

**Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud,  
Ecole des Mines de Paris  
& Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

---

**DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie  
Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives**

**Etude du fonctionnement hydrologique du bassin versant de  
Grézieu-La-Varenne à l'aide de traceurs isotopiques (oxygène 18)**

**Auteur : Raouf GNOUMA**

**Directeur de recherche : Pascal BREIL**



**Cemagref, groupement de Lyon  
Département Gestion des Milieux Aquatiques  
Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique**

**Septembre 2002**



## **REMERCIEMENTS**

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tout le personnel du Cemagref, groupement de Lyon pour leur accueil chaleureux et en particulier :

Monsieur **Jacques de Larambergue**, Directeur Régional du Cemagref, groupement de Lyon, pour m'avoir accueilli dans ses locaux.

Monsieur **Pascal BREIL**, chargé de recherche à l'unité Hydrologie-Hydraulique, mon maître de stage pour tout ce que j'ai appris à son contact ainsi que pour l'aide et les conseils apportés tout au long de ce stage.

Monsieur **Thierry BARIAC**, Hydrologue et Géochimiste à Paris VI, pour sa collaboration dans ce travail, qui s'est montré très serviable et très convivial.

Madame **Patricia RICHARD**, technicienne au Laboratoire de Biogéochimie Isotopique de Paris VI, pour l'analyse des échantillons.

Monsieur **Shamsidine SEBEA**, technicien au cemagref, groupement de Lyon, pour la mise en place du dispositif de prélèvement.

Merci à mes amis **thésards** et **stagiaires** rencontrés à cette occasion pour leur cordialité et leurs encouragements.

Enfin, merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur aide et qui m'ont consacré une partie de leur temps.

Avec toute ma reconnaissance  
**GNOUMA Raouf**

## RESUME

### Etude du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Grézieu-La-Varenne à l'aide de traceurs isotopiques (oxygène 18)

La présent travail a vocation dans une première étape à comprendre le fonctionnement hydrologique (ruissellement, effet piston) d'un bassin versant périurbain (bassin versant de Grézieu-La-Varenne situé à 25 km de Lyon) à travers la séparation des écoulements au niveau de l'hydrogramme de crue à l'aide de la méthode isotopique ( $^{18}\text{O}$ ). La deuxième étape a été consacrée à l'identification des phénomènes d'échanges d'eau entre le ruisseau et sa zone hyporhéique.

En mars et avril 2001, trois campagnes de mesures isotopiques de l'oxygène 18 ont été effectuées sur notre bassin. Les analyses indiquent que la zone hyporhéique est le lieu d'un mélange entre eau de surface et eau souterraine et on note une augmentation de la teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'amont vers l'aval pour les eaux de surface et hyporhéique. Il est important de mentionner que l'échantillonnage au niveau de la zone hyporhéique a été effectué par sondage tubé de type Bou-Rouch. Ce dispositif crée forcément un cône de rabattement qui provoque, par aspiration, un mélange des eaux de surface et des eaux hyporhéiques et par conséquent on obtient des mesures moins contrastées et représentatives de la zone hyporhéique. Un dispositif d'échantillonnage *in situ* plus adéquat a été mis en place durant ce stage.

Deux événements pluvieux, ayant généré des crues sur le bassin de la Chaudanne, ont fait l'objet de prélèvement les 18 mai et 1<sup>er</sup> août 2002. L'analyse de la composition isotopique des différentes composantes de ces crues a montré que le bassin a une réponse rapide aux événements et que la part de la pluie dans le ruissellement total est importante. Des prélèvements d'échantillons d'eau, le long de la rivière, au niveau de la zone hyporhéique à plusieurs profondeurs (10, 30 et 50 cm) ont été réalisés avec le nouveau dispositif. La signature isotopique des eaux à différentes profondeurs est bien individualisée. L'existence d'un gradient en certains points a été identifiée. Des zones d'échange entre l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique (infiltration et exfiltration) ont été également mises en évidence. Le contraste entre les valeurs de conductivité électrique des eaux échantillonnées n'est pas significatif. Ceci montre que la conductivité électrique ne permet pas de distinguer correctement les eaux de surface et hyporhéique.

**MOTS CLES** : bassin versant de Grézieu-La-Varenne, la Chaudanne, séparation des écoulements,  $^{18}\text{O}$ , zone hyporhéique, périurbain

## SOMMAIRE

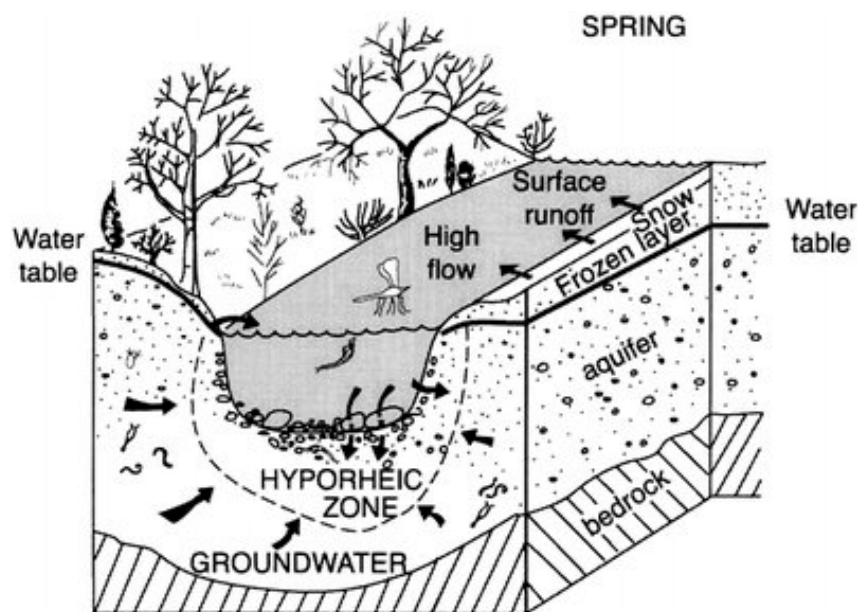
	Page
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>1</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>2</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>3</b>
<b>1. PROBLEMATIQUE</b> .....	<b>5</b>
<b>2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>7</b>
2-1. DIFFERENTES COMPOSANTES DE L'ECOULEMENT.....	7
2-1-1. <i>Le ruissellement direct</i> .....	7
2-1-2. <i>L'écoulement hypodermique</i> .....	7
2-1-3. <i>L'écoulement souterrain</i> .....	8
2-2. LES METHODES DE SEPARATION DES ECOULEMENTS.....	8
2-2-1. <i>Les méthodes graphiques</i> .....	8
a. Les méthodes simplifiées.....	8
b. La méthode de BARNES (1939).....	8
c. La méthode d'évaluation du débit souterrain par corrélation avec le niveau piézométrique de l'aquifère.....	9
2-2-2. <i>Les méthodes physico-chimiques et isotopiques de séparation des composantes de l'écoulement</i> .....	10
2-2-3. <i>Décomposition de l'hydrogramme de crue à l'aide de la conductivité et des analyses chimiques</i> .....	11
a. Mesures.....	11
b. Conditions d'application.....	11
2-2-4. <i>Décomposition de l'hydrogramme de crue à l'aide de l'oxygène 18</i> .....	12
a. Généralités.....	12
b. Mesures.....	13
c. Conditions d'application.....	13
<b>3. MATERIEL D'ETUDES</b> .....	<b>14</b>
3-1. LE BASSIN VERSANT DE LA CHAUDANNE.....	14
3-1-1. <i>Situation géographique</i> .....	14
3-1-2. <i>Caractéristiques physiques et hydrographiques</i> .....	14
3-2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	15
3-3. LES DONNEES DISPONIBLES.....	16
3-3-1. <i>Pluie</i> .....	16
3-3-2. <i>Débit</i> .....	16
3-3-3. <i>Oxygène 18 : analyse des campagnes réalisées en mars et avril 2001</i> .....	16
3-3-4. <i>Conductivité électrique de l'eau</i> .....	18
3-4. METHODE DE TRAVAIL ENVISAGEE.....	23
3-4-1. <i>Dans l'espace</i> .....	23
3-4-2. <i>Dans le temps</i> .....	23
<b>4. ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA CHAUDANNE</b> .....	<b>24</b>
4-1. CRUE DU 18 MAI 2002.....	24
4-1-1. <i>Analyse des variations isotopiques</i> .....	24
4-1-2. <i>Séparation isotopique de l'hydrogramme de la crue du 18 mai 2002</i> .....	26

4-2. CRUE DU 1 <sup>ER</sup> AOUT 2002 .....	27
4-2-1. Analyse des variations isotopiques .....	27
4-2-2. Séparation isotopique de l'hydrogramme de la crue du 1 <sup>er</sup> août 2002.....	28
4-3. SUIVI DES TENEURS ISOTOPIQUES DES EAUX DE SURFACE ET SOUTERRAINE.....	30
4-4. CONCLUSIONS SUR LA DECOMPOSITION ISOTOPIQUE DE DEUX CRUES AU NIVEAU DE LA CHAUDANNE .....	31
<b>5. ETUDE DE LA ZONE HYPORHEIQUE DE LA CHAUDANNE .....</b>	<b>32</b>
5-1. MODE D'ECHANTILLONNAGE AU NIVEAU DE LA ZONE HYPORHEIQUE .....	32
5-2. CAMPAGNE DES 13 ET 14 AOUT 2002 .....	33
5-2-1. Objectif et contexte de la campagne .....	33
5-2-2. Interprétation .....	33
5-3. CONCLUSIONS SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA ZONE HYPORHEIQUE DE LA CHAUDANNE .....	37
<b>6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>38</b>
<b>7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>40</b>
<b>INDEX DES FIGURES.....</b>	<b>44</b>
<b>INDEX DES TABLEAUX .....</b>	<b>45</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>46</b>

## 1. Problématique

L'objectif de mon stage de DEA au sein du Cemagref, groupement de Lyon unité Hydrologie-Hydraulique, est de (1) comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Chaudanne situé dans la commune de Grésieu-La-Varenne au Nord-Ouest de la ville de Lyon et (2) évaluer l'importance des échanges d'eau, par temps de pluie et par temps sec, entre l'écoulement de surface et l'eau située dans le substrat d'une rivière à fond sableux.

De récents travaux (BERNOUD, 1998 ; WOERTHER, 2000 et NOGUEIRA, 2001) réalisés sur la Chaudanne ont montré que la zone hyporhéique (figure 1), zone de circulation des eaux dans le substrat des rivières, est une zone d'activité chimique et biologique qui fluctue entre les caractéristiques d'eau de la rivière et d'eau de la nappe. Il semble que les flux qui transitent dans la zone hyporhéique conditionnent la répartition de la faune interstitielle. Le substrat de la rivière constitue une zone de transition entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Elle représente une habitat spécifique pour certains animaux et microorganismes.



**Figure 1 :** Modèle descriptif de la dynamique de la zone hyporhéique (SOPHOCLEOUS, 2001 d'après WILLIAMS, 1993)

L'activité biologique est une caractéristique de la capacité d'assimilation d'une rivière vis à vis des polluants qui y sont injectés. La zone hyporhéique est importante à ce titre. De plus la mise en évidence de l'existence des échanges entre la zone hyporhéique et l'eau de surface et la mesure de leur intensité permettrait d'évaluer les impacts causés par les rejets urbains de temps de pluie sur la rivière ou la zone hyporhéique et par la suite sur la ressource en eau souterraine du bassin.

Une meilleure connaissance des transferts d'eau et de la variabilité à la fois spatiale et temporelle des écoulements au niveau du bassin versant va servir de base par exemple à une meilleure description de processus bio-géochimiques se déroulant dans la zone hyporhéique.

La méthode que nous avons utilisée est le traçage isotopique et chimique naturel dont l'objet est de définir la contribution des différentes sources d'écoulement au cours du temps. Elle est adaptée ici à l'étude de l'importance des flux hyporhéiques à l'échelle du bassin versant. En effet, la quantification de la part des eaux souterraines dans l'hydrogramme de crue permet de déterminer l'origine de l'eau au niveau du bassin versant pour un événement donné.

Au delà de l'échantillonnage classique des différentes sources d'eau (pluie, rivière, nappe), la particularité de ce stage est que j'ai échantillonné aussi au niveau de la zone hyporhéique. Cela nous a amené durant le stage à concevoir un tube d'échantillonnage ne provoquant pas un mélange des eaux de surface avec les eaux de la zone hyporhéique.

Ce travail et ses résultats constituent une contribution à une thèse démarrée fin 2001 qui traite la modélisation des flux hyporhéiques dans un tronçon de la Chaudanne soumis à des rejets urbains de temps de pluie (Frédéric RUYSSCHAERT). Elle vise à étudier la zone hyporhéique d'un tronçon de 150 mètres de la Chaudanne afin de caractériser les conditions et zones d'échanges entre la nappe et la rivière. Un suivi des écoulements au niveau de la zone hyporhéique en prélevant des échantillons et en faisant des essais de traçage est nécessaire.

## **2. Revue bibliographique**

### **2-1. Différentes composantes de l'écoulement**

L'hydrogramme de crue d'un cours d'eau, pour un événement donné, est le résultat de trois composantes principales qui sont : le ruissellement direct, le ruissellement hypodermique ou retardé et l'écoulement souterrain. La séparation de ces composantes au niveau de l'hydrogramme ne peut pas se faire sans comprendre les différents processus qui génèrent l'écoulement total d'un cours d'eau. Dans ce qui suit, j'ai décrit ces différents types d'écoulement.

#### **2-1-1. Le ruissellement direct**

Le ruissellement direct est le résultat de la fraction de la pluie (pluie nette) qui s'écoule en surface. Du point de vue des processus de déclenchement, on peut distinguer deux types de ruissellement de surface : le ruissellement hortonien, qui a lieu lorsque l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration ou d'absorption du sol, et l'écoulement produit par des intensités de pluie très inférieures sur les terrains saturés des pièges topographiques (où les pentes sont faibles et les horizons du sol sont peu perméables) du bassin versant.

Pour le ruissellement direct, on peut citer la pluie tombant directement sur les surfaces d'eau libre. Outre les cas particuliers (retenue d'eau, marais, régions inondées), ces apports ne constituent qu'un très faible pourcentage et sont la plupart du temps confondus avec le ruissellement direct du fait d'un temps de réponse très court.

La teneur isotopique de l'eau de ruissellement direct est variable dans l'espace et surtout dans le temps au cours d'une averse. Un très léger enrichissement est possible lors des pertes par évaporation, mais ce phénomène est limité en période pluvieuse sous climats français (BLAVOUX, 1978).

La concentration en éléments dissous du ruissellement direct évolue en fonction du trajet de l'eau. La concentration en sels dissous n'est donc pas un indicateur stable. Ceci constitue le principal inconvénient de la méthode chimique de séparation des écoulements. Dans le signal hydrologique, le ruissellement direct constitue souvent la première partie d'une crue du bassin.

#### **2-1-2. L'écoulement hypodermique**

C'est la portion des précipitations infiltrées qui n'est pas descendue jusqu'à la nappe libre mais qui passe de la surface du sol vers les cours d'eau en cheminant au-dessous de la surface du sol (Glossaire International d'Hydrologie). Elle emprunte souvent des chemins préférentiels par exemple les failles ou les "galeries" créées par les bioturbations. La matrice sol n'est donc pas saturée.

La teneur isotopique du ruissellement hypodermique est différente de celle de la pluie. Cette dernière en tombant sur le sol pousse par effet de pression une eau préexistante qui correspond au mélange des infiltrations antérieures. Néanmoins, dans le cas où l'infiltration serait très élevée, la teneur isotopique du ruissellement hypodermique sera proche à la fin de l'épisode pluvieux de celle de la pluie (BLAVOUX, 1978).

En ce qui concerne les éléments chimiques, la minéralisation du ruissellement hypodermique est généralement plus proche de celle des eaux souterraines que de celle de la pluie. Au niveau du signal hydrologique, l'écoulement hypodermique contribue en principe après le ruissellement direct au gonflement d'une crue.



### **2-1-3. L'écoulement souterrain**

L'écoulement souterrain représente la partie fournie à l'écoulement total par les aquifères du bassin, soit directement par émergence visible, soit d'une manière occulte par drainage des nappes libres. Après la crue, on aura un drainage lent des aquifères temporaires qui contribuent à l'écoulement souterrain. Par conséquent, l'assimilation du débit de base de la rivière à l'écoulement souterrain "permanent" ne peut se faire qu'en période d'étiage prolongé. La teneur isotopique de la nappe peut présenter une certaine variabilité spatio-temporelle. A travers les sources qui drainent la nappe du bassin versant, on peut mesurer la teneur en  $^{18}\text{O}$  des eaux souterraines.

### **2-2. Les méthodes de séparation des écoulements**

Afin d'étudier le cycle de l'eau, les hydrologues ont tenté de décomposer les hydrogrammes de crue selon les différentes contributions de l'écoulement. Ceci a été le plus souvent abordé à travers des bilans hydriques, par l'analyse du rapport entrée-sortie des compartiments hydrologiques ou par l'étude de la variation du volume d'eau des réservoirs impliqués dans ces bilans. Ainsi plusieurs méthodes ont été inventées. Les principales sont présentées ci-après.

#### **2-2-1. Les méthodes graphiques**

##### **a. Les méthodes simplifiées**

Ces méthodes ont été proposées avec l'hypothèse d'une simplification des composantes de l'hydrogramme de crue en supposant qu'au niveau d'un cours d'eau en crue, le débit associé est le résultat de la superposition de deux écoulements : l'écoulement souterrain qui provient de la vidange des aquifères du bassin versant et le ruissellement total engendré par la pluie. Ce dernier regroupe à la fois le ruissellement direct et celui retardé (hypodermique). Ces méthodes font appel essentiellement à l'expérience et au jugement de l'opérateur.

La méthode la plus simple, citée par Blavoux (1978), consiste à tracer une horizontale du point (A) qui marque le début de la courbe de concentration jusqu'à l'intersection (A') avec la courbe de tarissement (figure 2).

Une variante de cette méthode consiste à joindre par une droite le point (A) à un point (B) (point de rupture) choisi arbitrairement sur la courbe de tarissement. Le coté arbitraire de la méthode influence naturellement les proportions de mélange.

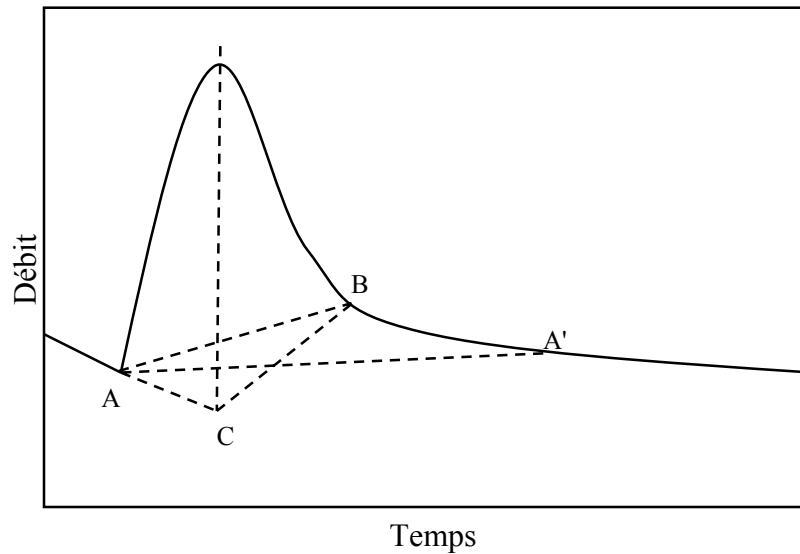
Une modification de cette méthode consiste à prolonger la courbe de ruissellement avant l'averse jusqu'au point (C) (figure 2) situé sur la verticale de la pointe de crue. Par la suite, (C) et (B) sont reliés (LLAMAS, 1993).

##### **b. La méthode de BARNES (1939)**

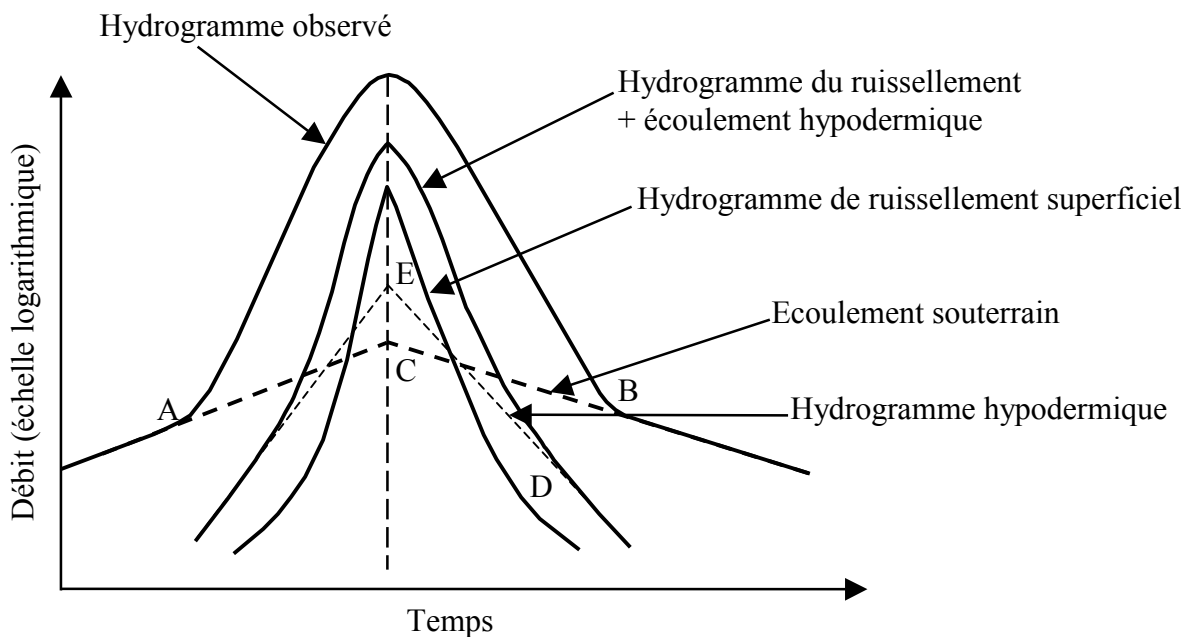
C'est une méthode qui permet de séparer l'hydrogramme de crue en trois composantes. Elle consiste à représenter les courbes de décrue de chacune des composantes en coordonnées semi-logarithmiques par des droites de pentes différentes permettant de les séparer (figure 3).

