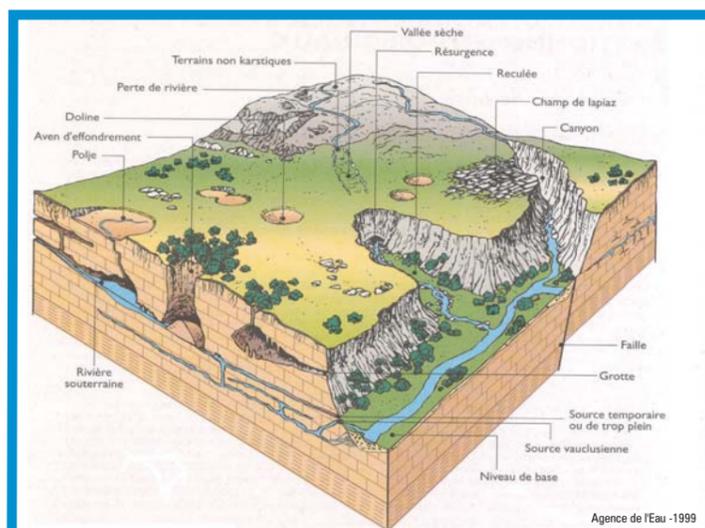


## ÉTUDE DU KARST PROFOND DE LA VALLÉE DU DOUBS

*NicolasROBBE*



*Source de Briseux*



# SOMMAIRE

<u>INTRODUCTION</u> .....	Page 3
---------------------------	--------

## PREMIERE PARTIE : QUELQUES RAPPELS DU CADRE DE L'ETUDE

1. <u>CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS, PERIODES HYDRIQUES ET POINTS DE PRELEVEMENTS</u> .....	Page 5
2. <u>BASSINS VERSANTS</u>	
2.1 Bassin versant de Thise-Chailluz.....	Page 6
2.2 Bassin versant de la source de Fourbanne.....	Page 6
2.3 Bassin versant de la source de Briseux.....	Page 6
2.4 Estimation de la superficie des bassins versants par le jaugeage des exutoires.....	Page 8
2.5 Comparaison des superficies de bassins versants estimées par le jaugeage des exutoires avec les superficies déduites géologiquement.....	Page 8
2.6 Estimation des altitudes moyennes des bassins versants par l'oxygène 18.....	Page 9

## DEUXIEME PARTIE : INTERPRETATIONS DES ANALYSES DES TROIS CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS

1. <u>TEMPS DE SEJOUR DES EAUX DANS LES AQUIFERES KARSTIQUES DE LA VALLEE DU DOUBS</u>	
1.1 Marqueurs du temps de séjour des eaux dans l'aquifère karstique	
• le carbone organique dissous (COD).....	Page 12
• le magnésium.....	Page 13
• le carbone 13.....	Page 13
• le tritium .....	Page 14
1.2 Interprétation des marqueurs du temps de séjour des eaux dans l'aquifère karstique du Jurassique supérieur de la vallée du Doubs	
• corrélation entre $\delta^{13}\text{C}$ et Mg/Ca.....	Page 16
• corrélation entre $^3\text{H}$ et Mg/Ca.....	Page 17
• corrélation entre le COD et $\delta^{13}\text{C}$ .....	Page 18
• corrélation entre les nitrates et $\delta^{13}\text{C}$ .....	Page 19
2. <u>RECHARGE DES AQUIFERES</u> .....	Page 20
3. <u>POLLUTIONS</u>	
3.1 Types de pollutions et points affectés.....	Page 21
3.2 Origines des pollutions.....	Page 23
4. <u>FONCTIONNEMENT DES RESERVOIRS</u>	
4.1 Les sources.....	Page 24
4.2 Les forages.....	Page 24

## TROISIEME PARTIE : CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS DE L'ETUDE ET RECOMMANDATIONS.....	Page 26
IMPRESSION SUR LE STAGE ET REMERCIEMENTS.....	Page 26
BIBLIOGRAPHIE.....	Page 27
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX.....	Page 28
<u>ANNEXES</u> .....	Page 29

## INTRODUCTION

Avec le pompage dans les nappes alluviales et le captage des sources, le pompage par forages dans le substratum karstique est un des modes d'alimentation en eau potable utilisés en Franche-Comté. Dans la basse vallée du Doubs entre Clerval et Besançon, six groupes de forages dans le karst profond sont actuellement exploités (Ville de Besançon, Syndicat des Eaux de Novillars, Papeteries de Novillars, Vaire-le-Petit, Amagney-la Montoillotte, Branne).

Les connaissances actuelles sur le karst profond et son mode de fonctionnement sont médiocres. La principale raison est la difficulté d'étude et la complexité du milieu karstique. Pour cette étude du karst profond de la vallée du Doubs, il a été fait appel à la chimie de l'eau. La réponse des aquifères exploités par forage sera comparée à celle des exutoires naturels des mêmes formations géologiques, qui ne mobilisent *a priori* que les eaux superficielles des aquifères calcaires, à renouvellement rapide.

Le but de cette étude est d'approfondir les connaissances sur le karst profond de la vallée du Doubs, son renouvellement, sa vulnérabilité et l'origine de l'eau.

La première partie de l'étude avait été réalisée par Arnaud Charmoille pendant son stage de maîtrise à l'été 2000. Elle concernait le cadre géographique et géologique de la vallée du Doubs, de Clerval à Besançon, ainsi que l'analyse et l'interprétation de la première campagne de prélèvements effectuée en juin 2000. Deux autres campagnes de prélèvements ont eu lieu en novembre 2000 et mai 2001.

Le présent rapport concerne l'interprétation des trois campagnes de prélèvements. De plus, quatre sources ont été jaugées, pour estimer la superficie de leur impluvium ; un traçage a été réalisé, pour déterminer le bassin versant de la source de Briseux.

Au terme de l'analyse et de l'interprétation des trois campagnes de prélèvements, quatre points, deux forages et deux sources, seront retenus pour la poursuite de l'étude. Des prélèvements mensuels devraient être effectués sur ces quatre sites.

# **PREMIERE PARTIE :**

QUELQUES RAPPELS  
DU CADRE DE  
L'ETUDE

## Campagnes de prélèvements et périodes hydriques

### • 1ère campagne: 28 juin 2000

Le mois de juin 2000 a été sec. L'étiage sur le Doubs est de l'ordre quadriennal.  
à la première campagne de prélèvements est caractéristique d'une période d'*étiage*.

### • 2e campagne : 14 novembre 2000

Suite à plusieurs épisodes pluvieux fin octobre et début novembre 2000, le niveau des rivières est très élevé, la crue est d'ordre décennal.

à la deuxième campagne de prélèvements est caractéristique d'une *période de hautes eaux*.

### • 3e campagne : 4 mai 2001

Au mois d'avril 2001, les précipitations ont été supérieures de 150% par rapport aux normales. L'effet a été le maintien des niveaux des rivières et le ralentissement de la baisse alors en cours.

à la troisième campagne de prélèvements est caractéristique d'une *période d'eaux moyennes*.

## Points de prélèvements (cf. carte de localisation en annexe)

Commune	Lieu-dit	Rive du Doubs	Type	Formation géologique	Campagnes de prélèvements	Symboles
Branne	forage de Branne	rive droite	forage (eau à 107m)	Callovien-Bathonien	1/2/3	●
Fourbanne	résurgence de Fourbanne	rive droite	résurgence vaclusienne	Bajocien supérieur	1/2/3	◆
Ougney-Douvot	source de Briseux	rive droite	résurgence vaclusienne	Bajocien supérieur	1/2/3	◆
Amagney	forage d'Amagney	rive droite	forage (eau à 89m)	Argovien-Oxfordien-Bathonien	1	●
Amagney	forage de la Montoillotte	rive droite	forage	?	2/3	●
Vaire-Arcier	source Chaney	rive gauche	résurgence jurassienne	Séquanien	3	◆
Novillars	forage des Papeteries du Doubs	rive droite	forage	?	1/2/3	●
Roche-lez-Beaupré	forage du syndicat de Roche Novillars	rive droite	forage (eau à 93m dans le Bathonien)	Argovien-Oxfordien-Bathonien	1/2/3	●
Vaire-Arcier	source d'Arcier	rive gauche	résurgence jurassienne	Séquanien	2/3	◆
Thise	champ captant de Thise	rive droite	forage (eau à 3m)	Bathonien	1/2	●
Thise	champ captant de Chailluz	rive droite	forage (eau à 54m)	Bathonien	2	●
Thise	source du Trébignon	rive droite	source jurassienne	Contact Bathonien-alluvions du Doubs	2/3	◆
Chalezeule	source du Camping	rive droite	source jurassienne	?	1	◆
Besançon	source de la Mouillère	rive droite	source vaclusienne	Bathonien	1/2/3	◆
Avanne-Aveney	résurgence d'Avanne	rive droite	résurgence vaclusienne	Bathonien	3	◆

**Tabl. 1 : caractéristiques des points de prélèvements et symboles utilisés.**

## **2. BASSINS VERSANTS**

Les bassins versants de Thise-Chailluz et de Fourbanne ont déjà été étudiés par A.Charmoille dans la première partie de l'étude. Leurs caractéristiques et leur étendue sont rappelées brièvement. Grâce à un traçage réalisé fin août 2001, le bassin versant de la source de Briseux peut être estimé.

### **2.1 Bassin versant de Thise-Chailluz**

Le bassin versant de Thise-Chailluz se développe dans les calcaires du Jurassique moyen. Une dizaine de traçages environ a été réalisé dans le secteur ; les limites de l'impluvium sont ainsi connues avec une précision satisfaisante :

- au NE, la faille de Braillans
- au N, les niveaux marneux du Lias et du Trias
- au NW, la faille de Tallenay
- au SE, les marnes oxfordiennes (la Mouillère, Fontaine-Argent)
- au S, les alluvions du Doubs.

Les exutoires principaux sont les sources de la Mouillère et du Trébignon. Une partie du bassin d'alimentation serait commune aux deux sources, la source du Trébignon ne fonctionnant que comme trop-plein (Abdelgader 1994), alors qu'une partie serait spécifique à la Mouillère. La partie la plus à l'ouest (St-Claude) serait également drainée vers la source d'Avanne (traçage SOLETCO, 1979), relation restant à confirmer. L'écoulement du Trébignon est lié aux variations piézométriques de la nappe du Doubs, lesquelles sont liées aux précipitations et à l'intensité des pompages de Thise et de Chailluz. Le bassin versant de Thise-Chailluz, tel qu'il est défini ici, couvre une superficie de 43 km<sup>2</sup>.

Sur le bassin versant de Thise-Chailluz, des prélèvements et analyses ont été effectués à la source de la Mouillère, du Trébignon, aux forages de Thise et de Chailluz.

### **2.2 Bassin versant de la source de Fourbanne**

La source de Fourbanne, de type vauclusien, est l'exutoire d'un important réseau karstique. Il est en partie alimenté par les pertes qui drainent les bassins fermés de Verne et de Luxiol, au nord de Baume-les-Dames. Le bassin versant de la source de Fourbanne, tel qu'il a été défini par A.Charmoille, a une superficie de 25 km<sup>2</sup>.

### **2.3 Bassin versant de la source de Briseux**

Aucune coloration n'était jusqu'à présent parvenue à la source de Briseux (Inventaire Spéléologique du Doubs, tome 2). En amont de la source de Briseux, on trouve la source de Fourbanne citée plus haut. En aval, des traçages ont aboutit à la source de Fontaine la Dame, située à moins d'un kilomètre de la source de Briseux, depuis la perte de la station d'épuration de Pouligny (SRAE, 1970), depuis la perte de la porcherie à St-Hilaire (Inventaire Spéléologique du Doubs, tome 2), depuis les pertes des égouts de Roulans (SOLETCO, 1999). Plus en aval encore, une coloration effectuée en 1957 dans le puits du hameau de Petit Roulans a aboutit à une source dans le Doubs près de l'écluse d'Aigremont (Inventaire Spéléologique du Doubs, tome 2).

