46**) ce qui confirme le rôle joué par le pôle organique dans la pollution de la source de Nadaillac. Les signatures isotopiques des eaux de la source ne peuvent pas être expliquées par le simple mélange entre l'eau du « pôle naturel et/ou pluie » et du pôle « minérale et/ou eaux usés » (mélange 1 en rouge, **figure 47**). De la même façon, les signatures des eaux ne peuvent pas être expliquées par le simple mélange entre l'eau du « pôle naturel » et du pôle « organique » (mélange 3 bleu, **figure 47**). En effet, la signature isotopique de l'échantillon « Nadaillac-1 et 4 » prélevé en octobre 2002 et décembre 2003 ne peut pas être expliquée si l'on ne considère pas une source appauvrie en bore 11 (engrais minéral et/ou eaux usés). L'utilisation de la signature isotopique du bore en fonction de l'inverse des teneurs en bore ne permet pas de conclure quant à l'éventuelle participation des deux pôles (engrais minéral et eaux usées) à la pollution azotée de la source de Nadaillac.

La **figure 48** qui représente l'évolution des signatures isotopiques du bore en fonction des signatures isotopiques du nitrate apportent des informations intéressantes. Les résultats suggèrent en effet que les eaux usées contribuent à la pollution de ce système.

En conclusion, la confrontation et la synthèse des informations apportées par les isotopes du bore et du nitrate permettent de montrer que la pollution azotée de la source de Nadaillac est multiple. Les eaux de la source semblent à la fois influencées par le pôle « eaux usées », le pôle « engrais minéral » et une source organique, qu'il n'est malheureusement pas possible d'identifier sur la base de ces résultats.

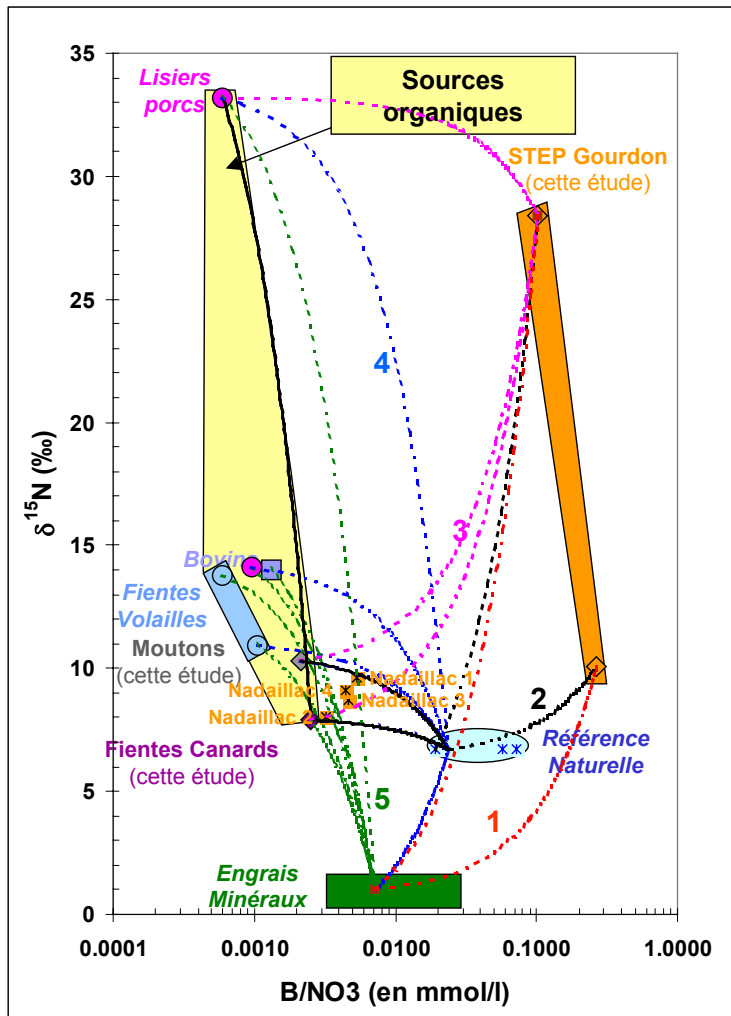


Fig. 46 - Relation $\delta^{15}\text{N}$ en fonction du rapport B/NO₃ de la source karstique de Nadaillac

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

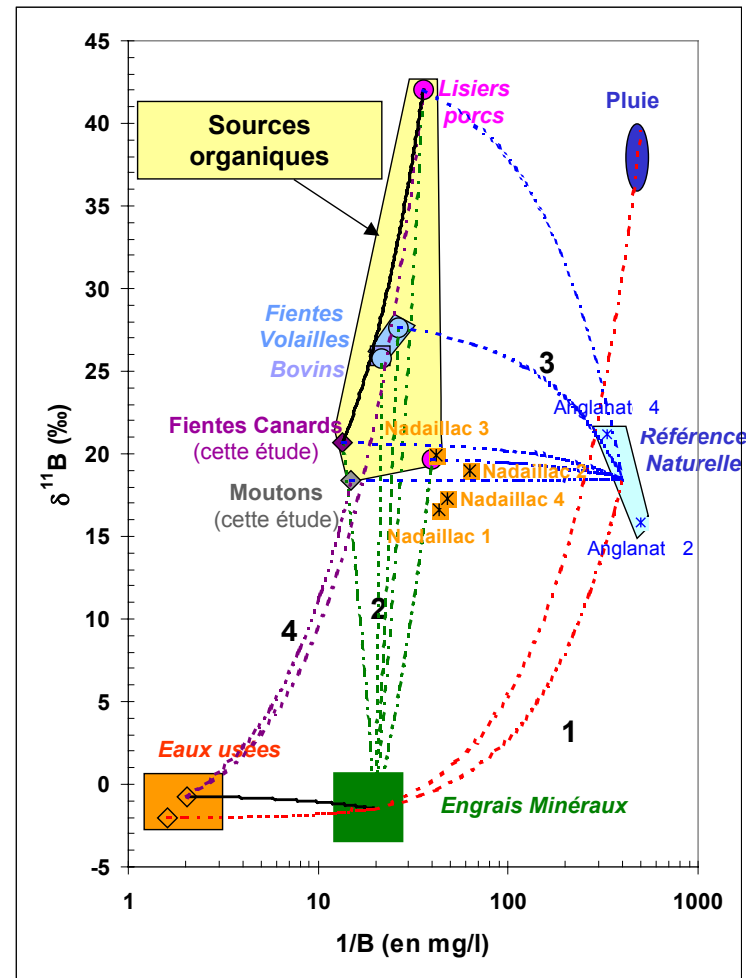


Fig. 47 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction du rapport 1/B de la source karstique de Nadaillac