En prolongeant la partie terminale de l'hydrogramme jusqu'à la verticale de la pointe (point C), on aura la courbe de décrue souterraine (ACB). En retranchant les ordonnées de cette courbe de celle de l'hydrogramme global, on obtiendra une nouvelle courbe qui sera la somme des hydrogrammes de ruissellement de surface et de l'écoulement hypodermique. Par le même principe que ci-dessus, on obtiendra une droite (DE) qui correspond à la décrue de l'écoulement hypodermique et enfin on obtient l'hydrogramme de ruissellement superficiel. C'est une méthode

arbitraire où le tracé de la montée de crue est laissé à l'appréciation de l'opérateur car les hydrogrammes de crues sont rarement simples.



**Figure 2.** Méthodes simplifiées de séparation des composantes de l'hydrogramme (BLAVOUX, 1978)



**Figure 3.** Décomposition de l'hydrogramme par la méthode de BARNES

**c. La méthode d'évaluation du débit souterrain par corrélation avec le niveau piézométrique de l'aquifère**

Cette méthode, citée par Blavoux (1978), consiste à établir la correspondance entre le niveau piézométrique de l'aquifère et le débit en étiage. En mesurant le niveau de l'aquifère pendant la crue, on connaîtra ainsi l'écoulement souterrain.

Pour établir la courbe de corrélation, on utilise les valeurs du débit en étiage et le niveau moyen de l'aquifère mesuré dans plusieurs puits dispersés sur tout le bassin. Il faut construire deux courbes,

une de saison chaude à forte évapotranspiration, une de saison froide pendant laquelle à hauteur égale, le débit sera plus fort. Toutefois, on est souvent obligé d'extrapoler la courbe établie pour trouver les valeurs correspondant aux grandes crues.

Les méthodes graphiques sont surtout utilisées pour une estimation grossière de la quantité d'eau ruisselée. La détermination de l'origine de l'eau est, d'après Hubert (1990), un problème relativement secondaire, lorsque l'objectif de l'hydrologue est la reconstitution ou la prévision des débits. Nous partageons cette analyse pour des bassins versants d'occupation homogène. Dans le cas d'un mélange entre flux urbains et ruraux, la contribution des entités hydrologiques contrastées à la formation des crues devient un problème essentiel dès qu'il s'agit de reconstituer ou prévoir la qualité de l'eau d'une rivière.

### **2-2-2. Les méthodes physico-chimiques et isotopiques de séparation des composantes de l'écoulement**

Les méthodes graphiques simples de séparation des écoulements, très subjectives, ont été remplacées ensuite par les méthodes de séparation physico-chimiques et isotopiques ayant pour objectif de cerner la réalité des phénomènes. Au début la variation de la conductivité de l'eau a été utilisée. Cette dernière reflète la charge globale en éléments dissous. Ensuite ces méthodes ont été affinées en étudiant les variations des concentrations de certains éléments majeurs. Enfin, les méthodes isotopiques ont été largement appliquées avec un certain succès. Ces méthodes reposent sur le traçage intrinsèque de la molécule d'eau qui permet une analyse plus rigoureuse des hydrogrammes de crue.

Le principe de calcul des méthodes chimique et isotopique de décomposition de l'hydrogramme de crue est le suivant.

En période d'étiage, le débit total de la rivière ( $Q_t$ ) est uniquement dû à la vidange des aquifères du bassin versant.

$$Q_t = Q_s \quad (1)$$

La concentration ( $C_t$ ) de la rivière correspond alors à la concentration ( $C_s$ ) de l'écoulement souterrain.

En période de crue, l'écoulement total ( $Q_t$ ) provient de la superposition de l'écoulement souterrain ( $Q_s$ ) et du ruissellement total lié à la pluie ( $Q_p$ ). Le ruissellement retardé sera en effet inclus dans l'une ou l'autre des composantes.

$$Q_t = Q_s + Q_p \quad (2)$$

avec ( $t$ ) l'écoulement total de la rivière, ( $s$ ) l'eau souterraine préexistante et ( $p$ ) la pluie.

Chaque composante a sa concentration chimique ou isotopique qui reste plus ou moins constante durant la crue, ( $C_s$ ) pour la composante souterraine et ( $C_p$ ) pour le ruissellement.

$$Q_t C_t = Q_s C_s + Q_p C_p \quad (3)$$

En éliminant ( $Q_p$ ) entre les équations 2 et 3, on obtient :

$$Q_s = Q_t \frac{C_t - C_p}{C_s - C_p} \quad (4)$$

Donc la proportion de l'eau souterraine dans l'écoulement de crue est :

$$\frac{Q_s}{Q_t} = \frac{C_t - C_p}{C_s - C_p} \quad (5)$$

### **2-2-3. Décomposition de l'hydrogramme de crue à l'aide de la conductivité et des analyses chimiques**

#### **a. Mesures**

La conductivité de l'eau de la rivière et sa teneur en certains ions sont obtenues par un dispositif de mesure en continu (conductimètre et ionomètre) ou à partir des échantillons prélevés lors de la crue.

D'après Blavoux (1978), les concentrations du ruissellement sont plus difficiles à appréhender. Pour certains, la minéralisation de la rivière à la pointe de l'hydrogramme d'une grosse crue pourra être prise comme valeur du ruissellement. L'estimation de ( $C_p$ ) pourra ainsi se faire à partir d'échantillons prélevés dans les ruisseaux temporaires dans les parties hautes des versants pour exclure l'écoulement souterrain et latéral.

La minéralisation de l'écoulement souterrain supposée constante est celle du cours d'eau à l'étiage prolongé. Elle peut aussi être mesurée sur les sources ou puits du bassin pendant la crue.

#### **b. Conditions d'application**

Comme pour la méthode isotopique, la décomposition de l'hydrogramme par la méthode chimique ne permet de distinguer que deux origines pour l'écoulement total, souterraine et superficielle. Il faut donc assimiler le ruissellement hypodermique à l'une ou à l'autre. Celui-ci comprend en partie un volume d'eau chassé du sol par la chute de pluie et sa minéralisation est proche de celle des eaux souterraines. Toutefois, elle reste intermédiaire et une première incertitude apparaît d'autant plus ce que cet écoulement sera important en volume.

Chaque composante de l'écoulement a une minéralisation supposée constante tout au long de la crue. Pour les eaux souterraines, surtout quand il s'agit d'un aquifère en milieu poreux bien défini, leur variation peut être considérée comme négligeable. Mais la minéralisation des eaux de ruissellement varie sensiblement pendant la crue d'où une erreur supplémentaire.

On suppose aussi pour cette méthode qu'il n'y a pas d'interaction chimique lors du mélange des deux écoulements et que l'ion étudié a une origine naturelle. Donc la méthode est inapplicable à des bassins urbains avec des rejets industriels dans le réseau hydrographique ou à des bassins agricoles avec épandages d'engrais. L'ion choisi doit être présent sur la totalité du bassin versant et il faut éviter un élément seulement présent sur un affleurement. On utilise le plus souvent les éléments majeurs (comme  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $SiO_2$ , ...).

Dans notre cas, l'eau de la Chaudanne peut avoir à la fois comme origine des rejets urbains de temps de pluie ainsi que la présence des engrais au niveau du bassin versant qui seront transportés

par les eaux de ruissellement. Ceci limite l'utilisation de la méthode chimique basée sur l'exploitation des concentrations en ions majeurs au niveau de notre bassin versant.

## 2-2-4. Décomposition de l'hydrogramme de crue à l'aide de l'oxygène 18

### a. Généralités

Les éléments chimiques possèdent pour la plupart plusieurs isotopes qui diffèrent les uns des autres par leur masse. La molécule d'eau est constituée de deux éléments (O et H) qui possèdent respectivement trois isotopes pour l'hydrogène  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  (deutérium) et  $^3\text{H}$  (tritium) et trois isotopes pour l'oxygène  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$ . L'abondance relative d'un isotope dépend de plusieurs facteurs tels que : le lieu de précipitation de la pluie (altitude, latitude, distance de l'océan), le cycle d'évaporation-condensation, etc (ROCCHICCIOLI-DELTCHEFF, 1971 ; LETOLLE, MARIOTTI et BARIAC, 1991). Le tableau 1 donne, pour la molécule d'eau, l'abondance relative moyenne et la nature de ses isotopes.

Les teneurs en isotopes lourds de l'eau sont exprimés en unité  $\delta$  (delta) de part pour mille de différence par rapport à l'étalon international "Vienna Standard Mean Ocean Water" (encore noté V-SMOW) qui représente la composition isotopique moyenne des océans (EPSTEIN et MAYEDA, 1953).

$$\delta = \left[ \left( \frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] * 1000 \quad (6)$$

avec

$$R = \frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}}$$

Donc par définition,  $\delta^{18}\text{O}$  (V-SMOW) = 0.

Lors du phénomène d'évaporation, il se produit un départ préférentiel des isotopes légers dans la phase gazeuse (LETOLLE et al, 1991). Dans une rivière, soumise à l'évaporation, on va noter un enrichissement en isotope lourd et donc le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  de l'échantillon augmente. Par conséquent  $R_{\text{échantillon}}$  tend vers  $R_{\text{standard}}$ . L'enrichissement se traduit donc par des valeurs petites de  $\delta$  en valeur absolue.

**Tableau 1.** Abondance relative moyenne et naturelle des isotopes de la molécule d'eau (ROCCHICCIOLI-DELTCHEFF, 1971)

Isotope	Abondance relative en %	Nature
$^{16}\text{O}$	99,76	stable
$^{17}\text{O}$	0,04	stable
$^{18}\text{O}$	0,2	stable
$^1\text{H}$	99,98	stable
$^2\text{H}$	0,02	stable
$^3\text{H}$	$10^{-17}$ à $10^{-9}$	radioactif ( $T_{1/2} = 12.43$ ans)

L'inégalité entre les masses des isotopes d'un même élément leur confère des propriétés physiques et chimiques très largement différentes. Ainsi, ils peuvent s'échanger entre deux composés ou deux phases comportant le même élément sans qu'une réaction apparente, autre qu'isotopique, ne s'opère entre les composés ou entre les phases. Au cours des échanges, une ségrégation se produit entre les isotopes. Cette ségrégation correspond aux **fractionnements isotopiques** (LETOLLE, MARIOTTI et BARIAC, 1991). L'exploitation de ces fractionnements

isotopiques permet de déterminer l'origine de l'eau qui génère la crue ainsi que les différents types d'écoulement mis en jeu.

Le fractionnement qui s'opère entre deux phases 1 et 2 peut être quantifié par le **facteur de fractionnement**  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{R_1}{R_2} = \frac{(1000 + \delta_1)}{(1000 + \delta_2)} \quad (7)$$

Quand  $\alpha = 1$ , il n'y a pas de fractionnement.

Le fractionnement peut aussi être exprimé par le **facteur d'enrichissement** :

$$\varepsilon = (\alpha - 1) * 1000 \approx \delta_1 - \delta_2 \quad (8)$$

La composition isotopique de l'eau en  $^{18}\text{O}$  de l'eau été déterminée grâce à la technique d'équilibration avec  $\text{CO}_2$  (EPSTEIN et MAYEDA, 1953). L'erreur analytique sur la mesure du rapport isotopique est de  $\pm 0.1 \text{ ‰}$  pour  $\delta^{18}\text{O}$ .

### **b. Mesures**

La teneur isotopique en  $^{18}\text{O}$  du ruissellement est celle de la pluie. Celle de la rivière est obtenue par des mesures sur des échantillons prélevés pendant toute la crue et jusqu'à l'apparition du tarissement. La teneur en  $^{18}\text{O}$  des eaux souterraines est celle de la rivière avant la crue en l'absence d'un épisode pluvieux précédent. Elle peut aussi être mesurée sur les eaux de la source du bassin prélevées pendant la crue (BLAVOUX, 1978).

### **c. Conditions d'application**

La décomposition de l'hydrogramme de crue à l'aide de l'oxygène 18 permet de calculer la part de la pluie dans l'écoulement total à l'exutoire.

La résolution de l'équation 3 n'admet que deux origines à l'écoulement total (souterraine et superficielle). D'après Blavoux (1978), l'écoulement hypodermique est constitué en partie par l'eau du sol avant l'averse. Sa teneur isotopique qui résulte du mélange des précipitations antérieures est souvent différente de la pluie, mais aussi des eaux de l'aquifère, à un degré moindre cependant. Ainsi, la décomposition de l'hydrogramme est approximative. Néanmoins, d'après les expériences menées par Blavoux (1978) sur le ruisseau du Maravant, cette méthode présente l'avantage sur la méthode chimique de montrer (dans certains cas) l'existence du ruissellement retardé : au niveau du bassin versant de ce ruisseau, Blavoux a constaté que la contribution de la pluie à l'écoulement global est extrêmement faible (0,2%) et elle se manifeste longtemps en cours de décrue, ce qui indique la présence d'un ruissellement retardé.

La teneur en  $^{18}\text{O}$  des eaux souterraines pendant la crue peut être considérée comme constante sans risque d'erreur (BLAVOUX, 1978).

La teneur ponctuelle en  $^{18}\text{O}$  pendant la pluie peut varier considérablement. Cette variation constitue un obstacle à l'étude des crues engendrées par des précipitations de longue durée.

Cette méthode nécessite d'avoir une eau de pluie dont la teneur isotopique se différencie nettement de celle des eaux souterraines. D'après Blavoux (1978) une différence d'au moins  $3 \text{ ‰}$  est souhaitable.

### 3. Matériel d'études

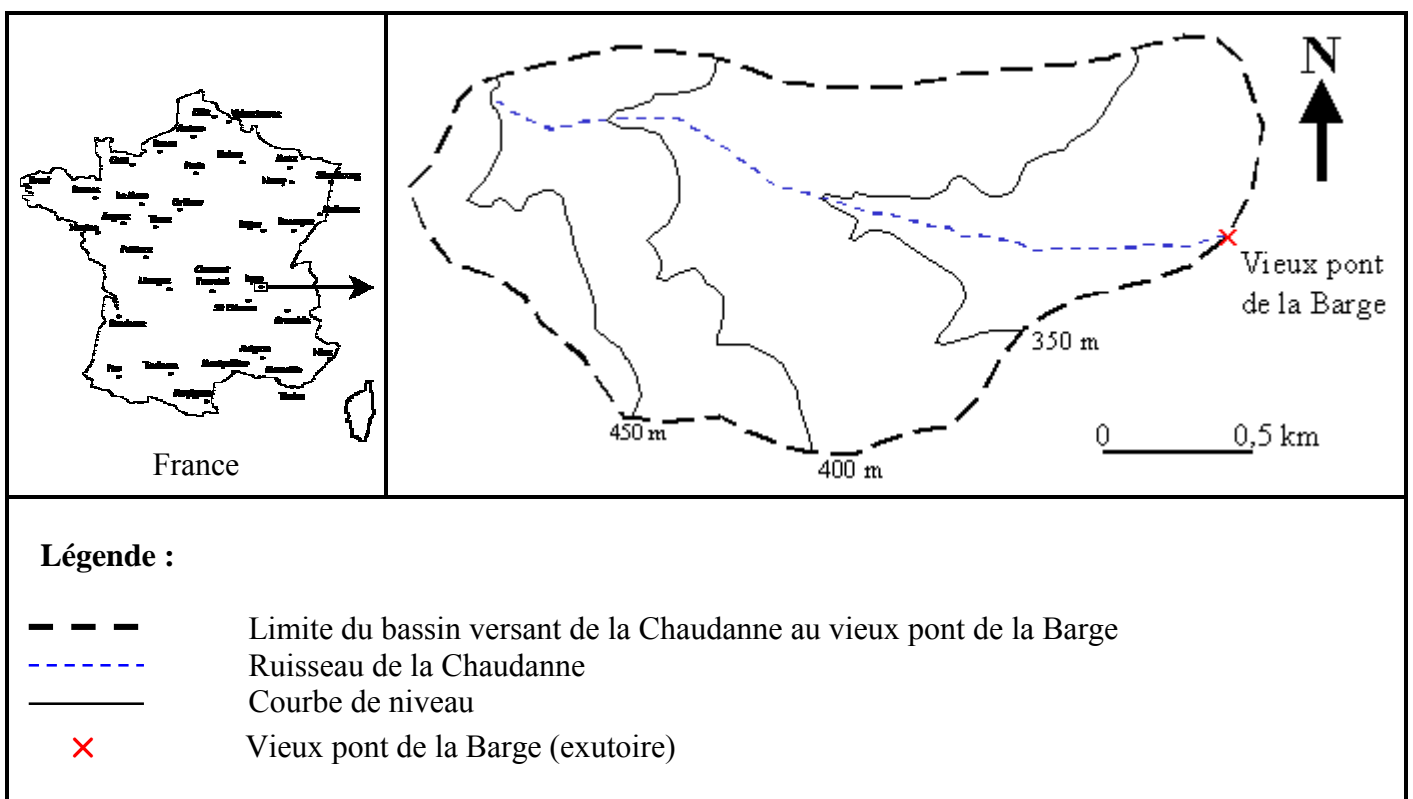
#### 3-1. Le bassin versant de la Chaudanne

##### 3-1-1. Situation géographique

Le bassin versant de la Chaudanne est situé au Nord-Ouest de la ville de Lyon, dans le département de Rhône-Alpes, sur la commune de Grézieu-La-Varenne (à une quinzaine de kilomètres de Lyon) (figure 4). C'est un **Bassin Versant de Recherche et d'Expérimentation (BVRE)** sur lequel différentes équipes du Cemagref de Lyon mènent leurs recherches depuis 1988.

Il s'agit d'un bassin versant périurbain caractérisé par une réponse rapide et une nappe d'accompagnement avec une faible capacité de stockage.

La Chaudanne est un petit affluent de l'Yzeron, lui-même affluent en rive droite du Rhône. Elle s'écoule selon un axe Nord-Ouest vers le Sud-Est et elle est alimentée, juste en amont, par une source non pérenne de quelques litres par secondes.



**Figure 4.** Le bassin versant de la Chaudanne (Carte IGN 2931 E : l'Arbresle)

##### 3-1-2. Caractéristiques physiques et hydrographiques

Notre bassin versant, de forme allongée, a une superficie de 2,82 km<sup>2</sup>. Son altitude et sa pente moyennes sont respectivement de 374,5 m et 0,07 m/m.

La longueur de la Chaudanne est de 2,5 km de la source à la station liminimétrique située au vieux pont de la Barge. Les altitudes extrêmes sont comprises entre 443 et 306 m (exutoire du bassin au vieux pont de la Barge). La pente moyenne de la rivière est de 0,05 m/m. Sa largeur oscille entre 0,5 et 1,5 m.

Le débit d'étiage de la Chaudanne varie de 0 à 10 l/s. Le débit moyen est de l'ordre de quelques dizaines de litres par seconde et peut atteindre plus de 250 l/s lors de fortes pluies et des rejets des

déversoirs d'orage. C'est un ruisseau à écoulement non permanent étant donné que son débit d'étiage peut être nul en période estival. Néanmoins, l'apparition de ce phénomène, d'après Orczyk (2001), est toujours retardée par un ressuyage de l'ordre d'une semaine qui traduit la présence d'un sous-écoulement important. Cet écoulement provient d'une nappe d'accompagnement, de profondeur variable, située dans les arènes granitiques qui caractérise le substrat dominant des rivières du secteur de l'Yzeron.

On peut diviser notre zone d'étude en deux parties : une partie amont de type rural couvrant une superficie de 2,22 km<sup>2</sup> et ayant des pentes dépassant fréquemment les 5% et une partie urbaine, de surface plus restreinte (0,6 km<sup>2</sup> qui représente environ 20% de la superficie totale du bassin), présentant des pentes de l'ordre de 3%. Le coefficient d'imperméabilisation de cette dernière est estimé, d'après Orczyk (2001), à 40,45%. Au niveau du bassin versant, la surface agricole utile représente, d'après Bernoud (1998), 80% de la surface totale.

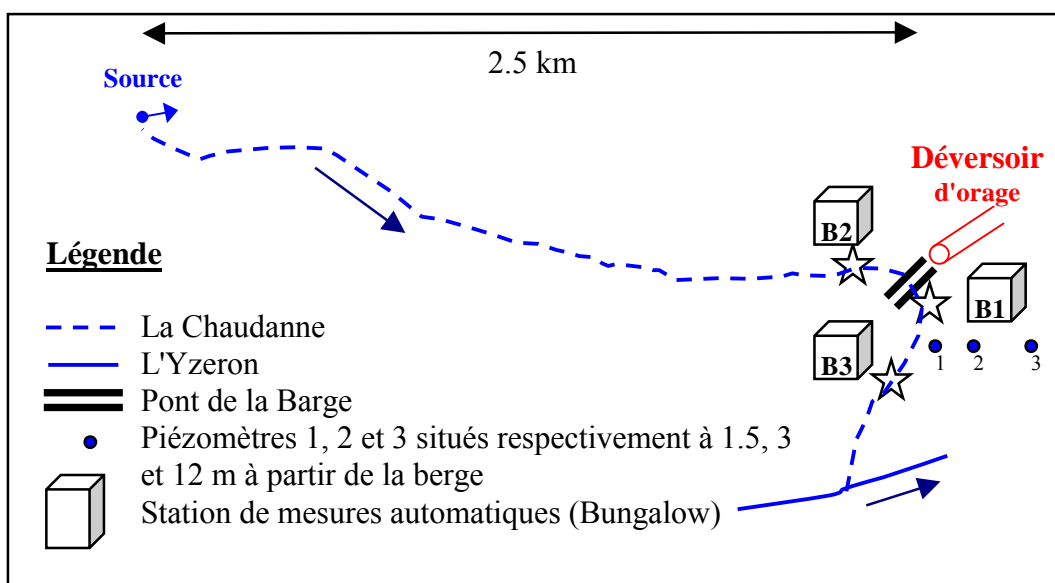
D'après Kessler et Chamraud (1990), la pluie moyenne annuelle est de 800 mm et elle est bien répartie sur toute l'année au niveau de notre région d'étude.

