



L'aquifère karstique de Fourbanne

Etude du comportement hydraulique et mécanique à partir de l'hydrogéochimie

Condensé des travaux de thèse :

*TRAÇAGE HYDROCHIMIQUE DES INTERACTIONS HYDRAULIQUES ET MÉCANIQUES ENTRE LES VOLUMES PERMÉABLES ET
PEU PERMÉABLES AU SEIN DES AQUIFÈRES FRACTURÉS CARBONATÉS*

<i>Avant propos</i>	3
<i>Introduction</i>	4
<i>1.Présentation de la source et de l'aquifère de Fourbanne</i>	6
1.1Géographie.....	6
1.2Géologie.....	6
<i>2.Comportement hydraulique de l'aquifère de la source de Fourbanne</i>	10
<i>3.Apport de l'hydrogéochimie dans la compréhension des relations entre les zones perméables et les zones peu perméables au sein des aquifères karstiques</i>	11
3.1Contexte hydrogéochimique régional.....	11
3.2Interactions entre les volumes perméables et les volumes peu perméables lors d'un épisode de crue au sein de l'aquifère karstique de Fourbanne.....	12
3.2.1 Protocole expérimental.....	12
3.2.2 Résultats.....	12
3.3.3 Interprétation.....	14
3.3.4 Synthèse.....	15
3.3.5 Influence sur le comportement des nitrates.....	15
<i>4.Apport de l'étude dans la compréhension des mécanismes de déformation des aquifères karstiques</i>	17
4.1L'évènement sismique.....	17
4.2Le signal hydrochimique.....	17
4.3Interprétation hydrogéologique.....	18
4.4Mécanisme de déformation à l'origine du signal post-sismique.....	19
<i>Conclusion générale</i>	21

Avant propos

L'étude présentée dans ce rapport a été menée au cours d'un travail de doctorat en Sciences de la Terre réalisé à l'*Université de Franche-Comté*, au sein de l'équipe d'accueil *Déformation, Ecoulement, Transfert* du *laboratoire de Géosciences* de Besançon. Cette étude a été financée par la *DIREN de Franche-Comté* et réalisée en collaboration avec Jean-Pierre Mettetal, hydrogéologue à la *DIREN*.

Les propos qui vont suivre présentent de manière synthétique les travaux réalisés durant quatre années au niveau de l'aquifère de Fourbanne. L'étude de cet aquifère s'est intégrée dans une approche multi-site à plusieurs échelles. La majeure partie des notions théoriques ainsi que des concepts de base ou encore des expérimentations réalisées sur les différents sites d'étude n'ont pas été présentés dans le texte qui va suivre, par souci de vulgarisation et d'accès au plus grand nombre. Il est donc possible que le lecteur averti, manque de certaines clés ou données pour approfondir dans le détail les notions développées ci-après.

J'invite donc le lecteur, s'il le souhaite, à approfondir le sujet développé dans ce rapport, en consultant le document de thèse original dont est tiré ce texte. Ce document est disponible aux adresses suivantes :

- <http://tel.ccsd.cnrs.fr/tel-00011213>
- <http://hal.archives-ouvertes.fr>

Introduction

Les aquifères karstiques appartiennent à la famille des aquifères fracturés. Au sein de ces réservoirs existent des processus d'écoulement complexes qui sont la conséquence directe des contrastes de perméabilité affectant ces milieux hétérogènes. *L'étude du karst a souvent été abordée d'un point de vue "spéléocentrique"*, de par la facilité d'accès au cœur de la zone non-saturée de l'aquifère par l'intermédiaire du réseau de conduits karstiques. Cet accès reste toutefois limité dans l'espace et sélectif en terme de fonctionnement de l'aquifère, l'investigation se limitant aux zones très perméables et à la partie supérieure de l'aquifère.

Bien que les méthodes hydrogéologiques classiques soient adaptées à la compréhension de ce type d'aquifère, l'approche "*karstologique*" a perduré pendant de nombreuses années, sans doute du fait de leur complexité. Ce type d'approche sépare clairement les écoulements liés au réseau de drainage constitué par les conduits et l'écoulement lié aux zones moins perméables entourant les conduits karstiques. Aucune interaction entre ces deux entités hydrogéologiques n'était envisagée, les observations se limitant aux observations ponctuelles faites lors d'explorations spéléologiques.

Bien que l'hydrogéologie actuelle aborde l'aquifère karstique dans son ensemble, l'accès aux différents compartiments des aquifères karstiques reste problématique. L'accès aux zones peu perméables ne peut se faire que par l'intermédiaire de forages ou d'ouvrages souterrains, qui fournissent des informations ponctuelles souvent difficiles à extrapoler au reste de l'aquifère et à relier entre elles. Ces limitations découlent de l'hétérogénéité du milieu résultant de sa fracturation qui s'étend de l'échelle kilométrique à une échelle inférieure au millimètre.

L'écoulement de l'eau dans un milieu souterrain fracturé est dépendant de processus hydrauliques, chimiques, thermiques et mécaniques. La prise en compte de ces différents mécanismes à différentes échelles semble donc indispensable à une bonne compréhension du fonctionnement global de ce type d'aquifère.

Jeannin et Grasso, (1995) puis *Jeannin (1996)* étudient les relations entre les volumes de roches peu perméables et les conduits perméables au sein d'un aquifère karstique. Pour ce faire, ils utilisent des mesures hydrauliques (débits, niveaux piézométriques de forages, analyse d'hydrogrammes ou encore des traçages artificiels) ainsi que des modèles numériques d'écoulement. Au cours de l'étude qui constitue le propos de ce mémoire, des objets similaires vont être étudiés en adoptant une approche hydrogéochimique. En effet, la composition chimique (le signal chimique) de l'eau d'un aquifère est influencé par la nature, la structure et le comportement de l'eau dans ce dernier. L'analyse du signal chimique permet de retracer le comportement des volumes d'eau dans l'aquifère. Cette méthodologie que l'on désigne sous le terme de "traçage naturel", va nous permettre d'étudier le comportement hydraulique des aquifères karstiques. Les investigations menées au cours de cette étude ont été ciblées sur les interactions hydrauliques, hydrochimiques et mécaniques intervenant entre les zones perméables et peu perméables d'un aquifère karstique. L'objectif de cette étude est de répondre aux questions suivantes:

- L'étude hydrochimique d'un aquifère autorise-t-elle une résolution suffisante pour détecter les échanges entre les compartiments de perméabilité contrastée au sein d'un aquifère karstique ?

- Quels sont les paramètres propres à l'aquifère qui régulent ces échanges et quelles conséquences ont-ils sur le transfert des polluants de la zone d'infiltration jusqu'à la source ?
- Quelle est l'influence des variations de conditions hydrodynamiques à l'échelle de l'aquifère sur les modalités d'échanges entre zones perméables et zones peu perméables?
- Enfin, des variations de perméabilité sous l'effet de contraintes mécaniques peuvent-elles entraîner une variation de la signature hydrochimique d'un aquifère de type karstique?

L'aquifère drainé par la source de Fourbanne n'a jusqu'à maintenant été le sujet d'aucune étude hydrogéologique poussée. Cependant, il a été l'objet de nombreuses investigations spéléologiques de la part du *GSCB (Groupe Spéléologique de Clerval Baume-Les-Dames)*. La structure du réseau karstique est donc bien connue. Les connaissances et les aménagements mis en place par les spéléologues ont permis une instrumentation stratégique et originale de l'aquifère. Le dispositif de mesure permet un suivi des volumes d'eau depuis leur infiltration en surface, jusqu'à la source avec des mesures au cœur de l'aquifère à proximité de la limite zone saturée/zone non saturée.

Les investigations réalisées sur le site de Fourbanne ont débuté par une étude approfondie de la structure géologique de l'aquifère et de ses limites. Les fonctionnements hydrauliques et hydrochimiques qui vont être décrits ont été déduits de l'étude de plusieurs épisodes pluvieux.

1. Présentation de la source et de l'aquifère de Fourbanne

1.1 Géographie

Le village de Fourbanne se situe au Nord Ouest du département du Doubs en rive droite de la rivière du même nom, à 23 km en amont de Besançon et 5 km en aval de Baume-Les-Dames (**Fig. 1**). La source de Fourbanne émerge à une altitude de 262 mètres, sur un terrain privé, dans la plaine alluviale du Doubs (Riv.). Une distance de 120 mètres sépare la source de la rivière. Cette émergence karstique fut exploitée jusqu'au début de la seconde guerre mondiale pour fournir la force motrice à un moulin à grain. La source donne naissance à un petit ruisseau qui se jette dans le Doubs (Riv.), à quelques centaines de mètres de l'émergence. Dans ce secteur, la vallée du Doubs est relativement encaissée, notamment en rive gauche, avec une crête qui culmine à 588 mètres (**Fig. 2**). La rive droite est affectée par un rebond topographique moins élevé, d'un dénivelé d'une centaine de mètres.

Fig.1: Localisation de la Source de Fourbanne

Fig. 2: Vue en perspective de la vallée du Doubs à la hauteur du village de Fourbanne

1.2 Géologie

- CONTEXTE GÉOLOGIQUE LOCAL

La source de Fourbanne se situe à l'intersection de structures géologiques régionales majeures, qui sont le faisceau bisontin, le plateau d'Ornans et les Avant-Monts (**Fig. 3**). La vallée du Doubs se situe au cœur du prolongement nord-est du faisceau bisontin, qui sépare le plateau d'Ornans de la zone des Avants Monts. Le faisceau bisontin est une zone plissée et faillée d'une largeur d'environ 5 km. Entre Besançon et Baume-Les-Dames, à la hauteur de la source de Fourbanne, le faisceau bisontin est réduit en une zone très étroite et très déformée.

Fig. 3: Schéma tectonique du massif du Jura montrant les principales unités tectoniques, ainsi que sa position par rapport aux grands ensembles géologiques voisins. (PHS : Plateau de Haute-Saône; IC : Ile Crémieu; AM : Avant-Monts; Fe : Ferrette; AR : Aiguilles Rouges; MB : Mont Blanc) (d'après Sommaruga, 1999)

La zone des Avant-Monts située au nord de vallée du Doubs, en amont de la source de Fourbanne, montre une structure géologique beaucoup moins tourmentée. Elle correspond à une structure tabulaire découpée par un réseau de failles méridiennes qui induisent une structure en système de horsts et grabens (**Fig. 4**). Ce découpage nord-sud des structures est caractéristique de la partie sud-est des plateaux de Haute-Saône (**Fig. 3**). La zone des Avant-Monts constitue donc une zone de transition structurale entre la zone externe jurassienne et la zone des plateaux de Haute-Saône. On passe d'une structure en plateau découpée par des faisceaux d'orientation SW-NE à une structure tabulaire ou sub-tabulaire découpée par des failles méridiennes (**Fig. 4**). Cette orientation nord-sud des structures tectoniques, se fait de manière progressive, elle est

déjà observable dans la partie nord de la zone externe. En effet, au sud de la vallée du Doubs, les accidents (prolongement de l'accident de Pontarlier et Mamirolle) qui découpent le plateau d'Ornans voient leur orientation initiale NE-SW, s'infléchir selon la direction nord-sud, avant de venir buter contre le Faisceau Bisontin.

Les unités structurales qui viennent d'être décrites s'organisent de la manière suivante : la zone des Avant-Monts est chevauchante sur la zone des plateaux de Haute-Saône, par l'intermédiaire de la faille de l'Ognon et la zone externe du massif jurassien chevauche les Avant-Monts au niveau du faisceau bisontin. La source de Fourbanne se situe donc entre deux accidents tectoniques majeurs de la bordure ouest du Jura.

Fig. 4:Schéma structural synthétique de la bordure nord-ouest du massif du jura

- **LE BASSIN VERSANT DE LA SOURCE DE FOURBANNE**

La source karstique de Fourbanne est une émergence de type vaclusien (ou artésien). L'exutoire se présente sous forme d'une vasque circulaire d'environ 20 mètres de diamètre et de 9 mètres de profondeur. La vasque est alimentée à sa base par un conduit karstique en interstrate de 3 à 4 mètres de large sur 1 à 1,5 mètres de hauteur. L'exploration sub-aquatique de ce conduit a débuté en 1971 et se poursuit encore aujourd'hui. La progression actuelle a permis de parcourir une distance de 500 mètres à partir du point d'entrée (**Fig. 5**).

Fig. 5 :Profil topographique en coupe et en plan du conduit karstique alimentant la source de Fourbanne

Les investigations géologiques de terrain réalisées durant cette étude se sont appuyées sur les données fournies par la carte géologique couplées à une étude des photos aériennes et du modèle numérique de terrain de la zone étudiée. Cet ensemble de données a ainsi permis de préciser les limites du bassin versant hydrogéologique de la source de Fourbanne présenté **figure 6**. Cette figure présente la carte hydrogéologique de la zone géographique située entre le Doubs (au sud) et l'Ognon (au nord), comprenant le bassin versant de la source de Fourbanne. Les terrains perméables et imperméables y sont représentés, ainsi que l'Aalénien qui marque la limite entre le Jurassique inférieur, globalement imperméable, et le Jurassique Moyen perméable. Il s'agit donc d'une carte interprétative simplifiée de la géologie du bassin versant de la source de Fourbanne. Un certain nombre de coupes géologiques a été réalisé de manière à caractériser la structure géologique de l'aquifère (**Fig.7**). L'emplacement des différentes coupes est représenté **figure 6**.

Fig. 6: Carte hydrogéologique d'une partie des Avants-Monts située au nord de Fourbanne, entre le Doubs et la vallée de l'Ognon.

Fig. 7: Coupes géologiques du bassin versant de la source de Fourbanne, (A) et (B) Coupes Nord-Sud, (C) Coupe NE-SW, (D) coupe Est-Ouest.

La limite septentrionale du bassin versant de la source de Fourbanne se situe à la latitude du Mont du Ciel. Elle correspond à la ligne de crête d'un relief en cuesta qui domine la vallée de l'Ognon (**Fig.6 et Fig.7 A, B**). Dans ce secteur, les terrains du Bajocien inférieur surmontent les marnes du Lias avec un léger pendage vers le sud. L'érosion du versant nord par les affluents de l'Ognon a formé un relief dissymétrique (**Fig.7 A, B**), avec des terrains marneux au nord qui

forment un talus de 160 mètres de dénivelé et une pente plus douce au sud en direction des villages de Verne et Luxiol.

La limite est du bassin versant est constituée par une faille de direction nord-sud. Cet accident traverse toute la carte selon une direction méridienne (faille de Autechaux). Elle met en contact, à la hauteur de Verne, les terrains du Trias à l'ouest avec les terrains du Jurassique moyen à l'est (**Fig. 6**). Plus au sud, à la hauteur du village d'Autechaux, cette faille met en contact les terrains du Jurassique moyen à l'ouest avec les terrains du Jurassique supérieur à l'est (**Fig. 7**). Des traçages réalisés par le bureau d'étude Science Environnement ont montré que l'eau s'infiltrant à l'est de cette faille était drainée, suivant le point d'injection choisi, soit en direction du nord-est et du village de Vergranne, soit vers le sud en direction de la source du Lonot.

