



**MASTER**  
Espace Rural &  
Environnement



**Association Culturelle  
Du SITE d'AZÉ**



## **MEMOIRE DE STAGE**

# **Fonctionnement hydrogéologique du système karstique des Grottes d'Azé : mise en place d'un suivi hydrochimique et traçages colorimétriques.**



Maîtres de stage : **Lionel BARRIQUAND**  
**Ludovic GUILLOT**  
**Michel OLIVER**

**Simon DAUTUN**

**Promotion 2013-2014**

Tuteur pédagogique : **Philippe AMIOTTE SUCHET**



## Remerciements

Je remercie M. le Président du Conseil Général de Saône-et-Loire pour m'avoir permis de faire ce stage, et M. Michel Olivier pour son accueil sur le site des grottes d'Azé, pour sa participation au projet et son aide.

Je tiens à remercier M. Philippe Amiotte Suchet et M. Pierre Curmi, responsables du Master 2 Espace Rural et Environnement qui m'ont permis de faire ce stage dans le cadre de mes études au sein de l'Université de Bourgogne.

Ensuite, je remercie Lionel Barriquand qui m'a beaucoup aidé et beaucoup apporté au cours de ce stage. Pour sa présence sur le terrain, pour son temps et pour son soutien.

Je remercie également Ludovic Guillot pour son accueil et pour son aide. Je le remercie aussi d'avoir pris sur son temps afin de m'aider dans ma campagne de terrain, pour les travaux d'aménagement et de bricolage, et pour la spéléologie.

Mes remerciements vont ensuite à Samuel Da Silva, qui m'a soutenu lors du stage. Je le remercie également d'avoir été présent sur le site lors des projets et des installations.

Je remercie Jacques Mudry et Catherine Bertrand du Laboratoire Chrono environnement UMR 6249 CNRS, avec l'aide également de Didier Cailhol responsable scientifique à la Fédération Française de Spéléologie, pour le prêt des fluorimètres de l'Université de Besançon.

J'adresse mes remerciements à M. Patrick Monin Maire d'Azé, M. Bernard Robelin Maire de Saint-Gengoux-de-Scissé, pour nous avoir permis de réaliser toutes les actions menées sur leurs communes. Je remercie particulièrement M. Marc Sangoy Maire de Bissy-la-Mâconnaise, pour nous avoir également assisté et prêté sa citerne d'eau lors du traçage au Vautiant, et M. Groseiller pour l'accès à son champ.

Je remercie Marc et Jean-Jacques Sologny, pour l'accès à leurs propriétés et leurs informations.

Je tiens à remercier sincèrement toutes les personnes bénévoles ayant participé aux traçages : Roland Dumontet, Dominique Dassonville, Daniel Merlier, la famille Guilbaut, Pascal Bieth, Chantal Nykiel, Vincent et Pierre Reynard, Didier Accary, Nathalie Delara, Samuel Da Silva et sa compagne Samia, Jean-Paul Dufour, Daniel Bressand, Elise Chenot et Marie Denis, Jean-Jacques et Françoise Mépas, Yvan Guigue, Christian Jessaulme, Maud Pothier. Merci pour leur motivation, leur implication jour et nuit, et pour la bonne ambiance.

Enfin je remercie, les guides des grottes d'Azé de cette saison, Mylène, Sandrine, Maud, Pascal, Maïté, Chloé, Deborah, Anaïs, Samuel, David, Lola et Agathe, pour leur bonne humeur et leur soutien.