Ces traçages permettent d'éliminer certaines zones du bassin d'alimentation potentiel de la source de Briseux : synclinal de St-Hilaire, secteurs de Pouligny et de Roulans à l'ouest, et à l'est le plateau au nord de Baume-les-Dames. Le bassin versant de la source de Briseux étant probablement à rechercher dans le secteur des villages de Séchin, Bréconchaux, Val-de-Roulans (Jurassique moyen, à failles d'orientation N-S à NE-SW), un traçage a été réalisé le 29/08/01, dans les égouts de la commune de Breconchaux, qui se perdent dans deux dolines à proximité du village. Les points surveillés étaient les sources de Briseux, Fourbanne et Fontaine la Dame côté vallée du Doubs, les sources de la Beune et Joloin à Rougemontot et le ruisseau de la Corcelle en amont de Rigney côté Ognon.

La coloration a bien aboutit à la source de Briseux au bout d'une semaine. Les caractéristiques du traçage sont développées dans le tableau 2. Une ébauche du bassin versant de la source de Briseux peut ainsi être établie (cf. figure 1).



<b>Injection</b>								
Commune	Lieu-dit	X	Y	Z	Date	Colorant	kg	Etat hydrique
Breconchaux	Perte des égouts	896.3	267.0	345	29/8/01	fluo	3	sec
<b>Réapparition</b>								
Commune	Lieu-dit	X	Y	Z	Temps (h)	Distance (m)	Vitesse (m/h)	
Ougney-Douvot	source de Briseux	897.08	265.15	260	160	2000	12.5	

**Tabl.2 : caractéristiques du traçage de Breconchaux.**

## 2.4 Estimation de la superficie des bassins versants par le jaugeage des exutoires

Les jaugeages des sources de Fourbanne, de Briseux, de la Mouillère et d'Arcier-Bergeret ont été réalisés le 17/08/01 après une période stable de plus d'une semaine au point de vue météorologique (pas de précipitations consécutives ni d'orages). Le but de l'opération est d'estimer la superficie des bassins versants de ces sources.

Le bassin versant des sources d'Arcier-Bergeret est évalué à 100 km<sup>2</sup> (SRAE, 1985). En connaissant le débit de cette source à un temps t (auquel il faut rajouter le débit détourné par la ville de Besançon), on peut estimer la superficie du bassin versant d'une autre source par la mesure de son débit (cf. tableau 3). Attention, on peut appliquer cette méthode ici car les sources étudiées ont un bassin versant d'altitude proche et un aquifère aux caractéristiques karstiques supposées semblables.

Date	Sources	Débit exutoire Q <sub>e</sub> (l/s)	Débit pompé par la ville de Besançon Q <sub>p</sub> (l/s)	Débit total Q <sub>t</sub> (l/s)	Superficie bassin versant S (km <sup>2</sup> )	Débit/km <sup>2</sup> Q <sub>t</sub> /S (l/s/km <sup>2</sup> )
17/08/01	Arcier + Bergeret	108	150	258	100	2.58
Date	Sources	Débit exutoire Q <sub>e</sub> (l/s)			Superficie bassin versant S (km <sup>2</sup> )	
17/08/01	Fourbanne	92			35.7	
17/08/01	Briseux	59			22.9	
17/08/01	Mouillère	60			23.3	

**Tabl.3 : débits et superficies des bassins versants des sources d'Arcier, Fourbanne, Briseux et la Mouillère.**

## 2.5 Comparaison des superficies de bassins versants estimées par le jaugeage des exutoires avec les superficies déduites géologiquement

Pour la source de Fourbanne, A.Charmoille avait défini un bassin d'alimentation de 25 km<sup>2</sup>. En réalité, il peut être largement agrandi vers l'ouest, jusqu'à une superficie de 33 km<sup>2</sup>, ce qui est très proche de la valeur estimée par calcul (environ 36 km<sup>2</sup>).

L'analyse des cartes géologiques a permis de définir un bassin versant de 8.5 km<sup>2</sup> pour la source de Briseux, très inférieur à la valeur estimée par calcul (23 km<sup>2</sup>). La source de Briseux pourrait ainsi être alimentée par un réservoir important, à transit lent comme le laisserait penser la faible vitesse d'écoulement du traçage de Breconchaux, voire par des circulations karstiques de provenance plus éloignée.

Sur le bassin versant de Thise-Chailluz, l'urbanisation (agglomération bisontine) influence les débits aux exutoires en diminuant l'infiltration des précipitations. De plus, l'aquifère est exploité par les champs captants de Thise-Chailluz. Le débit mesuré à la source de la Mouillère ne peut donc pas correspondre aux 43 km<sup>2</sup> du bassin versant de Thise-Chailluz, mais plus aux 23 km<sup>2</sup> déterminés indirectement par jaugeage.

## 2.6 Estimation des altitudes moyennes des bassins versants par l'oxygène 18

L'oxygène 18 est un traceur isotopique thermodépendant et conservatif de la molécule d'eau. Cet isotope ne représente que 0.2% de l'oxygène total contre 99.76% pour  $^{16}\text{O}$  et 0.04% pour  $^{17}\text{O}$ . Les isotopes lourds comme  $^{18}\text{O}$  sont moins volatils que les isotopes légers ( $^{16}\text{O}$ ). Il en résulte un marquage naturel des précipitations en  $^{18}\text{O}$  :

- marquage géographique en fonction de la latitude et de l'altitude
- marquage climatique en fonction des saisons ou des climats (pluies plus riches en  $^{18}\text{O}$  en été qu'en hiver).

La teneur en  $^{18}\text{O}$  est fixe dans les océans : SMOW (Standard Mean Ocean Water). On détermine dans une eau  $\delta^{18}\text{O}$  par rapport au SMOW.

Malgré les faibles dénivelées topographiques relevées en Franche-Comté, l'oxygène 18 permet d'estimer les altitudes moyennes des bassins versants des aquifères.

Les valeurs mesurées de  $\delta^{18}\text{O}$  vont de -9.24 à -8.26‰ (cf. figure 2) au cours des deux premières campagnes, les résultats de la troisième campagne n'étant pas encore disponibles. La campagne d'été (juin 2000) est plus négative que la campagne de crue (novembre 2000), sauf pour le forage de Papeteries-Novillars où  $\delta^{18}\text{O}$  reste constant, ce qui pourrait vouloir dire que le réservoir atteint par ce forage est très inertiel.

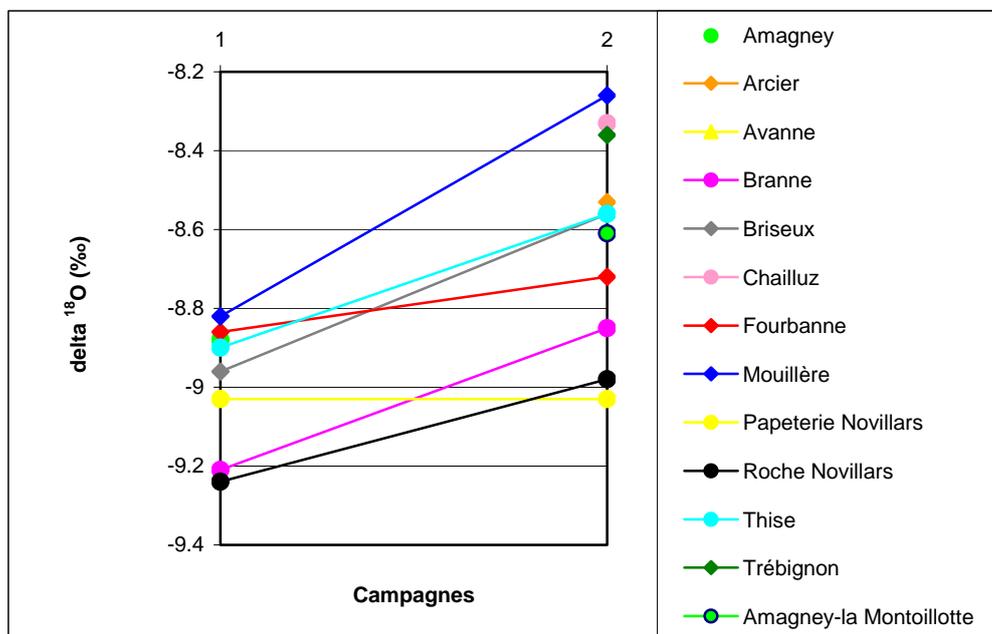


Fig.2 :  $\delta^{18}\text{O}$  au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2.

Le gradient moyen de  $\delta^{18}\text{O}$  en Franche-Comté est de -0.23‰ par 100m de dénivelé positif (Mudry, 1987). L'altitude moyenne de l'impluvium de la source de la Mouillère étant de 360m (Abdelgader, 1994), on peut, grâce aux mesures de  $\delta^{18}\text{O}$  à cette source, estimer les altitudes moyennes des bassins versants des autres points de prélèvements (cf. tableau 4). Pour la campagne de crue, le gradient de  $\delta^{18}\text{O}$  utilisé est de -0.29‰, plus approprié en hautes eaux.

Pour les deux forages situés dans le synclinal d'Amagney (forages d'Amagney et de la Montoillotte), l'altitude moyenne du bassin versant obtenue par  $\delta^{18}\text{O}$  est significative (386 et 481m), celui-ci s'étageant topographiquement entre 300 et 500m environ.

Pour l'impluvium de Thise-Chailluz, culminant à 619m au Fort de la Dame Blanche, on obtient des altitudes moyennes comprises entre 360 et 460m environ, suivant les campagnes et les points de prélèvements (forages de Thise et de Chailluz, sources de la Mouillère et du Trébignon).

Le bassin versant de la source d'Arcier a une altitude moyenne de 450m environ d'après  $\delta^{18}\text{O}$ , ce qui est effectivement l'altitude moyenne du plateau de Saône.

Le bassin versant de la source de Briseux déterminé géologiquement a une altitude comprise entre 260 et 400m au Val-de-Roulans (cf.figure 1). Or  $\delta^{18}\text{O}$  révèle un impluvium autour de 440m d'altitude moyenne. Cette source vaclusienne en rive droite du Doubs pourrait donc être en partie alimentée par les reliefs en rive gauche atteignant 575m au-dessus d'Ougney-le-Bas (extrémité est du faisceau bisontin), ce qui pourrait corroborer la superficie de son bassin versant en rive droite.

Le cas de la source de Fourbanne est similaire celui de la source de Briseux. En étiage,  $\delta^{18}\text{O}$  indique une altitude moyenne de bassin versant de 377m, très proche de l'altitude des pertes de Verne qui alimentent le réseau karstique de la source de Fourbanne. En crue,  $\delta^{18}\text{O}$  croît et l'altitude moyenne du bassin versant serait de 518m, valeur à peine atteinte par les reliefs sur ce même bassin versant tel qu'il a été défini par A.Charmoille. Là encore, il est possible d'envisager une alimentation de cette source vaclusienne en rive droite du Doubs par les reliefs de la rive gauche, atteignant 588m immédiatement en face de Fourbanne (extrémité est du faisceau bisontin).

D'après la figure 2 et le tableau 4, ce sont les forages de Branne, Papeteries-Novillars et Roche-Novillars, avec  $\delta^{18}\text{O}$  les plus négatifs, qui auraient les bassins versants les plus élevés. Mais les altitudes moyennes déterminées par  $\delta^{18}\text{O}$  sont souvent supérieures à celles atteintes par les reliefs environnants ces forages, que ce soit en rive droite ou en rive gauche du Doubs. Il faudrait alors envisager une alimentation du karst profond par des zones plus élevées. L'altitude moyenne d'environ 630m pour Papeteries-Novillars en hautes eaux sous-entendrait une altitude maximum de l'impluvium proche de l'altitude de la Haute Chaîne jurassienne.