La limite sud de l'aquifère correspond au relief du Framont situé au nord de Baume-les-Dames (**Fig. 6 et Fig. 7 A, B**). Ce relief est formé par un anticlinal à cœur marneux liasique. Ces marnes qui constituent la base de l'aquifère forment donc une barrière à l'écoulement de l'eau vers le sud (**Fig. 6 et Fig. 7 A, B**). La limite du bassin versant suit la crête de ce relief, l'eau s'infiltrant sur le flanc nord de l'anticlinal étant drainé en direction de Verne et Luxiol. Un traçage a confirmé cette direction d'écoulement. La limite méridionale se poursuit à l'ouest en suivant l'axe de l'anticlinal, jusqu'au village de Grosbois puis la source de Fourbanne (**Fig. 6**). Les terrains situés au sud de cette limite sont drainés par la source de la Baume Rousse.

La délimitation du bassin versant dans sa partie ouest est plus problématique. En effet, le secteur est couvert de forêts, et présente une géologie monotone avec des terrains du Jurassique Moyen qui affleurent sur une surface importante. Un traçage effectué par *Robbe (2001)* a montré une connexion entre les égouts du village de Breconchaux et la source du Briseux située plus en aval dans la vallée du Doubs. La coupe géologique présentée **figure 7 C** montre un abaissement de la base liasique de l'aquifère vers l'ouest qui est brutalement surélevée par la faille de Breconchaux. Ce secteur faillé forme donc une barrière au passage de l'eau vers l'est. La limite est du bassin versant est donc, d'après la coupe géologique (**Fig. 7 C**) et le traçage de Breconchaux, constituée par cette zone de faille (**Fig. 6**), qui relie les villages de Breconchaux, la Bretenière et Tallans. Le bassin versant ainsi délimité couvre une surface de 37 km².

- INSTRUMENTATION DE L'AQUIFÈRE

L'aquifère de la source de Fourbanne a été choisi pour son potentiel en terme d'instrumentation. En effet, l'entrée du système karstique est accessible au niveau des pertes. La zone non-saturée est accessible par le conduit karstique naturel. La source de Fourbanne est l'unique exutoire de l'aquifère et représente donc la sortie du système karstique. Ces trois points ont été équipés d'une station de mesure.

De manière à caractériser clairement le signal d'entrée de l'aquifère, la perte du Moulin de Verne (**Fig. 8**) a été équipée d'une sonde OTT Orphéus[®]. Cette sonde enregistre toutes les 15 minutes la hauteur d'eau, la conductivité électrique ainsi que la température de l'eau du ruisseau alimentant le conduit karstique principal de l'aquifère.

Afin de calibrer les modifications du signal hydraulique et hydrochimique, lors de la traversée de la zone non saturée de l'aquifère, une station de mesure a été installée dans le conduit karstique à l'aplomb du Village de Fontenotte. L'accès à cette partie du conduit karstique a été rendu possible par la réalisation, d'un puits vertical, par les spéléologues du *G.S.C.B.* Ce puits, d'une profondeur de 20 mètres, est le seul point d'accès possible au réseau karstique sans équipement de plongée. L'accès naturel au réseau karstique se fait par la grotte d'En-Versenne, cependant la visite de l'ensemble du réseau n'est possible qu'après le franchissement de

plusieurs siphons noyés qui imposent une progression sub-aquatique. La réalisation d'un puits artificiel par les spéléologues, permet maintenant d'accéder à la majeure partie du réseau souterrain sans équipement spécifique. Ce puits débouche dans la salle de Fontenotte (**Fig. 8**). Une station de mesure ISCO 4220[®] mesure l'évolution de la hauteur d'eau (sonde de pression à membrane) ainsi que les paramètres physicochimiques de la rivière souterraine (sonde YSI). Le point de mesure est installé à la côte -42 mètres, à la confluence de salle de Fontenotte et du conduit karstique principal (**Fig. 8**). Les mesures sont réalisées toutes les 15 minutes. Ce point de mesure permet d'étudier la distorsion du signal hydraulique et du signal hydrochimique dus à la traversée de la zone non-saturée et d'évaluer ainsi le rôle des différents champs de perméabilité dans la zone non-saturée. La maintenance technique de la station de mesure a été effectuée par les spéléologues pendant toute la durée de l'étude.

Le dernier point de mesure a été installé à la source de Fourbanne, dans la vasque de la source. Le matériel utilisé est une station ISCO 4230[®]. La hauteur d'eau est mesurée avec un système de bulle à bulle et les paramètres physico-chimiques de l'eau mesurés par une sonde multi paramètres YSI[®]. L'ensemble des capteurs est fixé sur un bras métallique qui plonge au centre de la vasque à l'aplomb du point de sortie du conduit karstique. Ainsi, les paramètres mesurés sont représentatifs de l'eau qui circule dans le conduit et ne sont pas biaisés par les phénomènes physico-chimiques pouvant intervenir dans la vasque. Ce point de mesure permet d'étudier les modifications induites par la traversée de la zone saturée de l'aquifère lorsqu'il est comparé aux signaux enregistrés à Fontenotte.

L'ensemble du dispositif qui vient d'être présenté a été installé à demeure sur les différents points de mesures, de manière à caractériser le comportement hydrogéologique de l'aquifère de Fourbanne à long terme et de disposer de données lors d'évènements climatiques ou géologiques particuliers. En parallèle, deux expérimentations de crue ont été réalisées. Durant ces investigations, le matériel déjà présent a été complété par d'autres dispositifs de mesure hydrogéologique.

Fig. 8: Dispositif de mesure mis en place dans l'aquifère de Fourbanne

2. Comportement hydraulique de l'aquifère de la source de Fourbanne

Le suivi hydraulique de l'aquifère de Fourbanne couplé à une analyse géologique de la partie aval du bassin versant de la source de Fourbanne, a mis en évidence la présence d'une zone saturée importante en amont de la source. Cette tranche saturée de l'aquifère s'est constituée à la faveur d'un abaissement tectonique de la base marneuse de l'aquifère (**Fig. 9**).

Fig. 9: (A) Topographie du toit du niveau marneux liasique (altitude en mètre NGF). (B) Bloc diagramme représentant la surface topographique et le toit des marnes liasiques au niveau du graben de la forêt de Grosbois

Le caractère saturé de cette portion de l'aquifère induit une désynchronisation du signal hydraulique et du signal chimique à la source quelles que soient les conditions hydrodynamiques générales de l'aquifère. Lors de l'arrivée de l'onde de crue à l'entrée de la zone saturée ; l'augmentation de piézométrie est immédiatement transférée à la source. Ceci implique à la source, la mobilisation d'eau présente dans l'aquifère depuis un épisode de recharge antérieur à l'épisode pluvieux qui a engendré la crue. La variation de niveau d'eau à la source est donc conditionnée par le temps de traversée de la zone non-saturée par l'onde de crue et non par la traversée de l'ensemble de l'aquifère. Ce type de comportement n'est pas habituel dans les aquifères karstiques de type jurassien comme celui de Fourbanne.

L'augmentation de la charge à l'entrée du conduit produit une inversion de gradient hydraulique et un blocage de l'écoulement en provenance des secteurs peu perméables. Lors de l'inversion de gradient hydraulique une alimentation des volumes peu perméables (VPP) par le conduit intervient. Alors qu'avant et après la crue, les volumes peu perméables situés au-dessus et sous le conduit sont drainés par ce dernier.

Nous allons à présent nous intéresser aux conséquences du contrôle hydraulique de la zone saturée par la zone non saturée. Puis déterminer les conséquences de ce mécanisme sur les relations hydrauliques et hydrochimiques entre le conduit et les volumes peu perméables qui l'entourent ?

3. Apport de l'hydrogéochimie dans la compréhension des relations entre les zones perméables et les zones peu perméables au sein des aquifères karstiques

3.1 Contexte hydrogéochimique régional

Les études hydrogéochimiques précédemment réalisées à l'échelle de la vallée du Doubs ont permis de différencier deux grands types d'aquifères à partir de l'analyse de leur signal hydrochimique. Ces deux grandes familles d'aquifères se sont développées dans les calcaires du Jurassique Moyen. Leur différenciation hydrochimique est le résultat de la structure tectonique particulière de la vallée du Doubs. En certains points de la vallée, notamment à l'aplomb du Doubs (Riv.), le Jurassique moyen se trouve sous l'altitude de la rivière et, il est surmonté par les terrains du Jurassique supérieur, non érodés. Ces aquifères sont accessibles par forage (**Fig. 10**). Dans d'autres zones géographiques de la vallée, notamment sur les bordures au niveau des Avants-Monts, le Jurassique moyen est à l'affleurement (**Fig. 10**). C'est le cas de l'aquifère de Fourbanne. L'étude à partir de plusieurs campagnes de prélèvements chimiques de ces deux types d'aquifères a permis la mise en évidence de deux signatures hydrochimiques différentes, qui impliquent deux comportements hydrogéologiques différents. On différencie des aquifères superficiels marqués par de fortes teneurs en éléments chimiques d'origine anthropique (liés à l'activité humaine) NO_3^- , et COT (Carbone Organique Total), et des aquifères profonds à faible teneur en éléments anthropiques et forte teneur en éléments caractéristiques de l'aquifère, marqueurs d'un temps de séjour prolongé de l'eau dans l'aquifère.

Fig. 10: Localisation des principales sources et forages de la vallée du Doubs représentés sur la carte géologique simplifiée (Charmoille, 2000; Mudry et al., 2002).

L'aquifère de Fourbanne est un aquifère superficiel. Les différentes campagnes hydrochimiques ont permis de réaliser un modèle du temps de séjour de l'eau de l'aquifère en fonction des teneurs du rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (indicateur du temps de séjour de l'eau dans l'aquifère) mesurées dans chaque famille d'aquifère (**Fig. 11**).

Fig. 11 Karst de la vallée du Doubs, rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ en fonction du tritium et du carbone 13 (Mudry et al., 2002).

Il apparaît que les aquifères drainés par des sources situées en bordure de la vallée du Doubs ont un temps de séjour moyen inférieur à 10 ans, et une signature en $\delta^{13}\text{C}$ marquée par l'influence du sol (**Fig.11**). Au contraire, les aquifères situés sous le niveau du Doubs, et dont l'aire de recharge est encore mal définie ont un temps de séjour élevé, supérieur à 10 ans pouvant atteindre 100 ans au niveau de certains forages, ainsi qu'une signature en $\delta^{13}\text{C}$ marquée par l'influence de l'aquifère (**Fig.11**). Les aquifères superficiels tels que celui de la source du Briseux ou de Fourbanne montrent à l'étiage un comportement hydrochimique se rapprochant parfois du groupe des aquifères profonds. Ceci n'est pas le signe d'échanges entre les deux types d'aquifères, mais la preuve de la présence, au sein d'aquifères superficiels, de zones de stockage

à long temps de séjour. Il faut noter qu'à Fourbanne l'influence anthropique de surface se fait moins ressentir qu'au niveau d'autres aquifères superficiels .

De par leur structure fortement hétérogène, les aquifères de type karstique sont parcourus par des eaux aux temps de séjours très contrastés. Les études précédemment réalisées sur l'aquifère de Fourbanne et les traçages présentés précédemment mettent clairement en évidence la coexistence d'eau à long temps de séjour avec des eaux à très courts temps de séjour, dans l'aquifère karstique de Fourbanne.

L'objectif du travail qui va suivre est de localiser ces différents volumes d'eau, de définir leur provenance ainsi que leur mode de circulation dans l'aquifère. Pour ce faire, nous allons utiliser l'hydrogéochimie.

3.2 Interactions entre les volumes perméables et les volumes peu perméables lors d'un épisode de crue au sein de l'aquifère karstique de Fourbanne

3.2.1 Protocole expérimental

L'expérimentation que nous allons maintenant commenter a été réalisée en Octobre 2002. L'épisode pluvieux étudié est précédé d'une crue importante (**Fig. 12**). L'expérimentation a donc été réalisée durant une période où l'aquifère affichait une tendance générale à la décrue perturbée par une réalimentation de l'aquifère.

Fig. 12: Suivi des hauteurs d'eau à Fontenotte et Fourbanne durant le mois d'octobre 2002

Chaque station de mesure permanente de l'aquifère a été complétée par l'installation d'un préleveur automatique d'eau, de manière à récolter des échantillons d'eau en vue d'une analyse de la teneur en éléments majeurs des eaux. Deux traçages artificiels ont été effectués. De la rhodamine a été injectée dans une doline en amont du village de Grosbois, dès l'arrivée des premières gouttes de pluie. De la fluorescéine a été injectée à la perte du moulin de Verne dès le début de l'élévation du niveau d'eau à ce point de mesure. Ainsi le volume d'eau infiltré durant la crue est marqué par le colorant. Ceci va nous permettre de suivre son évolution au cours de son transit à travers l'aquifère. Les prélèvements automatiques se font toutes les 15 minutes, au début de la crue, puis ont été progressivement espacés jusqu'à un prélèvement toutes les 4 heures pour le suivi à la source de Fourbanne. Sur chaque point de surveillance, des mesures manuelles des paramètres physico-chimiques ont été effectuées de manière à valider et compléter les mesures automatiques réalisées sur les trois points durant toutes l'expérimentation.

3.2.2 Résultats

Un comportement hydraulique particulier de la zone saturée a été mis en évidence au cours de l'étude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère de Fourbanne (*cf. 2. Comportement hydraulique de l'aquifère de la source de Fourbanne*). Nous allons maintenant relier ce comportement hydraulique avec l'analyse du signal hydrochimique enregistré à la source de Fourbanne.

- *Evolution des concentrations en nitrates*

Les données récoltées durant l'expérimentation sont présentées **Figure 13**. La courbe de suivi des concentrations en nitrates est fortement liée, dans sa première partie, avec la courbe de restitution de la rhodamine (**Fig. 13**). Les premières "bouffées" de nitrates enregistrées à Fourbanne proviennent de la zone non-saturée et la sortie de ces volumes d'eau à la source semble être soumise au contrôle hydraulique du conduit, de la même façon que la rhodamine (**en rouge sur la figure 13**).

Fig. 13 : Restitution des colorants et évolution des concentrations en NO₃⁻, Mg²⁺ de la hauteur d'eau et de la conductivité à la source.

L'eau transitant par le conduit, colorée par la fluorescéine, porte elle aussi un marquage en nitrates, mais les concentrations sont moins élevées que pour le signal de la zone d'infiltration diffuse. Ce signal correspond à la troisième vague de nitrates enregistrée à la source. Après le passage de trois volumes à fortes concentration en nitrates, la décrue s'amorce et les ions NO₃⁻ tendent à retrouver leur concentration moyenne mesurable à Fourbanne, qui se situe entre 16 mg.L⁻¹ et 17 mg.L⁻¹.

■ Evolution des concentrations en magnésium

Au début du suivi, la concentration en Mg²⁺ est de 2,7 mg.L⁻¹, elle augmente régulièrement jusqu'à 3 mg.L⁻¹ (**Fig. 13**). Cette augmentation fait suite à la forte dilution induite par la crue qui a précédé notre phase d'expérimentation (**Fig. 12**). La concentration en magnésium évolue pour retrouver sa concentration moyenne mesurable à la source. Cette phase est suivie d'un pic à 3,4 mg.L⁻¹, qui est synchrone avec la dernière concentration en rhodamine mesurée à Fourbanne. Cette forte valeur en Mg²⁺ se corrèle avec une chute des teneurs en nitrates. On assiste ensuite, à une baisse des concentrations en magnésium qui atteignent 3 mg.L⁻¹. Cette forte valeur en magnésium précède l'arrivée d'une nouvelle "bouffée" de nitrates correspondant à l'eau infiltrée à la perte de Verne.