Du point de vue géologique, le substratum du bassin versant de la Chaudanne est composé de granite gneissique (carte géologique de la France).

Selon la carte pédologique des coteaux du lyonnais, les sols du bassin versant sont caractérisés par des formations granitiques avec des sols bruns modaux sur roche granito-gneissique. 80 à 100% des analyses de sol réalisées concluent à une dominance sablo-limoneux à sablo-argileuse des terres (BERNOUD, 1998). Leurs profondeurs varient de 90 à 160 cm.

### 3-2. Dispositif expérimental

Depuis 2001, un dispositif météorologique a été mis en place au niveau de la Chaudanne visant à quantifier les rejets urbains dans la commune de Grézieu-La-Varenne par temps de pluie *via* un déversoir d'orage situé au niveau du pont de la Barge (figure 5). Il existe trois bungalows (B1, B2 et B3) qui contiennent des préleveurs automatiques permettant d'effectuer différentes mesures (débit, conductivité, oxygène dissous, pH, turbidité). Ces appareils sont déclenchés pour certains rejets du déversoir d'orage.



**Figure 5.** Dispositif de mesures dans la Chaudanne



### **3-3. Les données disponibles**

#### **3-3-1. Pluie**

Pour la pluie, on dispose au sein de notre bassin versant de deux pluviographes, l'un au niveau du pont de la Barge et l'autre situé à 1 km au Nord.

La teneur en  $^{18}\text{O}$  de la pluie peut varier à l'échelle de l'année. Cette variation peut atteindre 15  $\delta$  ‰. En été, on peut avoir des pluies à +1 et +2  $\delta$  ‰. Ce sont généralement des pluies de courte durée qui ont été ré-évaporées avant d'arriver au sol. En hiver, on peut avoir des pluies à -15 et -14  $\delta$  ‰. (BARIAC, communication personnelle)

#### **3-3-2. Débit**

Concernant la mesure de débit, un limnigraphe, est situé au niveau du vieux pont de la Barge (station GLV0311Q), déterminer la hauteur de l'eau et dont on peut déduire le débit par l'intermédiaire d'une courbe de tarage.

A l'amont du bassin versant, se trouve une source. La prise de quelques échantillons au niveau de cette source permet de déterminer sa teneur en  $^{18}\text{O}$ . La valeur trouvée doit être comparée à celle de l'eau de la rivière en période d'étiage prolongé (lors d'une campagne en été). Cela va nous permettre de déterminer la contribution de cette source à la nappe d'accompagnement car la source peut drainer un versant éloigné.

#### **3-3-3. Oxygène 18 : analyse des campagnes réalisées en mars et avril 2001**

Trois campagnes d'échantillonnage de l'eau ont été réalisées sur notre bassin versant respectivement le 8 mars et les 10 et 26 avril 2001. La première campagne est caractérisée par l'absence de pluie dans les 24 heures précédentes mais présente depuis la matinée du prélèvement, la deuxième par des petites quantités de pluie durant les 24 heures et la troisième est marquée par des pluies soutenues dans les 24 heures précédentes. L'objectif recherché par ces trois campagnes était de vérifier l'existence de signatures différenciées entre les eaux de surface, de nappe et hyporhéique au niveau du bassin versant et non la séparation des composantes de l'hydrogramme de crue. Les analyses s'effectuent au Laboratoire de Biogéochimie Isotopique (LBI) de Jussieu à Paris.

J'ai exploité les résultats de ces analyses afin d'avoir une idée du comportement du bassin versant et de proposer des hypothèses sur les modalités de transfert de l'eau entre ses différents compartiments (rivière, nappe et zone hyporhéique). Sur la base de ces résultats, trois nouvelles campagnes ont été réalisées. Ces dernières ont vocation à me permettre de vérifier les hypothèses déclinées ci-après.

#### **Mode d'échantillonnage des campagnes réalisées**

Pour la campagne du 8 mars 2001, l'eau a été échantillonnée en quatre points au niveau de la station limnigraphique : le déversoir d'orage<sup>1</sup> situé au pont de la Barge, la pluie à partir d'un pluviographe situé à 100 m au nord du bassin, l'eau de la rivière et celle de la nappe à 10 m de la berge et 2 m de profondeur (figure 6).

Lors de la campagne du 10 avril 2001, seulement l'eau de surface a été échantillonnée le long de la Chaudanne depuis la source jusqu'au grand canal de la Léchère situé en aval (à 300 m) du vieux pont de la Barge.

---

<sup>1</sup> C'est une conduite qui a pour rôle d'évacuer directement dans la Chaudanne le surplus d'eau, en cas de fortes pluies, de la commune de Grézieu-La-Varenne dont le réseau d'assainissement est unitaire.

Pour la campagne du 26 avril 2001, l'eau de surface et l'eau à 50 cm de profondeur dans le substrat ont été échantillonnées le long de la rivière de la Chaudanne de l'amont vers l'aval (figure 6). Le dispositif de prélèvement au niveau de la zone hyporhéique était celui utilisé par les biologistes. Il s'agit d'un tube crépiné à son extrémité inférieure et surmonté d'une pompe manuelle à piston. L'amorçage de la pompe crée forcément un cône de rabattement et par la suite la récupération dans l'échantillon prélevé d'un mélange eau de surface et eau de la zone hyporhéique. Il faut être très prudent lors de l'interprétation des résultats des mesures qui ont été effectuées dans cette zone. Le mélange minimise la différence réelle entre les signatures. (D'après T. Bariac, le dixième d'unité  $\delta$  de différence est considéré comme significatif et permet donc de différencier les sources).

### **Interprétation des résultats des analyses**

Le tableau 2 donne la teneur en  $^{18}\text{O}$  au niveau des points où l'eau a été échantillonnée.

**Tableau 2.** Teneur en  $^{18}\text{O}$  au niveau des points de prélèvements lors de la campagne du 8 mars 2001

Points de prélèvements	Numéro de l'échantillon	$\delta$ $^{18}\text{O}$ (‰)
Déversoir d'orage	2	- 9,0
Pluie	1	- 8,6
Rivière (amont déversoir d'orage)	3	- 8,6
Nappe (à 10 m de la berge et 2 m de profondeur)	4	- 7,6

A partir du tableau 2, on note une différence au niveau des signatures isotopiques de l'eau de la rivière et de l'eau de la nappe de l'ordre de 1  $\delta$  ‰. La méthode de séparation des écoulements peut donc s'appliquer dans de bonnes conditions. Ce résultat reste à confirmer. L'eau de la pluie a la même teneur en  $^{18}\text{O}$  que celle de la rivière. Ceci peut être expliqué par la faible superficie du bassin versant et donc un faible temps de concentration (environ une heure) mais reste à vérifier avec un échantillonnage de l'eau de pluie et celle de la rivière pendant une crue suffisamment séparée des événements précédents et suivants et à un pas de temps assez fin (de 5 minutes) en accord avec la dynamique de crue du bassin.

Le tableau 3 donne la teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de surface le long de la Chaudanne lors de la campagne du 10 avril 2001.

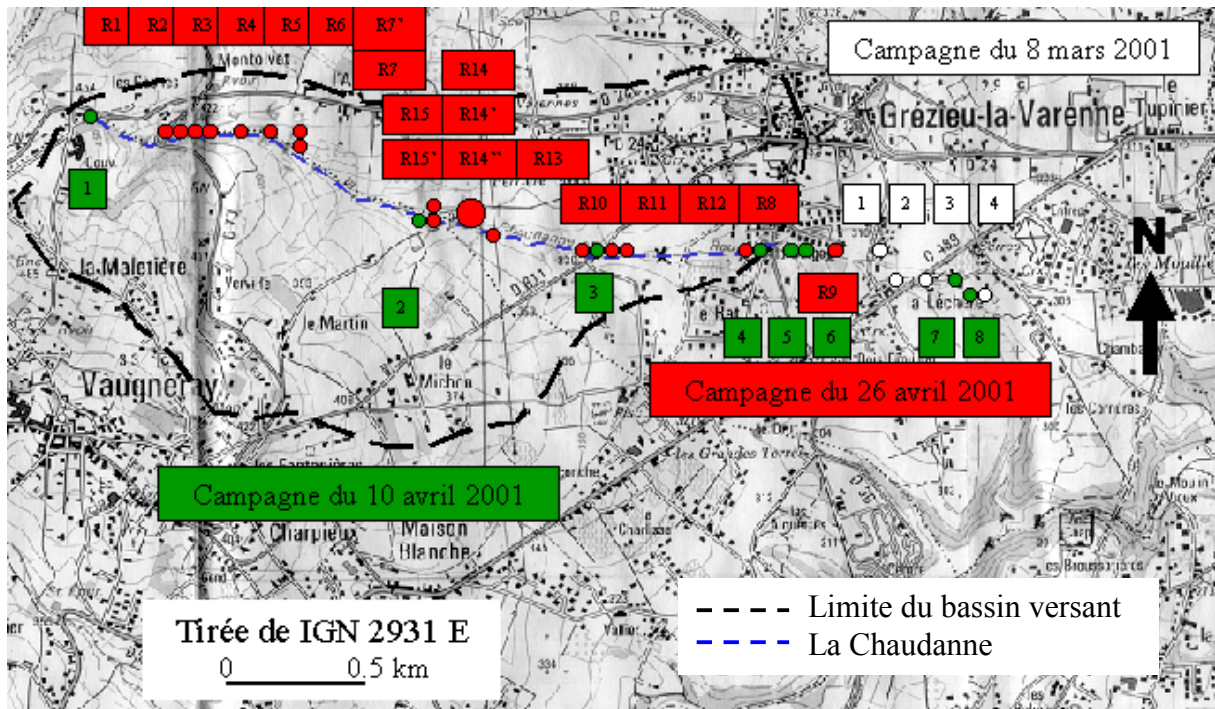
A partir du tableau 3, on peut remarquer que la teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de surface varie le long de la Chaudanne.

La teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de surface et de la zone hyporhéique le long de la rivière au cours de la campagne du 26 avril 2001 est donnée par le tableau 4. A partir de ce tableau, on remarque que l'eau de la zone hyporhéique présente une teneur en  $^{18}\text{O}$  légèrement différente de celle de la rivière. En allant de l'amont vers l'aval du bassin versant, on note une augmentation de la teneur en  $^{18}\text{O}$  des deux zones (figure 7). Ceci peut être expliqué par l'effet de l'augmentation de la contribution de l'écoulement souterrain à l'écoulement total.

Un autre point à signaler, est que les deux zones (rivière et hyporhéique) réagissent de la même façon de l'amont vers l'aval (figure 7).

A partir de cette campagne, on peut mettre en évidence l'existence de deux zones d'échange entre l'eau de la rivière et celle de la zone hyporhéique. Ceci est à relativiser en raison de la faible densité, en linéaire de rivière, de l'échantillonnage. Cet échange se fait dans les deux sens, de la

rivière vers la zone hyporhéique (infiltration) et de la zone hyporhéique vers la rivière (résurgence ou exfiltration) (figure 7). Le point où on a identifié le phénomène d'infiltration reste à vérifier avec le nouveau dispositif car il peut être dû au système de prélèvement utilisé (pompe Bou-Rouch).



**Figure 6.** Emplacement des points d'échantillonnage des campagnes du 8 mars, 10 et 26 avril 2001

**Tableau 3.** Teneur en  $^{18}\text{O}$  au niveau des points de prélèvements lors de la campagne du 10 avril 2001

Points de prélèvements	Nom du lieu de prélèvement	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) eau de surface
1	Source juste sous le monastère	-8,0
2	Ferme le Martin	-8,3
3	Croisement entre la Chaudanne et la D611	-8,1
4	Amont du pont de la Barge	-8,0
5	Entre les 2 ponts de la Barge	-8,0
6	Aval du vieux pont de la Barge	-8,1
7	Amont du grand canal La Léchère	-7,9
8	Aval du grand canal La Léchère	-8,0

Pour la campagne du 10 avril et au niveau du point kilométrique 0,5 (à 1,35 km de la source), on note une chute de la teneur en  $^{18}\text{O}$  (-8,3 ‰). Le même phénomène a été observé lors de la campagne du 26 avril 2001 (figure 7). Ceci peut être expliqué par l'apparition de l'eau de la zone hyporhéique dans la rivière (résurgence).

### 3-3-4. Conductivité électrique de l'eau

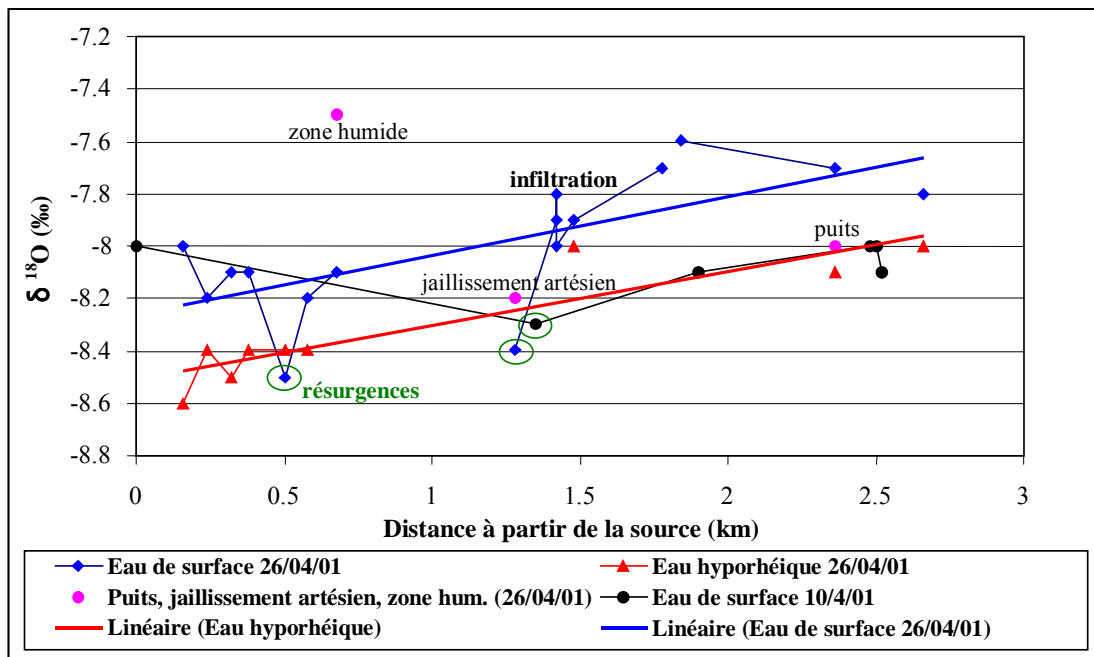
Des prélèvements d'échantillons d'eau au niveau de la surface et de la zone hyporhéique de la Chaudanne sont réalisés une fois tous les deux mois. Le but est d'analyser la qualité de l'eau en mesurant plusieurs paramètres (pH, conductivité, matière en suspension, demande chimique en oxygène). On peut se demander si la conductivité électrique de l'eau est un traceur intéressant dans le cadre de notre compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant. On a obtenu les résultats des analyses concernant la conductivité de l'eau des années 2000 et 2001 au niveau de

quatre stations de mesures. La station 1 est située à l'amont du bassin au niveau de la source, la station 2 est située 2,5 km à l'aval au niveau du pont de la Barge et sur les 200 mètres suivants il y a deux stations (3 et 4) situées à l'aval d'un déversoir d'orage.

**Tableau 4.** Teneur en  $^{18}\text{O}$  au niveau des points de prélèvements lors de la campagne du 26 avril 2001

Rivière		Zone hyporhéique	
Points de prélèvements	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Points de prélèvements	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
R 1	- 8,0	EHP 1	- 8,6
R 2	- 8,2	EHP 2	- 8,4
R 3	- 8,1	EHP 3	- 8,5
R 4	- 8,1	EHP 4	- 8,4
R 5	- 8,5	EHP 5	- 8,4
R 6	- 8,2	EHP 6	- 8,4
R 7	- 8,1		
R 7' (Zone humide)	-7,5		
R 15 (Jaillissement artésien)	- 8,2		
R15'	-8,4		
R 14	- 7,9		
R 14'	-7,8		
R 14''	-8,0		
R 13	- 7,9	EHP 13	- 8,0
R 10	- 7,7		
R 11	- 7,6		
R 8	-7,7	EHP 8	- 8,1
Puits	-8,0		
R9	-7,8	EHP 9	- 8,0

**N.B :** La position des points de prélèvements au niveau de la rivière et la zone hyporhéique est la même. Certains points n'ont pas été échantillonnés au niveau de la zone hyporhéique.



**Figure 7.** Campagnes d'échantillonnage du 10 et du 26 avril 2001 ratios  $\delta$  eaux dans la rivière et le substrat (-50 cm) de la Chaudanne

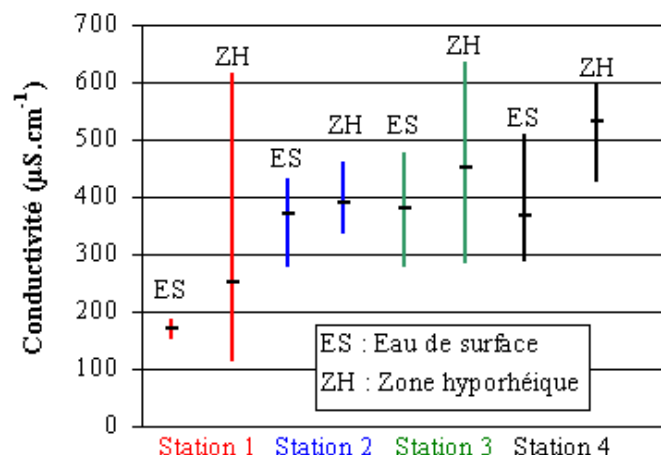
Il est à signaler qu'au niveau de chaque point d'échantillonnage, on prélève l'eau dans deux ou trois endroits pour faire des répliqués. Pour les stations 1 et 2, il n'y a pas une différence nette entre les valeurs de conductivité des répliqués. Par contre pour les stations 3 et 4 il y a un facteur 2 ou 3 entre les répliqués. J'ai pris pour chaque point la moyenne des valeurs des répliqués. Le nombre de valeurs échantillonnées dans la zone hyporhéique autorise une première analyse statistique portant sur la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation (tableau 5). Il est plus délicat d'interpréter les statistiques concernant les eaux de surface compte tenu du faible nombre de valeurs.

On observe l'augmentation amont-aval de la minéralisation de l'eau hyporhéique. Cela peut s'interpréter classiquement par un enrichissement en sels dissous des eaux qui ruissellent sur un plus long parcours en versant plus on va en aval du ruisseau. Il faut cependant noter que l'accroissement des conductivités moyennes des eaux hyporhéiques rapporté à la distance à la source montre un accroissement important au delà de la station 2. Cela s'explique sans doute par la présence d'un rejet fréquent de réseau unitaire dont la conductivité a été mesurée à 400  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Il est à noter que les coefficients de variation sont en moyenne inférieurs à 25%, ce qui révèle la constance des gammes de valeurs mesurées aux différentes stations. Seule, la source fait exception pour la zone hyporhéique en raison de fortes valeurs mesurées le 4/10/2000 (612  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Il s'agit en fait des premières eaux de recharge de la nappe, suite à un assèchement de 3 mois.

**Tableau 5.** Statistiques sur les valeurs de la conductivité de l'eau de surface (ES) et hyporhéique (ZH) dans la rivière de la Chaudanne

	ZH 1	ZE 2	ZE 3	ZE 4	ES 1	ES 2	ES 3	ES 4
Nb. mesures	9	18	15	17	2	5	6	4
moyenne ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	274,44	388,33	416,33	555,59	170	370	381,67	368,75
Coef de variation	0,73	0,15	0,26	0,26	0,14	0,18	0,21	0,27

Compte tenu de la dispersion et du faible nombre de mesures dans les échantillons de surface (figure 8), un test a été réalisé afin d'évaluer la probabilité d'appartenance à une même population. L'hypothèse principale est l'appartenance des deux échantillons comparés à une même population. Il est basé sur le calcul d'une variable auxiliaire qui est une métrique de la dissemblance entre les valeurs des échantillons. Le test calcule la probabilité de cette dissemblance. Cela permet d'apprécier à partir de ces petits échantillons aux distributions non normales (sauf pour les stations ZE2, 3 et 4 dont les effectifs sont assez fournis) la possibilité de distinguer au niveau intra et inter stations les eaux hyporhéiques et de surface.



N.B : La moyenne des valeurs est représentée par un trait noir.

**Figure 8.** Evolution de la conductivité de l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique au niveau de chaque station en fonction du temps

Nous interprétons le tableau 6 au seuil de 10%, c'est à dire 0,05 pour ce test bilatéral. Les cases jaunes signalent les « différences significatives ». (Une faible probabilité signifie que les échantillons ont une source commune à l'instant de prélèvement).

*La comparaison inter-stations* : La zone hyporhéique apparaît assez homogène du point de vue conductivité entre les stations 1 et 2 et 3. A noter que la station 4 se distingue des trois autres, ainsi que les stations 2 et 3. La raison supposée est celle des apports en sels dissous liés au déversoir d'orage situé entre ces deux stations et qui affecte donc la station 4 aussi. Cette dernière est affectée par un rejet d'eau pluvial provenant d'une aire de stationnement de supermarché.