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

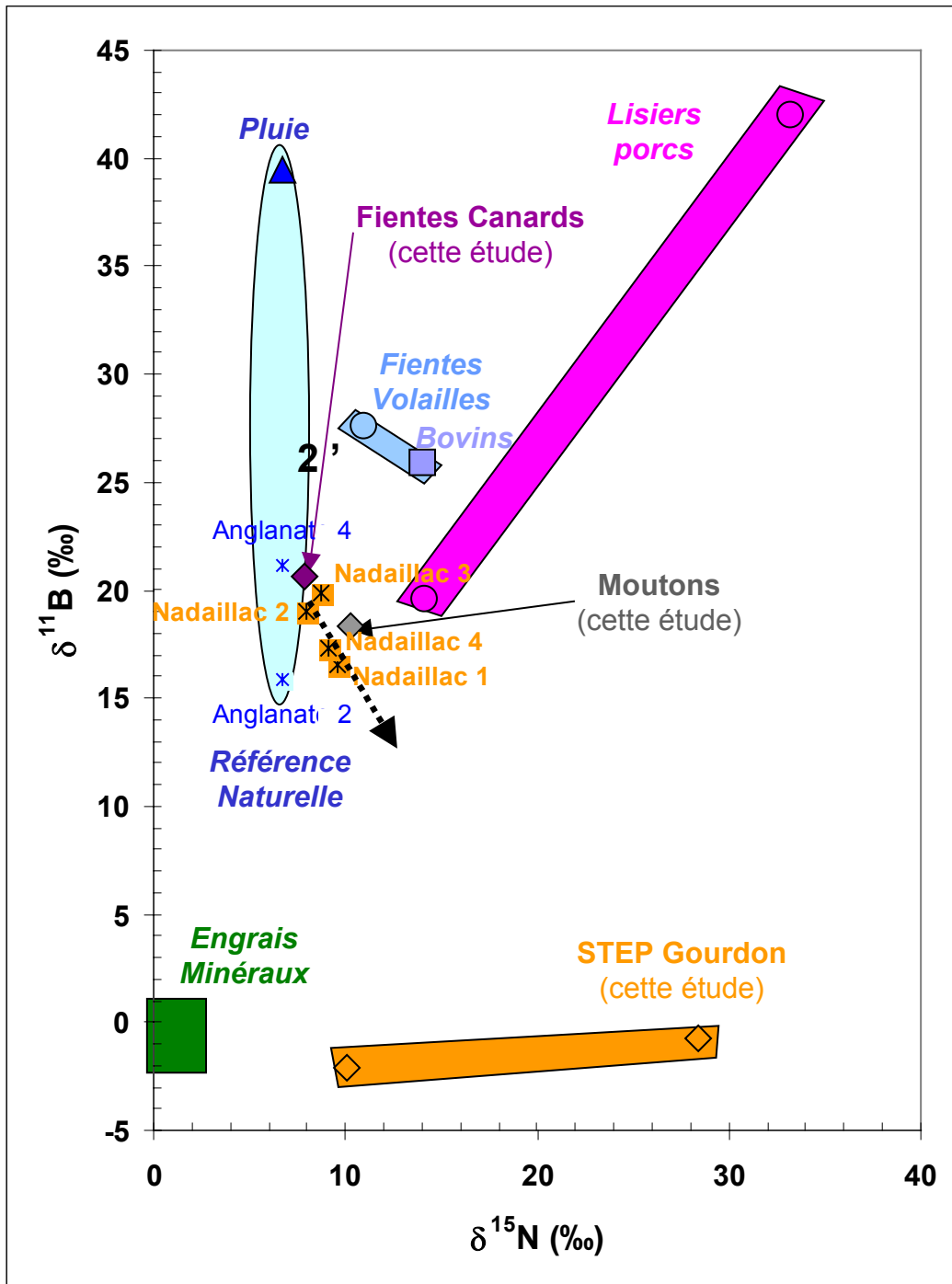


Fig. 48 - Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction du $\delta^{15}\text{N}$ des eaux de la source karstique de Naidailac

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

9.6 INFORMATIONS APPORTEES PAR LES ISOTOPES DU STRONTIUM

Nous présentons **figure 49** l'évolution des rapports isotopiques ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) du strontium en fonction de l'inverse des teneurs en strontium. Dans cette représentation graphique, les eaux des différentes sources karstiques s'individualisent les unes des autres. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où les différents systèmes karstiques se développent au sein de calcaires d'âges différents (cf. chapitre 2). Au sein de chaque système karstique, on observe une certaine variabilité isotopique qu'il est malheureusement difficile d'interpréter. Les résultats des sources de Nadaillac, Font d'Ente et Font-Polémie suggèrent néanmoins une participation du pôle engrais minéral. En effet, les engrais sont en général très peu radiogéniques (appauvri en ^{87}Sr), or les points s'alignent sur des droites de mélange dont l'un des pôles est très appauvri en strontium 87. Il est malheureusement impossible de déterminer des proportions de mélange car nous ne disposons pas, d'une part, de la référence isotopique naturelle des calcaires de chacun des systèmes karstiques et d'autre part, de la signature isotopique des engrais utilisés dans les pratiques culturales de la zone d'étude. L'étude des rapports isotopiques et des autres rapports chimiques (Ca/Sr ; Mg/Sr NO₃/Sr, B/Sr etc) n'apportent pas d'information supplémentaire.

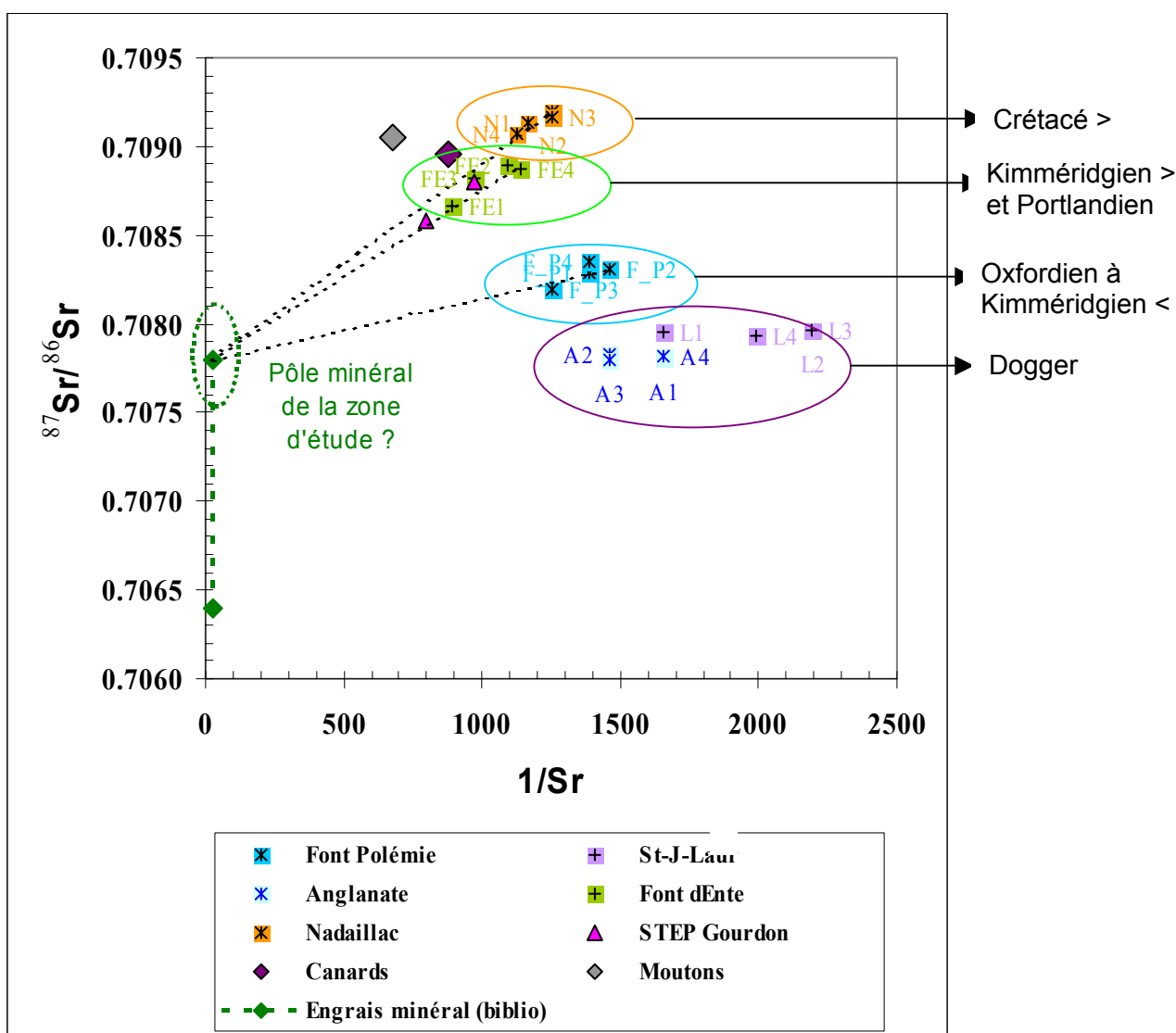


Fig. 49 - Evolution du rapport isotopique du strontium en fonction de l'inverse des teneurs en strontium des sources karstiques.

Les différents pôles de pollution et la signature de la référence naturelle sont également reportés.

9.7 INFORMATIONS SUR LES CONDITIONS D'ÉCOULEMENTS AU SEIN DES SYSTEMES KARSTIQUES

La signature chimique des eaux au cours des périodes d'étiages permet d'accéder aux conditions d'écoulement des eaux au sein des systèmes karstique (Bakalowicz 1979 ; Plagnes 1997). Les informations apportés par les paramètres du système calco-carbonique (calculé à l'aide du logiciel PhreeqcV2, Parkhurst and Appelo, 1999) permettent de distinguer :

- (1) les systèmes pour lesquels l'écoulement des eaux dans la zone noyée se produit en partie à surface libre
- (2) les systèmes pour lesquels l'écoulement des eaux dans la zone noyée se produit en en charge

Dans le premier groupe, les eaux présentent des indices de saturation élevés vis-à-vis de la calcite ($IS \gg 0$) et des pressions partielles en CO_2 (pCO_2) qui diminuent lorsque l'indice de saturation de la calcite augmente (cf. tableau 4). Ce phénomène indique que les phénomènes de dégazage sont favorisés car l'eau commence à perdre une partie de son CO_2 dissous avant l'émergence. De façon simultanée, le carbonate de calcium peut commencer à précipiter (concrétion calcaire, travertin par exemple). Ce phénomène se produit lorsque l'écoulement des eaux se fait en partie à surface libre dans des conduits potentiellement pénétrable. Les sources d'Anglanat et de Saint Jean de Laur semblent concernées par ce phénomène.