■ Evolution du rapport Mg²⁺/Ca²⁺

La concentration maximale des ions Mg²⁺ mesurée à Fourbanne est synchrone avec la fin de restitution de la rhodamine et une chute des concentrations en nitrates (**Fig. 13**). L'inversion de gradient, mis en évidence, (*cf. 2. Comportement hydraulique de l'aquifère de la source de Fourbanne*), semble avoir une influence sur le signal chimique à la source. La **figure 14** présente l'évolution du rapport Mg²⁺/Ca²⁺ à la source pendant la Crue.

Fig. 14: Evolution du rapport Mg²⁺/Ca²⁺ à la source de Fourbanne, pendant l'épisode de crue

Deux pics négatifs (0,015 et 0,013) marquent le début de la crue. Ils correspondent à la restitution de la rhodamine et aux deux "bouffées" de nitrates. On mesure ensuite, un pic positif (0,018) entre le passage des deux ondes de crues (**Fig. 14**) synchrone avec l'arrêt de restitution de la rhodamine et la chute de concentrations des nitrates. Le rapport se stabilise ensuite à une valeur moyenne de 0,016 pour ensuite augmenter en fin de suivi et se stabiliser à une valeur moyenne de 0,017. L'analyse de l'évolution des concentrations en nitrates, en magnésium et du rapport Mg²⁺/Ca²⁺ va nous permettre d'enrichir l'analyse des relations entre le conduit et les VPP.

3.3.3 *Interprétation*

Avant de commencer l'interprétation croisée des signaux hydrauliques et hydrochimiques, il convient d'apporter quelques précisions quant aux conditions hydrodynamiques de réalisation de cette expérimentation. Le système étudié est en crue. Par conséquent, les volumes d'eau contenus dans les VPP n'auront pas une signature typique de zones peu perméables, avec une minéralisation importante caractérisée par des éléments chimiques caractéristiques d'un temps de séjour prolongé, étant donné que les VPP se trouvent en phase de recharge. Ajouté à ceci, le conduit, bien qu'il s'agisse d'une discontinuité extrêmement perméable, peut, selon les conditions hydrogéologiques, être porteur soit d'un signal caractérisant des eaux à long temps de séjour, soit d'un signal chimique caractéristique des eaux à faible temps de séjour. Le conduit transporte l'information chimique des compartiments de l'aquifère qui l'alimente.

La restitution de la rhodamine se fait en deux phases (**1 et 3 sur figure 15**), qui correspondent à des volumes d'eau riches en nitrates, faiblement concentrés en magnésium et donc à faible temps de séjour. Cette eau est contenue dans les zones moins perméables que le conduit, situées en position haute par rapport à ce dernier. Durant les phases 1 et 3, l'eau s'écoulant à la source est donc un mélange de l'eau du conduit et des VPP qui l'entourent.

Ces deux phases sont séparées par la sortie à la source, d'un volume d'eau à plus long temps de séjour moins concentré en nitrates et non coloré par la rhodamine (**phase 2 sur Figure 15**). Cette phase intermédiaire correspond à une augmentation de pression dans le conduit, qui induit une inversion de gradient hydraulique et restitue, à la source, une eau caractéristique de la zone saturée à plus long temps de séjour. Les venues d'eau des VPP sont stoppées et seule l'information hydrochimique transportée par le conduit arrive à la source. Cette information a été acquise par le conduit, avant le début de la crue, lors de la traversée de la première portion de la zone saturée.

Le même comportement se reproduit à la fin de la restitution de la rhodamine (**phase 4 sur Figure 15**). De l'eau à long temps de séjour, caractéristique de la zone saturée, est drainée à la source. Une nouvelle inversion de gradient intervient, induite par la seconde onde de crue.

Le passage de la phase 4 à 5 est particulier. L'inversion de gradient se poursuit, au début de la phase 5, mais cette fois de l'eau à court temps de séjour est drainée par le conduit. La phase 5 correspond à la sortie à la source de l'eau infiltrée aux pertes. En effet, la conductivité diminue, la fluorescéine est restituée, les concentrations en Mg^{2+} diminuent et les nitrates augmentent. Le temps de séjour (rapport Mg^{2+}/Ca^{2+}) de ce volume d'eau, est plus important que celui infiltré en début de crue. L'eau colorée par la rhodamine a séjourné moins longtemps dans l'aquifère que l'eau infiltrée aux pertes, d'où la différence du rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} .

Cette arrivée d'eau se confond avec une nouvelle inversion de gradient, induite par le deuxième épisode pluvieux. L'eau présente à cet instant à l'exutoire provient donc exclusivement du conduit, les autres arrivées d'eau étant bloquées par l'inversion de gradient. Les nitrates mesurés à la source correspondent donc aux nitrates infiltrés aux pertes. La baisse des concentrations en magnésium s'explique par la succession dans le conduit de volumes d'eau caractéristiques de la zone saturée (phase 4), qui laissent place à l'eau infiltrée aux pertes (phase 5). Ceci est confirmé par l'augmentation immédiate des teneurs en magnésium lorsque la perturbation provoquée par la crue se termine (**cf. conductivité sur Figure 15**). Le magnésium durant la phase 6, tend à retrouver la concentration moyenne mesurable à Fourbanne hors période de crue, qui se situe autour de $4,2 \text{ mg.L}^{-1}$. La source retrouve son régime d'étiage.

Fig. 15 Détermination de l'origine de l'eau à la source à partir du suivi hydrochimique et hydraulique de la source de Fourbanne.

3.3.4 Synthèse

L'analyse hydrodynamique et hydrochimique couplée des interactions entre le conduit et les VPP se révèle complexe. En effet, cette interprétation fait appel à l'ensemble des mécanismes hydrauliques et hydrochimiques mis en évidence à Fourbanne. La relation hydrogéochimique entre le conduit et les zones peu perméables qui l'entourent peut être résumée ainsi (**Fig.15 et Fig. 16**) :

- **Phase 1** : Le conduit draine la zone saturée et est alimenté par les VPP, eux-mêmes alimentés par l'infiltration dans la zone non-saturée.
- **Phase 2** : Première inversion de gradient, seul le signal caractéristique de la zone saturée transporté par le conduit arrive à la source. L'écoulement des VPP est bloqué.
- **Phase 3** : Fin de la première inversion de gradient liée au passage de la première onde de crue. Le conduit est de nouveau alimenté par les VPP.
- **Phase 4** : La seconde inversion de gradient débute. Les venues d'eau des VPP sont bloquées. Dans un premier temps, le volume d'eau drainé par le conduit est caractéristique de la zone saturée (temps de séjour important, faibles concentrations en nitrates). La seconde phase correspond au transport par le conduit des volumes d'eau infiltrés aux pertes.
- **Phase 5** : L'eau infiltrée aux pertes, au début de la crue, arrive à la source. La seconde inversion de gradient se poursuit. Le signal chimique de l'eau infiltrée aux pertes n'est pas perturbé par les VPP.
- **Phase 6** : La source retrouve son régime d'étiage.

Fig. 16 : Modèle conceptuel des interactions conduit/VPP durant l'épisode de crue

3.3.5 Influence sur le comportement des nitrates

Il apparaît donc que les mécanismes hydrauliques intervenants dans la zone saturée de l'aquifère de Fourbanne ont un impact sur l'origine de l'eau s'écoulant à la source durant les épisodes de crue.

Ce comportement particulier a des conséquences sur le transit de nitrates au sein de l'aquifère de Fourbanne. Le premier paramètre qui influence la concentration en nitrates à la source de Fourbanne est le mode d'infiltration en surface. Dans les zones d'infiltration directe comme les pertes, l'eau va transiter au sein des zones les plus perméables comme les conduits. La **figure 17** présente l'évolution des concentrations en nitrates dans le conduit principal de l'amont de l'aquifère jusqu'à la source. On note une diminution de la concentration en nitrates tout au long du cheminement de la masse d'eau dans le réseau. Les nitrates sont donc soumis à une dilution d'un point de mesure à l'autre. Cette dilution est la conséquence de l'important volume d'eau déjà présent dans l'aquifère (entre Verne et Fontenotte) et notamment lors du passage dans la zone saturée (entre Fontenotte et Fourbanne). Ce résultat montre donc que l'infiltration de nitrates aux pertes a un effet « réduit » à la source du fait de la traversée de l'aquifère, et des dilutions qui en résultent.

Fig. 17: Concentration en NO₃⁻ de l'eau colorée par la fluorescéine lors de son transit à travers l'aquifère.

Au contraire l'infiltration diffuse induit un transit différent des nitrates à la source avec un impact accru sur les concentrations mesurées à la source. Les inversions de gradient qui affectent la zone saturée de l'aquifère de Fourbanne exercent un contrôle sur le transit des nitrates stockés préférentiellement dans les discontinuités peu perméables de la zone non saturée, lors de leur arrivée à l'interface zone non-saturée/zone saturée. Durant la phase d'infiltration suivante, ces éléments vont être lixiviés et drainés vers la zone saturée. Une fois parvenus dans la zone saturée, ces volumes d'eaux sont restitués à la source sous forme de «bouffées» très concentrées.

Ce résultat met en exergue qu'une infiltration de pollution dans une zone de perte sera, en terme de gestion de la pollution, moins dommageable pour l'aquifère qu'une infiltration de cette même pollution dans une zone d'infiltration diffuse. Les impacts seront réduits en intensité et en durée dans le cas d'une infiltration dans une zone de perte.

4. Apport de l'étude dans la compréhension des mécanismes de déformation des aquifères karstiques

4.1 L'évènement sismique

Le lundi 23 février 2004 à 18h31 (heure locale) un séisme de magnitude 5.1 M_L (<http://renass.u-strasbr.fr>) s'est produit dans la vallée du Doubs entre Baume-les-Dames et Besançon (47.3°N, 6.3°E) (**Fig. 1. et Fig.18 A**). Ce séisme a été ressenti très largement en dehors du Doubs dans tout l'Est de la France, en Suisse et dans le Sud-Ouest de l'Allemagne. Le massif du Jura est une région à faible sismicité notamment sur sa bordure ouest, ce séisme constitue donc un évènement géologique rare pour la région.

Une construction géométrique basée sur la localisation épacentrale, la profondeur focale et le mécanisme au foyer (<http://renass.u-strasbr.fr>), nous montre que le prolongement en surface de la faille ayant engendré la rupture sismique correspond à la faille de l'Ognon, qui marque la limite Nord-Ouest de l'aquifère de Fourbanne (**Fig. 18 A**).

Fig. 18: (A) Localisation géographique de l'épicentre et de l'aquifère de Fourbanne au niveau de la bordure Ouest du massif du Jura. (B) Localisation de l'épicentre, de l'hypocentre et du bassin versant de la source de Fourbanne, dans leur contexte géologique et structural

4.2 Le signal hydrochimique

Entre minuit et 01h00 le 24 février, le dispositif de mesure installé à la source de Fourbanne enregistre le début d'une augmentation anormale de la minéralisation de l'eau (**Fig. 19**). Cette augmentation de conductivité électrique de $50\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \pm 1\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ peut être qualifiée d'anormale étant donné l'historique de mesure que nous possédons à la source de Fourbanne et les connaissances acquises au cours de l'étude de ce système karstique. En effet, le comportement de l'aquifère vis-à-vis des évènements hydrométéorologiques est bien contraint et il paraît difficile d'expliquer cette augmentation brutale de minéralisation de l'eau par une interprétation hydrogéologique classique. Cette augmentation de conductivité n'est accompagnée d'aucune variation synchrone des autres paramètres surveillés (hauteur d'eau, température) permettant d'expliquer classiquement une variation de minéralisation.

Fig. 19: (A) Suivi des précipitations (a), de la hauteur d'eau (b) et de la conductivité électrique (c) à la station de mesure de Fontenotte (zone non-saturée). (B) Suivi des précipitations (a), de la hauteur d'eau (b) et de la conductivité électrique (c) à la station de mesure de Fourbanne (Zone saturée) (Charmoille et al., 2005).

Il est donc tentant de faire un lien entre l'évènement sismique, et l'augmentation de minéralisation de l'eau de la source de Fourbanne. L'analyse des enregistrements des stations de Fontenotte et Fourbanne révèle la présence d'une augmentation de conductivité électrique de l'eau sur les deux points de mesure, sans lien hydrogéologique avec les évènements météorologiques et le comportement hydrodynamique de l'aquifère. Il faut préciser que la température montre, sur les deux points de mesure, une évolution en accord avec l'évolution des

hauteurs d'eau, ce qui ne permet donc pas de corrélérer ce paramètre avec la conductivité électrique de l'eau.

Nous attribuons donc l'augmentation de conductivité électrique, enregistrée à Fourbanne et Fontenotte, à l'évènement sismique qui précède de quelques heures ces augmentations de minéralisation.

4.3 Interprétation hydrogéologique

A la suite du séisme du 23/02/04, une augmentation de $50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ de la conductivité électrique a été enregistrée à la source de Fourbanne. La minéralisation ne retrouvera sa valeur initiale que 12 jours plus tard. Lors du fonctionnement hydrogéologique normal de l'aquifère de Fourbanne, le signal de conductivité enregistré à la source correspond, avec un décalage temporel et une distorsion due à la traversée de la zone saturée, à celui enregistré à Fontenotte. Après le séisme, les deux enregistrements de Fontenotte et Fourbanne diffèrent significativement (**Fig. 19**). Nous en déduisons donc que l'augmentation de conductivité mesurée à la source trouve son origine dans la zone saturée de l'aquifère entre Fontenotte et Fourbanne. Cette augmentation de minéralisation ne peut pas être expliquée par des interprétations hydrogéologiques classiques. En effet, une augmentation de conductivité significative ($50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et durable (12 jours) comme celle mesurée après le séisme (**Fig. 20**), ne peut être attribuée à une infiltration d'eau de pluie ou une fonte de neige.

Fig. 20: Détail du signal de conductivité post-sismique enregistré à la source de Fourbanne (Charmoille et al., 2005)

L'arrivée d'eaux profondes en surface peut être écartée. En effet aucune augmentation de température n'a été mesurée à la source. Les études réalisées à l'échelle de la vallée du Doubs montrent que l'eau prélevée dans les forages à 150 m de profondeur sont de 4 à 6°C plus élevées en température au printemps et en été. Une arrivée d'eau d'une profondeur comparable ou supérieure, devrait donc s'accompagner d'une augmentation de température, synchrone avec l'augmentation de conductivité électrique.

Les mesures réalisées sur d'autres sites au cours de cette étude (*Charmoille, 2005*) montrent que le signal enregistré à Fourbanne est caractéristique d'une alimentation des secteurs perméables par des zones moins perméables. Les volumes d'eau sont contenus dans les zones peu perméables de l'aquifère. Les discontinuités peu perméables de la zone saturée de l'aquifère sont une zone privilégiée de stockage de l'eau. L'augmentation de conductivité mesurée à Fourbanne reflète donc d'une participation post-sismique plus importante des zones peu perméables saturées à l'alimentation du conduit.

La même interprétation est avancée pour l'augmentation de $42 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ enregistrée à la station de Fontenotte qui écourte la dilution induite par l'épisode d'infiltration (**Fig. 19**). Cependant, l'augmentation de conductivité est beaucoup moins marquée qu'à Fourbanne. Ceci résulte de la faible tranche de zone saturée présente à Fontenotte. En effet, ce point de mesure est situé à la base de la zone non saturée. La rivière souterraine où sont réalisées les mesures s'écoule dans le conduit karstique et surmonte une faible tranche de zone saturée étant donné la profondeur du Lias imperméable dans ce secteur. Ainsi, la contribution de la zone saturée à l'alimentation de la

rivière souterraine est réduite. Après le séisme, il en résulte une augmentation de conductivité moins marquée qu'à la station de Fourbanne (**Fig. 19**).