Points de prélèvements	Altitude moyenne Z du bassin versant (m)	
	1 <sup>ère</sup> campagne (juin 2000) $\delta^{18}\text{O} = -0.0023 * Z - 7.992$	2 <sup>e</sup> campagne (novembre 2000) $\delta^{18}\text{O} = -0.0029 * Z - 7.216$
forage d'Amagney	386	-
forage de la Montoillotte	-	481
forage de Branne	530	563
forage de Chailluz	-	384
forage de Papeteries-Novillars	451	626
forage de Roche-Novillars	543	608
forage de Thise	395	463
source d'Arcier	-	453
source de Briseux	421	463
source de Fourbanne	377	518
source de la Mouillère	360	360
source du Trébignon	-	394

**Tabl.4 : altitudes moyennes des bassins versants estimées grâce à  $\delta^{18}\text{O}$ .**

## **DEUXIEME PARTIE :**

**INTERPRETATION DES  
ANALYSES DES TROIS  
CAMPAGNES DE  
PRELEVEMENTS**

## TEMPS DE SEJOUR

### Marqueurs du temps de séjour des eaux dans l'aquifère karstique

Le temps de séjour des eaux dans l'aquifère karstique peut être estimé par l'analyse de plusieurs marqueurs caractéristiques :

- le carbone organique dissous (COD)
- le magnésium
- l'isotope 13 du carbone
- le tritium.

#### • le carbone organique dissous (COD)

Le carbone organique dissous (COD), dont l'origine est la matière organique (chute des feuilles, pollution par pertes d'égouts), est normalement plus élevé en période de crue qu'en période d'étiage, car une période de fortes précipitations entraîne le ruissellement d'eaux très chargées en matière organique, le ruissellement étant moindre en période sèche. Les fortes teneurs en COD sont dues à des pollutions organiques locales et ponctuelles (pression anthropique). Le COD ayant la particularité d'être minéralisé par les micro-organismes au cours de son séjour dans l'aquifère, on peut s'attendre à ce que les eaux des sources en période d'étiage, qui proviendraient du karst profond, donc à long temps de séjour, aient une faible teneur en COD par rapport aux eaux en période de crue, à transit plus rapide dans l'aquifère.

Valeurs de COD sur la vallée du Doubs (cf. figure 3) :

- étiage :  $0.7 \leq \text{COD} \leq 1.8 \text{ mg/l}$  (sauf Camping > 3 mg/l)
- crue :  $0.5 \leq \text{COD} \leq 2 \text{ mg/l}$  (sauf Papeteries, Fourbanne, Chailluz >> 4 mg/l)

Les résultats des analyses de COD de la troisième campagne ne sont pas encore disponibles.

Dans l'ensemble, le COD est moins important en basses eaux qu'en hautes eaux (sauf pour les forages de Roche et de Branne). Cependant le COD ne permet pas d'estimer un temps de séjour d'une eau dans son aquifère karstique, ni de distinguer une eau de source d'une eau de forage.

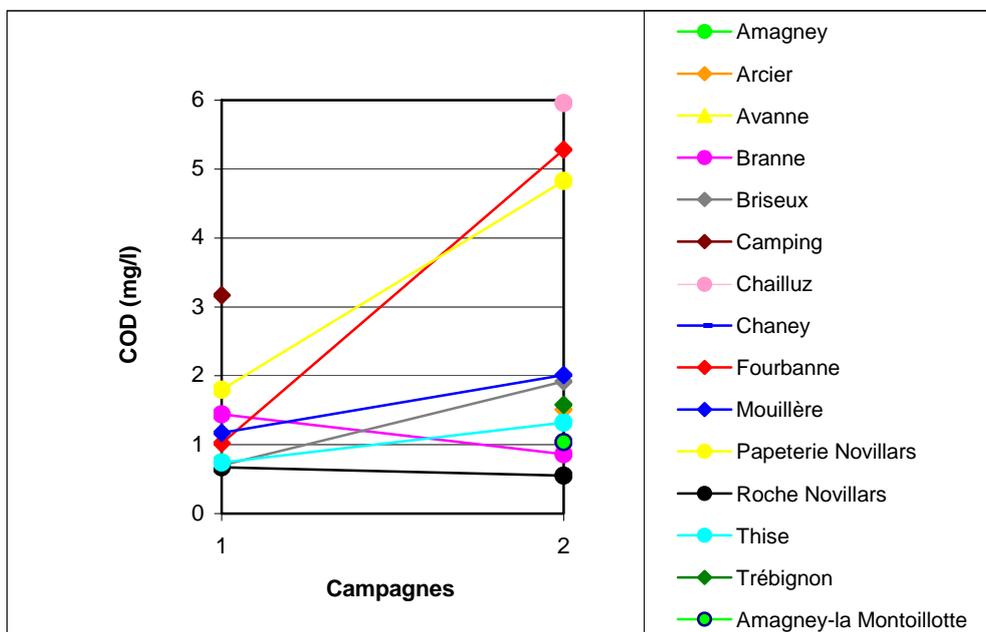


Fig. 3 : COD au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2.

## • le magnésium

Le magnésium est contenu en faible quantité dans les calcaires du Jurassique moyen. Par sa lente cinétique de mise en solution (Emblanch, 1997), le magnésium est un marqueur des eaux ayant eu un contact très prolongé avec la matrice carbonatée, si la géochimie du réservoir est homogène, donc des eaux à long temps de séjour dans le karst. Il permet de distinguer les eaux des sources des eaux de forages. En effet, les eaux de sources analysées sont toutes chargées à moins de 4,5 mg/l, alors que les eaux de captage dans le karst profond contiennent plus de 4,5 mg de magnésium par litre de solution (*cf.* figure 4).

Cependant le magnésium ne permet pas d'estimer quantitativement le temps de séjour d'une eau dans son aquifère karstique. Néanmoins, la lithologie des aquifères étant sensiblement identique sur toute la région étudiée, les eaux très chargées en magnésium du forage d'Amagney pourraient laisser à penser qu'il s'agit d'eaux plus anciennes que pour les quatre autres forages.

Nous utiliserons par la suite le rapport Mg/Ca (Mg et Ca exprimés en meq/l), car il permet de normer le magnésium par rapport à la minéralisation totale de l'eau.

Le magnésium et le carbone organique dissous ont un comportement opposé (Emblanch, 1997). Sur les sites analysés, entre étiage et crue, Mg diminue (sauf pour le forage de Branne), tandis que le COD augmente (sauf pour les forages de Roche et de Branne).

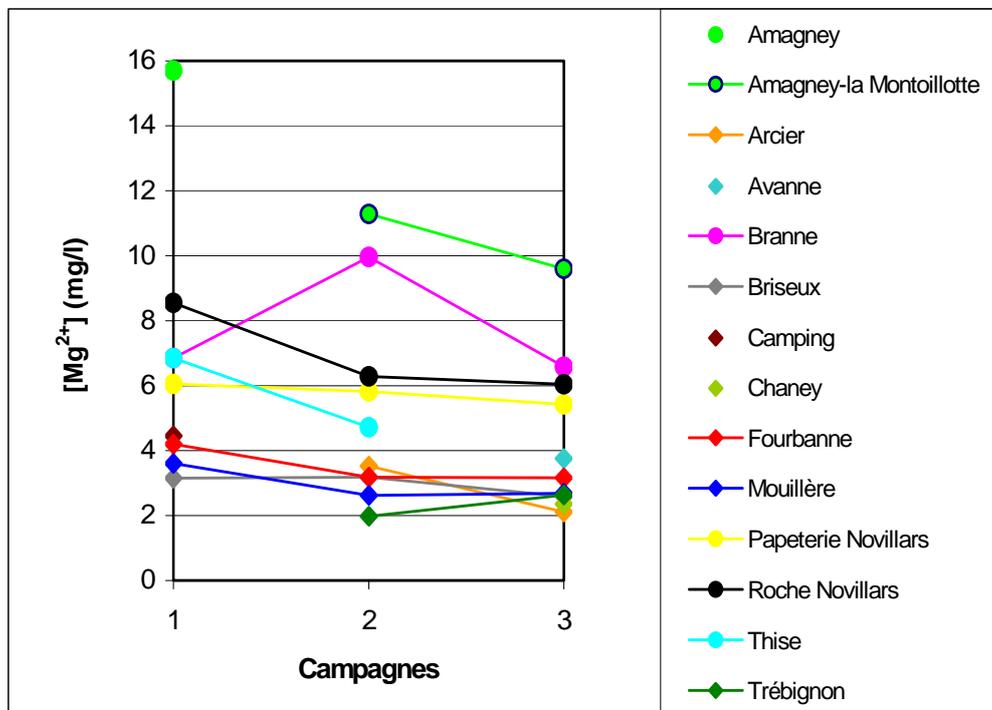


Fig. 4 : [Mg<sup>2+</sup>] au cours des trois campagnes de prélèvements.

## • le carbone 13

Le carbone est présent dans l'eau sous différentes formes : HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>2</sub> dissous, carbone organique dissous (COD), CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Selon son origine, il a une composition isotopique particulière. Le carbone 13 est un isotope stable. Les valeurs moyennes de δ<sup>13</sup>C sont les suivantes :

- δ<sup>13</sup>C = -8 ± 0.3 ‰ dans l'atmosphère (Emblanch, 1997)
- δ<sup>13</sup>C = -22 ‰ dans le CO<sub>2</sub> du sol en climats tempérés (Emblanch, 1997)
- δ<sup>13</sup>C = -2 à +2 ‰ dans la matrice carbonatée (Morse et Kenzie, 1990).

En théorie, à l'étiage, la majeure partie des écoulements provient de la zone noyée du karst, qui est un système fermé sur le CO<sub>2</sub> biogénique. Une eau séjournant longtemps au contact de la matrice carbonatée, dans le karst par exemple, s'enrichit en <sup>13</sup>C, son δ<sup>13</sup>C tendant à s'équilibrer avec le δ<sup>13</sup>C des calcaires. Si bien qu'à l'étiage, les eaux aux exutoires sont normalement plus enrichies en <sup>13</sup>C.

Dans l'ensemble,  $\delta^{13}\text{C}$  des forages est supérieur au  $\delta^{13}\text{C}$  des sources (cf. figure 5) ; cela indique logiquement que les eaux des forages, qui proviennent du karst profond, sont plus enrichies en  $^{13}\text{C}$  donc plus anciennes que l'eau des sources, provenant elles de niveaux plus supérieurs du karst, où elles n'ont pas eu le temps d'échanger leur carbone dissous avec celui de la matrice carbonatée. Les résultats des analyses de  $^{13}\text{C}$  de la troisième campagne ne sont pas encore disponibles.