Dans le second groupe, les eaux apparaissent sous saturées ou à l'équilibre vis-à-vis de la calcite ($IS < 0$; $IS = 0$) et l'évolution des pressions partielles en CO_2 (pCO_2) n'apparaît pas corrélée à l'évolution de l'indice de saturation de la calcite. Les phénomènes de dégazage ne sont pas favorisés ce qui indique que l'écoulement des eaux se produit dans des réseaux en charge (non pénétrable, excepté par des plongeurs). L'écoulement des eaux des systèmes karstique de Nadaillac, Font d'Ente et Font Polémie semblent se produire dans des réseaux karstiques en charge, au moins dans les parties proches de l'exutoire.

La relative stabilité des teneurs en carbone organique dissous (CMTD) des eaux indique que les systèmes ne sont pas affectés par une source de CO_2 d'origine profonde. Un apport de CO_2 profond se serait traduit pas une nette élévation du CMTD notamment en étiage.

Les indices de saturation vis-à-vis des phases minérales contenant de la silice (quartz, calcédoine) sont globalement proches de 0, voire supérieurs à zéro. Ce résultat indique que les eaux ont résidés plusieurs semaines dans les systèmes afin que les réactions thermodynamiques puissent avoir lieu.

Tableau 3 : pH, CMTD, pCO₂ et indices de saturation des eaux vis-à-vis de la calcite, de la dolomite, du quartz et de la calcédoine.

Dénomination	pH	CMTD mmol/l	IS Calcite	IS Dolomite	IS Quartz	IS Calcédoine	IS CO ₂ (g)	P(CO ₂) %
Anglanat_1	7.35	7.68	0.58	0.47	-0.05	-0.33	-1.77	1.7
Anglanat_2	7.14	7.45	0.30	-0.21	0.10	-0.19	-1.64	2.3
Anglanat_3	7.49	7.69	0.69	0.62	0.05	-0.23	-1.93	1.2
Anglanat_4	7.00	7.17	0.07	-0.65	0.04	-0.24	-1.54	2.9
Font d'Ente_1	7.15	5.99	0.20	0.19	0.30	0.02	-1.70	2.0
Font d'Ente_2	7.06	5.87	0.00	-0.31	0.44	0.16	-1.68	2.1
Font d'Ente_3	7.13	5.94	0.06	-0.12	0.42	0.14	-1.74	1.8
Font d'Ente_4	6.63	5.86	-0.56	-1.43	0.34	0.06	-1.37	4.3
Nadaillac_1	6.50	5.23	-0.77	-1.80	0.39	0.11	-1.30	5.0
Nadaillac_2	7.17	4.99	0.02	-0.29	0.50	0.22	-1.85	1.4
Nadaillac_3	7.10	5.12	-0.04	-0.40	0.46	0.18	-1.77	1.7
Nadaillac_4	7.00	5.20	-0.18	-0.65	0.44	0.16	-1.68	2.1
Font Polémie_1	6.56	6.00	-0.51	-1.26	0.21	-0.07	-1.26	5.5
Font Polémie_2	6.94	6.82	-0.01	-0.36	0.33	0.04	-1.52	3.0
Font Polémie_3	7.05	6.82	0.09	-0.15	0.31	0.03	-1.60	2.5
Font Polémie_4	7.00	6.64	0.01	-0.30	0.25	-0.03	-1.58	2.6
St-Jean de Laur_1	7.10	6.40	0.17	0.01	0.26	-0.01	-1.62	2.4
St-Jean de Laur_2	7.30	5.94	0.26	0.02	0.36	0.08	-1.89	1.3
St-Jean de Laur_3	7.41	5.25	0.29	0.21	0.35	0.06	-2.03	0.9
St-Jean de Laur_4	7.00	5.58	-0.12	-0.71	0.31	0.03	-1.65	2.2

10. Quantification des contributions relatives des sources de pollution dans les eaux souterraines des systèmes karstiques

Nous avons mis en évidence précédemment que les sources karstiques étudiées sont soumises à des degrés divers par trois types de pollution d'origine différente :

- Pollution par les sources minérales d'azote (engrais)
- Pollution par les sources organiques d'azote (fientes de canard, déjection de mouton et lisier de porc par exemple)
- Pollution par les sources domestiques d'azote (eaux usées).

Pour quantifier les contributions relatives des différentes sources d'azote pour chacun des aquifères karstiques, il convient de faire quelques hypothèses :

Hypothèse 1 : les teneurs en nitrate et en bore mesurées dans les eaux sont exclusivement apportées par les sources de pollution. Cette hypothèse apparaît justifiée dans la mesure où les teneurs en nitrate et en bore des eaux karstiques sont très nettement supérieures à celles mesurées au niveau de la source d'Anglanat qui constitue pour le secteur d'étude notre référence naturelle (Anglanat : $\text{NO}_3 < 1.1 \text{ mg/l}$; $\text{B} < 5 \text{ } \mu\text{g/l}$). Cette hypothèse revient à négliger les apports par les pluies.

Hypothèse 2 : nous avons montré précédemment que les eaux usées domestiques et les lixiviats des parcelles expérimentales « mouton » et « canard » présentaient des teneurs significatives en chlorures. Afin de prendre en compte l'influence de ces sources de pollution, nous avons corrigé les teneurs en chlorure mesurées dans les sources karstiques afin de considérer uniquement les apports anthropiques en chlorures. La correction a consisté à retrancher aux valeurs mesurées, la teneur en chlorure du pôle naturel caractérisé par la source d'Anglanat. La teneur en chlorure de la source d'Anglanat est de l'ordre de 5 mg/l.

Nous avons supposé que les engrais minéraux apportent pas ou peu de chlorures aux systèmes compte tenu du type d'engrais utilisé dans les pratiques culturales (ammonitrate). Le pôle engrais a été défini en prenant une teneur en chlorures de 10 mg/l.

Hypothèse 3 : nous avons souligné dans le chapitre précédent que les différents pôles de mélange (sources de pollution) sont soumis à une certaine variabilité isotopique et de teneurs ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{11}\text{B}$, NO_3 , B). Les calculs ont été réalisés en considérant les valeurs possibles de chacun des pôles :

- Pôle engrais minéral : $-2 \text{ } \text{‰} < \delta^{15}\text{N} < 2 \text{ } \text{‰}$; $40 \text{ mg/l} < \text{NO}_3 < 100 \text{ mg/l}$; $0 \text{ } \text{‰} < \delta^{11}\text{B} < 2 \text{ } \text{‰}$; $10 \text{ } \mu\text{g/l} < \text{B} < 50 \text{ } \mu\text{g/l}$; $\text{Cl} = 10 \text{ mg/l}$.
- Pôle eaux usées : $10 \text{ } \text{‰} < \delta^{15}\text{N} < 28 \text{ } \text{‰}$; $30 \text{ mg/l} < \text{NO}_3 < 50 \text{ mg/l}$; $0 \text{ } \text{‰} < \delta^{11}\text{B} < 2 \text{ } \text{‰}$; $400 \text{ } \mu\text{g/l} < \text{B} < 600 \text{ } \mu\text{g/l}$; $\text{Cl} = 150 \text{ mg/l}$.
- Pôle organique : $8 \text{ } \text{‰} < \delta^{15}\text{N} < 15 \text{ } \text{‰}$; $50 \text{ mg/l} < \text{NO}_3 < 180 \text{ mg/l}$; $15 \text{ } \text{‰} < \delta^{11}\text{B} < 20 \text{ } \text{‰}$; $50 \text{ } \mu\text{g/l} < \text{B} < 90 \text{ } \mu\text{g/l}$; $\text{Cl} = 100 \text{ mg/l}$.