L'augmentation de la part des zones moins perméables à l'alimentation du conduit est confirmée par les mesures réalisées quelques heures après le séisme (**Fig. 20**). En effet, on mesure des diminutions ponctuelles de minéralisation, incohérentes avec le reste de l'enregistrement (**Fig. 20**). Ces variations sont le résultat d'un blocage de l'écoulement des zones peu perméables entourant le conduit. Une inversion de gradient est produite dans la zone saturée par l'arrivée du volume d'eau infiltré le 21/02/04 et le 22/02/04. L'augmentation de hauteur d'eau à Fourbanne est synchrone avec ces chutes ponctuelles de conductivité (**Fig. 19 B**). Etant donné la faible augmentation de hauteur d'eau, le blocage des zones entourant le conduit n'est pas total. Par conséquent, seuls quelques volumes d'eau, faiblement minéralisés, parviennent à la source de manière dispersée. Pendant cette période d'inversion de gradient, l'eau expulsée par le séisme n'alimente pas le conduit, ce qui retarde le début de l'augmentation importante de conductivité. Ces chutes ponctuelles de minéralisation, au début du signal post-sismique, confirment l'augmentation, après le séisme, de la part des zones peu perméables dans l'alimentation du conduit.

4.4 Mécanisme de déformation à l'origine du signal post-sismique

Une bibliographie très riche a été étudiée afin d'identifier le mécanisme découlant du séisme et ayant pu engendrer une mobilisation de l'eau contenue dans les volumes peu perméables de l'aquifère de Fourbanne. *Les travaux de Muir-Wood et King (1993)* montrent que le modèle de déformation élastique co-sismique peut expliquer une grande variété de réponses hydrogéologiques d'origine sismique. Ils suggèrent que, suivant l'orientation des discontinuités (**Fig. 21**), les fractures préexistantes vont se fermer ou s'ouvrir en réponse à la variation de contrainte de la croûte terrestre, associée au cycle sismique. Ce scénario peut être appliqué à l'aquifère de Fourbanne et nous le jugeons le plus approprié pour expliquer le signal hydrogéochimique post-sismique enregistré à Fourbanne. Les mécanismes géologiques qui sont intervenus avant, pendant et après le séisme au niveau de l'aquifère de Fourbanne peuvent être résumés comme suit :

Fig. 21: Effet de la déformation élastique co-sismique sur la perméabilité de fractures verticales et horizontales en fonction du mécanisme de la faille (d'après Muir-Wood et King, 1993).

Pendant la période inter-sismique, l'eau est stockée dans les fractures peu perméables. Lorsque le séisme intervient, l'eau s'écoule des discontinuités peu perméables, dont la perméabilité a été améliorée par le relâchement des contraintes de la croûte terrestre, ce qui induit une augmentation de minéralisation à la source. Le retour de la conductivité électrique à sa valeur initiale n'implique pas un retour des discontinuités peu perméables à leur ouverture hydraulique initiale. En effet, l'eau à long temps de séjour présente dans ces discontinuités a pu être remplacée par de l'eau moins minéralisée récemment infiltrée dans l'aquifère, d'où la persistance du signal enregistré à la source de Fourbanne durant 12 jours.

A la suite du séisme de Besançon (23/02/04), une augmentation de minéralisation post-sismique a été enregistrée à la source de Fourbanne. Cette réponse hydrochimique est interprétée comme le résultat d'une amélioration de perméabilité des discontinuités peu perméables présentes dans

la zone saturée. Cette amélioration de perméabilité a induit une alimentation plus importante du conduit (30% en plus) par les zones peu perméables de la zone saturée. Le volume excédentaire en provenance des zones peu perméables, par rapport à un fonctionnement normal de l'aquifère, a été estimé à $4,3.10^3 \text{ m}^3$.

Conclusion générale

Cette étude a permis de décomposer les comportements hydrauliques, hydrochimiques et mécaniques respectifs des volumes perméables et peu perméables des aquifères karstiques. Ceci a été rendu possible grâce à l'approche pluriscale adoptée. L'ensemble des connaissances acquises à différentes échelles ont été mises en application et ont été nécessaires à l'interprétation d'un signal post-sismique enregistré à la source de Fourbanne.

- *Rôle des contrastes de perméabilité dans le transit des polluants au sein de l'aquifère*

Suivant le type d'infiltration de l'eau en surface, le transit des volumes d'eau dans la zone non saturée est différent. L'eau infiltrée aux pertes transite dans des discontinuités très perméables et subit peu de modifications lors de son transit à travers la zone non saturée. Au contraire, une partie des volumes d'eau infiltrés de manière diffuse sont préférentiellement stockés dans les discontinuités peu perméables de la zone non saturée, lors de leur arrivée à l'interface zone non-saturée/zone saturée. Un stockage des éléments anthropiques comme les nitrates va avoir lieu (**Fig. 22**). Durant la phase d'infiltration suivante, ces éléments vont être lixiviés et drainés vers la zone saturée. Une fois parvenues dans la zone saturée, ces volumes d'eaux vont se mélanger dans des proportions variables suivant l'état hydraulique des discontinuités les plus perméables. Cet état hydraulique est lui-même contrôlé par la vitesse de l'eau dans les discontinuités les plus perméables de la zone non saturée (**Fig. 22**).

Fig. 22: Modèle conceptuel pluriscale présentant les principaux résultats mis en évidence.

- *Rôle des contrastes de perméabilité dans les effets hydro-méca-chimiques au sein de la zone saturée*

Dans la zone noyée, les discontinuités peu perméables et perméables réagissent de manière différente aux déformations d'origine mécanique (**Fig. 22**). Ceci est lié au rapport de l'ouverture hydraulique sur la déformation. Les discontinuités peu perméables ont une ouverture hydraulique faible, une déformation qui n'a pas d'effet sur l'écoulement dans les discontinuités perméables modifie donc l'écoulement des discontinuités les moins perméables. En terme de réponse hydraulique à la déformation, les discontinuités peu perméables sont donc beaucoup plus réactives à une déformation de l'aquifère. Cette déformation peut avoir plusieurs origines, et notamment une origine interne à l'aquifère liée à la déformation hydromécanique des discontinuités les plus perméables, lors de leur mise en charge.

Cette caractéristique a permis la détection d'un changement de perméabilité des zones les moins perméables de l'aquifère à la suite d'un séisme. En effet, les zones peu perméables ayant une signature chimique caractéristique, une modification de leurs caractéristiques hydrauliques, suite à une déformation, marque chimiquement l'eau s'écoulant dans le réservoir.

Ainsi, l'outil hydrochimique apparaît être d'une résolution suffisante pour détecter des variations de perméabilité résultant d'une déformation de l'aquifère. Cette déformation peut avoir différentes origines. Dans notre cas, un lien clair a été établi entre une variation de perméabilité des volumes peu perméables et les changements de contrainte liés au cycle sismique.

Il apparaît au terme de cette étude que le signal chimique de l'eau drainée à l'exutoire d'un aquifère est un enregistrement des modifications hydrauliques ou mécaniques qui ont accompagné son transit à travers l'aquifère. L'étude hydrochimique de cet enregistrement permet de remonter aux processus intervenants au cœur de l'aquifère.

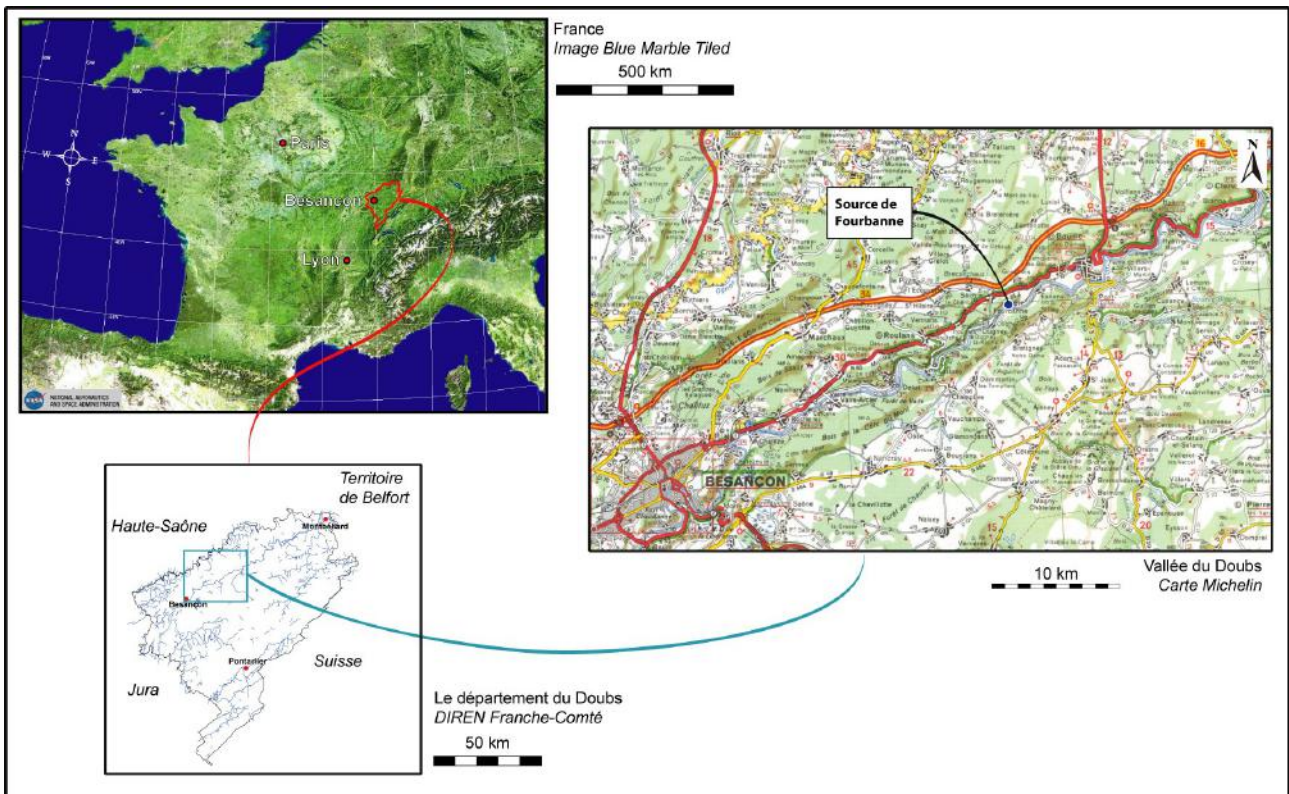


Fig.1: Localisation de la Source de Fourbanne

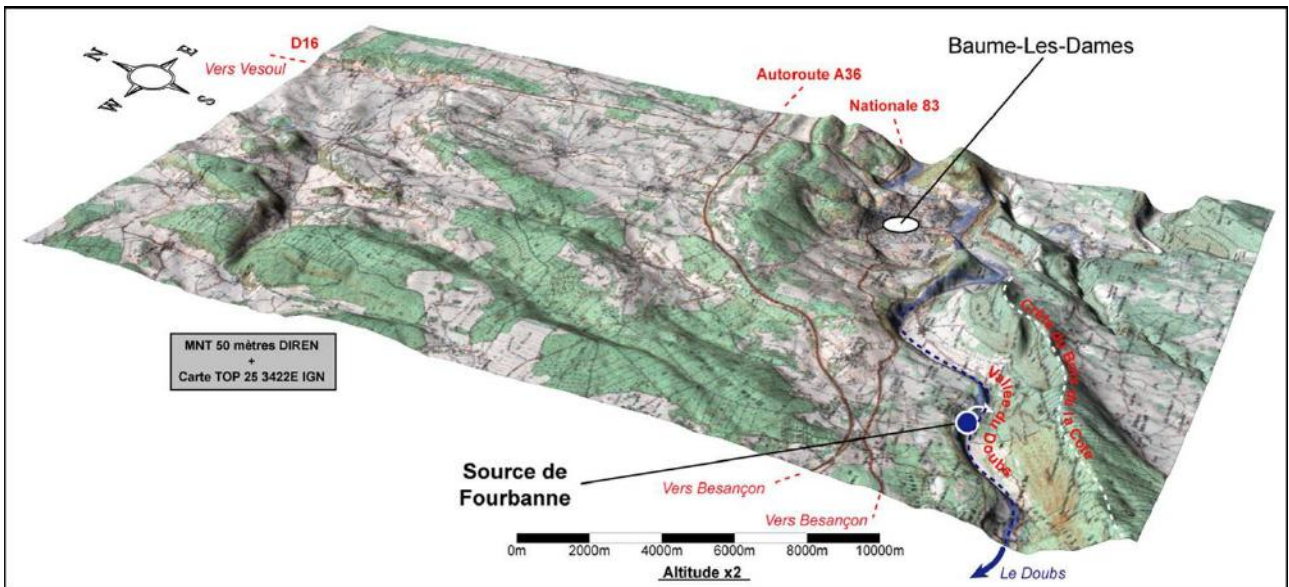


Fig. 2: Vue en perspective de la vallée du Doubs à la hauteur du village de Fourbanne

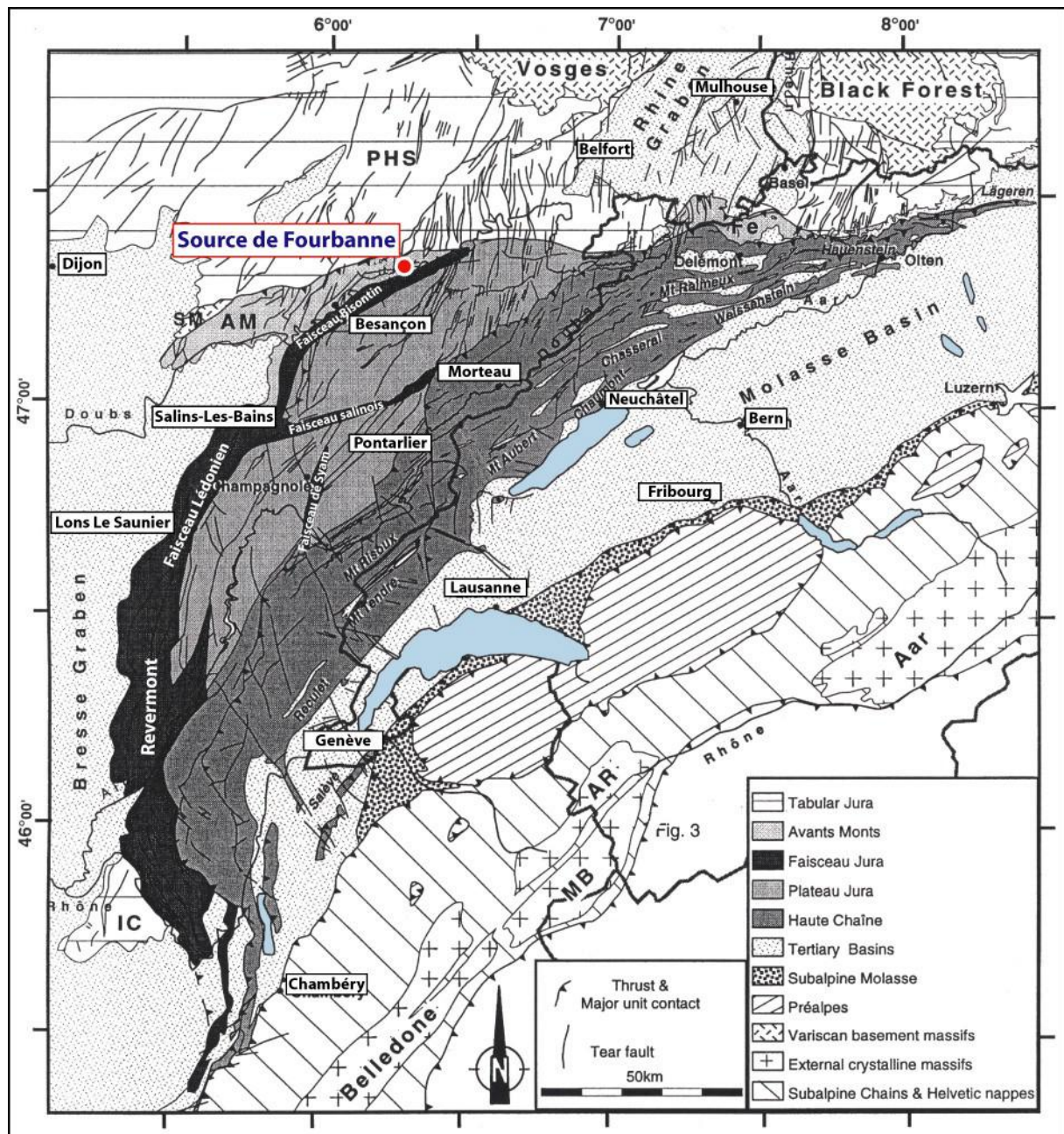


Fig. 3: Schéma tectonique du massif du Jura montrant les principales unités tectoniques, ainsi que sa position par rapport aux grands ensembles géologiques voisins. (PHS : Plateau de Haute-Saône; IC : Ile Crémieu; AM : Avant-Monts; Fe : Ferrette; AR : Aiguilles Rouges; MB : Mont Blanc) (d'après Sommaruga, 1999)