Les eaux de surface ne semblent pas pouvoir être distinguées, sauf pour la station 1, au seuil de 10% (une chance sur 10 de se tromper en affirmant cette différence).

*La comparaison intra-stations correspond aux cases encadrées en gras sur la tableau 6* : Il apparaît que la distinction entre l'eau de surface et de la zone hyporhéique n'est raisonnable que pour la station 3 située juste en aval des rejets des déversoirs d'orage.

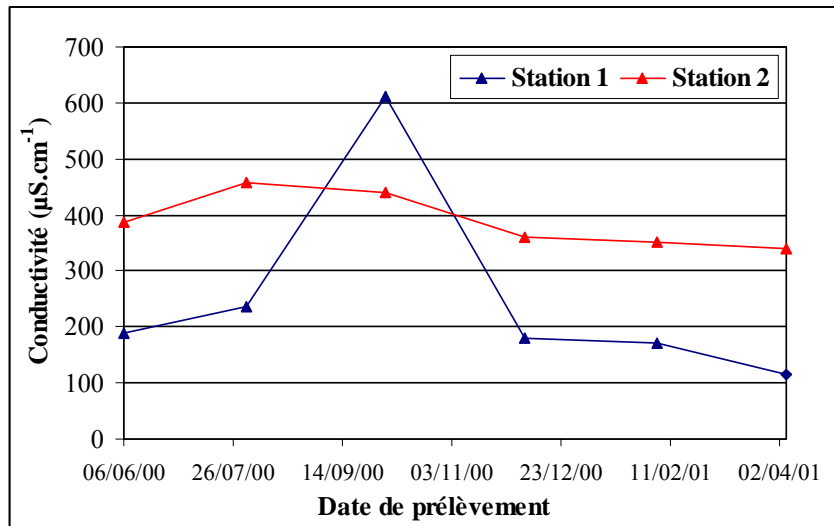
**Tableau 6.** Table des probabilités d'observer les « différences » calculées entre les stations échantillonnées. Test bilatéral de Wilcoxon

	ZH 1	ZH 2	ZH 3	ZH 4	ES 1	ES 2	ES 3	ES 4
ZH 1	1,00							
ZH 2	0,51	1,00						
ZH 3	0,51	0,02	1,00					
ZH 4	0,02	0,00	0,00	1,00				
ES 1	0,18	0,18	0,18	0,18	1,00			
ES 2	0,04	0,14	0,07	0,04	0,18	1,00		
ES 3	0,03	0,10	0,04	0,08	0,18	0,72	1,00	
ES 4	0,07	0,18	0,07	0,14	0,18	0,46	0,11	1,00

D'après la figure 9, on note que les évolutions de la conductivité de l'eau au niveau de la zone hyporhéique se font dans des intervalles de conductivité rapprochés. Ceci limite, d'après les résultats des analyses disponibles, l'utilisation de la conductivité pour mettre en évidence l'existence de deux domaines différents de variation de conductivité de l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique et quantifier par la suite les flux d'échange entre ces deux zones. Il faut noter que les prélèvements d'eau ont été fait de la même façon que pour l'oxygène 18 (par sondage tubé de type Bou-Rouch).

Nous considérons maintenant l'aspect saisonnier. A partir de la figure 9, on peut remarquer qu'au niveau de la zone hyporhéique la conductivité varie suivant qu'on est situé en amont ou en aval de la rivière. A part la valeur  $612 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , on peut cadrer la conductivité au niveau de la zone hyporhéique, pour la station 1, entre  $100$  et  $300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  et  $300$  et  $500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  pour la station 2.

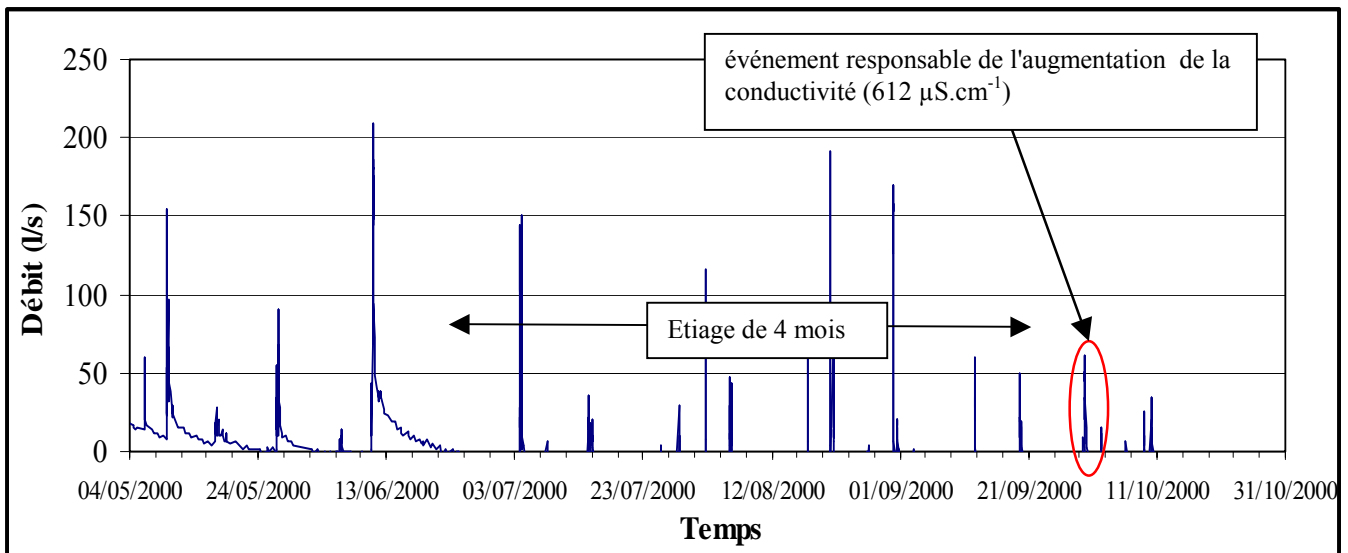
La répartition de la conductivité à l'échelle de l'année dépend de la saison (estivale ou hivernale). Pendant la saison pluvieuse, la conductivité augmente et atteint  $612 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  dans la source. En examinant la chronique de débit (figure 10), on peut déterminer la cause de l'augmentation de la conductivité. Elle est due sans doute à un événement fort ( $27,6 \text{ mm}$ ) survenu le 29 septembre 2000 après un étiage sec. Ceci est moins marqué au niveau de la station 2 qui présente une bonne stabilisation au niveau de la zone hyporhéique.



**Figure 9.** Evolution de la conductivité moyenne de l'eau au niveau de la zone hyporhéique de l'amont à l'aval de la rivière de la Chaudanne

L'analyse de la conductivité de l'eau permet de mettre en évidence l'existence d'un gradient amont-aval de conductivité de l'eau de surface le long de la Chaudanne.

La conductivité de l'eau est un paramètre non conservatif, à l'inverse de l'oxygène 18, et varie suivant le chemin parcouru par l'eau, la période (hivernale, automnale, ...) et l'ampleur de l'événement. Dans le cas où la variation de la conductivité de l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique se font dans deux intervalles différents, ceci permet de distinguer les deux types d'eau et localiser les zones d'échange entre la rivière et la zone hyporhéique.



**Figure 10.** Chronique du débit de la rivière de la Chaudanne au niveau du pont de la Barge

### **Conclusion sur les données des campagnes réalisées en 2001**

Au travers de cette première analyse des campagnes ponctuelles d'échantillonnage dans le temps et dans l'espace, il apparaît que la conductivité électrique ne permet pas de distinguer sans risque d'erreur les eaux de surface et de la zone hyporhéique. Cela témoigne d'un mélange entre ces deux compartiments sans toutefois tendre vers l'homogénéisation comme l'indique les différents

degrés de probabilité observés dans le tableau 6. Cette analyse globale gomme aussi le caractère saisonnier des relations eaux de surface/eaux hyporhéiques.

Enfin, la représentativité de données ponctuelles est toujours discutable. Ce que l'on peut supposer à ce stade, c'est que la dynamique des échanges au cours des événements est de l'ordre de quelques heures et qu'un suivi en continu (les capteurs de conductivité sont robustes et simples d'usage) à partir d'un contraste sensible de conductivité en début d'événement pourrait compléter l'approche isotopique.

### **3-4. Méthode de travail envisagée**

Afin de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Chaudanne et d'étudier les échanges d'eau, lors des crues et hors crues, entre l'écoulement de surface et l'eau de la zone hyporhéique, trois campagnes d'échantillonnage ont été réalisées au niveau de ce bassin en 2001 par Pascal BREIL. Pour exploiter ses résultats au mieux, il est très important de bien replacer ces campagnes dans le temps et dans l'espace pour caractériser l'évolution longitudinale et la dynamique des échanges en condition de hautes et de basses eaux.

Il a appliqué la méthode isotopique basée sur l'interprétation des teneurs isotopiques en  $^{18}\text{O}$ .

#### **3-4-1. Dans l'espace**

Une campagne hors pluie dans les 24 heures le long de la rivière de l'amont vers l'aval, inspirée de celle du 26 avril 2001. Le but de cette campagne est de mettre en évidence l'existence d'une différence de signature isotopique entre l'eau de surface et l'eau de la zone hyporhéique (à trois profondeurs) à l'échelle spatiale.

#### **3-4-2. Dans le temps**

Une campagne à l'exutoire du bassin versant lors d'une crue dont le but est de déterminer la dynamique et la participation de chaque compartiment (eau de surface, eau souterraine) à l'écoulement total. L'échantillonnage de l'eau de la rivière a été réalisé en continu au cours de l'événement.

L'eau de la pluie a été échantillonnée en continu afin de vérifier si sa teneur en  $^{18}\text{O}$  était constante au cours de l'événement pluvieux. L'utilisation de trois pluviographes permet de vérifier l'homogénéité de la pluie sur le bassin, mais ce point est facultatif pour notre cas vu la faible superficie du bassin versant.



## 4. Etude du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Chaudanne

### 4-1. Crue du 18 mai 2002

#### 4-1-1. Analyse des variations isotopiques

Le but de cette campagne était de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin et d'étudier les échanges d'eau pour un tel événement entre l'écoulement de surface et celui souterrain. Une campagne a été réalisée le 18 mai 2002 lors d'un événement pluvieux. J'ai échantillonné l'eau de la nappe, de la rivière et de la pluie.

Les résultats de cette campagne sont consignés dans le tableau 7.

**Tableau 7.** Crue du 18 mai 2002 à la Chaudanne

Date	Heure	Q (l/s)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$Q_s$ (l/s)
18/05/2002	6 h 00	10,27	-7,1	10,27
"	8 h 00	15,20	-7,0	14,66
"	9 h 00	27,44	-7,1	27,44
"	10 h 00	24,44	-6,0	18,10
"	11 h 00	18,09	-5,7	12,10
"	12 h 00	15,06	-6,0	10,94
"	13 h 00	13,40	-6,2	10,56
"	14 h 00	13,20	-6,4	11,09
"	15 h 00	13,20	-6,9	12,54
"	16 h 00	12,56	-7,0	12,20
"	17 h 00	13,10	-7,1	13,01
19/05/2002	11 h 12	10,27	-7,1	10,27

**N.B :** Pour ce tableau  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau de nappe est de  $-7,1 \delta \text{‰}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau de pluie est de  $-2,9 \delta \text{‰}$ . La précision analytique est de  $\pm 0.1 \text{‰}$  pour  $\delta^{18}\text{O}$ .

Un événement pluvieux est survenu le 18 mai 2002 à 5h00 et a duré environ 12 heures. La quantité de pluie tombée est de 6,2 mm avec 4,8 mm entre 5 h00 et 9h00. Une petite crue (débit de pointe 27,44 l/s) a été enregistrée alors que le ruisseau était à "l'étiage" (10,27 l/s) (figure 11). J'ai échantillonné l'eau de la rivière en amont et à l'aval du pont de la Barge et celle de la pluie au niveau du pluviographe situé au-dessus du bungalow 1. La fréquence d'échantillonnage est horaire. Quelques échantillons d'eau ont été prélevés, avant et après l'événement, au niveau de la source et du piézomètre.

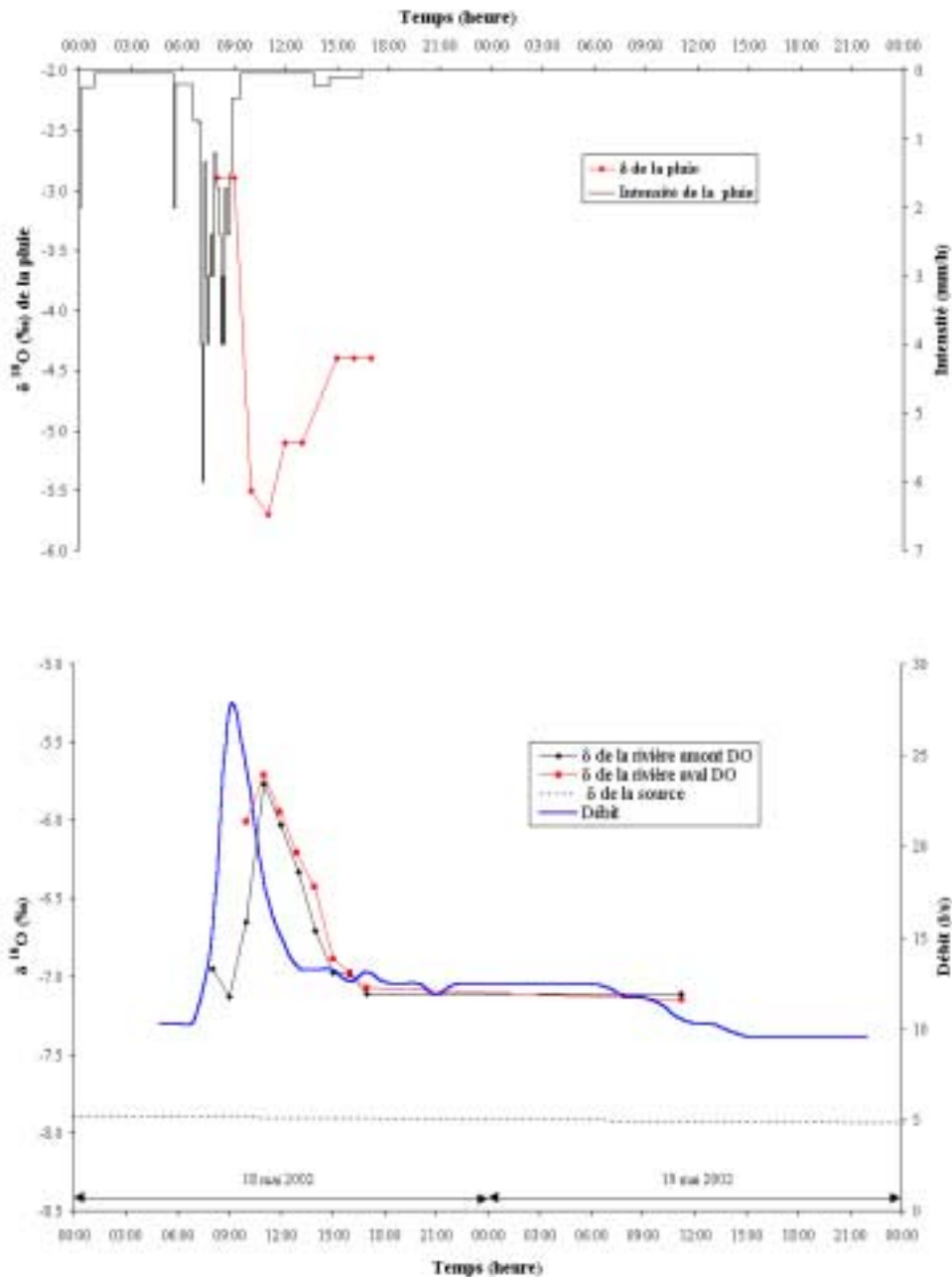
La teneur en  $^{18}\text{O}$  de la pluie n'a pas été constante tout au long de l'épisode pluvieux. Elle a varié de  $-5,7$  à  $-2,9 \delta \text{‰}$  avec une moyenne de  $-4,7 \delta \text{‰}$ . Ceci constitue un obstacle au moment de la décomposition de l'hydrogramme de crue. La teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de surface avant l'événement était de  $-7,1 \delta \text{‰}$ . L'échantillonnage de l'eau de pluie n'a pas été instantané vu la faible quantité de pluie et aussi la faible superficie d'interception du pluviographe.

La première réaction isotopique de la Chaudanne dès la montée de crue est cependant une augmentation rapide des teneurs en  $^{18}\text{O}$  sous la forme d'un pic bien individualisé avant que se manifeste la baisse normale due à la dilution par la pluie (figure 11). On peut l'interpréter comme l'apport d'eau riche en  $^{18}\text{O}$  en provenance du sol causé par l'infiltration de l'eau de pluie qui chasse l'eau existante dans les premiers centimètres du sol.

La teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de surface après le DO (Déversoir d'Orage) est légèrement plus élevée que celle avant le DO. Ceci peut être expliqué par le fait qu'au niveau du DO, il existe un tuyau (en

PVC) qui draine les eaux des chaussées vers la rivière donc un apport supplémentaire d'eau de pluie ruisselée après le DO.

La teneur moyenne en  $^{18}\text{O}$  des eaux souterraines est de  $-7,9 \delta \text{ ‰}$  (maximum  $-7,8 \delta \text{ ‰}$  et minimum  $-8 \delta \text{ ‰}$ ) alors que celle de l'eau de la rivière avant et après l'événement oscille entre  $-7,3$  et  $-7,1 \delta \text{ ‰}$ . La Chaudanne présente donc des teneurs en  $^{18}\text{O}$  plus fortes que celles de la source, ce qui confirme la participation d'une eau plus enrichie au débit de base. Cette eau provient soit des nappes perchées qui peuvent exister dans le bassin versant, soit des rejets des maisons situées de part et d'autre du ruisseau.



**Figure 11.** Etude isotopique de la crue du 18 mai 2002 à la Chaudanne (station pont de la Barge)

On note un décalage de deux heures environ entre la pointe de l'hydrogramme et la teneur maximale en  $^{18}\text{O}$  au niveau du ruisseau.

#### 4-1-2. Séparation isotopique de l'hydrogramme de la crue du 18 mai 2002

J'ai séparé les écoulements au niveau de l'hydrogramme de crue en prenant comme teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau souterraine  $-7,1 \delta \text{ ‰}$ . Le débitmètre placé en amont du DO n'a pas fonctionné. Le débit a été mesuré après le pont de la Barge donc en plus du débit de la rivière, il y a le débit du tuyau et du DO (déclenché pendant 10 mn). J'ai donc utilisé les teneurs en  $^{18}\text{O}$  des échantillons qui ont été prélevés après le DO (qui sont plus enrichies car on a plus d'apport d'eau de surface) pour séparer les écoulements.

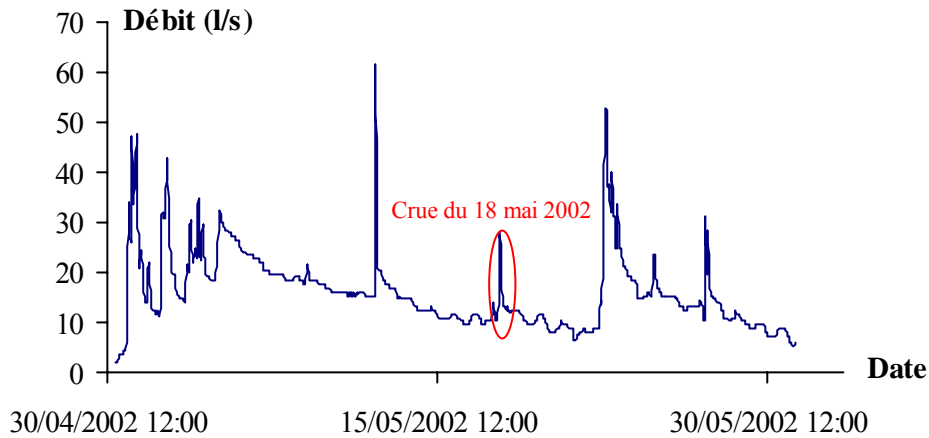
Hydrologiquement, il doit y avoir un décalage temporel entre la pluie tombée au niveau du bassin versant et la réponse de la rivière à cette pluie. Il faudrait tenir compte de ce décalage lors de la séparation des écoulements au niveau de l'hydrogramme de crue. A partir de la figure 11, on peut estimer que ce décalage est de deux heures environ. Le signal de la pluie n'a pas été échantillonné complètement entre le début et la fin de l'événement.

Dans une première étape, j'ai séparé les écoulements en prenant la teneur en  $^{18}\text{O}$  point par point, sans tenir compte du décalage, pour calculer la part de l'écoulement souterrain dans l'hydrogramme de crue. L'hydrogramme résultant est présenté en annexe 1. Cet hydrogramme montre que, lors de la montée des eaux et jusqu'à la pointe de crue, seule l'eau de la nappe alimente la rivière (la courbe de montée de l'écoulement souterrain se confond avec l'hydrogramme global). A partir de la pointe, l'écoulement souterrain s'annule et c'est la pluie qui constitue l'écoulement dans la rivière. Ceci n'a pas de sens physique et il n'y a pas une explication claire de l'arrêt brusque de l'écoulement souterrain ainsi que du passage vers l'alimentation de la rivière par l'eau de pluie. De plus le déversoir d'orage a été déclenché vers 10h00 le 18 mai 2002 et a duré environ 10 minutes. On peut ainsi déterminer, par l'intermédiaire d'une courbe (volume déversé en fonction de la hauteur précipitée), (GOURDOL, 2000), la quantité d'eau qui a été déversée dans la rivière. Cette eau est nécessairement plus enrichie en  $^{18}\text{O}$  que l'eau de la rivière.