Les calculs de proportion de mélange ont donc été réalisés à l'aide des traceurs des sources de pollution suivant : rapport isotopique et teneurs du nitrate ; rapport isotopique et teneurs

du bore et concentration en chlorure. La détermination des proportions de mélange est effectué en résolvant le système de 3 équations à 3 inconnues (X_i proportion de mélange) suivant :

$$\begin{cases} 1 = X_1 + X_2 + X_3 \\ A = X_1 \times A_1 + X_2 \times A_2 + X_3 \times A_3 \\ B = X_1 \times B_1 + X_2 \times B_2 + X_3 \times B_3 \end{cases}$$

avec

$$A_i = \frac{\delta^{15}N_i}{(NO_3)_i} \times (Cl_{\text{corrigé}})_i$$

$$B_i = \frac{\delta^{11}B_i}{B_i} \times (Cl_{\text{corrigé}})_i$$

La résolution du système d'équation à 3 inconnues permet d'évaluer les contributions relatives des différents pôles de mélange :

$$X_1 = \frac{A \times (B_2 - B_3) + A_2 \times (B_3 - B) - A_3 \times (B - B_2)}{Cste}$$

$$X_2 = \frac{A_1 \times (B - B_3) + A \times (B_3 - B_1) - A_3 \times (B_1 - B)}{Cste}$$

$$X_3 = 1 - (X_1 + X_2)$$

avec

$$Cste = A_1 \times (B_2 - B_3) + A_2 \times (B_3 - B_1) - A_3 \times (B_1 - B_2)$$

Les différentes proportions de mélanges (X_i) représentent respectivement :

- X_1 = contribution du pôle organique
- X_2 = contribution du pôle « eaux usées » domestique
- X_3 = contribution du pôle « engrais minéral »

36 combinaisons possibles de signatures géochimiques pour les pôles de mélange ont été évaluées. Les résultats moyens sont présentés dans le tableau 4 ci-dessous. A titre d'exemple, une représentation graphique des résultats a été présentée **figure 50**.

La **figure 50** permet de conforter les interprétations qualitatives du chapitre précédent. On montre à l'aide de cette figure que :

- La pollution de source de Font-Polémie est majoritairement attribué (de 60 à 90 %, tableau 4) au pôle « engrais minéral » et dans une moindre mesure par le pôle « organique » (de 5 à 35 %). La contribution du pôle « eaux usées » est très faible (<6%) voire négligeable compte tenu des incertitudes.
- La pollution de source de St-Jean de Laur est majoritairement attribué (de 70 à 95 %, tableau 4) au pôle « engrais minéral » et dans une moindre mesure par le pôle « eaux usées » (jusqu'à 25 %). La contribution du pôle « organique » est très faible (<5%) voire négligeable compte tenu des incertitudes.
- La pollution de source de Font d'Ente est majoritairement attribué (de 70 à 80 %, tableau 4) au pôle « engrais minéral » et dans une moindre mesure par le pôle « organique » (de 20 à 30 %). La contribution du pôle « eaux usées » apparaît inexistante compte tenu des incertitudes.
- La pollution de Nadaillac est majoritairement attribué (de 50 à 60 %, tableau 4) au pôle « engrais minéral » et dans une moindre mesure par le pôle « organique » (de 30 à 45%). Ce système karstique est également affecté de manière significative par les pollutions par les eaux usées (de 5 à 10 %).

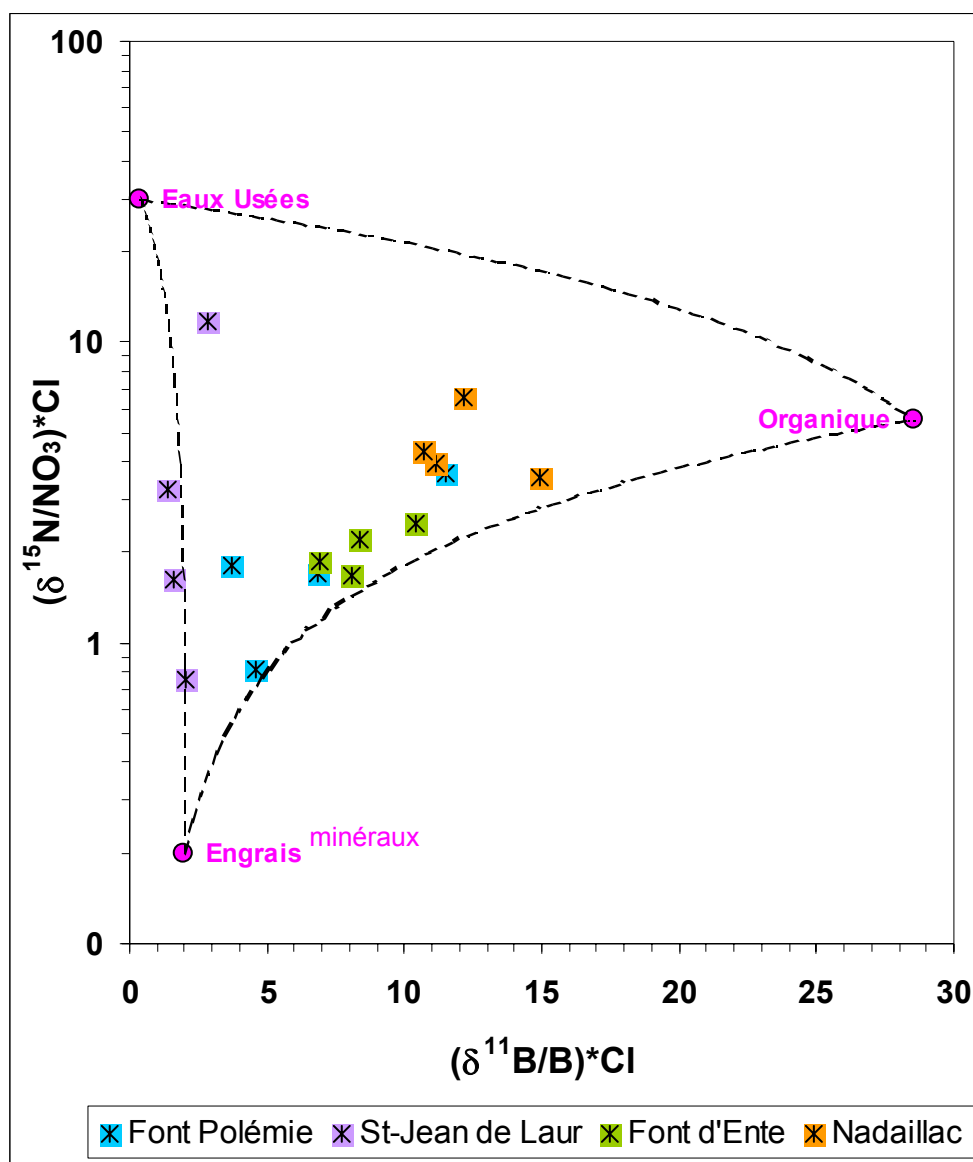


Fig. 50 - Relation $\delta^{15}\text{N}/\text{NO}_3 \cdot \text{Cl}$ versus $\delta^{11}\text{B}/\text{B} \cdot \text{Cl}$ des eaux des systèmes karstiques du Quercy.

Les paramètres des pôles de la figure 15 sont les suivants :

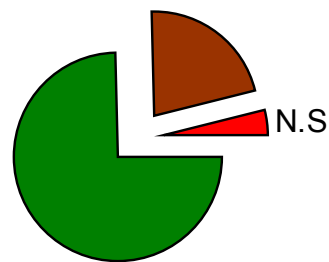
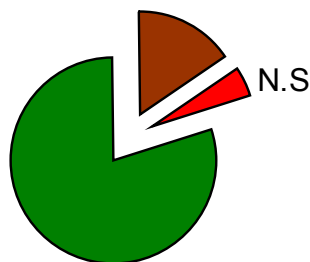
	Cl mg/l	NO ₃ mg/l	$\delta^{15}\text{NNO}_3$ ‰	B µg/l	$\delta^{11}\text{B}$ ‰
Engrais	10	100	2	10	2
Eaux Usées	150	50	10	400	1
Organique	100	180	10	70	20

Nom	Date	Déjections animales		Eaux usées domestiques		Engrais	
		Moyenne -Pôle 1	2sigma pôle 1	Moyenne -Pôle 2	2sigma pôle 2	Moyenne -Pôle 3	2sigma pôle 4
Font Polémie	22/10/02	32%	9%	6%	10%	63%	6%
Font Polémie	01/04/03	16%	5%	4%	13%	81%	3%
Font Polémie	23/07/03	6%	1%	6%	15%	90%	2%
Font Polémie	15/12/03	9%	3%	3%	15%	90%	2%
St.J.de.Laur	22/10/02	-1%	2%	10%	16%	94%	4%
St.J.de.Laur	02/04/03	-1%	1%	7%	16%	97%	2%
St.J.de.Laur	23/07/03	6%	6%	28%	15%	69%	13%
St.J.de.Laur	16/12/03	0%	0%	5%	16%	98%	1%
Font d'Ente	23/10/02	28%	8%	4%	11%	69%	5%
Font d'Ente	02/04/03	21%	6%	4%	12%	75%	4%
Font d'Ente	22/07/03	17%	5%	4%	13%	81%	3%
Font d'Ente	15/12/03	20%	6%	3%	13%	77%	4%
Nadaillac	23/10/02	35%	9%	12%	9%	54%	9%
Nadaillac	01/04/03	43%	13%	4%	8%	53%	8%
Nadaillac	23/07/03	31%	9%	7%	10%	63%	6%
Nadaillac	15/12/03	29%	8%	8%	10%	63%	6%

Tableau 4 : contribution relative des différents pôles de pollution.