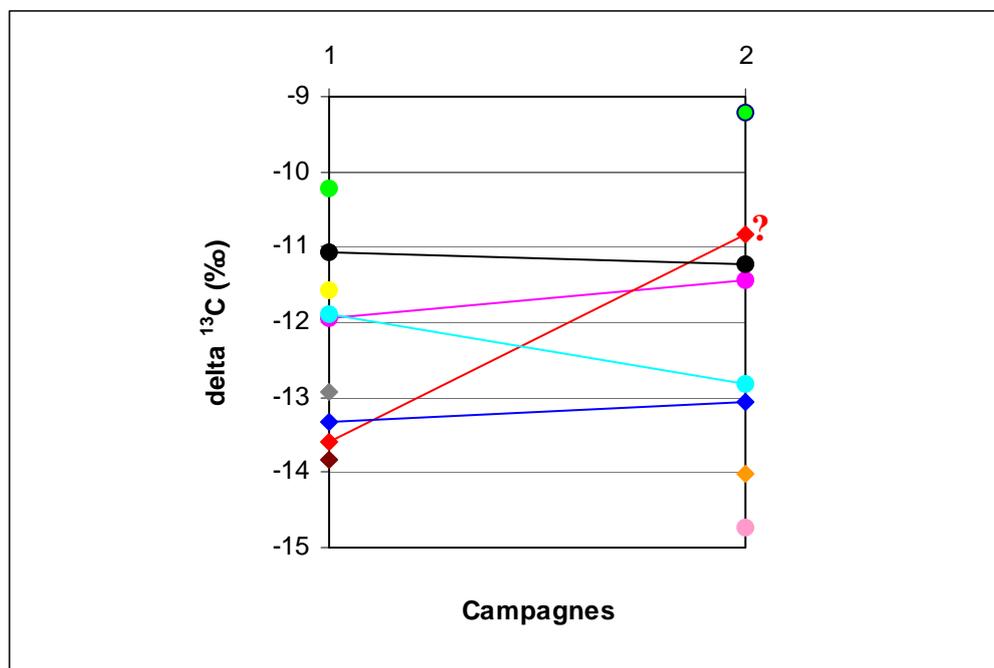


Fig. 5 :  $\delta^{13}\text{C}$  au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2.

Les eaux analysées les plus enrichies en  $^{13}\text{C}$  proviennent des captages d'Amagney et de la Montoillotte. Cela laisserait sous-entendre que l'eau du synclinal d'Amagney est la plus ancienne, comme le montrent déjà ses fortes teneurs en magnésium. Les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  des forages de Branne, Roche-Novillars et Papeteries-Novillars sont environ équivalentes, comprises entre -12 et -11‰, ce qui constitue une valeur moyenne de  $\delta^{13}\text{C}$  pour les forages. A Thise,  $\delta^{13}\text{C}$  est plus faible en crue qu'en étiage, donc le captage pompe une eau à temps de séjour plus court en crue qu'en étiage. Pour Chailluz, on a le  $\delta^{13}\text{C}$  le plus faible : l'eau serait la plus jeune au captage de Chailluz, bien que très proche du captage de Thise.

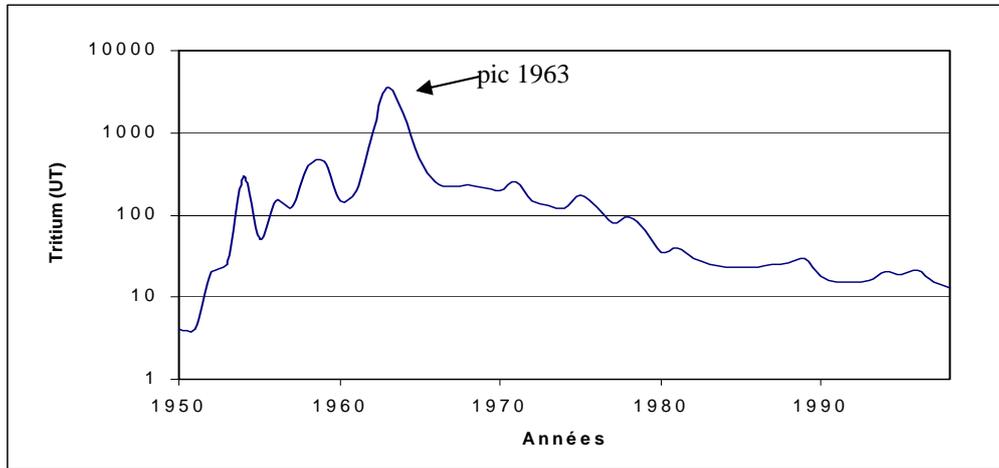
Pour les sources, la valeur moyenne de  $\delta^{13}\text{C}$  à l'étiage est de -13.42 ‰. En hautes eaux, seulement trois sources ont été analysées en  $^{13}\text{C}$ . Pour les sources de la Mouillère et d'Arcier, le  $\delta^{13}\text{C}$  moyen en hautes eaux reste équivalent à  $\delta^{13}\text{C}$  moyen en basses eaux. Le  $\delta^{13}\text{C}$  des sources est significatif d'eaux à court temps de séjour. En hautes eaux, la source de Fourbanne est très enrichie en  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C} = -10.8$  ‰), ce qui pourrait indiquer un apport d'eaux à long temps de séjour par effet de chasse. La grande variabilité de  $\delta^{13}\text{C}$  de la source de Fourbanne peut être le reflet d'une recharge importante de la réserve entre basses et hautes eaux.

### • le tritium

Les caractéristiques générales du tritium  $^3\text{H}$  sont les suivantes :

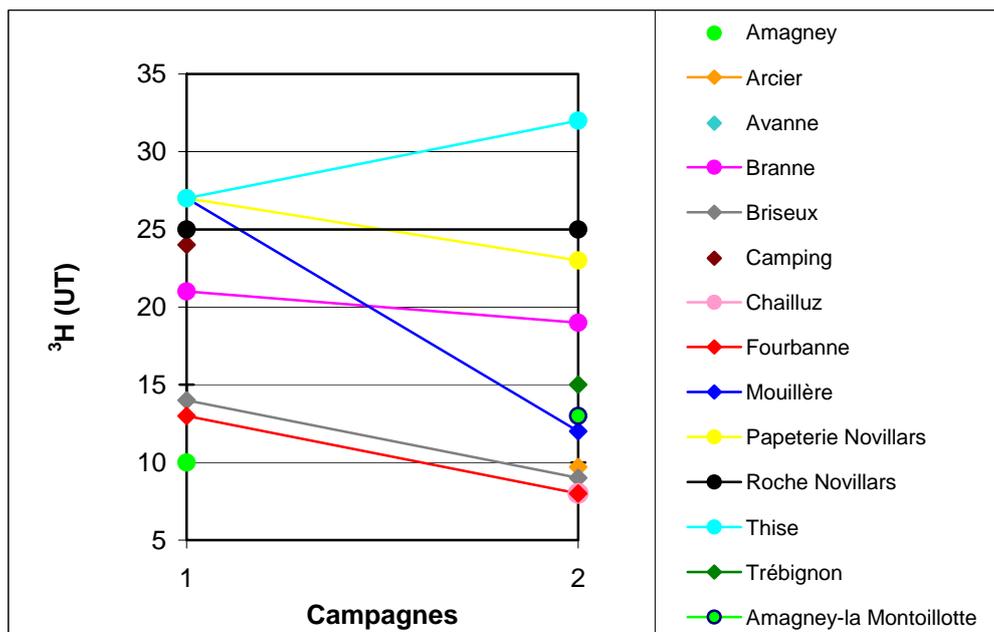
- isotope radioactif de l'hydrogène, d'une période de 12.43 ans ; le tritium se désintègre en hélium avec émission de rayon  $\beta^-$ .
- unité de mesure : 1 Unité Tritium (UT) correspond à la présence d'un atome de tritium pour  $10^{18}$  atomes d'hydrogène (ce qui représente une activité de  $3.24 \cdot 10^{-3}$  pCi/ml)
- origine naturelle : le tritium naturel est produit dans la stratosphère et la haute atmosphère par l'action des neutrons, issus du rayonnement cosmique, sur les noyaux d'azote :  $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^3\text{H} + ^{12}\text{C}$ . Sa production totale annuelle dans l'atmosphère avoisine les 3.5 kg/an.
- le tritium s'oxyde rapidement et s'incorpore à la vapeur d'eau ( $^1\text{H}^3\text{HO}$ ), il passe ensuite dans l'atmosphère terrestre où il participe au cycle de l'eau, on mesure ainsi couramment sa teneur dans les précipitations, les eaux de surface et les eaux souterraines.

- origine artificielle : le tritium artificiel résulte de l'injection dans la stratosphère et l'atmosphère de grandes quantités de neutrons résultant des essais thermonucléaires aériens (bombe H) qui ont eu lieu de 1952 à 1980. Ces neutrons par réactions avec l'azote atmosphérique ont donné naissance à des quantités importantes de tritium artificiel, les teneurs dans les précipitations, sous nos latitudes, ayant atteint 3000 UT en 1963 (cf. figure 6).
- teneur dans l'atmosphère :  $10^{-15}$  %, jusqu'à  $10^{-12}$ % suite au pic de 1963.
- variations saisonnières de la teneur en tritium des précipitations : maximum en juin/juillet et minimum en novembre/décembre ; variations géographiques importantes.



**Fig. 6 : teneur en  $^3\text{H}$  des précipitations à Thonon-les-Bains (Haute-Savoie) (d'après CRG Thonon).**

On peut remarquer sur le figure 7 qu'il n'y a pas de différenciation stricte par le tritium des eaux de sources des eaux de forages. Les résultats des analyses de tritium de la troisième campagne ne sont pas encore disponibles. Les forages de Thise, Roche-Novillars, Papeteries-Novillars et Branne atteignent une eau chargée en tritium entre 20 et 30 UT environ. L'eau des sources de Fourbanne, de Briseux, du Trébignon, d'Arcier et des forages de Chailluz et d'Amagney sont peu chargées en tritium ( $\leq 15$  UT). A la source de la Mouillère (et la source du Camping), la teneur en tritium est élevée à l'étiage (27 et 24 UT), alors qu'elle est deux fois plus faible en hautes eaux (12 UT). Hormis pour le forage de Thise, les eaux étaient plus chargées en tritium lors de la première campagne que lors de la seconde, à l'image des variations saisonnières de la teneur en tritium des précipitations.



**Fig. 7 :  $^3\text{H}$  au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2.**

## Interprétation des marqueurs du temps de séjour des eaux dans l'aquifère karstique du Jurassique supérieur de la vallée du Doubs

### • corrélation entre $\delta^{13}\text{C}$ et Mg/Ca

La corrélation entre  $\delta^{13}\text{C}$  et Mg/Ca, deux marqueurs de long temps de séjour des eaux dans un aquifère karstique, laisse apparaître trois groupes d'eaux différents (cf. figure 8) :

- eaux à très long temps de séjour : eaux du synclinal d'Amagney
- eaux à long temps de séjour : eaux des forages de Branne, Papeteries-Novillars, Roche-Novillars, ainsi que Thise en période d'étiage.
- eaux à courts temps de séjour : eaux de sources et eaux du forage de Thise en période de hautes eaux.

Sur le graphique de la figure 9, la corrélation entre  $\delta^{13}\text{C}$  et Mg/Ca est significative avec un coefficient de corrélation supérieur à 75 %.

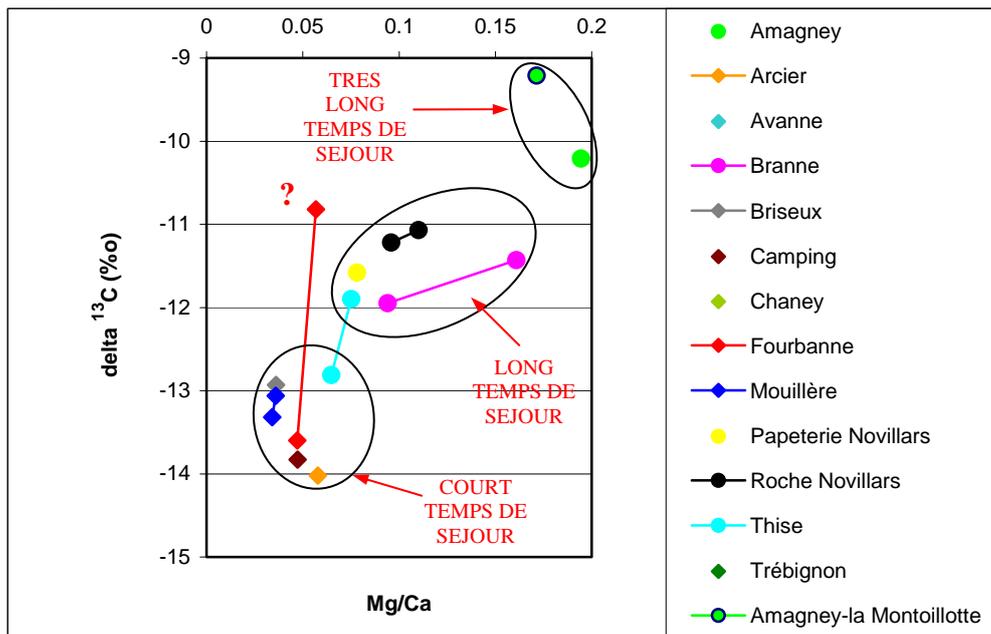


Fig. 8 :  $\delta^{13}\text{C}$  - Mg/Ca au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2.