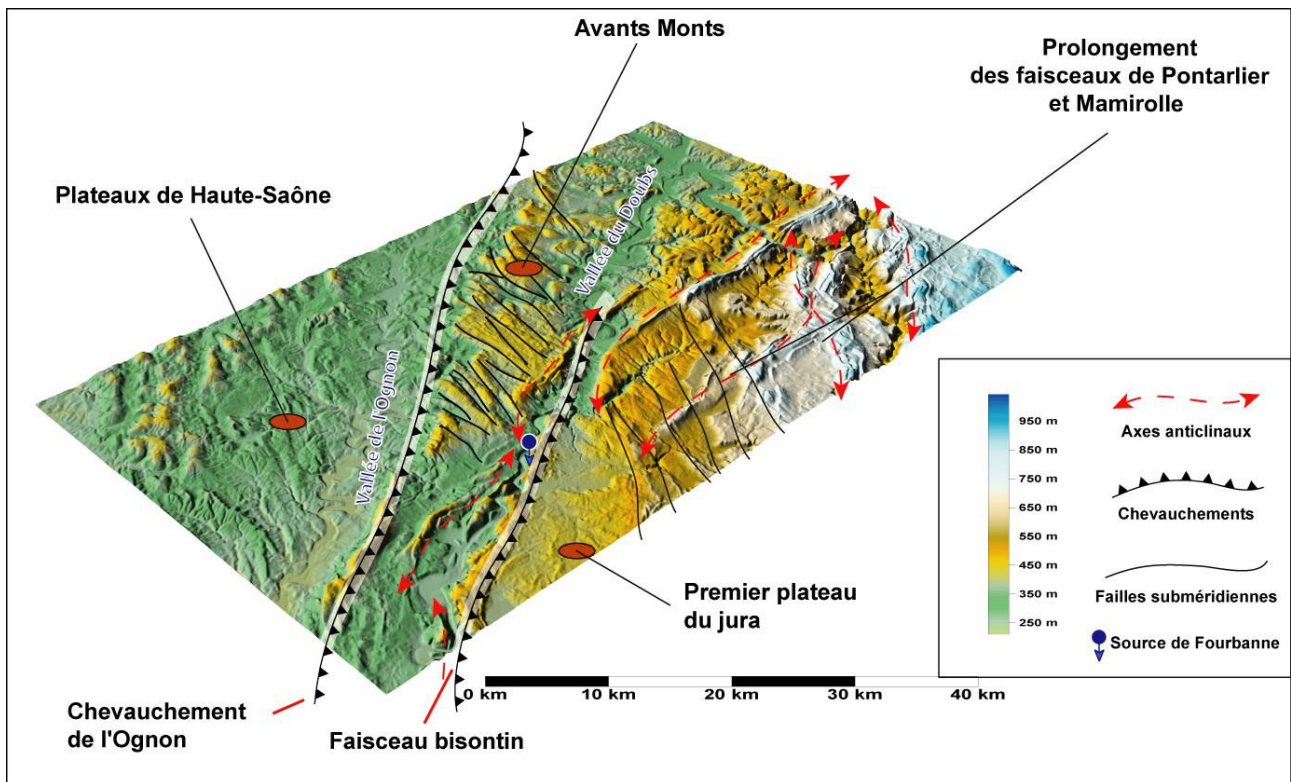


Fig. 4: Schéma structural synthétique de la bordure nord-ouest du massif du Jura

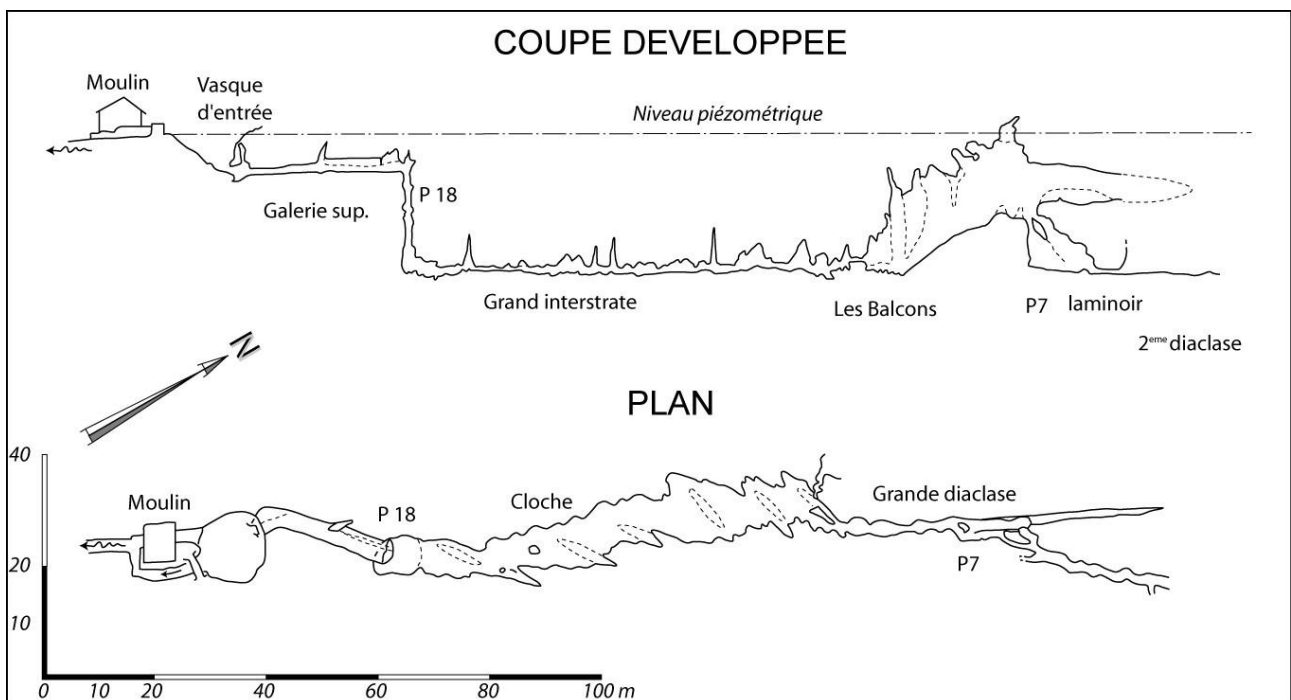


Fig. 5 : Profil topographique en coupe et en plan du conduit karstique alimentant la source de Fourbanne

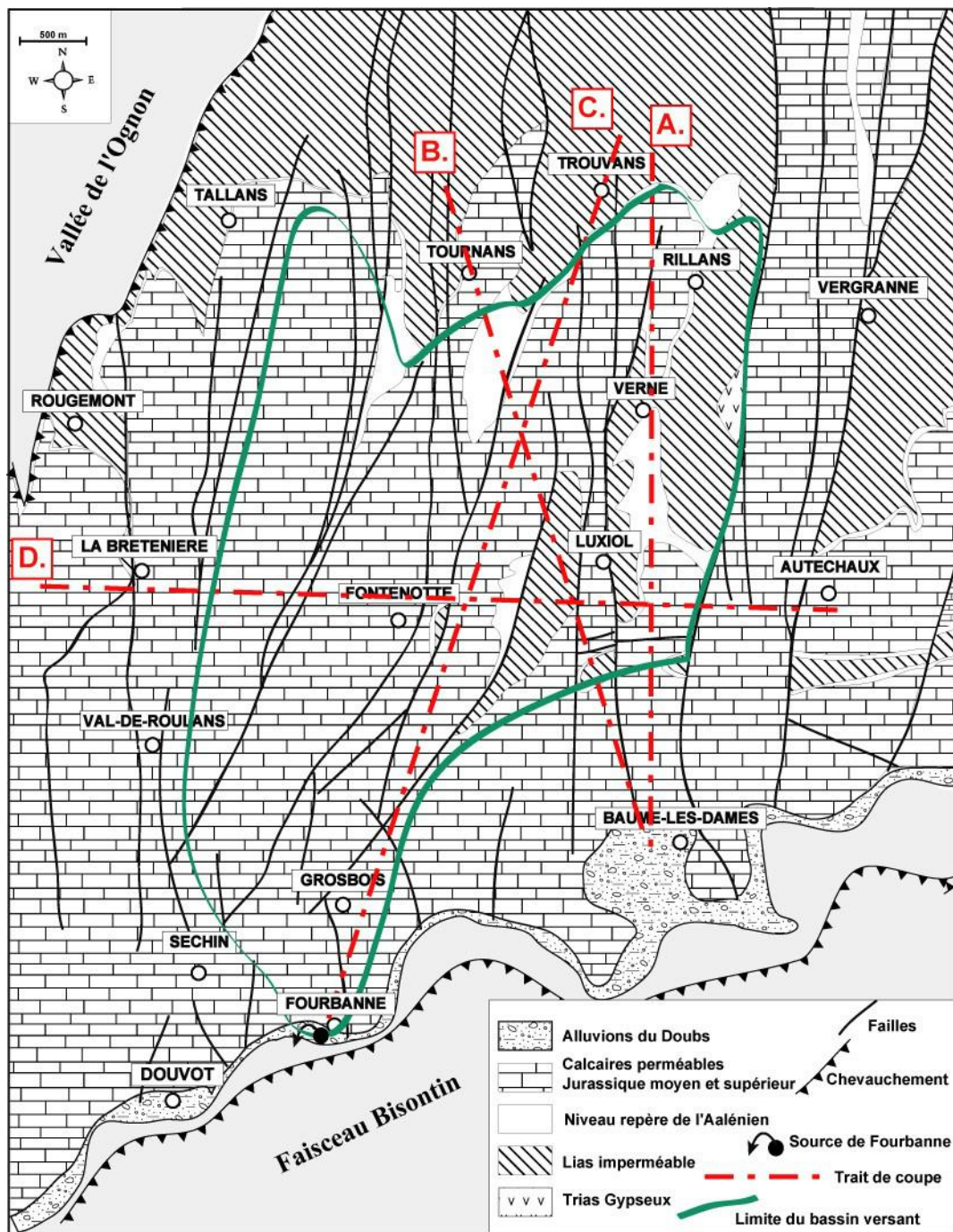


Fig. 6: Carte hydrogéologique d'une partie des Avants-Monts située au nord de Fourbanne, entre le Doubs et la vallée de l'Ognon.

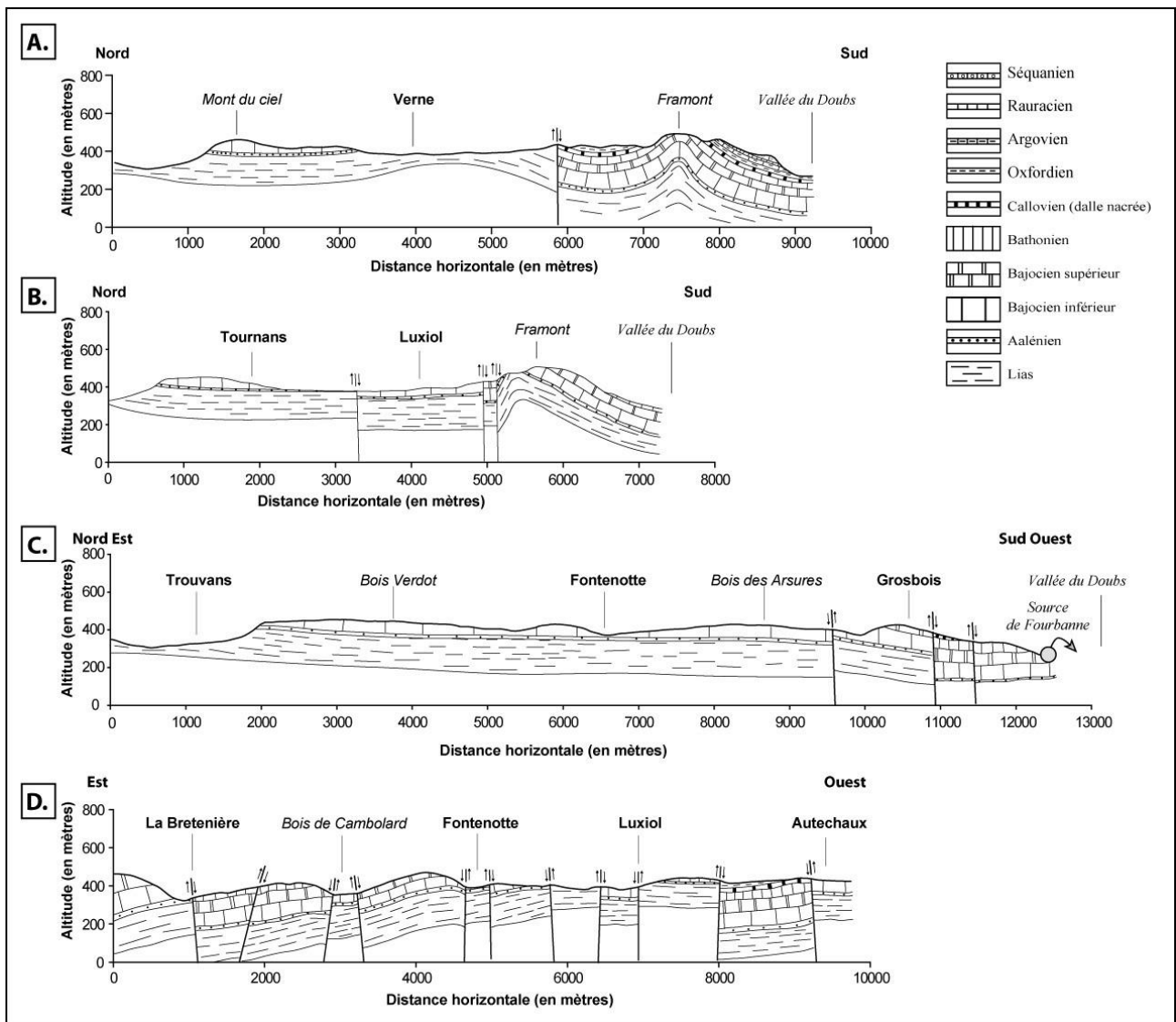


Fig. 7: Coupes géologiques du bassin versant de la source de Fourbanne, (A) et (B) Coupes Nord-Sud, (C) Coupe NE-SW, (D) coupe Est-Ouest.