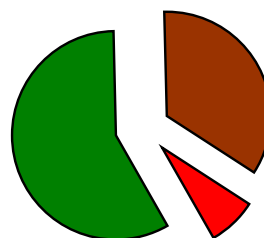
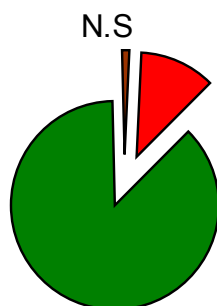
Font Polémie

Font d'Ente

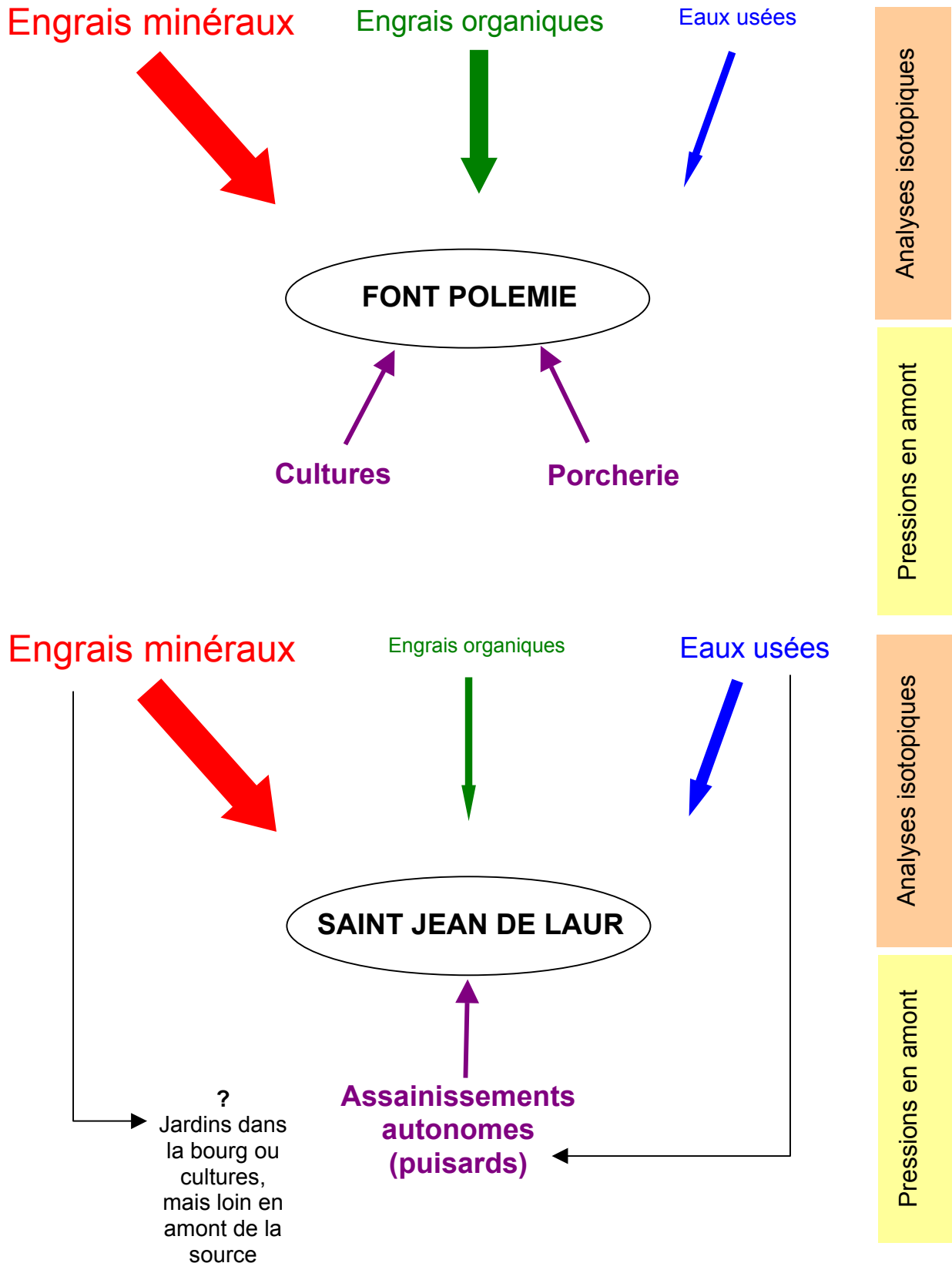


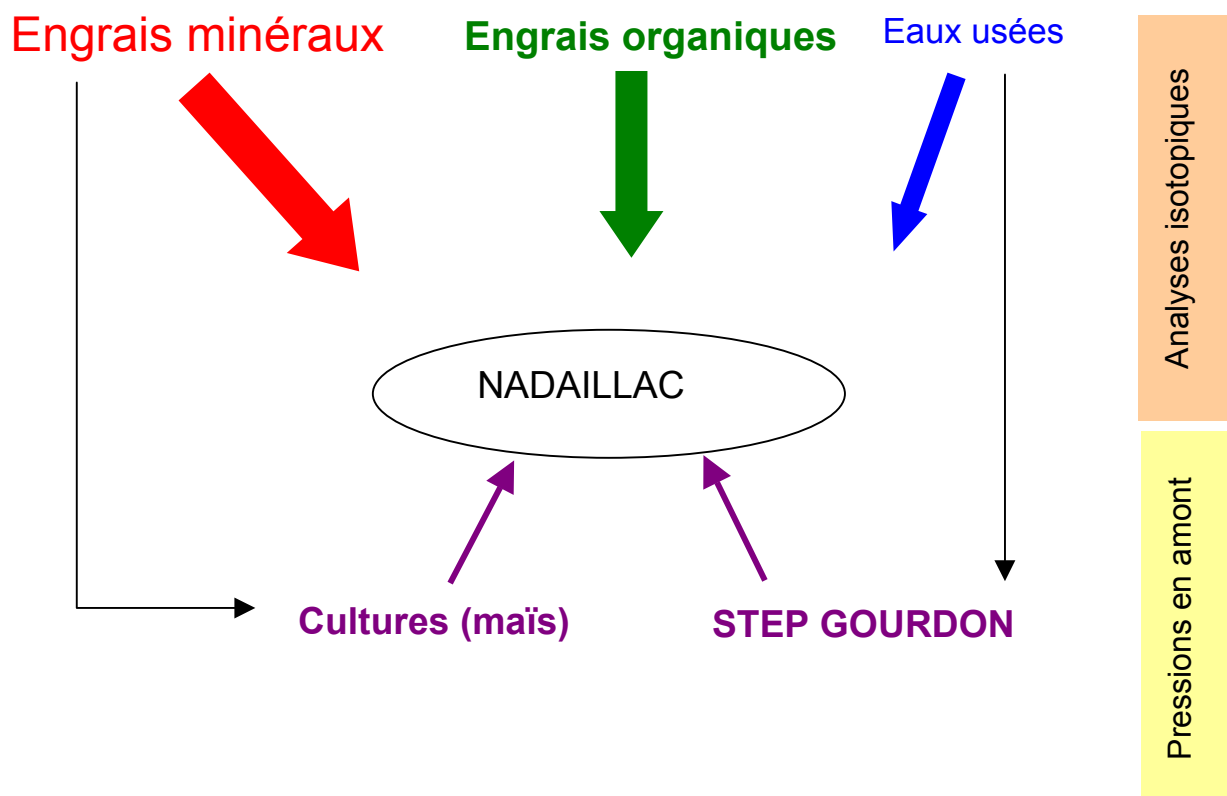
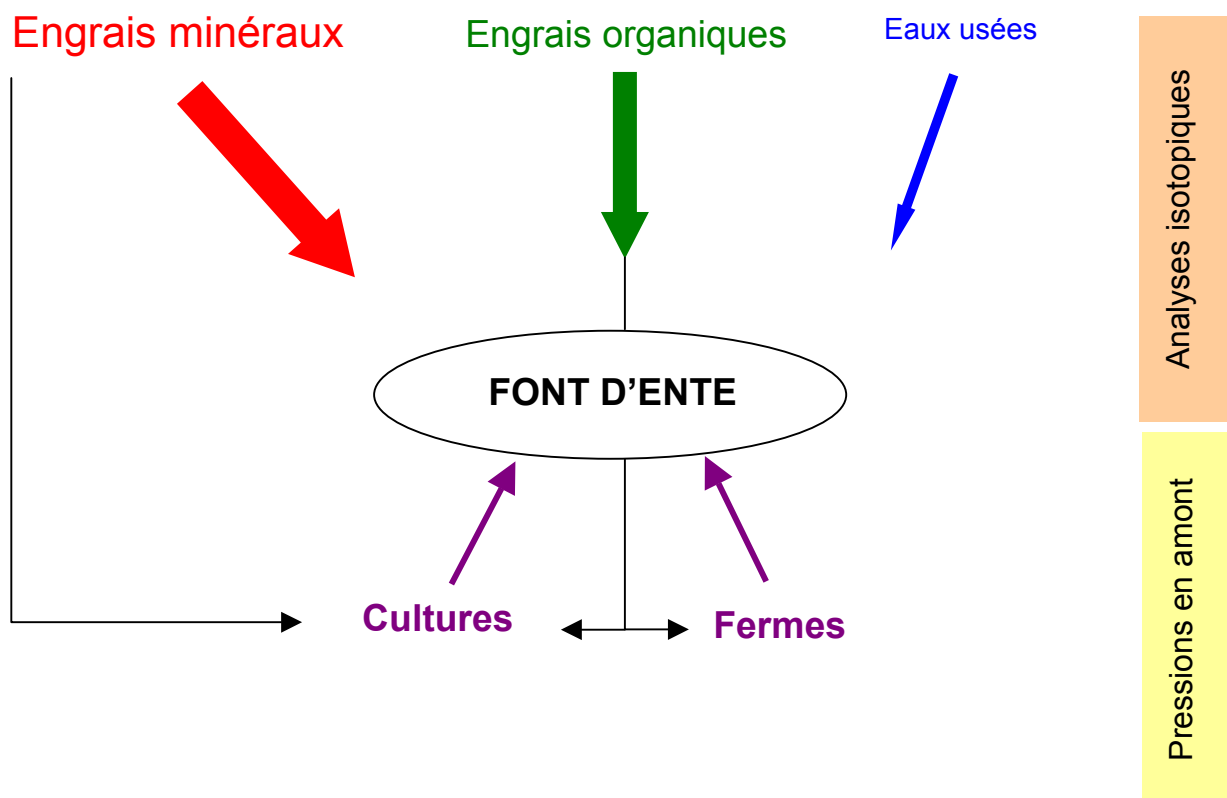
St.J.de.Laur

Nadaillac



Synthèse des contributions relatives des différents pôles de pollution en fonction de la pression observée





POURSUITE DE L'ANALYSE A PARTIR DES RESULTATS PHYSICO-CHIMIQUES

Afin de compléter l'analyse sur l'origine des nitrates, il est possible de s'appuyer sur les résultats des analyses physico-chimiques effectués sur les pôles de pollution et de les comparer à ceux des sources karstiques :

- Source de Saint Jean de Laur : Cette source présente des teneurs importantes en bore, COD, et dans une moindre mesure en zinc et en chlorures. Or, ces éléments se retrouvent en fortes concentrations dans les effluents d'origine domestiques (stations d'épuration ou assainissement autonomes). Dans la mesure où le bourg du village, situé en amont hydraulique de la source, est assaini par des puisards, ces résultats confortent l'hypothèse d'une contamination non négligeable par ces dispositifs.
- Source de Nadaillac : la source karstique présente des teneurs importantes en chlorures, sodium, zinc et sulfates (et bore), qui se retrouvent également dans les effluents de la station d'épuration de Gourdon. On constate également que les chlorures se retrouvent également en concentrations importantes dans les lixiviats de lisiers de moutons. Ces résultats montrent l'importance des sources de pollution dans la contamination de la source.
- Les faciès physico-chimiques des deux autres sources karstiques ne permettent pas d'effectuer des rapprochements avec les sources de pollution potentielles.

11. Conclusions et perspectives d'applications

Les aquifères karstiques développés dans les Causses du Quercy sont particulièrement vulnérables aux pollutions de surface. Bien que la pression anthropique globale appliquée sur le territoire soit relativement faible, des contaminations locales aux nitrates ont pu être observées.

Afin de mieux comprendre les mécanismes de pollutions survenues sur certaines sources karstiques, ainsi que le fonctionnement global des Causses du Quercy, une recherche de l'origine des nitrates par traçage isotopique des sources d'azote a été effectuée sur cinq sources du Causse de Gramat et de Limogne.

Cette étude a également pour objectif d'évaluer le degré d'application des méthodes de traçage isotopique dans ce type de milieu karstique.

Les résultats des analyses physico-chimiques effectuées lors des quatre campagnes de prélèvements n'ont pas fait apparaître de variations cohérentes des faciès en fonction du cycle hydrologique.

Une augmentation des teneurs en nitrates a été observée, en particulier sur la source de Saint Jean de Laur au cours de l'année 2003, mais la densité et la durée des mesures ne permettent pas de conclure quant à la tendance d'évolution.