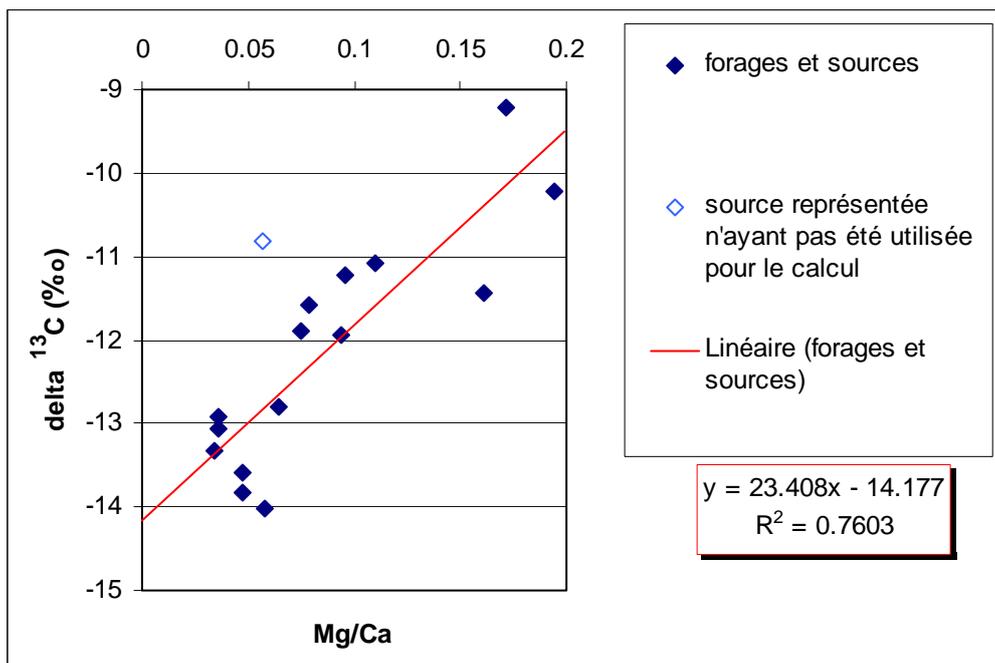


Fig. 9 : corrélation entre  $\delta^{13}\text{C}$  et Mg/Ca.

## • corrélation entre $^3\text{H}$ et Mg/Ca

Sur le graphique de la figure 10, la corrélation  $^3\text{H}$  - Mg/Ca permet de distinguer deux groupes :

- forages :  $10 \leq ^3\text{H} \leq 32$  UT
- sources :  $8 \leq ^3\text{H} \leq 15$  UT. En période d'étiage, les eaux aux exutoires de la Mouillère et du Camping ont tendance à se rapprocher du groupe des forages.

Il en ressort deux logiques. Les forages atteignent des eaux à long temps de séjour dans le karst profond ; plus ces eaux sont anciennes, plus le rapport Mg/Ca est élevé et plus la teneur en tritium diminue, du fait de sa désintégration en hélium. Donc pour le groupe des forages, les eaux du synclinal d'Amagney sont bien les plus anciennes, celles de Thise les plus récentes. La corrélation est significative pour les forages (cf. figure 11).

Dans le groupe des sources, la diminution de la teneur en tritium constatée à Fourbanne et à Briseux est due aux variations saisonnières de la teneur en tritium des précipitations. A l'étiage, la source de la Mouillère et la source du Camping ont une forte teneur en tritium ; l'origine est une eau à long temps de séjour provenant de la zone noyée du karst qui alimente majoritairement ces deux sources en période de basses eaux.

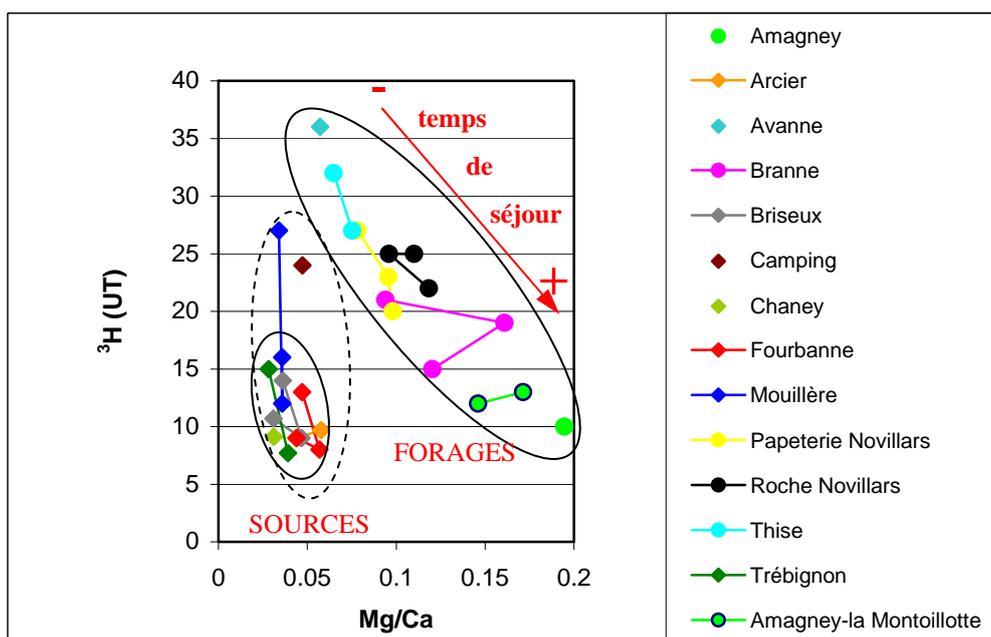


Fig. 10 :  $^3\text{H}$  - Mg/Ca au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2.

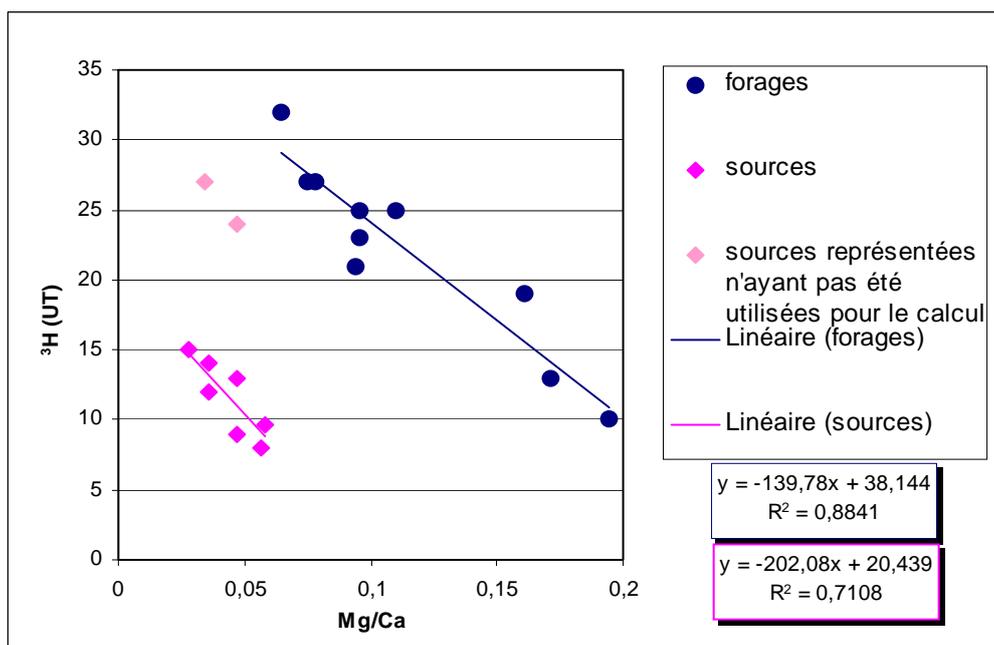


Fig. 11 : corrélation entre  $^3\text{H}$  et Mg/Ca.

## • corrélation entre les nitrates et $\delta^{13}\text{C}$

La relation entre les nitrates  $\text{NO}_3^-$ , marqueur du court temps de séjour (marqueur de l'infiltration car réduits en  $\text{N}_2$  dans les milieux profonds anoxiques), et le carbone 13, marqueur du long temps de séjour laisse apparaître deux pôles (cf. figure 12) :

- un groupe Sources :  $[\text{NO}_3^-]$  élevée ( $> 10 \text{ mg/l}$ ) et  $\delta^{13}\text{C}$  négatif ( $\leq -13 \text{ ‰}$ )  
à eaux récentes du karst supérieur
- un groupe Forages :  $[\text{NO}_3^-]$  faible ( $< 8 \text{ mg/l}$ ) et  $\delta^{13}\text{C}$  peu négatif ( $> -13 \text{ ‰}$ )  
à eaux anciennes du karst profond.

La figure 13 montre bien la décroissance exponentielle de la concentration en nitrates avec l'enrichissement en carbone 13.

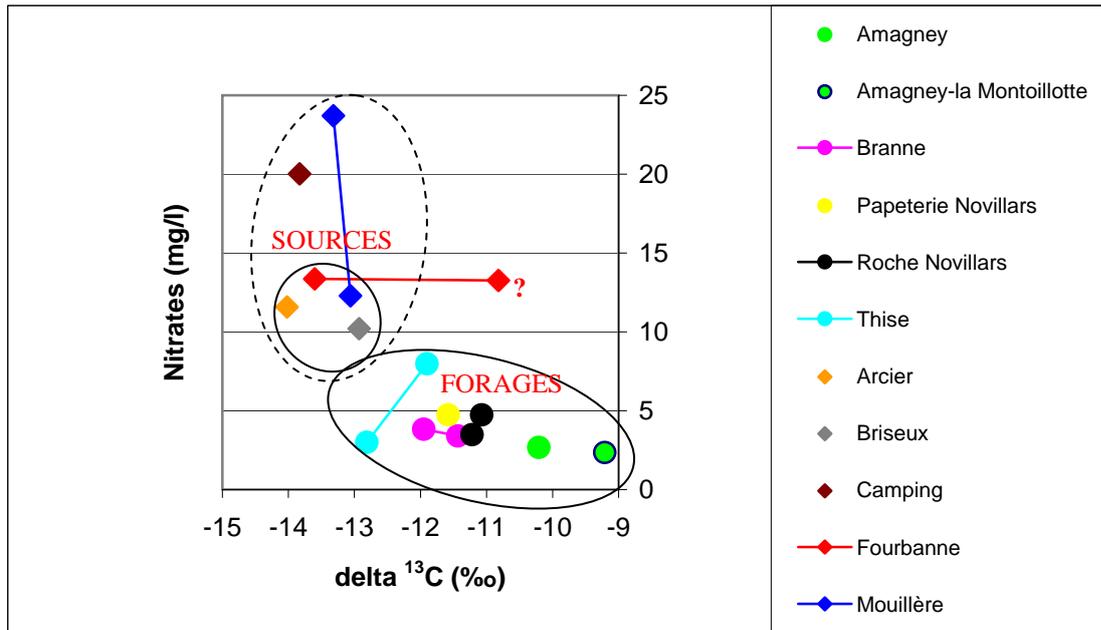


Fig. 12 : nitrates -  $\delta^{13}\text{C}$  au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2.