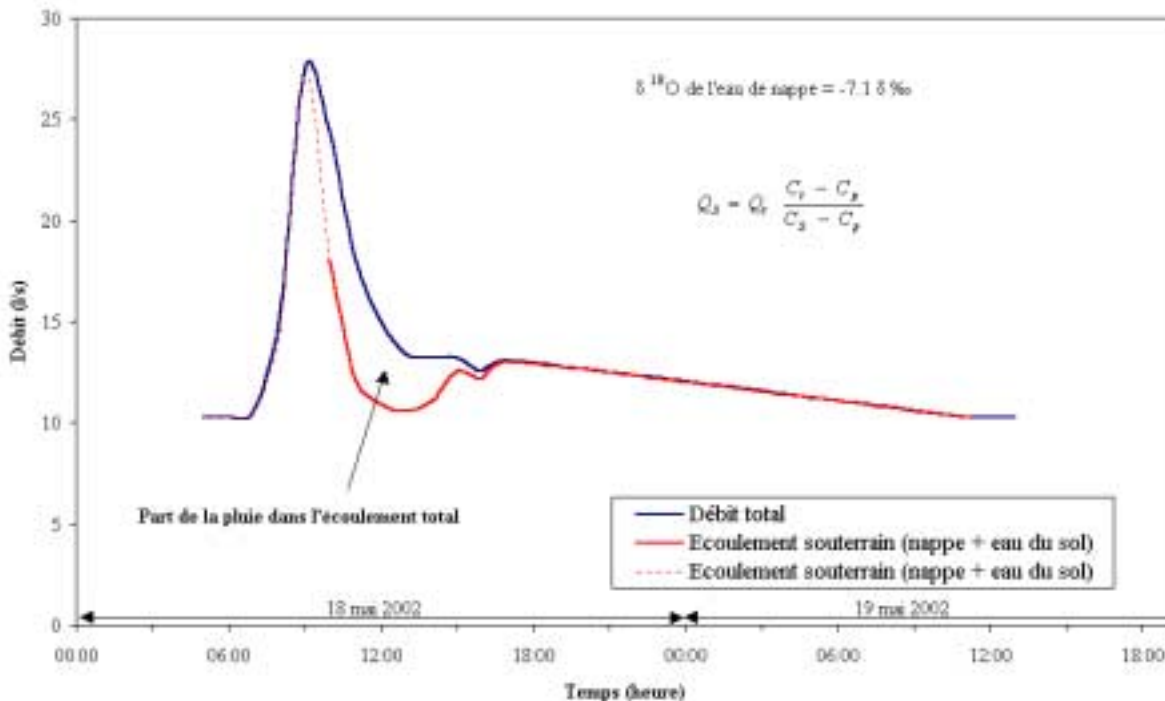
Dans une deuxième étape et en examinant le signal de la pluie au cours de l'événement (figure 11), on constate qu'une grande partie de ce signal a une teneur en  $^{18}\text{O}$  égale à  $-2,9 \delta \text{ ‰}$ . J'ai séparé les écoulements cette fois-ci en prenant une teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de pluie constante ( $-2,9 \delta \text{ ‰}$ ) tout le long de l'événement. On a obtenu l'hydrogramme donné par la figure 13. Pendant la crue l'écoulement souterrain (courbe en rouge en pointillé) se confond avec l'écoulement total ce qui peut s'expliquer par l'hypothèse d'un effet piston de la pluie sur les eaux du sol : l'écoulement souterrain présente une montée très rapide jusqu'à la verticale de la pointe de crue et une décroissance tout aussi rapide. L'eau nouvelle qui s'infiltré dans le sol diffuse rapidement au sein de la matrice du sol, ce qui entraîne un déplacement de l'eau "ancienne" matricielle *via* les macropores. Cette dernière s'achemine alors en sub-surface, jusqu'à l'exutoire du bassin versant (RIBOLZI et al, 1999). Cette hypothèse ne peut pas être confirmée par manque de points d'échantillonnage de l'eau de pluie pendant la crue.

La figure 12 donne la chronique de débit au niveau de la Chaudanne afin de situer la crue échantillonnée du 18 mai 2002 par rapport à celles qui ont eu lieu durant le mois de mai 2002. A partir de cette figure on peut noter que l'événement qu'on a échantillonné est bien individualisé par rapport aux événements antérieurs et suivants.

La décomposition de l'hydrogramme en début de crue (essentiellement entre 6h00 et 8h00 le 18 mai 2002) est imprécise par manque d'échantillons. Le pas d'échantillonnage (1 heure) n'était pas adapté au fonctionnement de notre bassin car, avec ce pas de temps, on ne connaît pas l'évolution des teneurs isotopiques des différentes eaux entre les heures. C'est pour cette raison que j'ai échantillonné la petite crue du 1<sup>er</sup> août 2002 avec un pas de temps plus réduit (1, 2 et 5 minutes).



**Figure 12.** Chronique du débit de la Chaudanne au niveau du pont de la Barge



**Figure 13.** Décomposition isotopique de la crue du 18 mai 2002 à la Chaudanne en prenant une teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de pluie constant (-2,9 ‰)

## 4-2. Crue du 1<sup>er</sup> août 2002

### 4-2-1. Analyse des variations isotopiques

Un orage court (1,8 mm durant 30 minutes) a eu lieu le premier août 2002 et a engendré une petite crue (débit de pointe 27,13 l/s) alors que le débit du ruisseau était de 7,33 l/s. J'ai échantillonné au cours de l'événement l'eau de la rivière et celle de la pluie. J'ai utilisé, pour cette campagne, un bac afin de pouvoir échantillonner l'eau de la pluie instantanément en augmentant la surface d'interception. Des échantillons ont été prélevés au niveau de la source avant et après l'événement. Les résultats sont donnés par le tableau 8.

Les prélèvements instantanés de la pluie révèlent une certaine variation des teneurs en  $^{18}\text{O}$  au cours de l'averse.

**Tableau 8.** Crue du 1 août 2002 à la Chaudanne

Heure	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) de la pluie	Q (l/s)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) du ruisseau	Q <sub>s</sub> (l/s)
9:12	-4,1	7,33	-5,6	3,79
9:40	-4,1	11,73	-5,5	5,66
9:41	-4,3	16,87	-5,5	7,50
9:42	-4,3	20,53	-5,4	8,36
9:44	-4,3	27,13	-5,4	11,05
9:47	-3,9	23,47	-5,4	11,36
9:54	-4,0	19,07	-5,3	8,26
9:56	-4,0	15,40	-5,2	6,16
10:15	-3,4	11,73	-4,7	4,24
10:29	-	8,07	-4,8	3,14
11:18	-	8,07	-5,7	5,15
12:18	-	6,60	-5,8	4,40
12:42	-	6,60	-5,9	4,58
12:54	-	6,60	-5,9	4,58

**N.B :** Le temps indiqué est en heure locale. ‰. La précision analytique est de  $\pm 0.1$  ‰ pour  $\delta^{18}\text{O}$ .

L'eau de la rivière avant la crue (-5,6  $\delta$  ‰) ne reflète pas la composition de la nappe (de -7  $\delta$  ‰). En examinant la chronique du débit et les intensités de pluies précédentes la crue qu'on a échantillonnée (figure 14), on constate que cette dernière est sans doute influencée par les événements antérieurs qui ont eu lieu sur le bassin. De plus, l'évolution des teneurs en  $^{18}\text{O}$  pendant cette crue montre que tout l'épisode pluvieux participe à l'écoulement, ce qui implique une contribution des fractions de pluie antérieures.

Au cours de la crue, le  $\delta^{18}\text{O}$  du ruisseau suit l'évolution du débit. Il augmente d'abord légèrement au cours de la montée de crue, puis plus nettement, jusqu'à la valeur -4,7  $\delta$  ‰. Cette diminution témoigne de la dilution de l'eau préexistante par l'eau de pluie. Cette dernière participe de façon croissante au pic de crue. Le volume total de la pluie tombée sur le bassin est estimé à 5040 m<sup>3</sup>.

#### 4-2-2. Séparation isotopique de l'hydrogramme de la crue du 1<sup>er</sup> août 2002

L'influence des événements antérieurs à la crue du 1<sup>er</sup> août 2002 rend la décomposition de l'hydrogramme assez imprécise. D'autre part, le premier échantillon prélevé en montée de crue dans la rivière présente une teneur en  $^{18}\text{O}$  plus forte (-5,6  $\delta$  ‰) que l'écoulement souterrain (-7  $\delta$  ‰) avec une variation en sens inverse de la teneur de la pluie (figure 15). Cette anomalie ne peut être due qu'à l'apparition d'un troisième type d'eau qui peut être celle stockée dans le sol et "poussée" par la pluie infiltrée.

La décomposition de l'hydrogramme de crue n'est possible qu'à partir de la pointe de crue, car l'interprétation des valeurs en montée de crue est sans doute perturbée par l'apparition de l'eau du sol légèrement plus enrichie en  $^{18}\text{O}$  (figure 16).

A la fin de la décrue, la teneur en  $^{18}\text{O}$  de la rivière est de -5,9  $\delta$  ‰. Elle reste supérieure à celle de la source. Ce qui indique qu'il y a encore une arrivée d'eau plus enrichie en  $^{18}\text{O}$  dans la rivière.

Dans ces conditions une évaluation même approximative de la fraction d'eau de pluie dans l'écoulement total ne peut être effectuée.

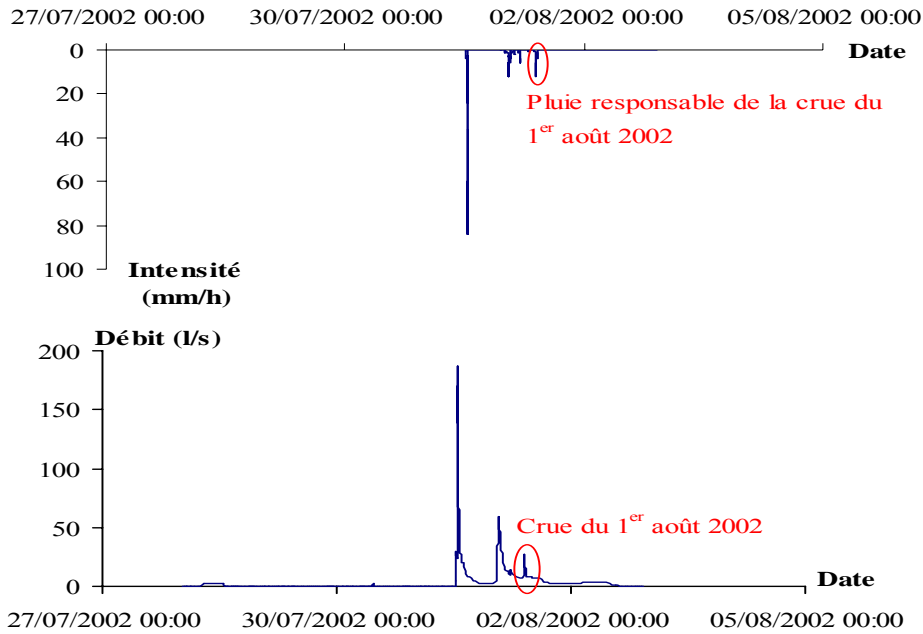


Figure 14. Chronique de débit et intensités des pluies au niveau de la Chaudanne

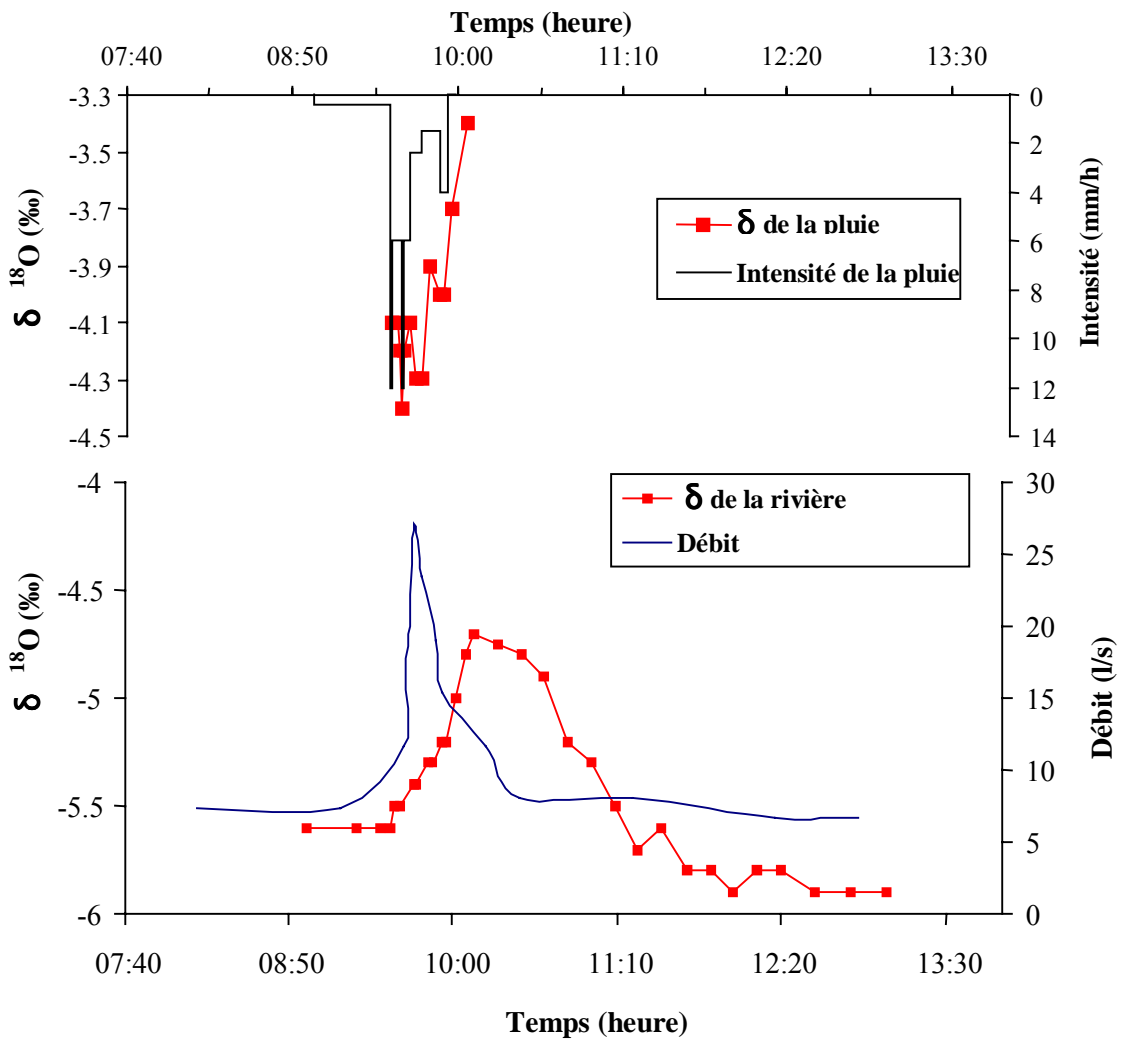
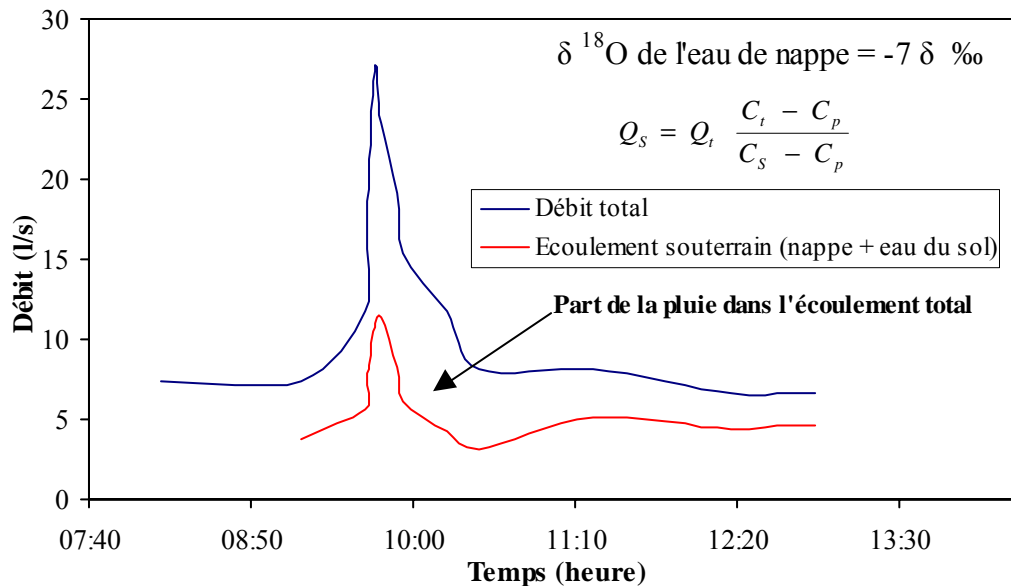


Figure 15. Etude isotopique de la crue du 1<sup>er</sup> août 2002 à la Chaudanne (station pont de la Barge)



**Figure 16.** Décomposition isotopique de la crue du 1<sup>er</sup> août 2002 à la Chaudanne

#### 4-3. Suivi des teneurs isotopiques des eaux de surface et souterraine

Des prélèvements d'échantillons d'eau au niveau de la source, de la rivière et du piézomètre, situé à 12 m de la berge en rive gauche, ont été effectués durant les mois de juin et de juillet 2002. Les résultats des analyses en  $^{18}\text{O}$  sont donnés par la figure 17. J'ai vidé le piézomètre afin d'avoir une idée sur les vitesses de réapparition de l'eau dans le piézomètre et mesurer par la suite sa teneur en  $^{18}\text{O}$ . Cette opération n'a pas été possible car vraisemblablement le piézomètre était colmaté en profondeur. En fait, il s'agissait simplement d'un tube en PVC. Son remplacement par un tube crépiné a été réalisé ultérieurement.

Un orage a eu lieu dans la nuit du 27/06/2002 au 28/06/2002. Il a généré une crue importante dans la Chaudanne et a causé des dégâts au niveau du dispositif de prélèvement.

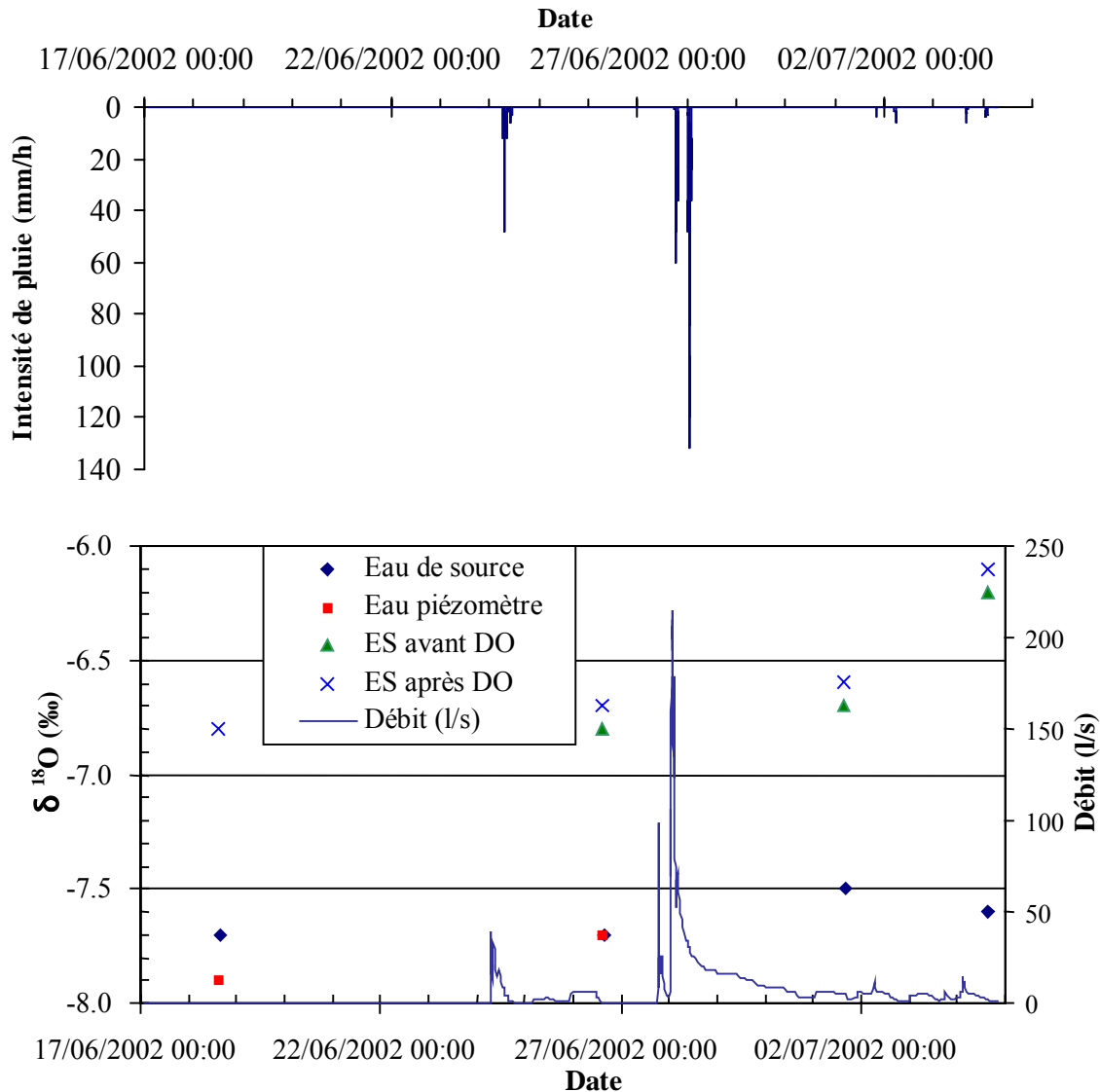
#### Interprétation

A partir de la figure 17, on voit bien que la teneur de l'eau de la source (normalement  $-7,9 \delta \text{ ‰}$ ) est influencée par la crue du 27-28/06/2002. Au niveau du piézomètre, la teneur en  $^{18}\text{O}$  mesurée (le 26/06/2002 à 14h50) correspond à celle de l'eau de la nappe ( $-7,9 \delta \text{ ‰}$ ) qui subit elle aussi une augmentation suite aux événements.