Les méthodes d'investigation isotopiques ont permis de constater que l'ensemble des sources karstiques polluées présentaient une contamination d'origine multiple, avec des parts contributives différentes pour le pôle eaux usées, le pôle engrais minéraux et les engrais organiques.

La contribution relative de ces différentes sources de pollution (eaux usées domestiques, engrais minéraux, amendements organiques) a été évaluée. Dans l'estimation des contributions relatives, on doit tenir compte de la variabilité isotopique naturelle afférant à chaque source de pollution, d'où les incertitudes parfois élevés (jusqu'à 15 %).

Par ailleurs, les caractéristiques isotopiques des amendements organiques ne sont pas suffisamment contrastées pour pouvoir les différencier : on parlera donc d'un pôle « déjections organiques » comprenant les lisiers de moutons et les fientes de canards (seul le lisier de porc se différencie par un enrichissement en isotopes du Bore et des Nitrates).

Pour les sources de Saint Jean de Laur et de Nadaillac, les faciès physico-chimiques permettent de confirmer les résultats des analyses isotopiques, et parfois même de préciser l'origine de la pollution organique en fonction le type de pressions exercées.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- Source de Font Polémie : elle paraît en grande majorité influencée par des engrais minéraux, et dans une moindre mesure par des engrais organiques vraisemblablement de type « lisiers de porc ». Cette hypothèse est confirmée par la présence de cultures et d'une porcherie en amont hydraulique de la source.
- Source de Saint Jean de Laur : les analyses isotopiques indiquent une contribution majeure des engrais minéraux et dans une moindre proportion des eaux usées. L'amont hydraulique immédiat du captage contient assez peu de cultures et le faciès physico-chimique des eaux dénote une influence du pôle "eaux usées". Il est néanmoins possible qu'une partie des nitrates issus des engrais minéraux provienne des quelques parcelles cultivées environnantes ou des jardins domestiques situés dans le bourg.
- Source de Font d'Ente : la pollution nitratée semble provenir en majorité des engrais minéraux et organiques, probablement utilisés pour les cultures du plateau des Cabrairies, situé en amont hydraulique de la source.

- Source de Nadaillac : la pollution azotée de cette source est multiple avec une contribution des trois pôles de pollution : engrais minéraux, engrais organiques, eaux usées. Ces différentes origines peuvent s'expliquer par la présence de cultures (maïs) dans le bassin d'alimentation, pouvant faire l'objet d'amendements minéraux et organiques, et de la station d'épuration de Gourdon dont les effluents traités sont rejetés dans le ruisseau Marcillande.

Le faciès physico-chimique de la source présente de fortes similitudes avec les rejets de la station de Gourdon : il est donc possible que l'influence de ce pôle de pollution soit légèrement sous-estimée par l'étude isotopique.