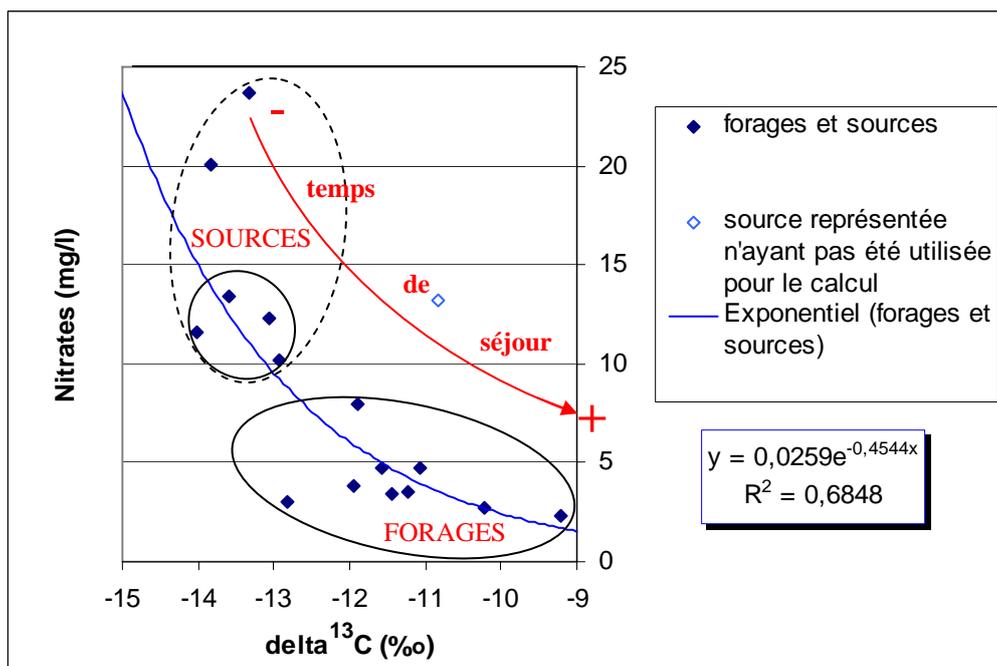


Fig. 13 : corrélation entre  $\text{NO}_3^-$  et  $\delta^{13}\text{C}$ .

• **corrélation entre le COD et  $\delta^{13}\text{C}$**

Le COD est, comme les nitrates, un marqueur du court temps de séjour. La corrélation entre le COD et  $\delta^{13}\text{C}$  (cf.figure 14) révèle comme la corrélation précédente un pôle Forages à long temps de séjour et un pôle Sources à court temps de séjour.

De plus, les eaux du forage de Thise se rapprochent nettement du pôle Sources, en période de hautes eaux. Il s'agit d'eaux plus récentes à transit rapide de la surface vers l'aquifère. Les eaux du forages de Chailluz (hautes eaux), par leur très faible teneur en  $^{13}\text{C}$  et leur très forte concentration en COD, sont d'un faciès à très court temps de séjour ; ce sont donc des eaux d'infiltration à transit très rapide de la surface vers l'aquifère. On dispose malheureusement de très peu de données sur les eaux du forage de Chailluz. Il semblerait néanmoins que les eaux pompées dans les champs captants de Thise et de Chailluz proviennent de la zone supérieure du karst et soient affectées en périodes de hautes eaux (fortes précipitations et ruissellements intenses) par l'infiltration des ruissellements de surface.

L'analyse de l'eau de la source de Fourbanne en périodes de hautes eaux est assez énigmatique : le fort  $\delta^{13}\text{C}$  révèle une eau ancienne tandis que COD, nitrates (cf.fig.12), tritium et Mg/Ca (cf.fig.8) la font appartenir logiquement au pôle Sources, eau à court temps de séjour. L'origine est peut-être une erreur d'analyse.

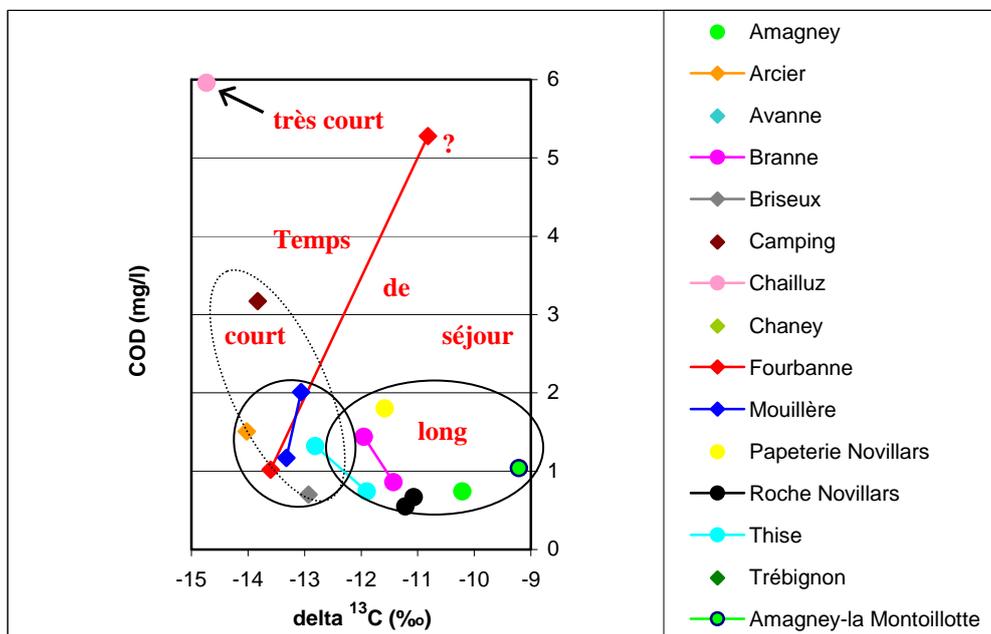


Fig. 14 : COD -  $\delta^{13}\text{C}$  au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2.

## 2. RECHARGE DES AQUIFERES

La recharge des aquifères peut être appréciée qualitativement en analysant la variabilité des marqueurs du temps de séjour (nitrates, COD,  $^{13}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ). Une forte teneur en nitrates ou en COD témoignent d'une recharge récente. Le comportement différent des aquifères des sources par rapport au comportement du karst profond atteint par les forages apparaît sur le graphique de la figure 15 :

- les **sources** sont affectées par d'importantes variations de la teneur en nitrates. Il y a donc passage massif d'eaux d'infiltration vers les sources. Leurs réservoirs sont soumis à des recharges importantes par infiltration des ruissellements de surface. La teneur en tritium de la source de la Mouillère est très variable (cf. figure 10), passant de 27 UT en étiage à 12 UT en hautes eaux. Il est donc possible que le réservoir de la source de la Mouillère soit important mais mal homogénéisé.
- les **forages** sont affectés par des variations du rapport Mg/Ca et peu de variations de la teneur en nitrates. Il y a donc un mélange entre des eaux anciennes à long temps de séjour et des eaux d'infiltration. Mais cette recharge des aquifères profonds est relativement réduite : faible variabilité du rapport Mg/Ca aux forages de Papeteries-Novillars et de Roche-Novillars par exemple. Le karst au niveau du forage de Branne semble être l'aquifère profond dont la recharge est la plus importante, Mg/Ca variant beaucoup.
- le forage de **Thise** a une position intermédiaire, comme nous le montrait l'interprétation des marqueurs du temps de séjour. Le rapport Mg/Ca le classe dans le groupes des forages et sa variabilité en nitrates le rapproche des sources. Sa variabilité en  $^{13}\text{C}$  (cf. figure 5) montre également une recharge importante de l'aquifère du forage de Thise.

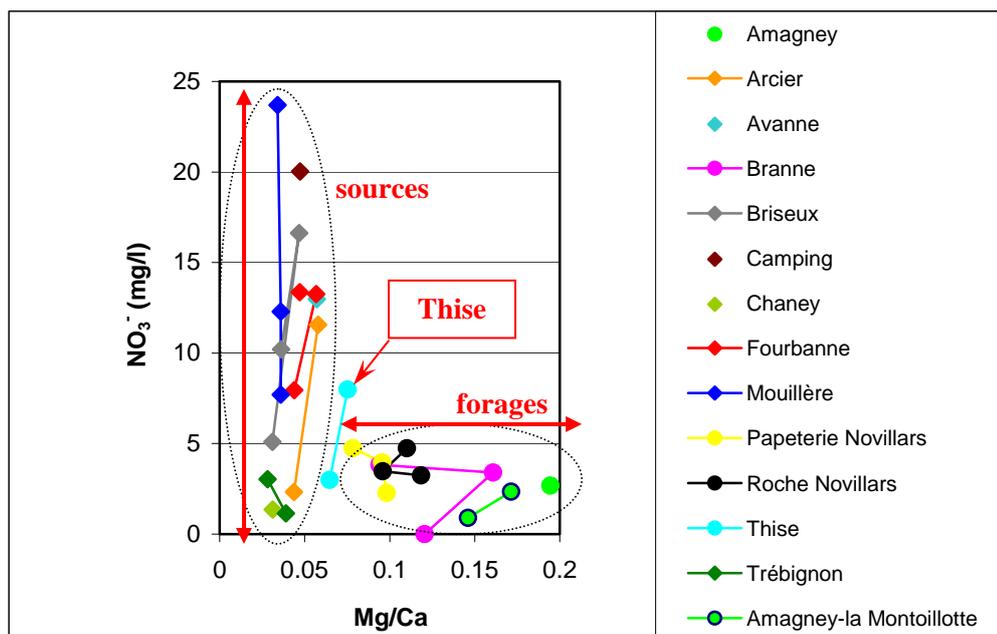


Fig. 15 : nitrates-Mg/Ca au cours des trois campagnes de prélèvements.

## 3. POLLUTIONS

### 3.1 Types de pollutions et points affectés

Sur les graphiques  $\text{NO}_3^-$ - $\text{Cl}^-$  (cf.figure 16) et  $\text{COD}$ - $\text{NO}_3^-$  (cf.figure 17), deux groupes de points s'individualisent nettement :

- un pôle naturel, avec des eaux peu chargées en nitrates, chlorures et COD
- un pôle anthropique, avec des concentrations plus importantes.

Les eaux des forages de Branne, Roche-Novillars, Papeteries-Novillars, Amagney et la Montoillotte appartiennent au pôle naturel. Ces forages atteignent le karst profond qui n'est pas affecté par les pollutions de surface.

Les eaux des forages de Chailluz (cf.figure 14) et de Thise intègrent le pôle anthropique : COD important pour Chailluz, nitrates et chlorures pour Thise. Nous avons vu précédemment que ces deux forages captaient des eaux relativement récentes. Les teneurs en nitrates, chlorures et COD confirment que ces deux forages n'atteignent pas le karst profond mais des eaux en partie affectées par l'infiltration des ruissellements de surface.

A noter que le forage de Papeteries-Novillars peut éventuellement être soumis à des pollutions organiques (cf. figures 17 et 18), les Papeteries du Doubs en étant sans doute l'origine.