Fig. 8: Dispositif de mesure mis en place dans l'aquifère de Fourbanne

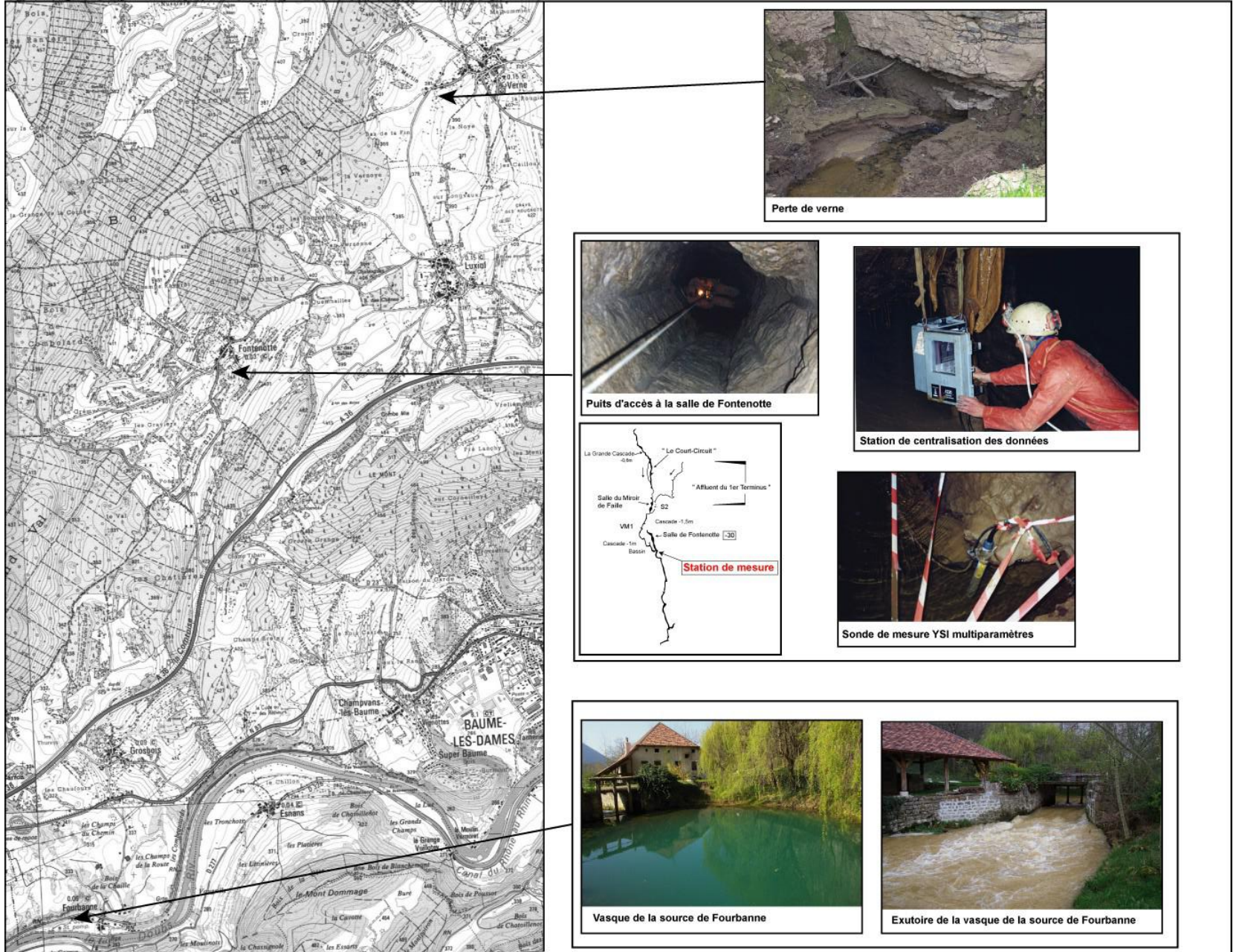
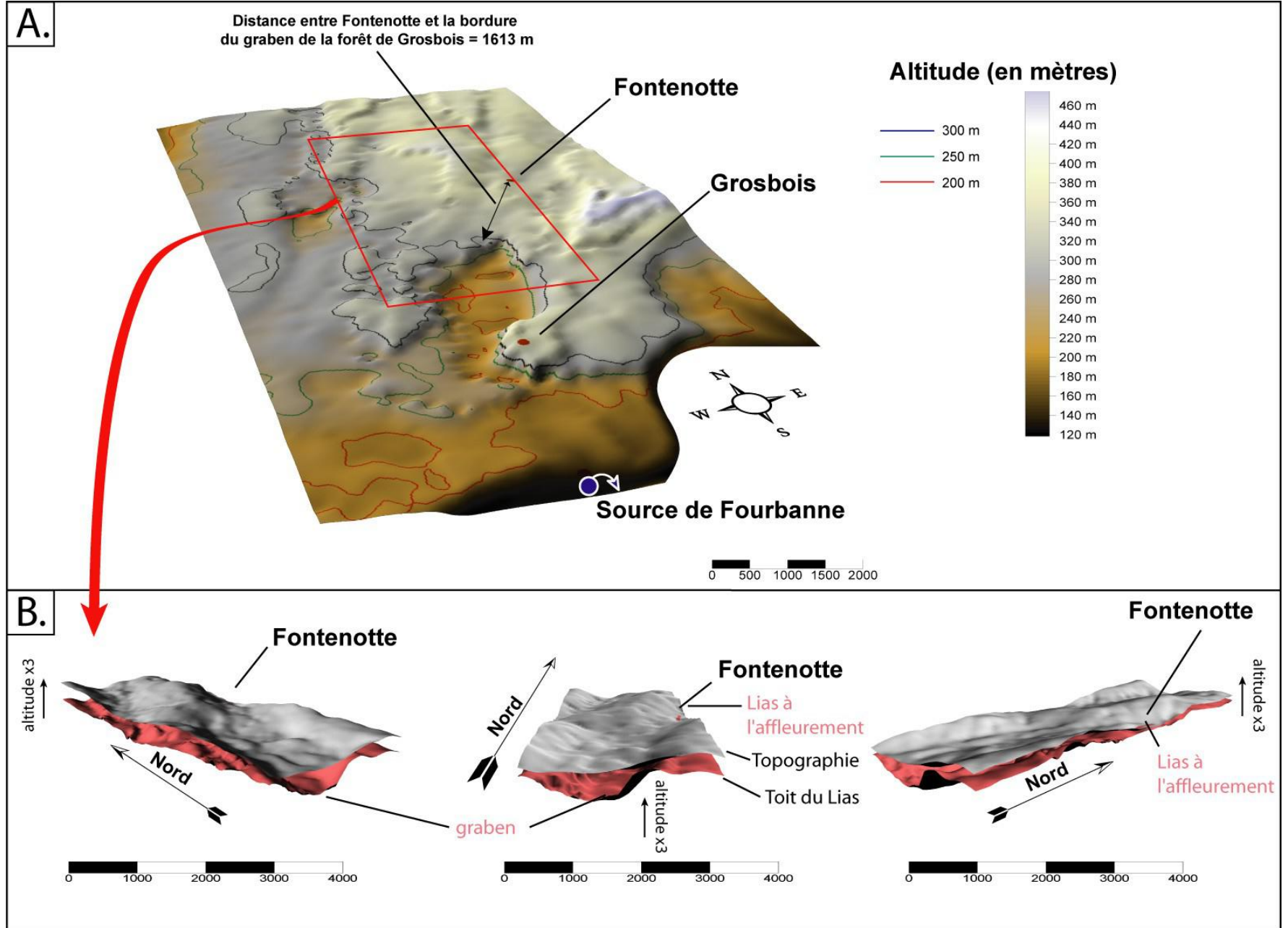


Fig. 9: (A) Topographie du toit du niveau marneux liasique (altitude en mètre NGF). (B) Bloc diagramme représentant la surface topographique et le toit des marnes liasiques au niveau du graben de la forêt de Grosbois



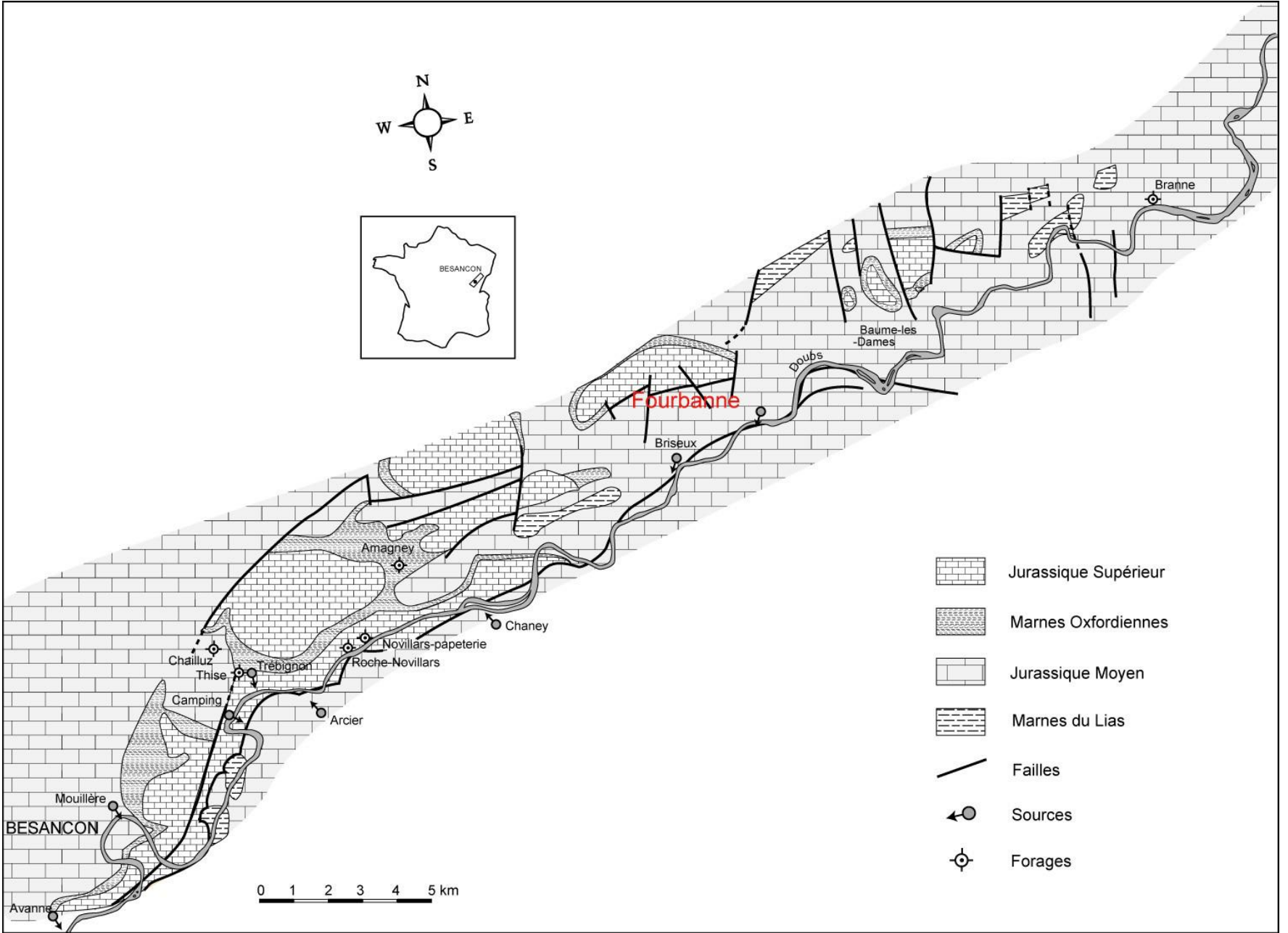


Fig. 10: Localisation des principales sources et forages de la vallée du Doubs représentés sur la carte géologique simplifiée (Charnoille, 2000; Mudry et al., 2002).

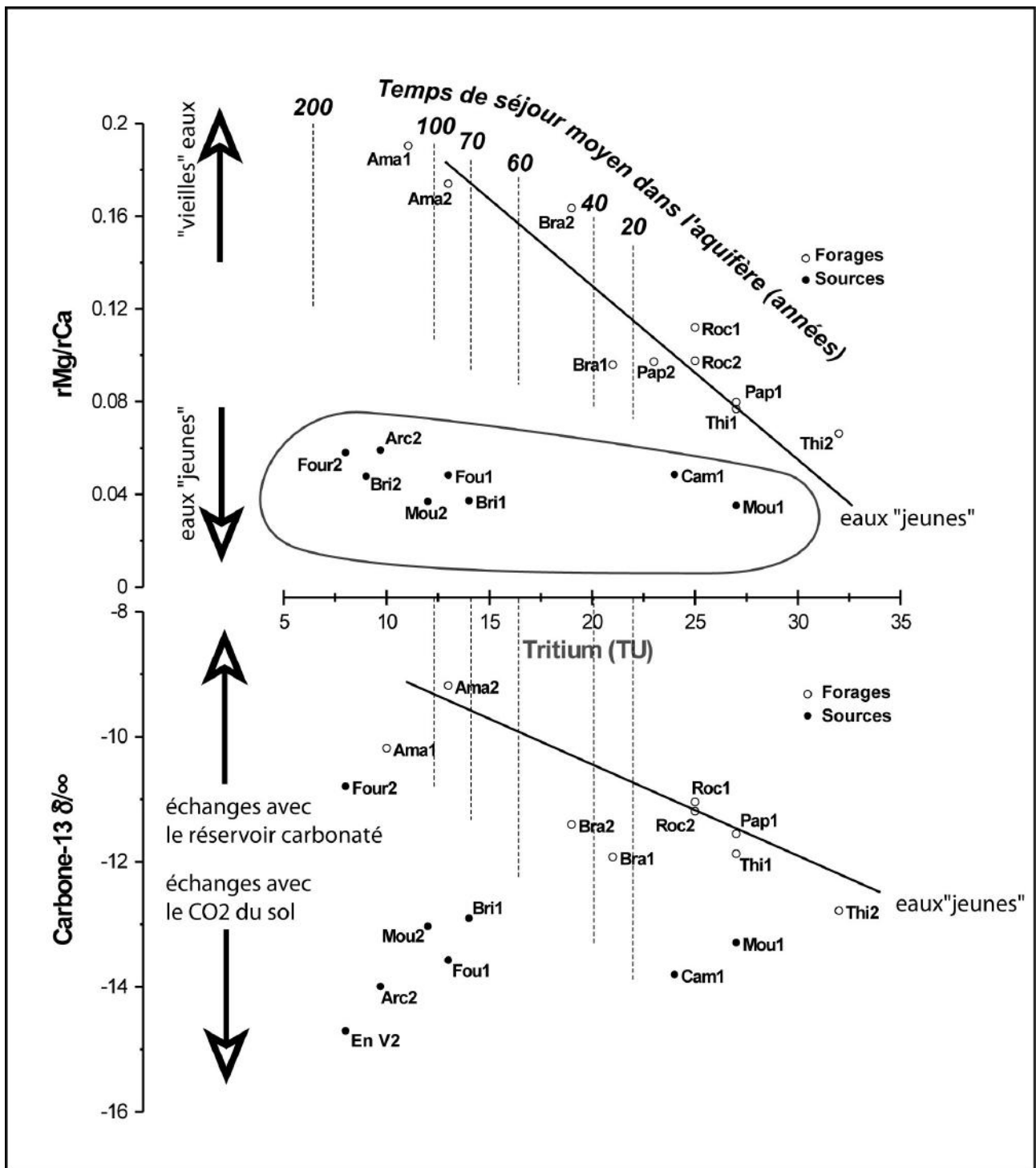


Fig. 11 Karst de la vallée du Doubs, rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} en fonction du tritium et du carbone 13 (Mudry et al., 2002).