L'écoulement souterrain étudié à la source, bien que relativement constant, présente le premier juillet 2002 une augmentation de sa teneur en  $^{18}\text{O}$ . Cette variation indique que l'infiltration importante à la suite des pluies abondantes a atteint la nappe. En outre, il s'agit d'un mélange et non d'un remplacement puisque cette influence, toujours présente le 4/07/2002, décline en l'absence de pluie.

Le même phénomène a été observé aussi pour l'eau de surface. Sa teneur subit une augmentation dans les jours qui suivent l'orage du 27 juin 2002 : il passe de  $-6,7$  à  $-6,1 \delta \text{ ‰}$ . Ceci peut être expliqué par l'arrivée des eaux du sol, déjà infiltrées lors de la crue, qui dure quelques jours après l'événement. C'est le phénomène de ressuyage qui témoigne la présence d'un sous-écoulement important.

Donc les différents compartiments du bassin versant de la Chaudanne ont une réponse rapide suite aux événements.



**Figure 17.** Teneurs en <sup>18</sup>O des eaux de surface (ES) et souterraine au cours du temps, chronique de débit et intensité de pluie au niveau du bassin de la Chaudanne

#### 4-4. Conclusions sur la décomposition isotopique de deux crues au niveau de la Chaudanne

Ayant un bassin périurbain avec des fortes pentes et des textures sablo-limoneux à sablo-argileuse, on doit s'attendre à un écoulement de surface important lors des événements. Or en réalité, et d'après les résultats déjà observés à travers les campagnes qui ont été réalisées, ce n'est pas le cas.

La décomposition de l'hydrogramme de crues des 18 mai et 1<sup>er</sup> août 2002 s'est avérée possible au moyen de l'oxygène 18. Elle révèle une participation importante de l'écoulement souterrain avec une montée rapide jusqu'au moment de la pointe de crue et une descente tout aussi rapide. Ce comportement fait penser à une onde de pression chassant l'eau de la nappe et probablement l'eau du sol.

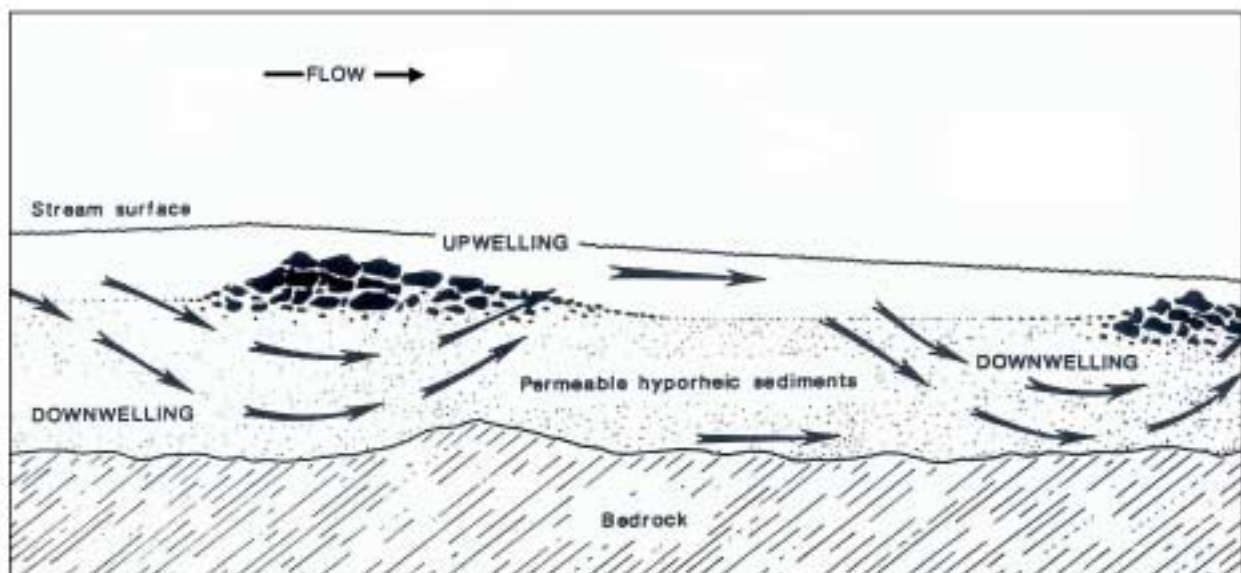
En effet, en utilisant l'oxygène 18 comme traceur (δ<sup>18</sup>O ‰), il apparaît que le signal obtenu dans le ruisseau ne provient pas uniquement du dernier corps d'averse qui est pourtant le responsable direct de la montée des eaux. Pour expliquer l'évolution de la teneur en <sup>18</sup>O de l'eau du ruisseau, il faut considérer l'influence des corps d'averses précédents. Ce fonctionnement implique la mise en mouvement retardée d'eaux résidentes (crue du 1<sup>er</sup> mai 2002).



## 5. Etude de la zone hyporhéique de la Chaudanne

Plusieurs travaux (ROUCH, 1992 ; BOULTON, 1993 ; ROUCH et al, 1997 et FELLOWS, 2001) ont été consacrés, au cours de la dernière décennie, à l'étude de la zone hyporhéique des rivières. Le but recherché, à travers ces études, est de mieux comprendre la nature des écoulements à l'intérieur des sédiments des cours d'eau et d'en mieux localiser les phénomènes d'échange et de stockage entre les eaux de surface et les eaux souterraines à travers la zone hyporhéique (figure 18). Ainsi, une hétérogénéité spatiale tant sur les plans biologique que physique et chimique a été observée au niveau des substrats des rivières à des différentes échelles (métrique, hectométrique).

Les chercheurs s'intéressent actuellement à la modélisation des écoulements au niveau de la zone hyporhéique d'une rivière qui constitue un lieu de piégeage des polluants et nutriments qui génèrent un métabolisme important. Cela nécessite des données de terrain qui doivent être représentatives. Il faut donc disposer d'un outil d'échantillonnage de la zone hyporhéique qui ne perturbe pas le milieu lors des prélèvements.



**Figure 18.** Infiltration (Downwelling) et exfiltration (Upwelling) au niveau de la zone hyporhéique (BOULTON, 1993)

### 5-1. Mode d'échantillonnage au niveau de la zone hyporhéique

La pompe Bou-Rouch est parfaitement adaptée au prélèvement d'invertébrés au niveau de la zone hyporhéique (CREUSE DES CHATELLIERS et DOLE-OLIVIER, 1991). Dans le contexte de notre site d'étude, j'ai testé cette pompe Bou-Rouch avec un colorant alimentaire (Jaune orangé sunset E 110) le 17 avril 2002 en amont du pont de la Barge. Le but était de voir si on récupère de l'eau de surface en pompant dans la zone hyporhéique. J'ai implanté la pompe dans le substrat de la rivière à 50 cm de profondeur et j'ai versé le colorant mélangé avec de l'eau à 200 m environ en amont. Au moment du passage du panache, j'ai pris 4 échantillons lors du pompage qui a duré 15 minutes. J'ai analysé ces échantillons dans un spectrophotomètre et j'ai constaté que plus le temps de pompage augmentait, plus on récupérait de colorant dans les échantillons prélevés. Donc la pompe Bou-Rouch crée un cône de rabattement et l'échantillon prélevé à 50 cm de profondeur sera constitué d'un mélange eau de surface et eau de la zone hyporhéique. Avec la pompe Bou-Rouch la condition de représentativité de l'échantillon n'est pas respectée.

Pour faire l'analyse en  $^{18}\text{O}$ , nous avons besoin de petits volumes (1 ml par flacon) et on doit utiliser une faible dépression afin de diminuer l'effet du rabattement. Ceci a nécessité le développement d'un outil de prélèvement au niveau de la zone hyporhéique plus adéquat.

J'ai développé, durant ce stage, avec un technicien du laboratoire (Shamsidine SEBEA) un dispositif d'échantillonnage de la zone hyporhéique dont le principe est décrit dans les figures 19 et 20. Il s'agit d'un tube compartimenté relié à une pompe péristaltique (ou à vide) permettant de prélever l'eau au niveau de la zone hyporhéique à trois profondeurs (10, 30 et 50 cm). Les chambres de prélèvement sont bien isolées entre elles. J'ai testé ce nouveau tube dans la zone hyporhéique et celui-ci a finalement donné satisfaction après un certain nombre de modifications (diamètres des trous des chambres de prélèvement, épaisseur du tube, pointe, ...). C'est ce dispositif que j'ai utilisé durant la campagne des 13 et 14 août 2002.

L'expérience du traçage avec ce nouveau dispositif peut être envisagée car, sur 200 m, les infiltrations hyporhéiques peuvent très bien expliquer le phénomène de récupération du traceur en profondeur.

## **5-2. Campagne des 13 et 14 août 2002**

### **5-2-1. Objectif et contexte de la campagne**

L'objectif de cette campagne était de comparer l'aptitude de traceurs chimique et isotopique à différencier les eaux prélevées à différentes profondeurs et si possible de localiser des zones d'échange entre l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique. Les emplacements des points échantillonnés sont donnés par la figure 21. La campagne a été réalisée dans un contexte particulier. La rivière était en étiage sévère donc seul l'apport de la nappe peut jouer et l'eau ainsi analysée vient essentiellement du ressuyage de la nappe.

J'ai échantillonné durant cette campagne le long de la rivière l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique à trois profondeurs (10, 30 et 50 cm). J'ai mesuré aussi la conductivité électrique de l'eau lors des prélèvements des échantillons. Néanmoins, dans certains points, je n'ai pas pu échantillonner à toutes les profondeurs suite à des problèmes de colmatage des chambres de prélèvements surtout celle située à 50 cm de profondeur. Ceci est dû essentiellement à la nature de sédiments du substrat de la rivière (sédiments fins) et à la longueur des flexibles de prélèvement (2 m) dont il faut combler le volume en prélevant plus d'eau. La dépression créée par la pompe péristaltique devient insuffisante pour prélever de l'eau lorsque les tuyaux de jonction entre le dispositif et la pompe sont trop longs (perte de charge) et que la chambre de prélèvement est bouchée. Au niveau du dernier point (point n°8), j'ai utilisé un tuyau de 20 cm de longueur et j'ai réussi dans ce cas à prélever à 50 cm. Donc, pour prélever à toutes les profondeurs, il faut diminuer la longueur du tuyau et utiliser une pompe plus puissante sur une courte durée.

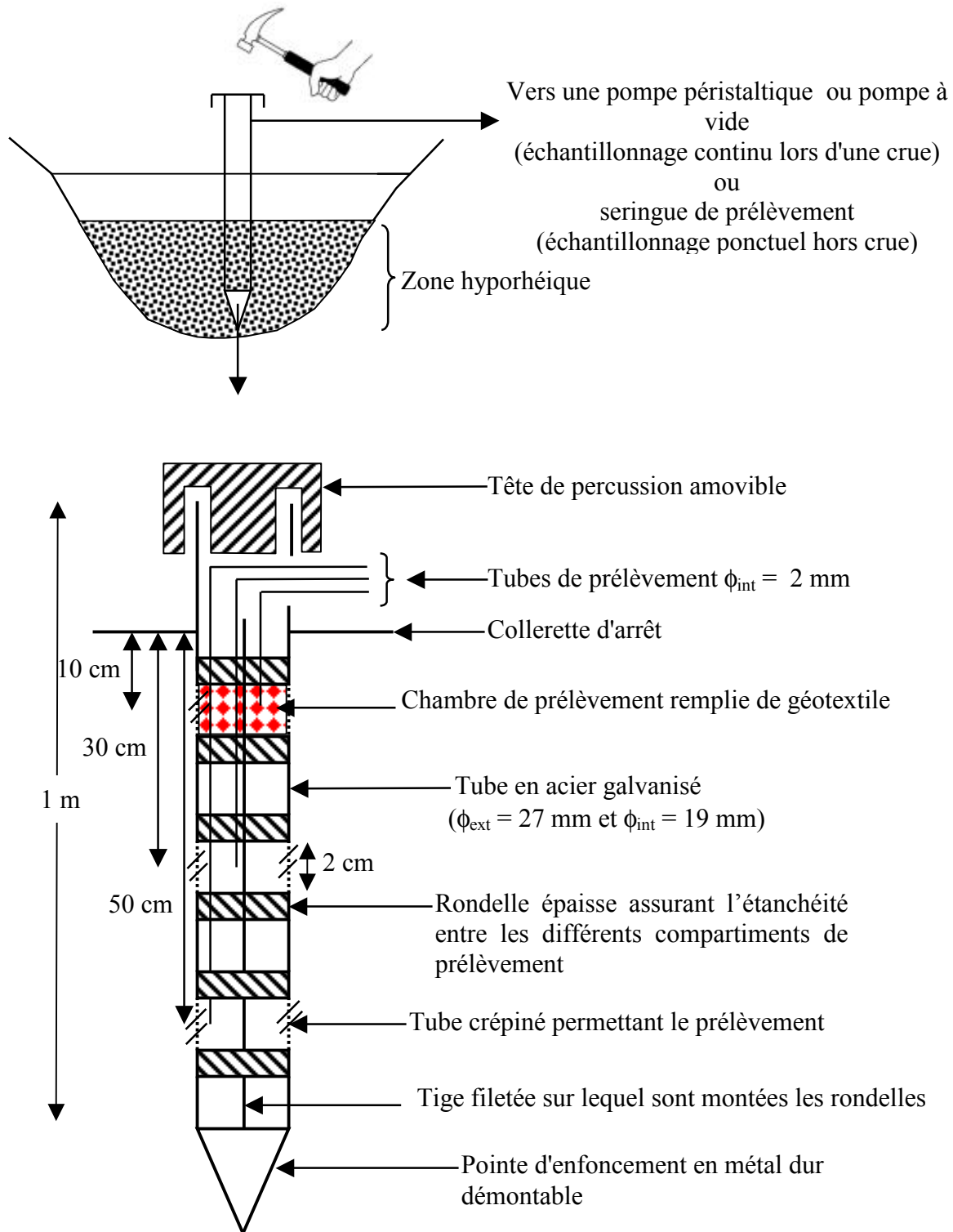
### **5-2-2. Interprétation**

La figure 22 donne l'évolution de la conductivité de l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique à deux profondeurs (10 et 30 cm) le long de la Chaudanne. Ponctuellement, on a un gradient entre les valeurs de conductivité mesurées. Ce gradient est croissant en allant de la surface vers la zone hyporhéique sauf au point 1.

Au niveau du point 1, je n'ai pas échantillonné l'eau de surface. On note une inversion de la conductivité qui augmente en allant de la zone hyporhéique vers la surface.

Cinq points sur huit indiquent que l'on ne peut pas différencier en étiage sévère les eaux hyporhéiques et de surface à partir de leurs conductivité électrique.

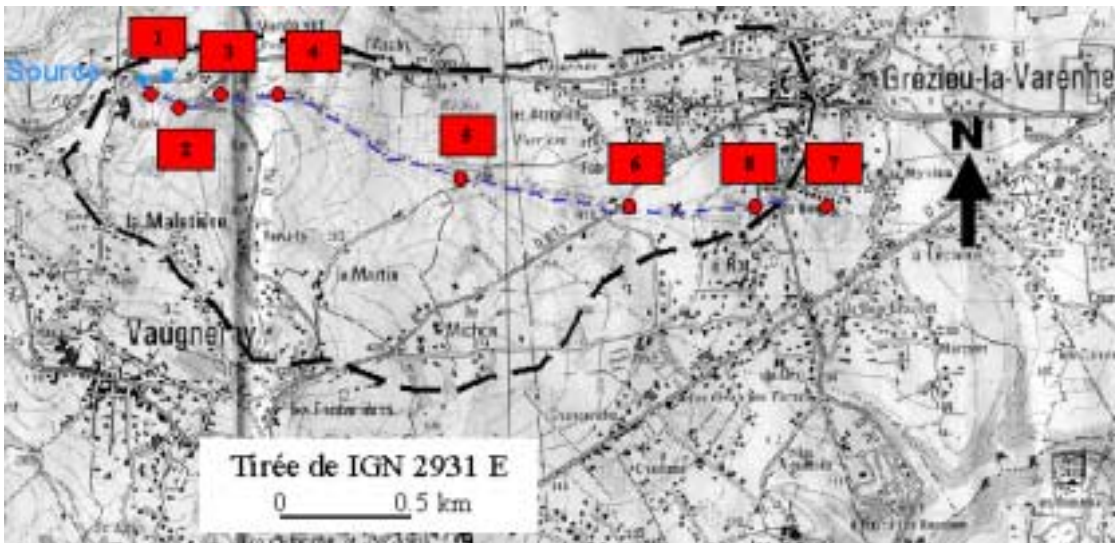
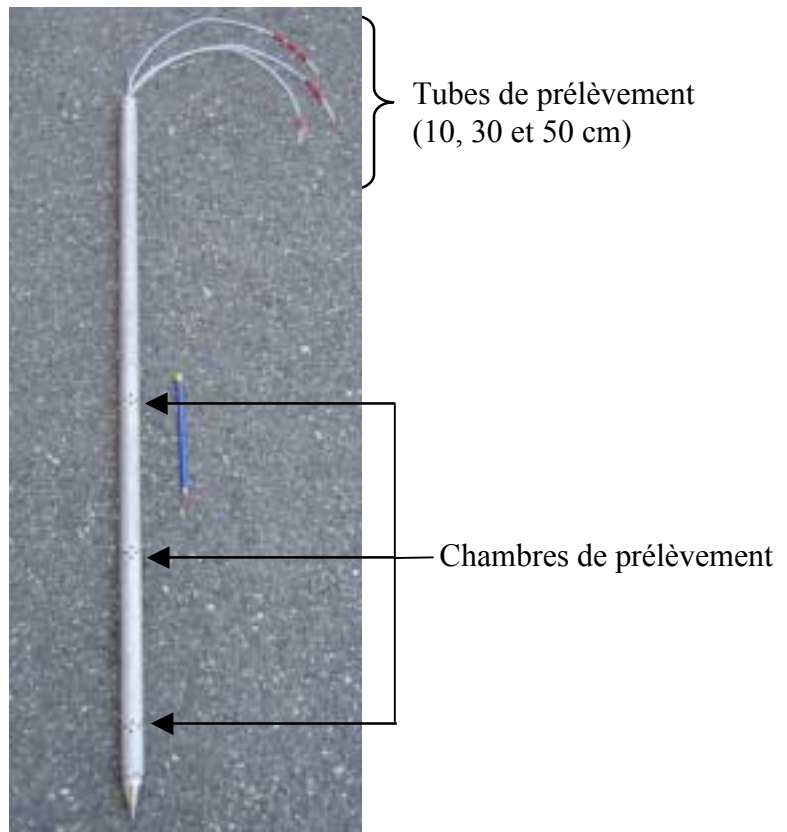
Le long de la Chaudanne et à l'exception des deux premiers points proches de la source, où on a enregistré des conductivités fortes, on constate que la conductivité augmente sensiblement (220 à 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en allant de l'amont vers l'aval le long de la Chaudanne. Ceci étant donné que la contribution des eaux souterraines augmente elle aussi dans le même sens. Car à cette période de l'année, l'écoulement est essentiellement alimenté par la nappe d'accompagnement de la Chaudanne.



**N.B :** Le volume mort de la chambre de prélèvement situé à chaque niveau sera au préalable vidé, avant échantillonnage en flacon.

**Figure 19.** Principe du dispositif d'échantillonnage de l'eau hyporhéique au niveau de la rivière de la Chaudanne

**Figure 20.** Dispositif de prélèvement au niveau de la zone hyporhéique



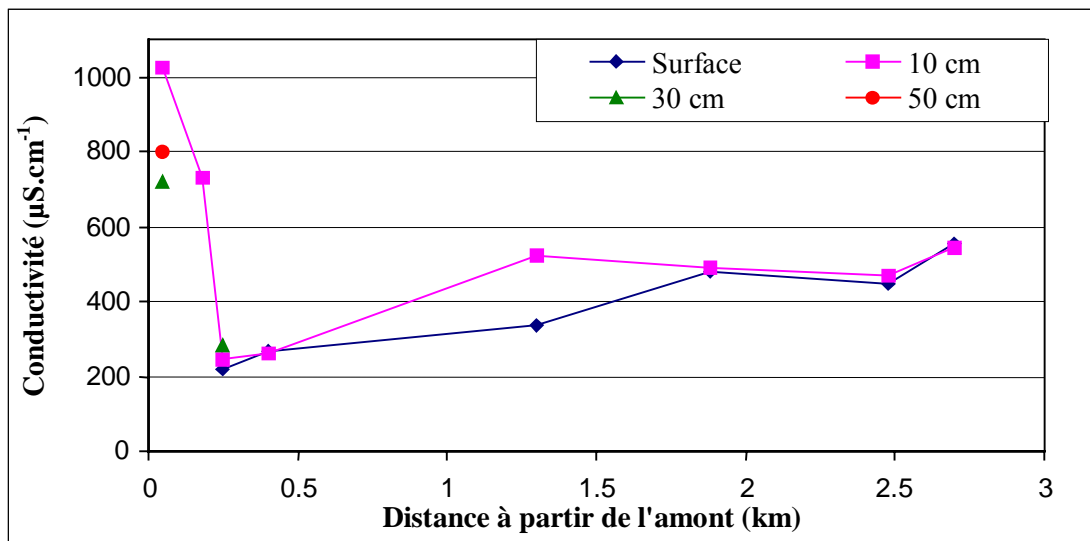
**Figure 21.** Emplacements des points de prélèvements de la campagne des 13 et 14 août 2002

Les fortes valeurs de conductivité enregistrées à l'amont de la Chaudanne sont dues probablement au fait que la source draine des versants sous forêt dont l'eau est plus minéralisée. Il reste cependant une différence de 230  $\mu\text{S}/\text{cm}$  entre 10 et 30 cm de profondeur pour laquelle nous n'avons pas encore d'explication.