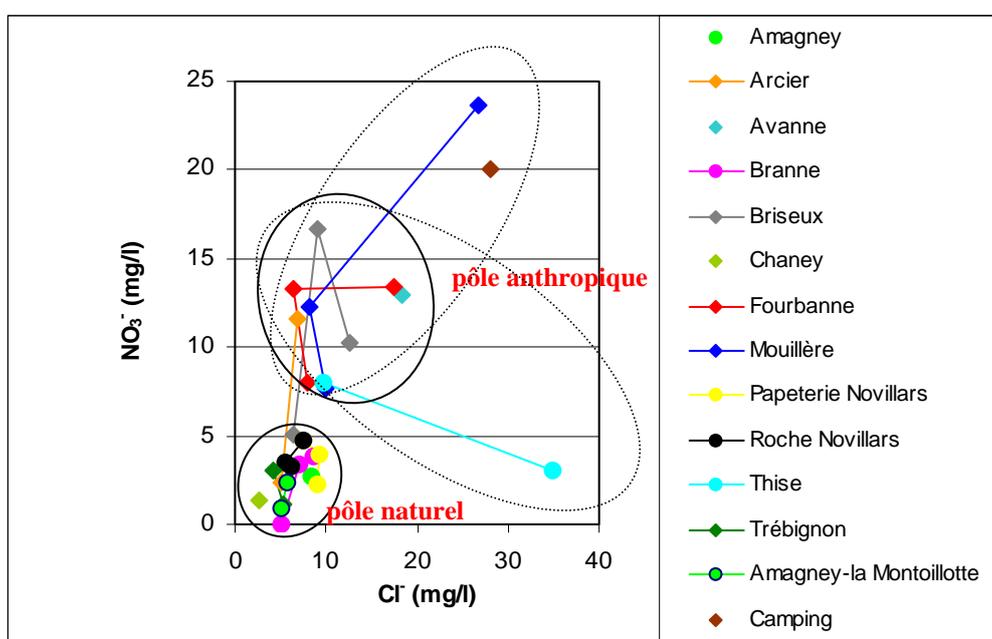


Fig. 16 : nitrates-chlorures au cours des trois campagnes de prélèvements.

Certaines sources font partie du pôle anthropique pour les trois campagnes de prélèvements, d'autres font également partie du pôle naturel pour certaines campagnes :

- sources de la Mouillère, du Camping et de Fourbanne : pôle anthropique
- source de Briseux, d'Arcier et Chaney : pôle anthropique pour les campagnes 1 (Briseux) et 2 (Briseux et Arcier), pôle naturel pour la campagne 3 (Briseux, Arcier et Chaney)
- source du Trébignon : pôle naturel pour les campagnes 2 et 3.

Les sources de la Mouillère et de Fourbanne sont parfois soumises à des pollutions organiques ou nitratées très supérieures à la moyenne (Mouillère, campagne 1 : nitrates = 23.7 mg/l ; Fourbanne, campagne 2 : COD = 5.28 mg/l) (cf. figures 16 et 18).

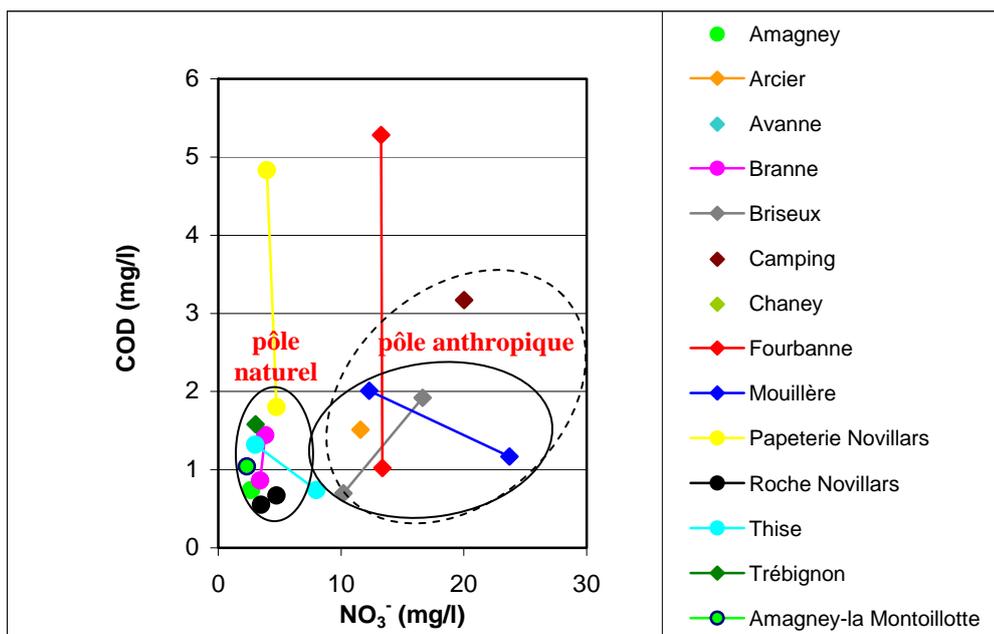


Fig. 17 : COD-nitrates au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2.

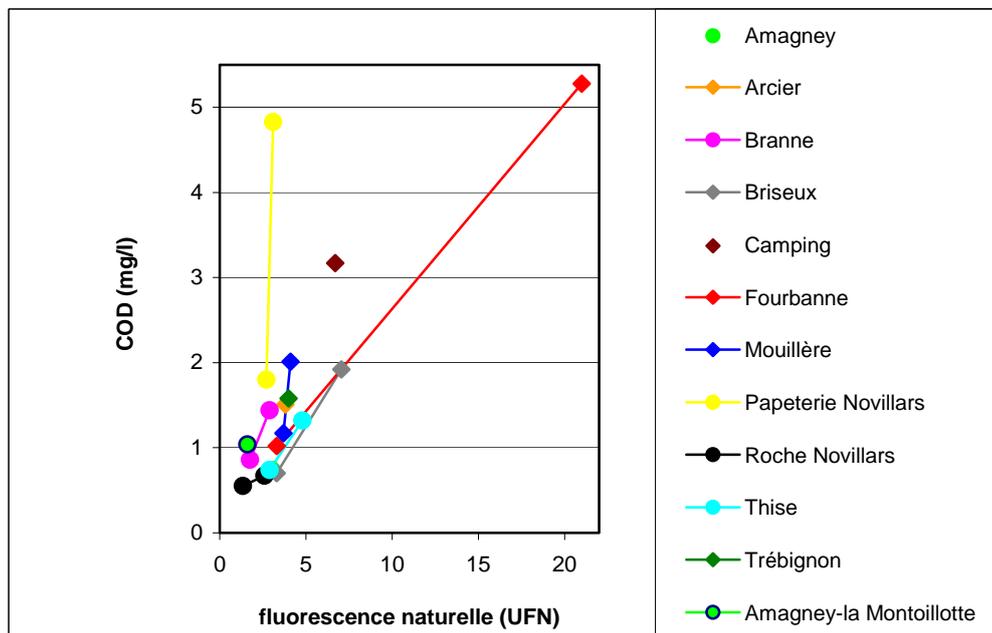


Fig. 18 : COD-fluorescence naturelle au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2.

Les sources et les forages étudiés sont également soumis à des pollutions en éléments métalliques : fer surtout, mais aussi manganèse et zinc, voire exceptionnellement cuivre, nickel et cadmium (cf. figure 19). Tous les points sont touchés sans exception, mais certains le sont plus fortement : source de la Mouillère, Arcier, Fourbanne, forage d'Amagney, de Thise. Lors des analyses, les seuils de détection étaient les suivants : FeIII, Zn et Cu 5 µg/l, Mn 20 µg/l.

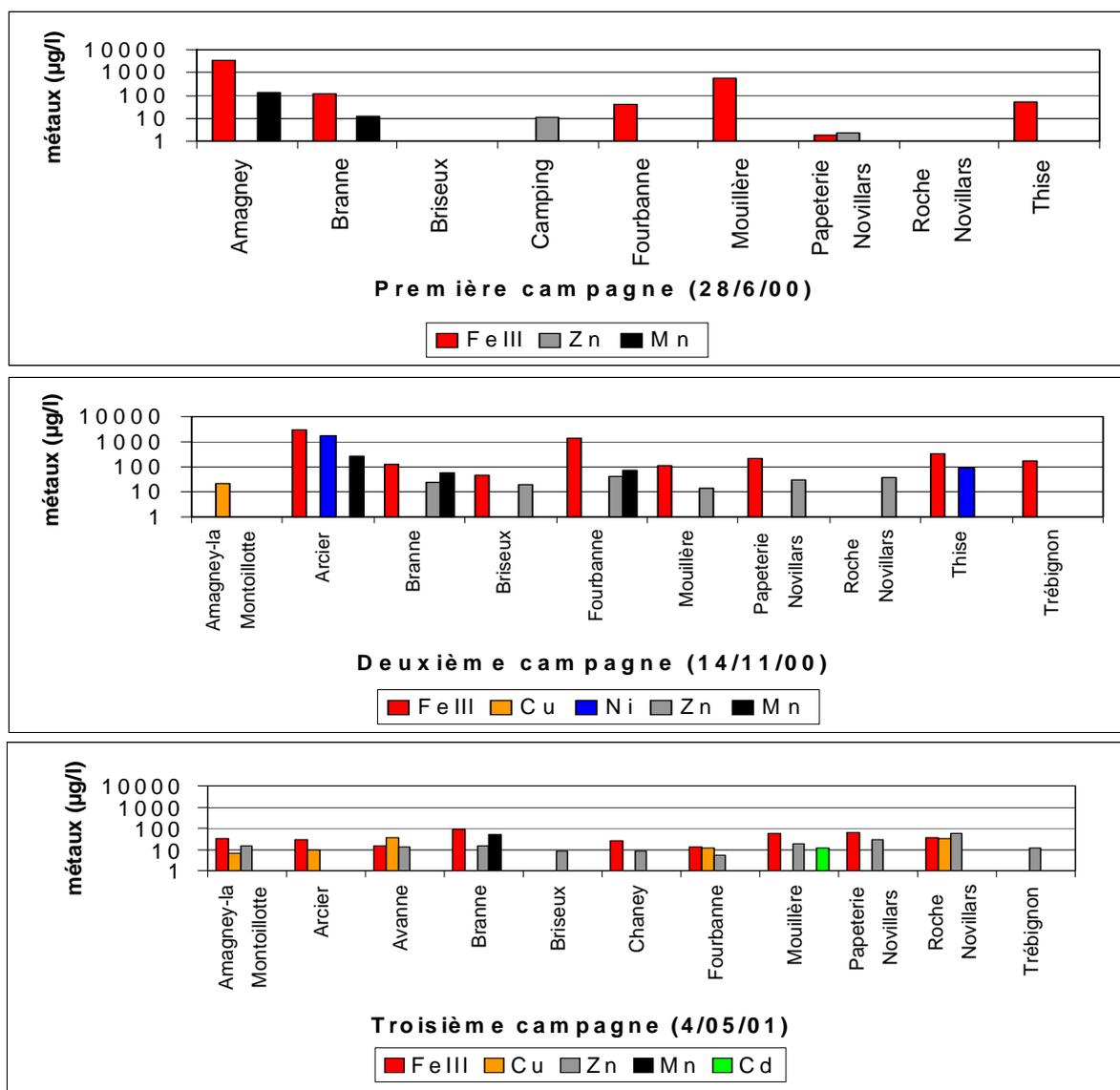


Fig. 19 : concentrations en éléments métalliques au cours des trois campagnes de prélèvements.

### 3.2 Origines des pollutions

Les pollutions rencontrées aux différentes sources et à certains captages sont essentiellement d'origine anthropique. Les pollutions organiques et nitrées sont dues à l'infiltration des ruissellements de surface, à l'agriculture sur les bassins versants ainsi qu'aux communes partiellement ou non équipées d'installations pour le traitement des effluents usés. La forte concentration en chlorures relevée au forage de Thise en novembre 2000 est vraisemblablement causée par le salage de l'autoroute A36 au nord du bassin versant. Les pollutions en éléments métalliques tels que nickel, cuivre et cadmium sont sans doute d'origine industrielle.