# Sommaire

I)	Introduction et contexte d'étude. ....	9
II)	Contexte hydrologique et hydrogéologique. ....	10
1)	Objet d'étude. ....	10
1.1)	La zone d'étude. ....	10
1.2)	Occupation du sol. ....	10
1.3)	Géologie de la zone. ....	11
2)	Hydrologie et Hydrogéologie de la zone d'étude. ....	12
2.1)	Hydrographie de la rive droite de la Saône. ....	12
2.2)	Les points caractéristiques de l'étude. ....	14
2.3)	Les Grottes d'Azé. ....	16
III)	Matériels et méthodes. ....	18
1)	Mesures des volumes d'eau et des débits. ....	18
1.1)	Les sondes et le choix de ces sondes. ....	18
1.2)	Implantation des sondes et définition du protocole. ....	18
1.3)	Les sondes mesurant seulement les variations de hauteur d'eau. ....	20
1.4)	La sonde extérieure. ....	20
1.5)	Données de la sonde et calcul des débits. ....	20
1.6)	Validation des mesures de débits par les sondes. ....	23
2)	Caractéristiques physico-chimiques des eaux. ....	25
2.1)	Analyses physico-chimiques. ....	25
2.2)	Analyses hebdomadaires pH et conductivité, suivi annuel. ....	26
2.3)	Température de l'eau et relation avec le débit. ....	26
3)	Multi-traçage colorimétrique. ....	26
3.1)	Introduction. ....	26
3.2)	Les traceurs. ....	27
3.3)	Les fluorimètres. ....	28
3.4)	1 <sup>ère</sup> campagne. ....	29
3.5)	2 <sup>ème</sup> campagne. ....	31
3.6)	Prélèvements d'eau. ....	32
3.7)	Modélisation de la réponse sur une partie connue du réseau. ....	32

<b>IV)</b>	<b>Résultats.</b>	<b>33</b>
1)	Les débits et la réponse à la pluie.	33
1.1)	La réponse hydrologique.	33
1.2)	Gueule du Loup et Tranquiou.	38
1.3)	Les temps de réponse.	39
2)	Composition physico-chimique des eaux (variabilité spatiales et temporelles).	40
2.1)	Analyses physico-chimiques.	40
2.2)	Suivi hebdomadaire de pH et conductivités.	41
2.3)	Température.	42
3)	Résultats des traçages.	44
3.1)	1 <sup>ère</sup> campagne.	44
3.2)	2 <sup>ème</sup> campagne.	47
3.3)	Modélisation sur une partie connue du réseau.	50
<b>V)</b>	<b>Synthèse et discussion.</b>	<b>52</b>
1)	Bilan hydrologique et surface d'alimentation.	52
2)	Relation débit et température.	53
<b>VI)</b>	<b>Conclusion.</b>	<b>55</b>
<b>VII)</b>	<b>Perspectives.</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>56</b>
	<b>ANNEXES</b>	<b>57</b>