La figure 23 donne l'évolution de la teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique à différentes profondeurs le long de la Chaudanne. Globalement on observe :

- l'existence de signatures différenciées pour les différents profondeurs de prélèvements.

- l'existence d'un gradient entre les différentes valeurs mesurées : plus on va en profondeur, plus la teneur en  $^{18}\text{O}$  enregistrée est proche de celle de la nappe (point de prélèvement n°5).



**Figure 22.** Evolution de la conductivité de l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique (à 10 et 30 cm) le long de la Chaudanne (campagne des 13 et 14 août 2002)

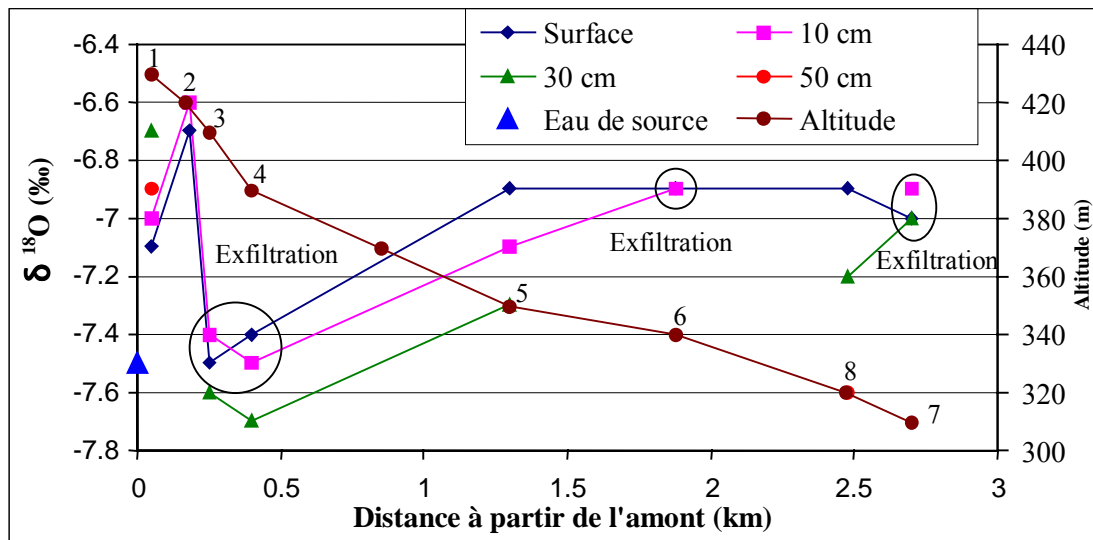
Les courbes de la conductivité électrique et de l'oxygène  $^{18}\text{O}$  ont la même allure générale le long de la rivière. La teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de source était de  $-7,5 \delta \text{ ‰}$ .

Les causes de l'évolution de la teneur en  $^{18}\text{O}$  ponctuellement et le long de la Chaudanne peuvent être déterminées en intégrant, dans notre interprétation, la topographie du bassin de l'amont vers l'aval et la nature des sols. On peut ainsi mettre des hypothèses sur le fonctionnement hydrologique du bassin qui restent à vérifier. En examinant la carte pédologique donnée en annexe 2, on constate qu'il y a quatre unités de sol au niveau du bassin versant de la Chaudanne.

- Zones urbaines,
- Unité de sol n°5 : représenté par les versants du bassin. Elle a une structure limono-sableuse moyennement profonde. Donc, c'est plutôt le phénomène de ruissellement qui domine,
- Unité de sol n°12 : constitué par des sols colluviaux limono-sableux à sablo-limoneux,
- Unité de sol n°13 : on la retrouve le long de la Chaudanne et elle constituée par des sols bruns colluvial limono-sableux à sablo-limoneux.

A l'amont du bassin, au voisinage de la source, la teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de la zone hyporhéique est plus enrichie que celle de l'eau de surface. Ceci a été observé essentiellement au niveau des deux premiers points de prélèvements. Vu le contexte climatique de la campagne (été), on peut supposer que la source draine les eaux des versants qui ont probablement subi le phénomène de l'évaporation. Au point 2, la pente du versant devient plus forte et apparemment on a encore des apports d'eau plus enrichie en  $^{18}\text{O}$  vers la rivière. Cela nous laisse supposer qu'il existe une nappe superficielle d'accompagnement, dont l'eau est plus enrichie, qui alimente la rivière.

Les teneurs en  $^{18}\text{O}$  au point 3 atteignent la valeur mesurée à la source. En regardant l'évolution des altitudes depuis la source jusqu'à ce point, on constate que probablement il y a un point de rupture qui engendre une exfiltration depuis la nappe vers la rivière, mais cette fois l'eau n'est pas influencé par l'évaporation puisque sa teneur en  $^{18}\text{O}$  est plus appauvrie par rapport aux points 1 et 2. Le même phénomène a été observé au point 4.



N.B : 1, 2, ... : Numéro de point de prélèvement.

**Figure 23.** Evolution de la teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique à différentes profondeurs le long de la Chaudanne (campagne des 13 et 14 août 2002)

Le point de prélèvement n°5 est situé dans une zone plate. Lors de l'échantillonnage on pouvait remarquer des flaques d'eau et l'écoulement était présent dans la rivière. Le substrat est plutôt limoneux. La circulation des eaux est ainsi plus difficile en cet endroit. Les teneurs en  $^{18}\text{O}$  sont plus enrichies. Les eaux sont probablement influencées par l'évaporation.

Au point 6, on enregistre la même teneur en  $^{18}\text{O}$  en surface qu'à 10 cm. Ceci peut être expliqué par une exfiltration d'eau de la zone hyporhéique vers la rivière.

Un contraste bien marqué a été observé au point 7. L'échantillon prélevé à 10 cm a été cassé. A 50 cm, on retrouve une teneur en  $^{18}\text{O}$  proche de celle de la nappe qui a été identifiée au point 3 et 4. Aucun phénomène d'échange ne peut être remarqué en cet endroit (point 7).

Au point 8, situé après un radier, la teneur en  $^{18}\text{O}$  à 30 cm est la même que celle de la rivière. Ceci peut être expliqué par une exfiltration d'eau du substrat vers la rivière.

### 5-3. Conclusions sur le fonctionnement de la zone hyporhéique de la Chaudanne

La signature isotopique des eaux à différentes profondeurs est bien individualisée en certains points et l'existence d'un gradient entre les valeurs a été identifiée. Des zones d'émergence de l'eau souterraine dans l'écoulement superficiel ont été identifiées le long de la Chaudanne (point 3, 6 et 8). Néanmoins, il faut multiplier les campagnes d'échantillonnage à différents régimes du cours d'eau (hautes et basses eaux) et serrer les points de prélèvements afin de vérifier si on a toujours des signatures différentes, confirmer l'existence d'un gradient entre les différents points de prélèvements et de déterminer le sens des échanges entre la nappe et la rivière (infiltration ou exfiltration).

L'étude d'un secteur (tronçon radier) du ruisseau en implantant des tubes de prélèvement permettra de rendre compte de l'hétérogénéité spatiale tant sur les plans biologique que physique et chimique au niveau de la zone hyporhéique (ROUCH, 1992). Cette instrumentation est prévue dans le cadre de la thèse de Frédéric RUYSSCHAERT.

Le nouveau dispositif de prélèvement est apparu particulièrement adapté à l'échantillonnage à échelle spatiale réduite dans la zone proche de l'écoulement superficiel où des phénomènes d'échange peuvent avoir lieu.

## 6. Conclusions et perspectives

L'analyse de la composition isotopique des échantillons de deux crues survenues sur le bassin de la Chaudanne, a permis d'émettre les hypothèses suivantes pour expliquer son fonctionnement hydrologique :

- un effet piston de la pluie qui chasse l'eau de la nappe et du sol;
- à l'échelle de l'événement, une réponse rapide du bassin et ses différents compartiments qui réagissent dès qu'un événement se produit sur le bassin versant;
- une part importante de l'eau de pluie dans l'écoulement total;
- la confirmation de présence de réserve dans la bassin à travers l'analyse isotopique des pluies qui a mis en évidence la contribution d'eau préexistante à l'écoulement total lors des crues;
- la contribution d'autres sources (nappes perchées, eaux résiduares, ...) à l'écoulement total.

Néanmoins, des études à pas de temps plus fins sont nécessaires pour déterminer la relation pluie-débit-sol-végétation, notamment pour la quantification des flux à l'échelle du bassin versant. Il faudra introduire la composante sol en prenant des échantillons au niveau de l'horizon humifère du sol, avant et après l'événement, et en déterminant sa teneur en  $^{18}\text{O}$ . On aura ainsi une idée sur la contribution de cette eau à l'écoulement total.

Dans l'optique d'une identification des fonctions de production et de transfert du bassin versant, il sera nécessaire de prendre en compte l'influence des saisons sur le fonctionnement hydrologique du bassin.

L'outil isotopique permet de bien différencier l'eau préexistante de l'eau nouvelle. Cette approche suppose, bien évidemment, que les concentrations des deux types d'eau restent à peu près constantes au cours de l'épisode considéré. Pour cette raison, les isotopes constitutifs de la molécule d'eau, du fait de leur indépendance vis-à-vis des réactions physico-chimiques, demeurent en ce domaine un outil privilégié.

Mais la décomposition isotopique ne permet pas de préciser le chemin parcouru par l'eau de pluie jusqu'au ruisseau, de même qu'elle ne résoud pas le problème de savoir quelle est l'eau préexistante qui participe à la crue : l'eau de la nappe ? l'eau du sol ? ou un mélange des deux ? De plus la variation de la composition isotopique de la pluie au cours de l'événement est un facteur qui peut perturber l'interprétation.

Dans une deuxième étape de ce stage, des prélèvements d'échantillons d'eau au niveau de la zone hyporhéique, à trois profondeurs (10, 30 et 50 cm), et le long de la rivière ont été réalisés. Un nouvel outil d'échantillonnage *in situ* au niveau de la zone hyporhéique a été utilisé. Il s'agit d'un tube compartimenté de faible diamètre permettant une investigation verticale.

A travers cette campagne, en certains points, une signature isotopique des eaux à différentes profondeurs est bien distinguée. L'existence d'un gradient entre les valeurs mesurées a été identifiée.

Le dispositif prototype, élaboré durant ce stage, correspond aux attentes fixées par Monsieur l'encadrant et le thésard. Il sera donc fabriqué en 15 exemplaires qui seront implantés dans un tronçon radier de la Chaudanne afin d'obtenir des données chimiques, isotopiques et hydrogéologiques sur les eaux de la zone hyporhéique, puis pour suivre les processus à l'interface zone hyporhéique-eau souterraine. Des expériences d'injection de traceurs artificiels, en utilisant soit des colorants, soit des solutions chimiques concentrées, à travers ces dispositifs seront également réalisés pour vérifier les sens et les intensités des écoulements hyporhéiques.

Le recours à ce dispositif de prélèvement permettra d'affiner les modèles d'écoulement souterrain et de transport de polluant habituels pour les adapter à l'échelle comprenant les processus hyporhéiques.

Des prélèvements avec ce nouveau dispositif au niveau de la zone hyporhéique à différentes périodes de l'année (hautes et basses eaux) peuvent être envisagés afin de suivre la dynamique et l'ampleur des échanges entre l'écoulement de surface et le milieu hyporhéique en relation avec les conditions aux limites avoisinantes (tirant d'eau, caractéristiques de l'écoulement, forme et position de la nappe) et les caractéristiques géomorphologiques de la rivière.

Compte tenu de ces interrogations et des premiers résultats, il semble intéressant de poursuivre l'investigation isotopique sur ce petit bassin versant périurbain afin de localiser les éventuelles sources (nappes perchées, eaux résiduaires, ...) qui peuvent alimenter le ruisseau lors des événements et même en dehors des périodes pluvieuses. Pour affiner les analyses et quantifier les flux entre l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique, il est nécessaire de travailler sur un épisode pluvieux bien différencié des eaux d'écoulement pré-crue et de prélever en continu des échantillons d'eau de la zone hyporhéique avant, pendant et après l'événement. Une reconnaissance des nappes perchées et une implantation des piézomètres sur l'ensemble du bassin versant peuvent être envisagées. On doit procéder aussi à l'échantillonnage des différentes eaux alimentant la rivière afin de connaître la teneur en  $^{18}\text{O}$  de chaque type d'eau (eau de source, eaux résiduaires, eaux usées du déversoir d'orage, ...).



## 7. Références bibliographiques

- BAHIR M., JALAL M. et BLAVOUX B. (2001).** Isotops and waters ressources in the arid and semi-arid zone, Exemple of Meskala-Kourimat basin (Morocco). In: First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers-Monitoring, Modeling and Management, Essaouira, Morocco.
- BELHAOUANE M. (1999).** Modélisation d'un réseau d'assainissement : étude des fréquences de déversement d'un déversoir d'orage. Rapport de stage de Mastère, spécialité eau potable et assainissement : Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg. 45 p.
- BERNOUD S. (1998).** Réponse écologique d'un ruisseau périurbain aux rejets de temps de pluie. Rapport de stage de Mastère spécialité, eau potable et assainissement : Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg. 46 p.
- BLAVOUX B. (1978).** Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium : possibilités et limites de la méthodes des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Naturelles : Université Pierre et Marie Curie, Paris 6. 333 p.
- BOEGLIN J.L. et TARDY Y. (1997).** Erosion chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger (Guinée, Mali). Découpage d'hydrogramme en quatre écoulements. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des Planètes, vol 325. p. 125-131.
- BOIS P.H. (1991).** Hydrologie générale. Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble. Institut National Polytechnique de Grenoble. 175 p.
- BOULTON A.J. (1993).** Stream ecology and surface-hyporheic exchange : implications, techniques and limitations. Freshwater ressources, vol 44, p. 553-564.
- BREAUD P.J. (1998).** Instrumentation d'une station de mesure en rivière. Rapport de stage de BTS spécialité, gestion et maîtrise de l'eau option, études et projets d'aménagements hydrauliques : Institut Rural de la Loire de Saint Etienne. 15 p.
- BUTTLE M. et PETERS D.L. (1997).** Inferring hydrological processes in a temperate basin using isotopic and geochemical hydrograph separation : a re-evaluation. Hydrological processes, vol 11, p. 557-573.
- CELLE H., DANIEL M., MUDRY J. et al. (2000).** Signal pluie et traçage par les isotopes stables en Méditerranée occidentale. Exemple de la région avignonnaise (Sud\_Est de la France). Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des Planètes, vol 331. p. 647-650.
- CHOCAT B. (1997).** Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris : Lavoisier TEC & DOC. 1124 p.
- CREUZE DES CHATELLIERS M. et DOLE-OLIVIER M.J. (1991).** Limites d'utilisation du sondage de type Bou-Rouch pour la capture de la faune interstitielle. Traçage chimique au chlorure de sodium. Académie de Sciences, t. 312, série III , p. 671-676.
- CROUZET E. et al. (1970).** Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement. Journal of Hydrologie, n°11. p. 217-229.
- EPSTEIN S. et MAYEDA T. (1953).** Variation of  $^{18}\text{O}$  content of waters from naturel sources. Geochim. Cosmochim. Acta, vol n°4, p. 213-224.
- FELLOWS CS., VALETT MH. et DAHM CN. (2001).** Whole-stream metabolism in tow montane streams : contribution of the hyporheic zone. Limnol. Oceanogr., vol 46, n°3. p. 523-531.
- FRASER B.G., DUDLEY WILLIAMS D. et HOWARD K.W.F. (1996).** Monitoring Biotic And Abiotic Processes Across The Hyporheic/Groundwater Interface. Hydrogeology Journal, vol 4, n°2. p. 36-50.
- GOURCY L., ARANYOSSY J.F., OLIVRY J.C. et al. (2000).** Evolution spatio-temporelle des teneurs isotopiques ( $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ ) des eaux de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali). Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des Planètes, vol 331. p. 701-707.

- GOURDOL F. (2000).** Identification des critères pluies/débits de déclenchement d'une chaîne d'acquisition d'indicateurs de la qualité de l'eau d'une rivière. Mémoire du DEA, spécialité mécanique des fluides : Ecole Centrale de Lyon. 64 p.
- HARVEY J.W. et WAGNER B.J. (2000).** Quantifying hydrologic interactions between streams and their subsurface hyporheic zones. Streams and Ground Waters. J. B. Jones and P. J. Mulholland. San Diego, Academic Press. p. 3-44.
- HUBERT P. (1989).** La séparation de l'hydrogramme : apport des méthodes isotopiques. Hydrogéologie, n°3. p. 143-150.
- IQBAL M.Z. (1998).** Application of environmental isotopes in storm-discharge analysis of two contrasting stream channels in a watershed. Water resources, vol 32, n°10, p. 2959-2968.
- KESSLER J. et CHAMBRAUD A. (1990).** Météo de la France : tous les climats localité par localité. France : JC Lattès. 391 p.
- LADOUCHE B., PROBST A., VIVILLE D. et al. (2001).** Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). Journal of Hydrology, n°242, p.255-274.
- LAUDON H. et SLAYMAKER O. (1997).** Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity : an alpine example. Journal of hydrology, vol 201. p. 82-101.
- LAURANT B., GIBERT E., WINCKEL A. et al. (2001).** Bilans hydrologique et isotopiques ( $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ ) du lac Massoko, Tanzanie. Quantification des échanges lac-eaux souterraines. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des Planètes, vol 333. p. 617-623.
- LETOLLE R., MARIOTTI A. et BARIAC T. (1991).** Isotopes stables : Applications. Compte rendu de fin d'étude d'une recherche financée par le ministère de la recherche et de la technologie. 293 p.
- LLAMAS J. (1993).** Hydrologie générale : principes et applications. Québec Canada : Gaëtan morin éditeur 2ième édition. 527 p.
- LOYE-PILOT M.D. et JUSSERAND C. (1990).** Décomposition chimique et isotopique d'un hydrogramme de crue d'un torrent méditerranéen – Réflexions méthodologiques. Revue des sciences de l'eau, vol 3, n°2, p.211-231.
- MARC V., LAVABRE J. et BOENNEC J.M. (1995).** Organisation spatio-temporelle des écoulements sur le bassin versant du Réal Collobrier (massif des Maures), approche par traçage chimique et isotopique naturel de l'eau. In: troisième journée du Comité français de l'AIH séminaire du GIP Hydrosystèmes sur la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des hydrosystèmes conséquences pour la gestion, Avignon. p. 73-78.
- MARC V. et MATHYS N. (1999).** Traçage d'une crue sur le bassin versant marneux du Laval. Les bassins versants expérimentaux de Draix laboratoire d'étude de l'érosion en montagne - actes du séminaire, Draix Le Brusquet Digne, 22-24 octobre 1997, Cemagref Editions, Antony. p.129-134.
- MARJOUA A., OLIVE PH. et JUSSERAND C. (1997).** Apport des outils chimiques et isotopiques à l'identification des origines de la salinisation des eaux : cas de la nappe de la Chaouia côtière (Maroc). Revue des sciences de l'eau, vol 10, n°4, p.489-505.
- MARTIN C. et LAVABRE J. (1997).** Estimation de la part du ruissellement sur les versants dans les crues du ruisseau du Rimbaud (massif des Maures, Var, France) après l'incendie de forêt d'août 1990. Journal des sciences hydrologiques, vol 42, n°6, p. 893-907.
- MEDHIOUB K. et JUSSERAND C. (1984).** Le comportement chimique et isotopique des eaux du complexe paralique de la dépression de Ben Guiriden (sud-est tunisien). Revue des sciences de l'eau, vol 3, n°4, p.335-358.
- MEROT P., DURAND P. et MORISSON C. (1995).** Four-component hydrograph separation using isotopic and chemical determinations in agricultural catchment in western France. Physics and Chemistry of the Earths. vol 20, n°3-4. p. 415-425.