Certaines pollutions sont peut-être d'origine géologique : minerais de fer de l'Aalénien pour les fortes concentrations en fer et en manganèse du forage d'Amagney par exemple.

## **4. FONCTIONNEMENT DES RESERVOIRS**

### **4.1 Les sources**

Les sources sont alimentées par des eaux d'infiltration, à court temps de séjour dans l'aquifère. La fréquente variabilité inter-campagnes des mesures montre le taux de renouvellement important des réservoirs karstiques des sources. L'ensemble des sources est affecté par la pression anthropique, parfois importante : agriculture, petites industries, urbanisation, qui entraînent parfois de fortes concentrations en nitrates, Carbone Organique Dissous, métaux...

D'après l'analyse de l'oxygène 18, les exutoires de Fourbanne et de Briseux, situées en rive droite du Doubs, pourraient être en partie alimentées par le faisceau bisontin en rive gauche.

### **4.2 Les forages**

Les forages d'Amagney et de la Montoillotte, dans le synclinal d'Amagney, atteignent le karst profond, dont les eaux se caractérisent par le plus long temps de séjour de tous les points étudiés. Le forage d'Amagney est touché par de fortes concentrations en fer, probablement d'origine géologique.

Les forages de Branne, Papeteries-Novillars et Roche-Novillars atteignent également le karst profond, avec des eaux à long temps de séjour. L'analyse de  $\delta^{18}\text{O}$  pour ces trois forages aboutit à des altitudes moyennes de bassins versants supérieures aux reliefs environnants. Une hypothèse à envisager serait l'alimentation par les plateaux plus élevés, voire même par la Haute Chaîne.

Les caractéristiques du karst profond sont bien mises en évidence par les forages ci-dessus : eaux anciennes à long temps de séjour, recharge réduite et taux de renouvellement limité, pression anthropique très faible à nulle.

Les forages de Thise et de Chailluz ont un comportement intermédiaire entre les forages et les sources : temps de séjour de l'eau le moins élevé du groupe des forages, recharge importante et pression anthropique. Ces deux forages n'atteindraient pas le karst dit profond.

# **TROISIEME PARTIE :**

## **CONCLUSIONS**

## **CONCLUSIONS DE L'ETUDE ET RECOMMANDATIONS**

Les sources étudiées sont les exutoires d'eaux d'infiltration à transit rapide, soumises en général à la pression anthropique.

Les forages étudiés atteignent dans le karst profond des eaux anciennes. Ce séjour prolongé permet la minéralisation du carbone organique dissous et une dénitrification naturelle, ce qui induit une eau souvent de très bonne qualité. Le traitement de l'eau étant relativement léger, il serait donc logique de privilégier le pompage par forages dans le karst profond pour l'alimentation en eau. Cependant, une étude des réserves en eau du karst profond est indispensable pour une bonne gestion des ressources.

Pour la suite de l'étude, deux couples forages-sources les plus caractéristiques doivent être retenus pour un suivi plus serré à pas de temps régulier. Mon choix se porte sur le forage de Roche-Novillars ou celui de Papeteries-Novillars, ainsi que sur le forage de Branne, ces trois forages étant parfaitement représentatifs du karst profond. En ce qui concerne les sources, la source de la Mouillère et la résurgence de Fourbanne me paraissent caractéristiques et appropriées, la source d'Arcier étant en rive gauche du Doubs et alimentée par les pertes du plateau de Saône au SE, et la source de Briseux étant trop peu connue (bassin versant, fonctionnement).

Ce suivi permettra de tester les propriétés de mélangeur de chaque aquifère, à partir de la variabilité des teneurs au cours du cycle hydrologique et d'épisodes choisis de crue, ainsi que de préciser la vulnérabilité des différents systèmes à divers types de pollutions (azotée, agricole, urbaine).

## **IMPRESSION SUR LE STAGE ET REMERCIEMENTS**

Ce stage, particulièrement intéressant et enrichissant, m'a permis d'aborder et de redécouvrir la chimie des eaux, l'utilisation des traçages naturels, ainsi que d'apprendre à avancer dans une étude où, au départ, tout ou presque paraît complexe. S'atteler à un sujet méconnu comme le karst profond est très motivant. De plus, la rigueur nécessaire lors d'un traçage et de son suivi, comme j'ai pu le faire entre autres pour le traçage de la source de Briseux, est de mon point de vue extrêmement profitable pour l'insertion dans le milieu professionnel.

Je remercie tout ceux que j'ai côtoyé pendant deux mois et demi au Service des Eaux et des Milieux Naturels de la DIREN de Franche-Comté pour leur accueil, tout particulièrement mon maître de stage Jean-Pierre Mettetal, pour m'avoir fait partager ses connaissances et pour la confiance qu'il m'a accordée, et Alain Moustache pour les illustrations. Je remercie également Jacques Mudry, du département de Géosciences de l'UFR Sciences et Techniques de Franche-Comté et responsable de la MST Géologie Appliquée, de m'avoir accordé de son temps précieux et de son savoir.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abdelgader A. (1994). Essai de caractérisation des bassins versants dans la zone des Avants-Monts (Doubs). Fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique et modélisation des bassins de Thise-Chailluz et de Marchaux. *Thèse*, Université des Sciences et Techniques de Franche-Comté.
- Blavoux B. (1978). Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilité et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrogéologie de la zone tempérée. *Thèse*, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Charmoille A. (2000). Etude du karst profond de la vallée du Doubs. *Rapport de MST*, Université des Sciences et Techniques de Franche-Comté. Inédit.
- Chauve P., Dubreucq F., Frachon JC., Gauthier A., Mettetal JP. et Peuguenet J. (1987). Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en Franche-Comté. *Annales scientifiques de l'Université de Besançon, Géologie, Mémoire n°2*.
- Comité Départemental de Spéléologie du Doubs (1988). Inventaire spéléologique du Doubs, Tome 1.
- Comité Départemental de Spéléologie du Doubs (1991). Inventaire spéléologique du Doubs, Tome 2.
- DIREN Franche-Comté (SEMNA). Hydrologie en Franche-Comté, Bulletin n°07-juillet 2000.
- DIREN Franche-Comté (SEMNA). Hydrologie en Franche-Comté, Bulletin n°11-novembre 2000.
- DIREN Franche-Comté (SEMNA). Hydrologie en Franche-Comté, Bulletin n°4-avril 2001.
- DIREN Franche-Comté (SEMNA). Hydrologie en Franche-Comté, Bulletin n°5-mai 2001.
- Emblanch C. (1997). Les équilibres chimiques et isotopiques du carbone dans les aquifères karstiques : étude en région méditerranéenne de montagne sur le bassin expérimental de la Fontaine de Vaucluse. *Thèse*, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
- Mudry J. (1987). Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonaté. *Thèse*, Université des Sciences et Techniques de Franche-Comté.

## CARTES

- BRGM (1957). Carte géologique au 1/50 000 n° 473, Baume-les-Dames.
- BRGM (1973). Carte géologique au 1/50 000 n° 474, Montbéliard.
- IGN (2000). Carte topographique TOP25-3423 ET, Baume-les-Dames.
- Ministère de l'Industrie (1958). Carte géologique au 1/50 000 n° 502, Besançon.
- Ministère de l'Industrie (1958). Carte géologique au 1/50 000 n° 503, Vercel.

## INTERNET

[http://web.ccr.jussieu.fr/crg\\_thonon/competences.htm](http://web.ccr.jussieu.fr/crg_thonon/competences.htm)

## LISTE DES FIGURES

N°	page
1	: le bassin versant de la source de Briseux..... 7
2	: $^{18}\text{O}$ au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2..... 9
3	: COD au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2..... 12
4	: $[\text{Mg}^{2+}]$ au cours des trois campagnes de prélèvements..... 13
5	: $\delta^{13}\text{C}$ au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2..... 14
6	: teneur en $^3\text{H}$ des précipitations à Thonon-les-Bains (Haute-Savoie)..... 15
7	: $^3\text{H}$ au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2..... 15
8	: $\delta^{13}\text{C}$ - Mg/Ca au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2..... 16
9	: corrélation entre $\delta^{13}\text{C}$ et Mg/Ca..... 16
10	: $^3\text{H}$ - Mg/Ca au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2..... 17
11	: corrélation entre $^3\text{H}$ et Mg/Ca..... 17
12	: nitrates - $\delta^{13}\text{C}$ au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2..... 18
13	: corrélation entre $\text{NO}_3^-$ et $\delta^{13}\text{C}$ ..... 18
14	: COD- $\delta^{13}\text{C}$ au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2..... 19
15	: nitrates-Mg/Ca au cours des trois campagnes de prélèvements..... 20
16	: nitrates-chlorures au cours des trois campagnes de prélèvements..... 21
17	: COD-nitrates au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2..... 22
18	: COD-fluorescence naturelle au cours des campagnes de prélèvements 1 et 2..... 22
19	: concentrations en éléments métalliques au cours des trois campagnes de prélèvements..... 23
20	: carte de localisation des points de prélèvements..... 30

## LISTE DES TABLEAUX

N°	page
1	: caractéristiques des points de prélèvements et symboles utilisés..... 5
2	: caractéristiques du traçage de Breconchaux..... 7
3	: débits et superficies des bassins versants des sources d'Arcier, Fourbanne, Briseux et la Mouillère... 8
4	: altitudes moyennes des bassins versants estimées grâce $\delta^{18}\text{O}$ ..... 10
5	: ensemble des analyses de la première campagne..... 31
6	: ensemble des analyses de la deuxième campagne..... 32
7	: ensemble des analyses de la troisième campagne ..... 33

# **ANNEXES**

**Annexe 1** : carte de localisation

**Annexes 2/3/4** : données campagnes 1/2/3 : voir [données campagnes.xls](#)

ETUDE DU KARST PROFOND  
DE LA VALLEE DU DOUBS

Résumé

Dans la région de la vallée du Doubs, entre Montbéliard et Besançon, une ressource en eaux profondes se situe dans le karst du Jurassique moyen, exploitée par captages.

Le but de l'étude est de mieux comprendre le fonctionnement du karst profond de la vallée du Doubs. La géochimie des eaux de trois campagnes de prélèvements, en basses, moyennes et hautes eaux, ont bien montré que le karst profond se caractérise par des eaux à long temps de séjour, une recharge faible et une bonne protection vis-à-vis de la pression anthropique (pollutions agricoles, urbaines, industrielles). Les aquifères supérieurs alimentant les sources sont pour leur part caractérisés par des eaux à court temps de séjour, une recharge importante par des eaux d'infiltration et une vulnérabilité aux pollutions de surface.

L'étude de l'oxygène 18 a mis en évidence l'alimentation du karst profond par des zones d'altitude très supérieure aux reliefs environnant la vallée du Doubs ; des circulations profondes avec la Haute Chaîne pourraient être envisageables.

Abstract

In the Doubs valley, between Montbéliard and Besançon, a deep groundwater catchment, situated in karstified Middle Jurassic limestones, has been investigated.

The purpose of the study is a better understanding of the functioning of the deep karst of the Doubs valley. The geochemistry of water samples collected during periods of low, intermediate, and high water level clearly show that the waters of the deep karst are characterized by a long residence time, that recharge is low and that they are well protected against anthropogenic pollution of agricultural, urban or industrial origin. In contrast, the superficial aquifers that feed the sources are characterized by a short residence, and by important recharge due to infiltration of surface water. These aquifers are thus vulnerable to anthropogenic pollution.

The oxygen 18 data demonstrate that the water of the deep karst originates from altitudes clearly above the surrounding Doubs valley. Consequently, an origin from the High Chain of the Jura Mountains and a transfer by important subsurface circulation may be envisaged.

Mots-clés

Karst profond, hydrochimie, sources, forages, traçages, isotopes du milieu, temps de séjour, recharge, vulnérabilité.