Perspectives d'application

Cette étude a permis de montrer que la recherche de l'origine de la contamination en nitrate des eaux souterraines peut être abordée par une approche géochimique reposant sur l'utilisation des isotopes du milieu (isotopes de l'azote $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, du bore $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$, du strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) couplée à une étude hydrochimique « classique » (éléments majeurs). En effet, des éléments de réponse ont été apportés aux deux questions fondamentales qui se posaient sur la qualité des eaux des aquifères karstiques des Causses du Quercy :

- Quelle est l'origine de la pollution par les nitrates des eaux du secteur ?
- Est-il possible de quantifier les proportions respectives des différentes origines de nitrate ?

Pour répondre à ces deux interrogations, il s'est avéré indispensable de réaliser un diagnostic précis de la situation sur un secteur test constitué de 4 sources karstiques afin d'appréhender le mécanisme de cette contamination azotée et son origine. Il est également apparu indispensable de caractériser l'état géochimique d'un système naturel pas affecté pas les problèmes de pollution (source d'Anglanat).

On constate que les signatures isotopiques des différents types de déjection animale sont trop proches pour pouvoir les différencier en terme de sources de pollution. Seule l'utilisation d'un traceur plus spécifique à chaque espèce animale permettrait d'identifier l'origine exacte de la pollution par le pôle organique. A l'heure actuelle, un procédé de caractérisation isotopique par l'Oxygène des nitrates est en cours de développement et permettrait de répondre à cette problématique.

Par ailleurs, on constate que les résultats de l'étude montrent une part contributive très importante des engrais minéraux dans la contamination des eaux de sources (de 60 à 50 % de la pollution totale). Or les pratiques culturales du secteur ne semblent pas justifier à elles seules cet impact. Il conviendrait donc de s'interroger sur la part de nitrates apportée par la minéralisation de la matière organique naturelle, notamment au droit des prairies anciennes, où la quantité d'azote produite peut atteindre 5 à 6 unités (kg/ha). Pour cela, la mise en place d'une parcelle expérimentale au droit d'une prairie ancienne non traitée (depuis au moins 10 ans) et non occupée par du bétail pourrait être réalisée : les lixiviats recueillis après une période d'irrigation feraient l'objet d'une analyse physico-chimique (en particulier les nitrates) et isotopique.

Sur la base des résultats de l'étude, les acteurs institutionnels dans le domaine de l'eau pourront à l'avenir mettre en place un programme d'actions précis visant à réduire les teneurs en nitrates dans l'eau souterraine de ces aquifères patrimoniaux. Il peut s'agir dans un premier temps de faire une évaluation de la pression polluante associées aux divers pratiques agricoles. Sur la base de ces diagnostics des actions de sensibilisation et de remédiations pourront être engagées afin de réduire la charge d'azote des eaux qui contribuent à recharger les aquifères karstiques.

Généralisation à d'autres secteurs

La méthodologie mise en place dans cette étude exploratoire est généralisable et peut être appliquée à d'autres secteurs ou des problèmes de pollution ont été répertoriés au niveau de système karstique. L'état des lieux réalisé durant ces dernières a mis en évidence une contamination diffuse chronique en nitrate des eaux des aquifères du Jurassique avec des teneurs pouvant dépasser 30 mg/l sur certains captages. L'action réalisé dans cette étude peut servir de référence.

Références bibliographiques

Aravena R., Evans, M. . and Cherry, J. A. (1993). Stable isotopes of oxygen and nitrogen in sources identification of nitrate from septic systems, *Groundwater*, 31, 180-186.

Aravena, R. and Robertson, W. D. (1998). Use of multiple isotopes tracer to evaluate denitrification in groundwater : Study of nitrate from a large-flux septic system plum, *Groundwater*, 36, 975-982.

Bakalowicz, M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse d'Etat, Paris VI.

Barth S. (1998). Boron isotope variation in nature : a synthesis, *Geol. Rundsch*, 82, 640-651.

Berger, G. Bosch, B. Letolle, R. Marcé, A. Mariotti, A. and Megnien, C. 1976. Recherches sur l'origines 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, 183 pages.

Blum A., Chery L., Barbier J., Daudry, D. et Petelet-Giraud, E. (2002). Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport final. Volume 2. Synthèse des connaissances sur les éléments majeurs. BRGM/RP-51549-FR, 77 p.

Cailliez, F., & Pages, J.P. (1976). Introduction à l'analyse des données. SMASH éd. Paris.

Chery L., Talbo, H, Jegou, J. P., Brach, M., Bonnin, J. Plancard, D. et Rochfi-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, 123 p.

Corinne Land Cover région Midi-Pyrénées - 1998

Donville, B. et Bergé P. (1985). Impact de l'assainissement individuel sur les teneurs en nitrate des eaux souterraines, *Sciences et Techniques de l'eau*, 18, 159-163.

Freyer H. D. and Aly A.I.M.,(1975). Nitrogen-15 variations in fertilizer nitrogen. *J of Environmental Quality* 3, 405-406.

GHYSELINCK M., LADOUCHE B., 2002 – Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques de l'aquifère jurassique au niveau des Causses du Quercy (Lot). Rapport BRGM/RP 52062, 27 p., 20 fig., 3 tabl.

Heaton, T.H.E (1986). Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere : a review, *Chemical Geology*, 59, 87-102.

Homewood P., Guillocheau F., Eschard R., et Cross T.A. (1992) – Corrélations haute résolution et stratigraphie génétique – Une démarche intégrée. *Bull. Centre Rech. Explo. – Prod. Elf Aquit.*, 16, p. 357 – 381.

Ladouche B., Duvail C., Marchal J. P. Le Strat P. et Chery L., 2003. Détermination de l'origine des nitrates dans l'aquifère du Roussillon par le traçage isotopique des sources d'azote (Commune de Pia, Pyrénées Orientales). Rapport BRGM/RP- 52745-FR, 54 p., 18 Fig., 3 tab., 1 annexe, 4 tab.

Mariotti, A. (1986). La dénitrification dans les eaux souterraines, principes et méthodes de son identification : une revue, *J. Hydrol.*, **88**,1-23.

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 application à différents environnements. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France, 224 p.

Tarisse A. (1974). Contribution à l'étude hydrogéologique de la bordure Nord du Causse de Limogne, Thèse présentée à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 327 p.

Pauwels, H. Foucher, J.C and Kloppmann, W. (2000). Denitrification and mixing in a shist aquifer : influence on water chemistry and isotopes, *Chemical Geology*, 168, 307-324.

Parkhurst D. L. and Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to phreeqc (version 2)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations

Plagnes, V. (1997). Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 376p.

Shearer G. B., Kohl D. H. and Commoner B. (1974). The precision of determination of the natural abundance of nitrogen-15 in soils, fertilizers and shelf chemicals. *Soil sciences* 118, 308-316.

Showers, W. J. Eisenstein, D. M. Paerl, H. W. and Rudek, J. (1990). Stable isotope tracers of nitrogen sources to the Neuse river, NC. UNC Water Resources Research Institute. 253 p.

Widory D., Chery L., Mougin B., Talbo H., Bonnin, J. Plancard, D. et Rochfi-Ghandour, H. (2001). Traçage isotopique des sources de nitrate dans les eaux souterraines : cas du bassin de l'Arguenon (Cotes-D'Armor). BRGM/RP-51091-FR., 123 p.

Widory D., Petelet-Giraud E, Négrel Ph et Grau, S. (2003). Etude isotopique de la nappe alluviale du champ captant de l'île de Chambon (Allier) : mise en évidence des circulations et identification des sources de pollution. BRGM/RP-52536-FR, 61 p. 36 fig., 10 tab.

ANNEXE 1

Mise en place de parcelles expérimentales permettant la caractérisation des signatures isotopiques des déjections animales fréquemment utilisées dans le secteur d'étude

L'identification des différentes sources de pollution azotée des sources karstiques nécessite d'avoir une connaissance fine des différents pôles de pollution. Afin de caractériser la signature des déjections animales, la Chambre d'Agriculture du Lot a identifié le lisier de mouton et les fientes de canards comme étant des amendements représentatifs du secteur d'étude.

L'identification de leur signature isotopique nécessite de se replacer dans les conditions réelles d'épandage et de collecter les eaux de lixiviation susceptibles de s'infiltrer dans les réseaux karstiques.

Ce travail nécessite de simuler une pluviométrie suffisante permettant de lessiver les engrais organiques et d'attendre que l'azote organique soit oxydé en nitrates, facilement mobilisables par les eaux d'infiltration.