- MILLET A., BARIAC T., GRIMALDI C. et BOULLEGUE J. (1990).** Signature isotopique et chimique des précipitations (pluies et pluviocessivats) en Guyane française. *Revue des sciences de l'eau*, vol 12, n°4, p.729-751.
- NOGUEIRA S. (2001).** Incidence des rejets urbains de temps de pluie sur les communautés d'invertébrés interstitiels (oligochètes et crustacés) d'un petit cours d'eau périurbain. Rapport de stage spécialité, environnement et santé publique : Université de Montpellier. 33 p.
- NOVEL J.P., DRAY M., FERHI A. et al. (1999).** Homogénéisation des signaux isotopiques,  $^{18}\text{O}$  et  $^3\text{H}$ , dans un système hydrologique de haute montagne : la vallée d'Aoste (Italie). *Revue des sciences de l'eau*, vol 12, n°1, p.3-21.
- ORCZYK C. (2001).** Etude de devenir de la matière organique apportée par les rejets urbains de temps de pluie dans un ruisseau périurbain : développement d'une démarche méthodologique et application à la Chaudanne. Rapport de stage : Faculté Libre des Sciences. 81 p.
- PETROVIC N. (1999).** Activités agricoles sur le petit bassin périurbain de Grézieu-La-Varenne : enquête auprès des exploitants et étude des apports en nutriments d'origine agricole. Rapport de DAG. Cemagref Lyon. Equipe Pollutions Diffuses. 30 p.
- POINARD D. (2000).** Analyse hydrologique de deux bassins montagneux à couvert végétal contrasté : les BVRE de Draix (Alpes de Haute Provence). Mémoire du DEA spécialité, sciences de l'eau dans l'environnement continental : Université d'Avignon. 40 p.
- REMENIERAS G. (1960).** L'hydrologie de l'ingénieur. Collection du laboratoire national d'hydraulique. Paris : EYROLLES. 413 p.
- RIBOLZI O., ANDRIEUX P., VALLES V. et al. (2000).** Contribution of groundwater and overland flows to storl flow generation in a cultivated Mediterranean catchment. Quantification by naturel chemical tracing. *Journal of Hydrology*, n°233. p. 241-257.
- RIBOLZI O., AUQUE L., BARIAC T. et al. (2000).** Ecoulements hypodermiques et transferts de solutés dans les placages éoliens du Sahel : étude par traçage isotopique et chimique sous pluies simulées. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, série II, fascicule A-Sciences de la Terre et des Planètes*, vol 330, Iss 1. p. 53-60.
- ROCHE M. (1963).** Hydrologie de surface. Paris : Gauthier – Villars éditeur. 430 p.
- ROCCHICCIOLI-DELTCHEFF C. (1971).** Les isotopes. France : Presses universitaires. 126 p.
- ROUCH R. (1992).** Caractérisations et conditions hydrodynamiques des écoulements dans les sédiments d'un ruisseau des Pyrénées. Implications écologiques. *Stygologia*, vol 7, n°1, p. 13-25.
- ROUCH R., MANGIN A., BAKALOWICZ M. et HULST D. (1997).** The hyporheic zone : hydrogeological and geochemical study of a stream in the Pyrenees Montains. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* vol 82, n°3, p. 357-378.
- ROUSSEL C. (1995).** Séparation des composantes d'un hydrogramme de crue par l'utilisation de traceurs chimiques et isotopiques sus le sous-bassin amont (Melarchez) et à l'exutoire principal de bassin versant de l'Orgeval. Mémoire du DEA filière, hydrochimie et hydrologie isotopique : Université de Paris sud, laboratoire d'hydrologie et géochimie isotopique Orsay. 69 p.
- SCHINDLER J.E et KRABBENHOFT D.P. (1998).** The hyporheic zone as a source of dissolved organic carbon gases to a temperate forested stream. *Biogeochemistry*, vol 43, p. 157-174.
- SCHOEN R., GAUDET J.P. et BARIAC T. (1999).** Preferential flow and solute transport in a large lysimeter, under controlled boundary conditions. *Journal of hydrology*, n°215. p. 70-81.
- SOPHOCLEOUS M. (2001).** Interactions between groundwater and surface water : the state of the science. *Hydrogeology Journal*, vol 10. p. 52-67.
- SYMADER W. et BIERL R. (1998).** The heterogeneity of runoff and its significance for water quality problems. *Journal des sciences hydrologiques*, vol 43, n°1, p. 103-113.
- TRAVI Y., LAVABRE J., BLAVOUX B. et MARTIN C. (1994).** Traçage chimique et isotopique ( $\text{Cl}^-$ ,  $^{18}\text{O}$ ) d'une crue d'automne sur un petit bassin versant méditerranéen incendié. *Journal des sciences hydrologiques*, vol 39, n°6, p. 605-619.
- WILLIAMS DD. (1993).** Nutrient and flow vector dynamics at the hyporheic/groundwater interface and their effects on the intersticiel faune. *Hydrobiologia*, vol 251, p. 185-198.

- WINTER T.C., LABAUGH J.W. et ROSENBERRY D.O. (1988).** The design and use of a hydraulic potentiometer for direct measurement of differences in hydraulic head between groundwater and surface water. *Limnol. Oceanogr.*, vol 33, n°5, p. 1209-1214.
- WOERTHER S. (2000).** Etude du sous écoulement dans la zone hyporhéique d'une petite rivière. Rapport de stage : Ecole Nationale des Mines de Saint Etienne. 27 p.

## INDEX DES FIGURES

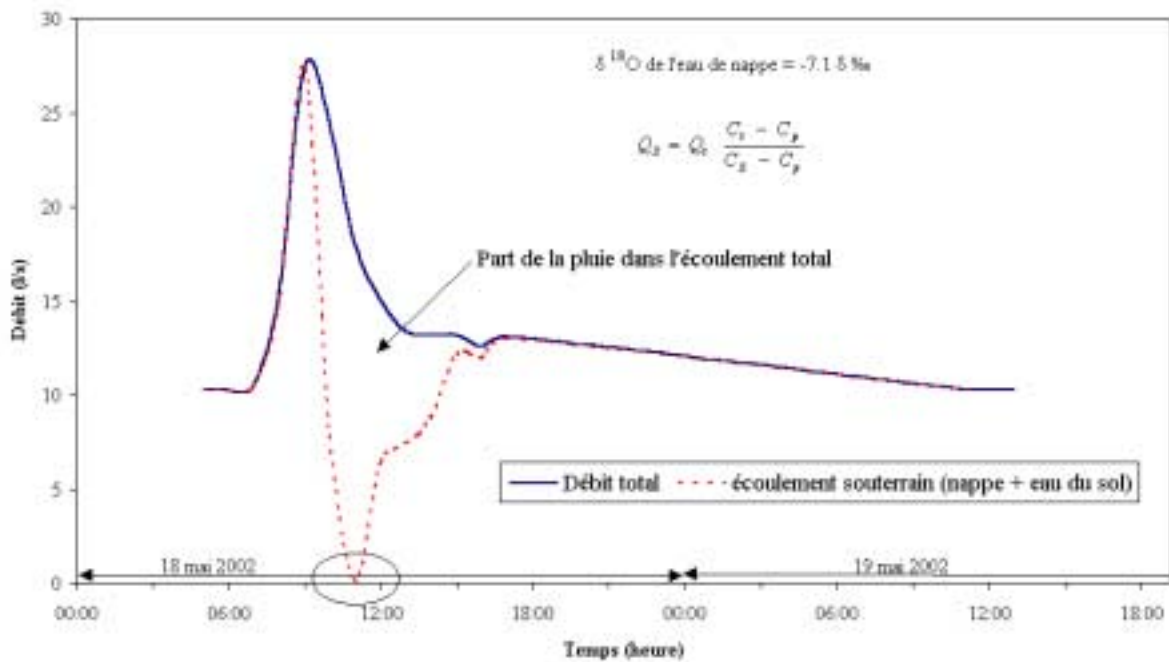
N°	Titre	Page
1	Modèle descriptif de la dynamique de la zone hyporhéique	5
2	Méthodes simplifiées de séparation des composantes de l'hydrogramme	9
3	Décomposition de l'hydrogramme par la méthode de BARNES	9
4	Le bassin versant de la Chaudanne	14
5	Dispositif de mesures dans la Chaudanne	15
6	Emplacement des points d'échantillonnage des campagnes du 8 mars, 10 et 26 avril 2001	18
7	Campagnes d'échantillonnage du 10 et du 26 avril 2001 ratios $\delta$ eaux dans la rivière et le substrat (-50 cm) de la Chaudanne	19
8	Evolution de la conductivité de l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique au niveau de chaque station en fonction du temps	20
9	Evolution de la conductivité moyenne de l'eau au niveau de la zone hyporhéique de l'amont à l'aval de la rivière de la Chaudanne	22
10	Chronique du débit de la rivière de la Chaudanne au niveau du pont de la Barge	22
11	Etude isotopique de la crue du 18 mai 2002 à la Chaudanne	25
12	Chronique du débit de la Chaudanne au niveau du pont de la Barge	27
13	Décomposition isotopique de la crue du 18 mai 2002 à la Chaudanne en prenant une teneur en $^{18}\text{O}$ de l'eau de pluie constant (-2,9 ‰)	27
14	Chronique de débit et intensités des pluies au niveau de la Chaudanne	29
15	Etude isotopique de la crue du 1 <sup>er</sup> août 2002 à la Chaudanne	29
16	Décomposition isotopique de la crue du 1 <sup>er</sup> août 2002 à la Chaudanne	30
17	Teneurs en $^{18}\text{O}$ des eaux de surface (ES) et souterraine au cours du temps, chronique de débit et intensité de pluie au niveau du bassin de la Chaudanne	31
18	Infiltration (Downwelling) et exfiltration (Upwelling) au niveau de la zone hyporhéique	32
19	Principe du dispositif d'échantillonnage de l'eau hyporhéique au niveau de la rivière de la Chaudanne	34
20	Dispositif de prélèvement au niveau de la zone hyporhéique	35
21	Emplacements des points de prélèvements de la campagne des 13 et 14 août 2001	35
22	Evolution de la conductivité de l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique (à 10 et 30 cm) le long de la Chaudanne (campagne des 13 et 14 août 2002)	36
23	Evolution de la teneur en $^{18}\text{O}$ de l'eau de surface et celle de la zone hyporhéique à différentes profondeurs le long de la Chaudanne (campagne des 13 et 14 août 2002)	37

## INDEX DES TABLEAUX

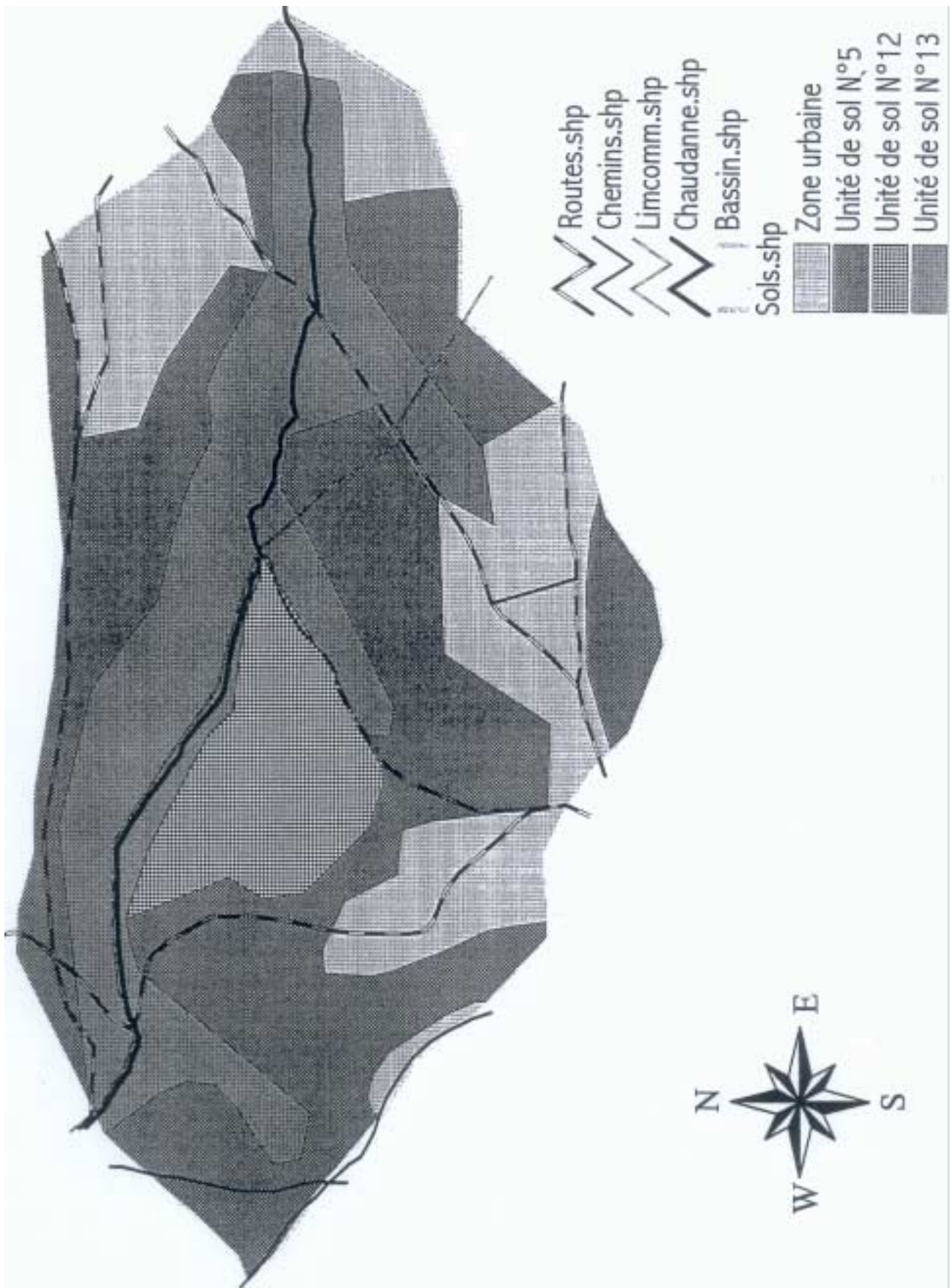
N°	Titre	Page
1	Abondance relative moyenne et naturelle des isotopes de la molécule d'eau	12
2	Teneur en $^{18}\text{O}$ au niveau des points de prélèvements lors de la campagne du 8 mars 2001	17
3	Teneur en $^{18}\text{O}$ au niveau des points de prélèvements lors de la campagne du 10 avril 2001	18
4	Teneur en $^{18}\text{O}$ au niveau des points de prélèvements lors de la campagne du 26 avril 2001	19
5	Statistiques sur les valeurs de la conductivité de l'eau de surface (ES) et hyporhéique (ZH) dans la rivière de la Chaudanne	20
6	Table des probabilités d'observer les « différences » calculées entre les stations échantillonnées. Test bilatéral de Wilcoxon	21
7	Crue du 18 mai 2002 à la Chaudanne	24
8	Crue du 1 août 2002 à la Chaudanne	28

# ANNEXES

**Annexe 1.** Décomposition isotopique de la crue du 18 mai 2002 à la Chaudanne en prenant point par point la teneur en  $^{18}\text{O}$  de la pluie correspondante



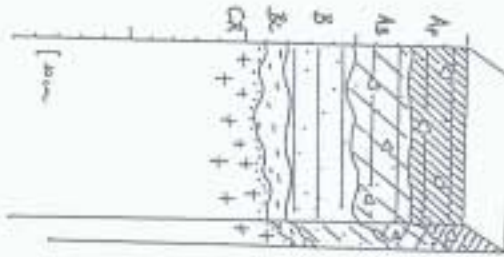
**Annexe 2.** Carte des sols du bassin versant de la Chaudanne  
(PETROVIC, 1999 d'après IGCS, Carte des sols du Rhône, Sol-CONSEIL/SIRA, 1997)





### Unité de Sol n° 5

Dénomination : Sol brun acide (alcofrisol typique), limono-sableux moyennement profond issu de roche cristalline (gneiss, diorite, granite, tuf ou schiste).  
 Variante sablo-argileuse (profil 23 et 105 par exemple, R = 0.5 à 0.6).  
 Environ 12 à 15 % de la Surface totale du Rhône.  
 UCS n° 102 à 104, 301 à 305 et 701 à 704 - Mts du Beaujolais et du Lyonnais + Piémont



Profil n° 74 - Morphologie

Ap - 0/25 cm : Limon sableux, brun (10 YR 3/4), structure granuleuse à polyédrique subanguleuse (5 - 15 mm), compact. Nombreux cailloux, nombreuses racines.  
 Aa - 25/50 cm : Limon sablo-argileux, beige (10 YR 3/3), structure polyédrique anguleuse (10 mm), compact. Nombreux cailloux, nombreuses racines.  
 B - 50/80 cm : Limon sablo-argileux, jaunâtre (10 YR 6/5), structure polyédrique anguleuse (50 mm), très compact, peu de cailloux, peu de racines.  
 B/C - 80/90 cm : Limon argilo-sableux, orangé verdâtre rougeâtre (10 YR 5/8 à 10 YR 2/2), structure polyédrique anguleuse (50 mm), très compact, très nombreux cailloux, pas de racines.  
 CR - > 90 cm : Roche compacte.  
 Roche mère : Schiste.

CARACTÉRISTIQUES CHIMICO-PHYSICO-ÉCOLOGIQUES

Horizon	Ref.	A	Lf	Lg	Sf	Sg	pH	ca.t	ca.a	MO	Ntot	C/N	CEC
Ap - 0/25 cm	15	23.7	24.0	12.5	13.5	26.3	6.03	0	0	1.9	0.08	13.8	13.7
Aa - 25/50 cm	20	25.3	18.6	10.2	13.6	32.4	6.60	0	0	-	-	-	18.6
B - 50/80 cm	9	12.1	10.7	9.8	21.1	48.4	6.72	0	0	-	-	-	13.0
B/C - 80/90 cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CR - > 90 cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### Photo du Profil n° 74

Localisation : Côteaux du Beaujolais  
 Commune : Saint Lager  
 X : 779.800 Y : 2125.000 Z : 280 m  
 Occupation du sol : vigne  
 RU : 80 - 100 mm Hy : 0 R : 1.1 à 1.2



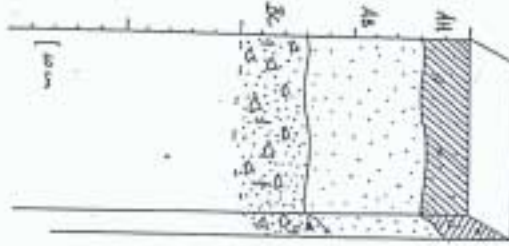
(PETROVIC, 1999 d'après IGCS, Carte des sols du Rhône, Sol-CONSEIL/SIRA, 1997)

**Unité de Sol n° 12 (voir profil de l'US n° 11)**

**Dénomination :** Sol brun colluvial (colluviosol typique, limono-sableux à sablo-limoneux, moyennement profond, de l'alweg issu de roche cristalline (gneiss, diorite, granite, tuf ou schiste).

**Moins de 1 % de la Surface totale du Rhône**

**UCS n° 1051, 309 et 704 - Mts du Beaujolais et du Lyonnais + Plémont**



**Pas de profil - Morphologie d'un sondage**

**AH - 0/20 cm :** Limon sableux, brun (10 YR 3/2), structure grumeleuse (5 mm), peu compact. Quelques graviers, nombreuses racines.

**AB - 20/70 cm :** Sable limoneux, beige (10 YR 4/3), structure polyédrique subanguleuse (15 mm), compact. Quelques cailloux, racines peu nombreuses.

**BC - 70/100 cm :** Sable limoneux à sable grossier, jaune orangé (10 YR 7/4), structure particulaire, nombreux cailloux, pas ou peu de racines.

Roche mère : Colluvions de tufs.

**Pas de photo de profil**

**Localisation :** Principalement, Monts du Beaujolais

**Commune :**

**X : - Y : - Z :** 400 à plus de 700 m

**Occupation du sol :** -

**RU :** 60 à 100 mm Hy : 0 R : 0,8

Pas de photo

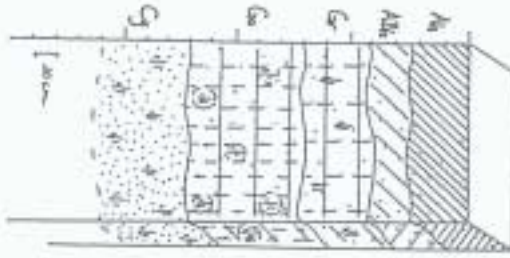
**CARACTÈRES ANALYTIQUES GÉNÉRAUX DU SOL (selon le profil de référence en cm)**

Horizon	Ref.	A	Lf	Lg	Sf	Sg	pH	cat.	caa	MO	Ntot	C/N	CEC
AH - 0/20 cm	*												
AB - 20/70 cm	-												
BC - 70/100 cm	-												

### Unité de Sol n° 13

Dénomination : Sol colluvial (colluviosol typique), limono-sableux à sablo-limoneux, profond, de thalweg issu de roche cristalline (gneiss, diorite, granite, tuf ou schiste).

Environ 4 % de la Surface totale du Rhône  
UCS n° 105, 7041 et 309 - Mis du Beaujolais et du Lyonnais + Piémont



#### Profil n° 2 - Morphologie

Ah - 0/15 cm : Limon sableux, brun (10 YR 3/3), structure polyédrique subanguleuse (20 mm), compact. Très nombreuses racines.

ABh - 15/40 cm : Sable limoneux, beige (10 YR 4/2), structure polyédrique anguleuse (30 mm), compact. Nombreuses racines.

Gr - 40/70 cm : Sable argileux, gris bleu (5 Y 5/1), structure prismatique (50 mm), très compact, pas de racines, rares taches rouille (2.5 YR 4/8).

G0 - 70/120 cm : Sable argileux, gris-rouille (10 YR 6/2), structure prismatique (50 mm) à particulaire, peu compact, pas de racines, nombreuses taches rouille (7.5 YR 5/5).

G1 - 120/160 cm : Sable grossier, jaune orangé (2.5 Y 6/2), structure particulaire, peu compact, pas de racines, nombreuses taches rouille (5YR 5/8).  
Racine mère : Colluvions de tufs.

CARACTERES ANALYTIQUES (Cl, fines, 30, sauf pH et CEC en mg/100g)													
Horizon	Ref.	A	Lf	Lg	Sf	Sg	pH	cat.	ca.a	MO	Ntot	C/N	CEC
Ah - 0/15 cm	0	19.2	20.6	7.2	15.6	37.4	5.39	0	0	3.1	0.21	8.6	9.7
ABh - 15/40 cm	0	13.0	18.4	6.7	15.2	47.1	5.59	0	0	-	-	-	-
Gr - 40/70 cm	0	16.8	25.1	6.6	11.2	40.2	5.84	0	0	-	-	-	-
G0 - 70/120 cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G1 - 120/160 cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

#### Photo du Profil n° 2

Localisation : Monts du Beaujolais  
Commune : Amplepuis  
X : 757.975 Y : 2110.750 Z : 520 m  
Occupation du sol : pré pâturé en bas fonds  
RU : 150 mm Hy : 0 à 2 R : 0.7 à 1.3



(PETROVIC, 1999 d'après IGCS, Carte des sols du Rhône, Sol-CONSEIL/SIRA, 1997)