## Table des illustrations

Fig. 1 : Localisation de la zone dans son contexte régional, carte réalisée à l'aide de données SIG. ....	10
Fig. 2 : Carte d'occupation des sols de la zone, carte réalisée à l'aide de données SIG. ....	11
Fig. 3 : Motif type d'un chaînon des monts du Mâconnais (Guillot, Morel & Simonnot, 2005). ....	12
Fig. 4 : Carte des bassins versants du Mâconnais, Contrat des rivières du Mâconnais, Tome 2. ....	13
Fig. 5 : Carte de recensement des points d'intérêts, réalisée à l'aide de données SIG. ....	15
Fig. 6 : Topographie de la Grotte de la Rivière Souterraine, Simonnot & Guillot, 1999-2003.....	16
Fig. 7 : Coupe longitudinale de la Grotte de la Rivière Souterraine. ....	16
Fig. 8 : Gouffre du Tunnel, photo S. Dautun. ....	17
Fig. 9 : Exemple d'une sonde Reefnet, photo S. Dautun. ....	18
Fig. 10 : Exemple d'implantation de sonde à la Gueule du Loup, photo L. Guillot. ....	20
Fig. 11 : Sonde extérieure dans l'abri météo, photo S. Dautun. ....	20
Fig. 12 : Modèle représentant un site de mesure avec seuil. ....	22
Fig. 13 : Exemple de mesure de débit au sel effectuée à la résurgence le 04 Juin 2013. ....	24
Fig. 14 : Buses se situant près de la Résurgence. ....	25
Fig. 15 : Exemple illustrant le modèle pour calculer la section d'eau d'une buse, hauteur d'eau 9,5 cm. .	25
Fig. 16 : Equipe d'injection au Vautiant, photo L. Barriquand.....	28
Fig. 17 : Exemple de GGUN-FL30, photo V. Reynard.....	28
Fig. 18 : Fonctionnement à l'intérieur du fluorimètre, Schnegg 2012.....	29
Fig. 19 : Appareil externe du fluorimètre, photo S. Dautun. ....	29
Fig. 20 : Equipe d'injection à la Perte de la Goulouze, photo L. Barriquand. ....	30
Fig. 21 : Citernes pour l'alimentation du Vautiant, photo L. Barriquand.....	30
Fig. 22 : Récupération d'eau au niveau des tuyaux, photo L. Barriquand. ....	31
Fig. 23 : Injection d'Uranine® dans le Gouffre des Teppes, photo S. Dautun. ....	31
Fig. 24 : Injection de Tinopal® à la Perte de la Verzée Nord, photo S. Dautun. ....	32
Fig. 25 : Fluorimètre et Uranine® à la Salle du Siphon, photo JJ Mépas. ....	32
Fig. 26 : Illustration de la réponse hydrologique d'un bassin versant ( <a href="http://echo2.epfl.ch/e-drologie/">http://echo2.epfl.ch/e-drologie/</a> ). .	33
Fig. 27 : Variations des débits à la station "Tunnel de St Gengoux" et des précipitations journalières à Igé de juillet 2013 à août 2014. ....	34
Fig. 28 : Variations des débits à la station "Perte de la Goulouze" et des précipitations journalières à Igé de juillet 2013 à août 2014. ....	34
Fig. 29 : Variations des débits à la station "Salle de la Cascade" dans la grotte, et des précipitations journalières à Igé de juillet 2013 à août 2014. ....	35
Fig. 30 : Variations des débits à la station "Résurgence" et des précipitations journalières à Igé de mai 2013 à août 2014. ....	35
Fig. 31 : Précipitations mensuelles de la station d'Igé sur la période de mesure des débits, comparées aux normales de la station de Charnay-les-Mâcon, IPSEAU 1996. ....	36
Fig. 32 : Test sur la sonde du Tunnel, photo S. Dautun. ....	36
Fig. 33 : Variations des hauteurs d'eau à la station "Gueule du Loup" et des précipitations journalières à Igé de septembre 2013 à août 2014. ....	39
Fig. 34 : Variations des hauteurs d'eau à la station "Tranquiou 1" et des précipitations journalières à Igé de septembre 2013 à août 2014. ....	39
Fig. 35 : Exemple d'un temps de réponse de la Grotte de la Rivière Souterraine (Salle de la Cascade). ...	40
Fig. 36 : Diagramme de Piper. ....	41
Fig. 37 : Evolution des conductivités sur la période de suivi.....	42
Fig. 38 : Evolution du pH sur la période de suivi. ....	42
Fig. 39 : Evolution de la température dans la Grotte, Perte et Tunnel. ....	43
Fig. 40 : Variations temporelles de la température de l'eau sur les sites de Perte et de Cascade en novembre 2013 et en janvier 2014. ....	43
Fig. 41 : Courbes de restitution de traceurs dans la grotte à la Salle de la Cascade.....	44
Fig. 42 : Courbes de restitution de traceur dans la Mare (à gauche) et la Gueule du Loup (à droite). ....	44
Fig. 43 : Courbes de restitution de traceurs à la Salle de la Cascade. ....	47

<i>Fig. 44 : Courbes de restitution de traceurs à la Salle du Siphon (à gauche) et à la Résurgence (à droite).</i>	47
<i>Fig. 45 : Carte synthétique des traçages, géologie par S. Dechamps.</i>	49
<i>Fig. 46 : Courbes de restitution d'Uranine® mesurée par les 4 fluorimètres dans la grotte.</i>	50
<i>Fig. 47 : Carte de la surface d'alimentation hypothétique du système.</i>	52
<i>Fig. 48 : Corrélation des temps de réponse obtenus à partir des températures et du traçage, avec le débits.</i>	53
<i>Fig. 49 : Relation débits et températures à la Salle de la Cascade.</i>	54
<i>Tab. 1 : Masses d'eau souterraines du Mâconnais, Contrat des rivières du Mâconnais, Tome 3.</i>	13
<i>Tab. 2 : Liste des différentes fiches synthétiques présentes en annexes.</i>	14
<i>Tab. 3 : Rôle des sondes et leur implantation.</i>	19
<i>Tab. 4 : Sondes, positionnement et date de pose.</i>	20
<i>Tab. 5 : Historique des anciens traçages sur Azé, (Extrait de Guillot, Morel &amp; Simonnot, 2005).</i>	27
<i>Tab. 6 : Quelques caractéristiques des traceurs fluorescents, (Extrait de l'OFEG, groupe de travail traçage de la société suisse d'hydrogéologie, 2002).</i>	27
<i>Tab. 7 : Synthèse de la 1ère campagne.</i>	29
<i>Tab. 8 : Estimation des quantités de colorants à injecter.</i>	30
<i>Tab. 9 : Caractéristiques des sections de traçages.</i>	32
<i>Tab. 10 : Balance ionique pour chaque échantillon d'eau.</i>	40
<i>Tab. 11 : Interprétations de la restitution des traceurs pour la 1ère campagne.</i>	46
<i>Tab. 12 : Interprétation de la 2ème campagne.</i>	48
<i>Tab. 13 : Interprétations de la restitution d'Uranine® au sein de la grotte.</i>	51