Afin de caractériser la signature isotopique et chimique des déjections de moutons et des fientes de canards, il a donc été nécessaire de réaliser un dispositif expérimental permettant la collecte de solutions de sol, après oxydation des jus d'épandage des lisiers. Le principe de conception et de fonctionnement de ces parcelles est schématisé ci-dessous :

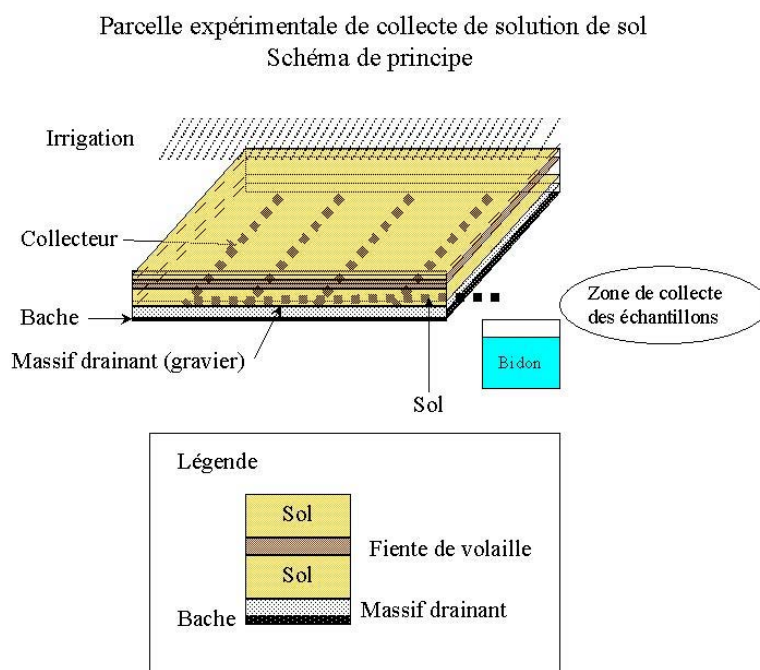


Fig. 51 - Schéma de principe d'une parcelle expérimentale de collecte de solution de sol

Première étape : mise en place de la micro-parcelle :

- Aménagement de deux parcelles de 30 m² avec un réseau de drainage protégé par un massif drainant (cf. schéma ci-dessus) :

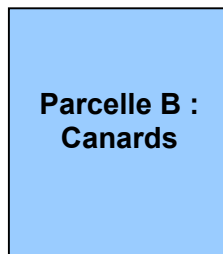
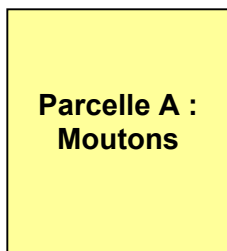


Fig. 51 – Photographies de la mise en place des parcelles expérimentales



- Recouvrement des massifs drainants des parcelles par une couche de terre considérée comme « vierge », c'est à dire n'ayant reçu aucune culture ou engrais minérale et organique (un prélèvement de cette terre en vue d'une analyse est également prévu).
- Irrigation des parcelles (simulation de pluie : 50 mm).
- Ressuyage des parcelles pendant quelques jours (collecte d'un échantillon d'eau pour analyse).



Fig. 52 - Photographies des pièges à lixiviats

Piège à lixiviats (prélèvements)

Trop plein du piège à lixiviats

Deuxième étape : épandage des déjections

- Epandage des déjections de mouton (100 kg) et des fientes de canards sur les parcelles
- Recouvrement des parcelles par une couche de sol « vierge » (quelques centimètres).
- Aspersion de 50 mm d'eau sur les parcelles

Troisième étape : Aspersion et prélèvements

- Irrigation des parcelles de sorte qu'il y ait une pluviométrie de 50 mm par semaine (contrôle avec un pluviomètre par parcelle),
- Prélèvement de 2 séries d'échantillons par semaine sur 4 semaines consécutives. Analyses des teneurs en nitrates en laboratoire sur les 8 séries d'échantillons (4 pour la parcelle « Canard » et 4 pour la parcelle « Mouton »). L'analyse physico-chimique complète et isotopique sera réalisée sur l'échantillon qui présente les teneurs en nitrates les plus importantes (oxydation optimale).

Pour chaque prélèvement, réalisé deux fois par semaine sur quatre semaines consécutives, les échantillons suivants ont été confectionnés :

Tableau 5 : Paramètres analysés et protocole de prélèvement

	Liste des Flacons					
	Cation Filtré acidifié	Anion Filtré	COD Filtré Acidifié	87Sr/86Sr	Isotope Bore	Isotope Nitrate
Parcelle A : Moutons	Flacon 125 ml filtré + H ₂ CO ₃	Flacon 125 ml	Flacon 250 ml verre filtré + H ₂ SO ₄	analyse sur flacon 125 ml filtré + H ₂ CO ₃	Flacon 2 l filtré	Flacon TDO -5l-brute
Parcelle B : Canards	Flacon 125 ml filtré + H ₂ CO ₃	Flacon 125 ml	Flacon 250 ml verre filtré + H ₂ SO ₄	analyse sur flacon 125 ml filtré + H ₂ CO ₃	Flacon 2 l filtré	Flacon TDO -5 l-brute

Tableau 6 : Calendrier des prélèvements et des aspersion

Mai	Prélèvement	Aspersion	Pluviométrie
18/05/2003			5 mm
19/05/2003			
20/05/2003			
21/05/2003			
22/05/2003		55 mm	
23/05/2003	X (témoin)		
24/05/2003			
25/05/2003			
26/05/2003	Epandage lisier		
27/05/2003		50 mm	
28/05/2003	X		
29/05/2003			
30/05/2003			
31/05/2003			

Juin	Prélèvement	Aspersion	Pluviométrie
01/06/2003		25 mm	
02/06/2003	X	11 mm	
03/06/2003		30 mm	
04/06/2003			
05/06/2003	X		10 mm
06/06/2003			
07/06/2003			
08/06/2003			
09/06/2003		30 mm	
10/06/2003	X		
11/06/2003			
12/06/2003		35 mm	
13/06/2003	X	28 mm	
14/06/2003			
15/06/2003			
16/06/2003	X	30 mm	
17/06/2003			
18/06/2003			
19/06/2003		24 mm	
20/06/2003	X		
21/06/2003			
22/06/2003			
23/06/2003	X		
24/06/2003			
25/06/2003			
26/06/2003			
27/06/2003			

Une fois les 4 semaines de prélèvement effectuées, les flacons servant à l'analyse des cations pour les semaines 2,3 et 4 (oxydation non débutée en semaine n°1) ont été envoyés au laboratoire du BRGM pour une première analyse des concentrations en nitrates. Les résultats sont les suivants :

Nitrates exprimés en NO₃
BORNE INFERIEURE 0,1
BORNE SUPERIEURE 10000
UNITE : mg/l

Parcelle A (moutons)

semaine 2 : 78,5
semaine 3 : 150
semaine 4 : 178

Parcelle B (canards)

semaine 2 : 90,5
semaine 3 : 156
semaine 4 : 168

Les échantillons de la semaine n°4 présentent les teneurs les plus importantes en nitrates pour les deux parcelles, ce qui indique que l'oxydation de l'azote organique est optimale. Ces échantillons sont les plus représentatifs des mécanismes naturels de lixiviation des nitrates et sont donc sélectionnés pour effectuer les analyses physico-chimiques globales et isotopiques.

ANNEXE 2

RESULTATS D'ANALYSE

Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT)

Tableau 7 – Campagne n°1 : résultats des analyses in situ

Tableau 8 – Campagne n°1 : Résultats des analyses réalisées au laboratoire du BRGM

Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT)

Tableau 9 – Campagne n°2 : résultats des analyses in situ

Tableau 10 – Campagne n°2 : Résultats des analyses réalisées au laboratoire du BRGM

Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT)

Tableau 11 – Campagne n°3 : résultats des analyses in situ

Tableau 12 – Campagne n°3 : Résultats des analyses réalisées au laboratoire du BRGM

Détermination de l'origine des nitrates dans quelques sources karstiques des Causses du Quercy (LOT)

Tableau 13 – Campagne n°4 : résultats des analyses in situ

Tableau 14 – Campagne n°4 : Résultats des analyses réalisées au laboratoire du BRGM

Tableau 15 – Résultats d'analyse des lixiviats issus de deux parcelles micro-expérimentales (mouton et canard)