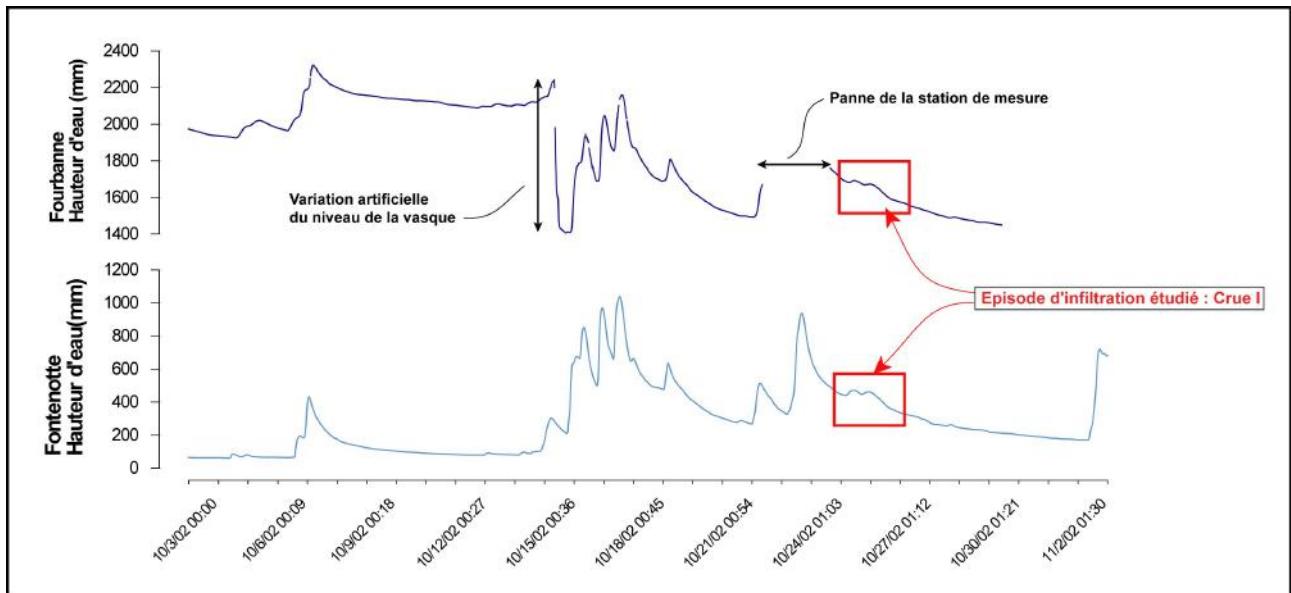


Fig. 12: Suivi des hauteurs d'eau à Fontenotte et Fourbanne durant le mois d'octobre 2002

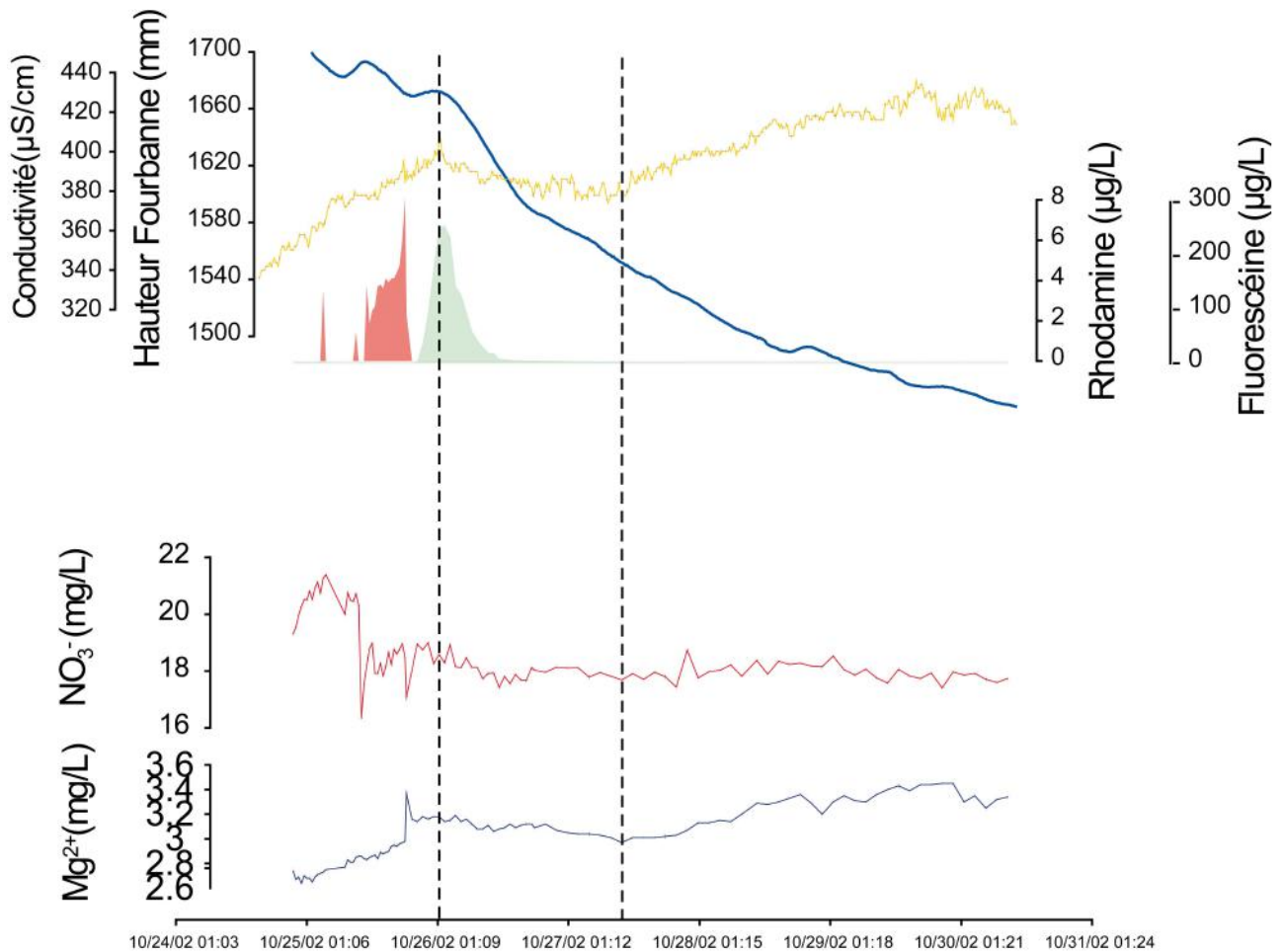


Fig. 13: Restitution des colorants et évolution des concentrations en NO_3^- , Mg^{2+} de la hauteur d'eau et de la conductivité à la source.

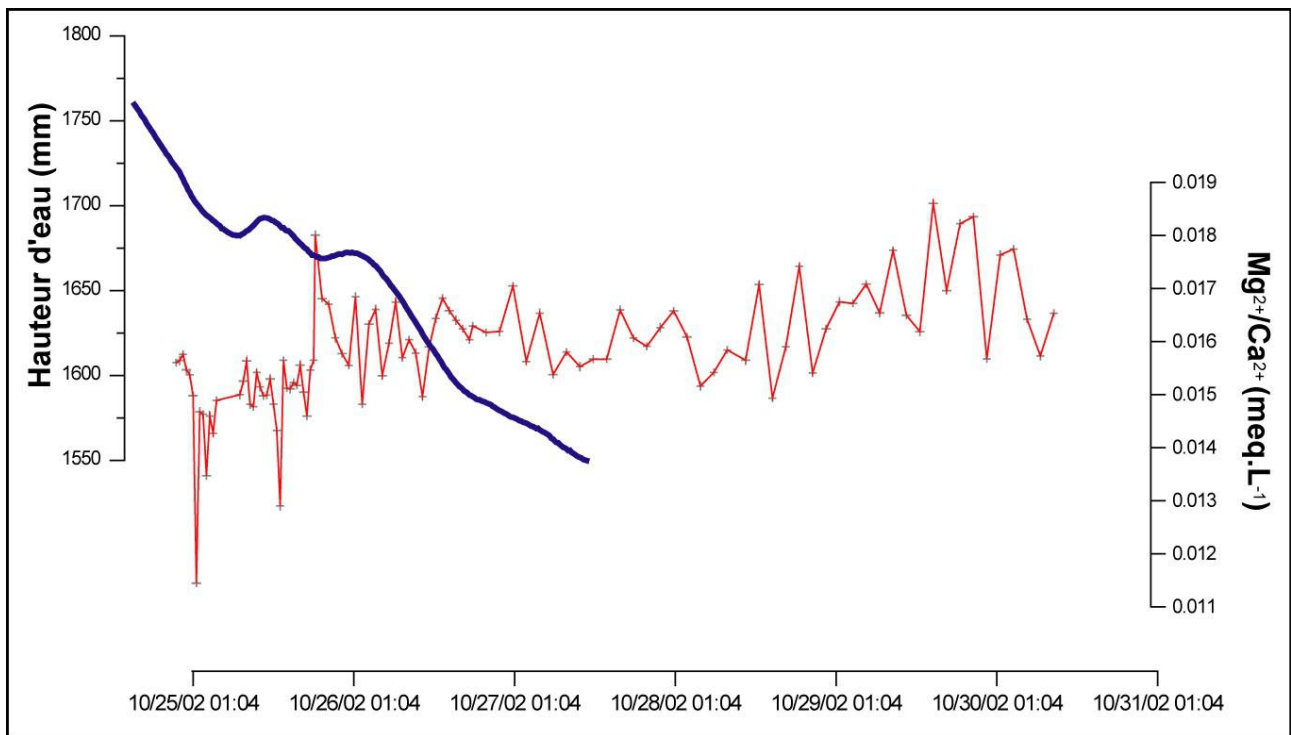


Fig. 14: Evolution du rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} à la source de Fourbanne, pendant l'épisode de crue

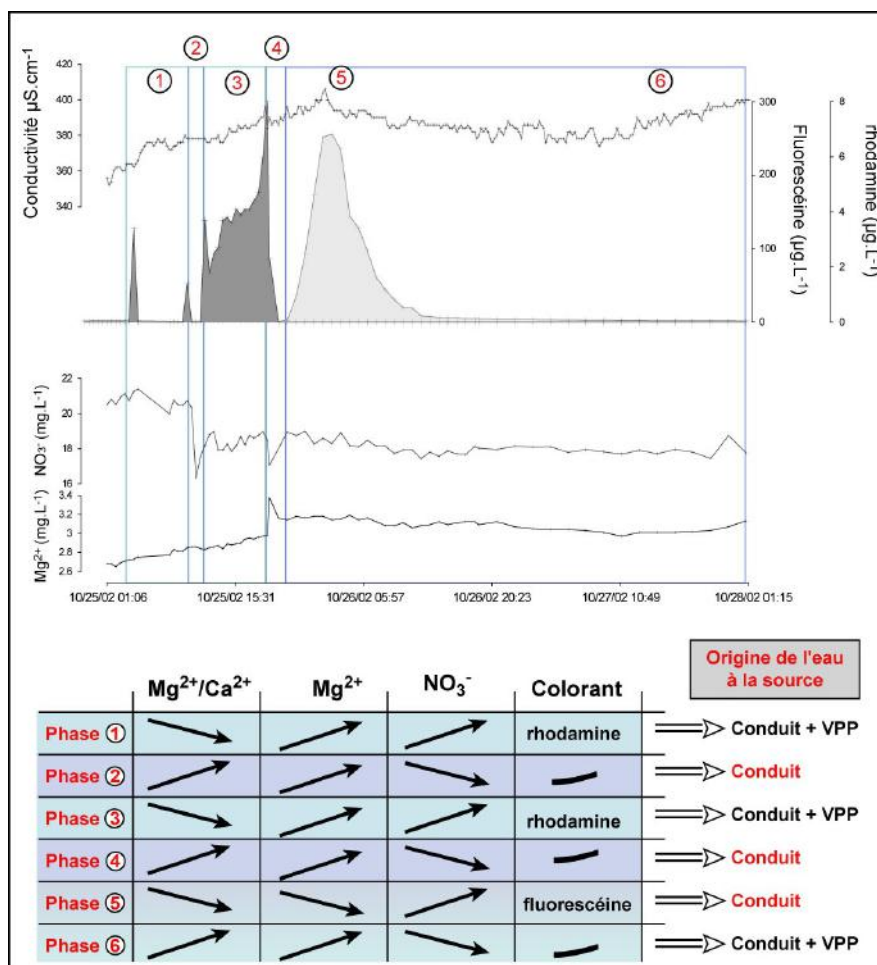


Fig. 15 Détermination de l'origine de l'eau à la source à partir du suivi hydrochimique et hydraulique de la source de Fourbanne.

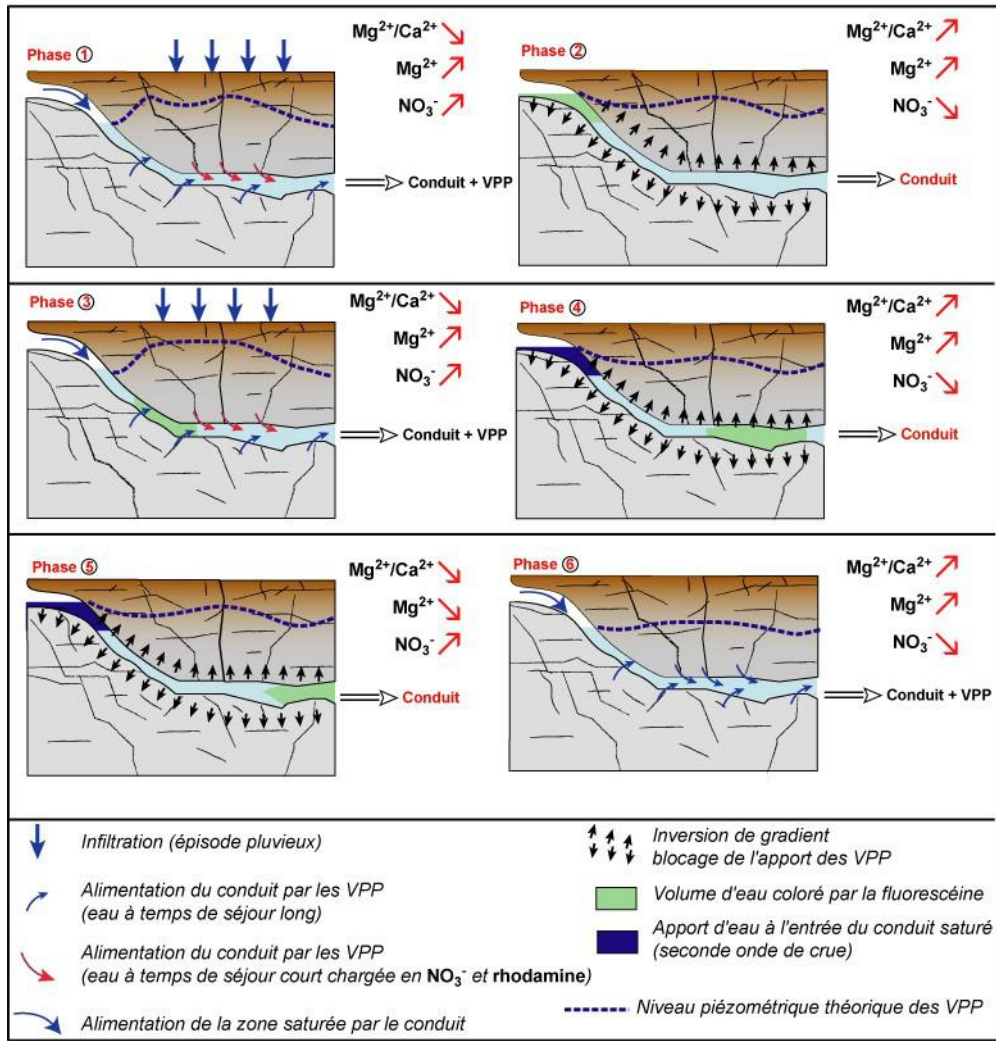


Fig. 16: Modèle conceptuel des interactions conduit/VPP durant l'épisode de crue

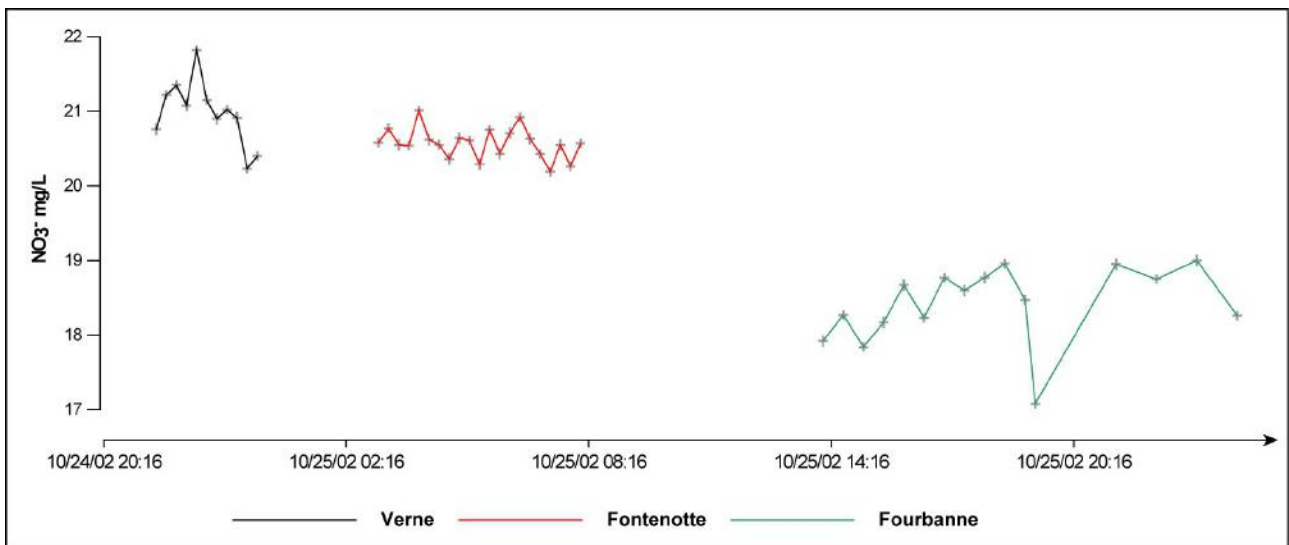


Fig. 17: Concentration en NO_3^- de l'eau colorée par la fluorescéine lors de son transit à travers l'aquifère.

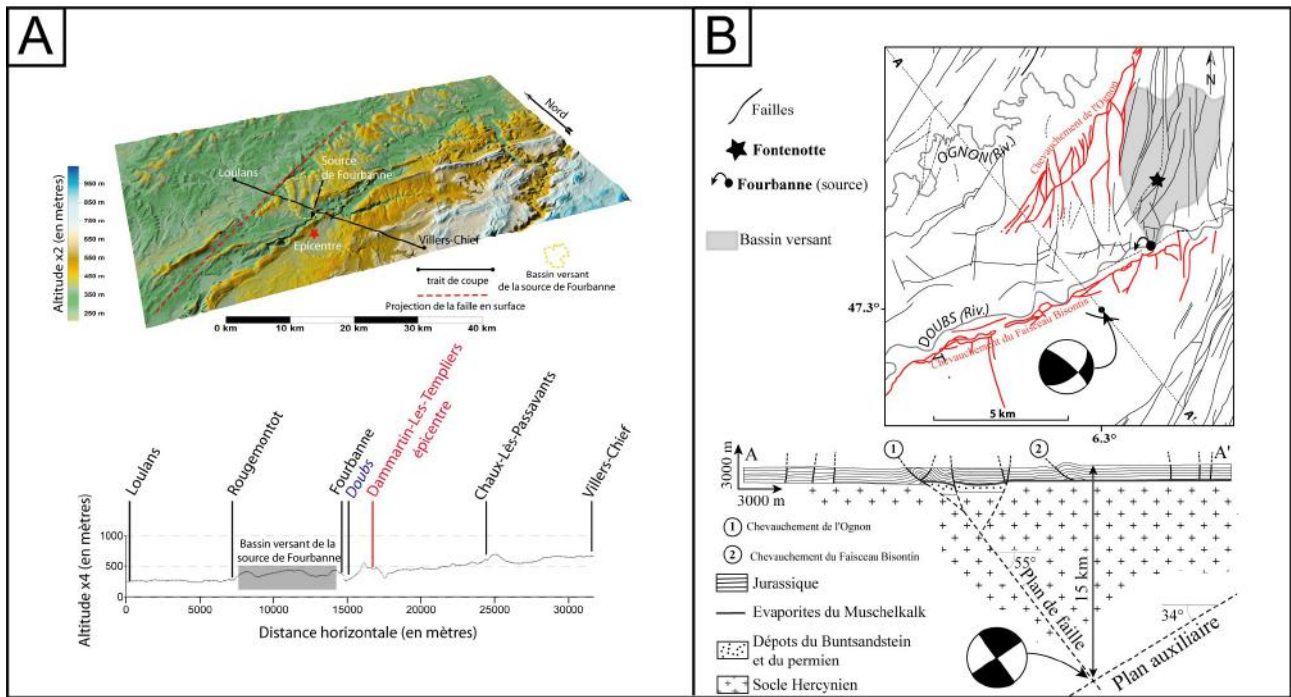


Fig. 18: (A) Localisation géographique de l'épicentre et de l'aquifère de Fourbanne au niveau de la bordure Ouest du massif du Jura. (B) Localisation de l'épicentre, de l'hypocentre et du bassin versant de la source de Fourbanne, dans leur contexte géologique et structural

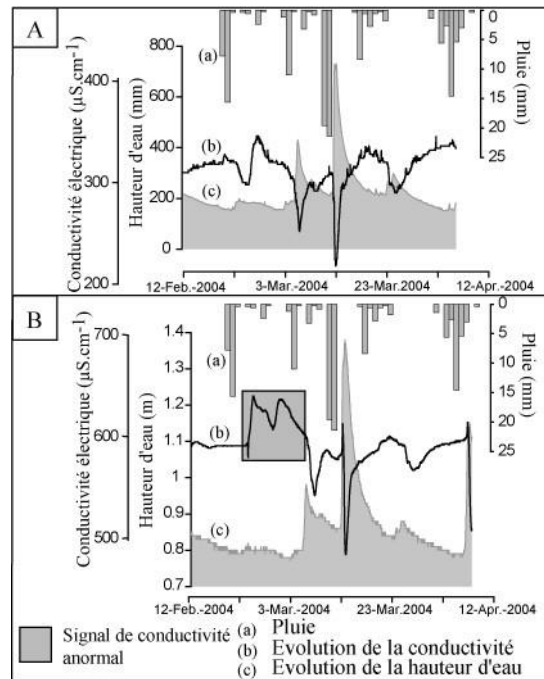


Fig. 19: (A) Suivi des précipitations (a), de la hauteur d'eau (b) et de la conductivité électrique (c) à la station de mesure de Fontenotte (zone non-saturée). (B) Suivi des précipitations (a), de la hauteur d'eau (b) et de la conductivité électrique (c) à la station de mesure de Fourbanne (Zone saturée) (Charmoille et al., 2005).

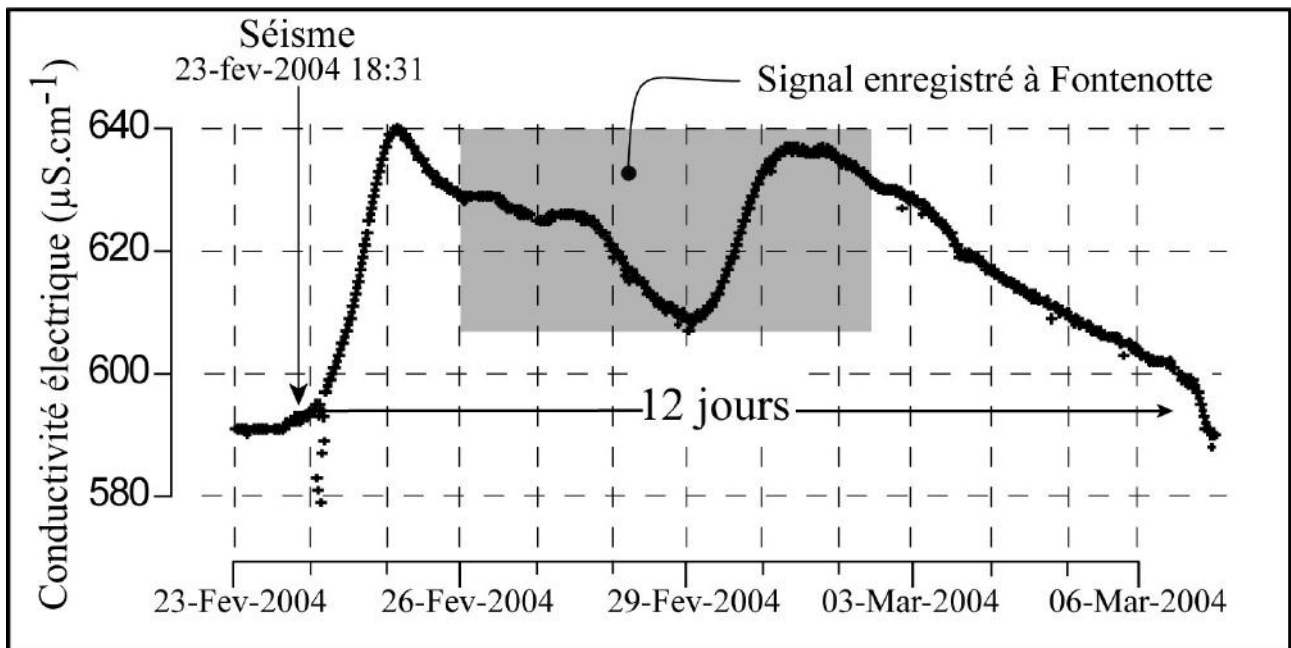


Fig. 20: Détail du signal de conductivité post-sismique enregistré à la source de Fourbanne (Charmoille et al., 2005)

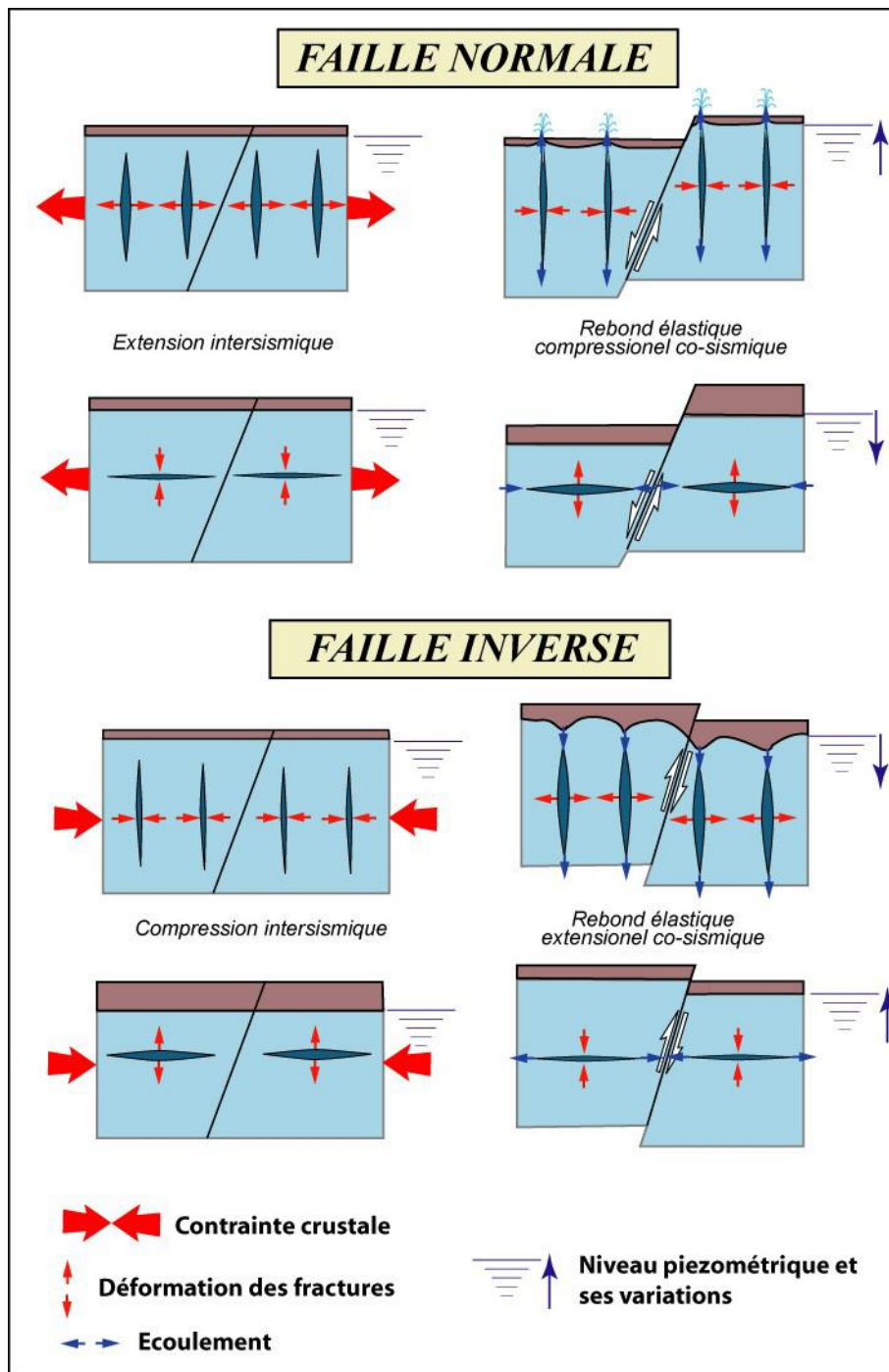


Fig. 21: Effet de la déformation élastique co-sismique sur la perméabilité de fractures verticales et horizontales en fonction du mécanisme de la faille (*d'après Muir-Wood et King, 1993*).

Fig. 22: Modèle conceptuel pluriscalaire présentant les principaux résultats mis en évidence.