## **Présentation des structures et organismes encadrant le stage :**

Cette année constitue le deuxième volet et la continuité de l'étude hydrogéologique de la zone géographique s'étendant d'Azé à Cruzille débutée en 2013. Elle s'effectue sur la base d'un partenariat entre trois organismes différents :

### **Conseil Général de Saône-et-Loire :**

Le Conseil Général de Saône-et-Loire, propriétaire du site des Grottes d'Azé depuis 2001, a pour objectif la préservation et la valorisation du site. Pour cela, il mène à bien toutes les actions de terrain permettant une présentation moderne et dynamique de ce patrimoine. Il a mis en place un Comité Scientifique qui valide les recherches proposées par l'Association Culturelle du Site d'Azé.

### **L'Association Culturelle du site des Grottes d'Azé :**

Après plusieurs recherches infructueuses menées dans la première partie du XXème siècle par des préhistoriens, Raymond Morel, soutenu par une équipe d'Azéens, commence l'exploration du site en 1953. En 1958 une association, qui deviendra par la suite « L'Association Culturelle du Site d'Azé » est créée. Elle a pour vocation l'exploration du site des Grottes d'Azé. Depuis lors, les recherches spéléologiques et scientifiques se poursuivent sur le site avec la collaboration des membres de l'association. Au niveau scientifique, ces collaborations touchent différents domaines tels que la préhistoire, la paléontologie, la géologie et l'environnement. De nombreux partenariats avec différentes universités ont vu le jour et servent à l'amélioration des connaissances qui sont ensuite vulgarisées par le biais des visites scolaires et touristiques du site, des publications et des expositions.

### **L'EPTB Saône & Doubs :**

L'Etablissement Public Territorial du Bassin Saône & Doubs couvre 3000 communes réparties sur 3 régions et 9 départements. L'établissement intervient sur plusieurs thématiques et prend en charge l'essentiel des missions d'étude et le portage des politiques publiques territoriales type contrat de rivière. Cette collectivité assure l'élaboration, et la mise en œuvre des programmes d'action de restauration des milieux aquatiques sur l'ensemble des bassins versants de la Saône et du Doubs en collaboration avec les structures de gestions locales. Sur le Mâconnais, l'EPTB Saône et Doubs anime le contrat des rivières du Mâconnais s'appliquant aux 4 bassins versants : Petite Grosne, Mouge, Bourbonne et Natouze.

## **l) Introduction et contexte d'étude.**

En Bourgogne du sud, au sein du massif calcaire s'étendant d'Azé à Cruzille dans les Monts du Mâconnais, se trouvent des réseaux karstiques. Une partie de ce karst demeure inconnue malgré les recherches spéléologiques déjà réalisées. Lors du premier volet de cette étude en 2013, J'ai répertorié les sources participant à l'alimentation du karst, ainsi que les endroits où elles resurgissent en d'autres points éloignés de quelques kilomètres. Un protocole de mesure des débits et de la température de l'eau par le biais de sondes pression a également été mis en place pour réaliser un suivi sur plusieurs années.

Cette étude est en relation avec le contrat de rivière du Mâconnais animé par l'EPTB Saône & Doubs. Le but de ce contrat est de restaurer la qualité de l'eau et assurer la sécurité de la ressource mais aussi assurer une meilleure protection des biens et des personnes, tout ceci en protégeant et en mettant en valeur les éléments patrimoniaux. Un travail particulier est prévu sur la vulnérabilité des bourgs traversés par les cours d'eau, et l'acquisition de connaissances sur ce réseau karstique s'intègre pleinement dans ce volet.

Les travaux scientifiques réalisés à Azé, et leurs résultats sont retransmis au grand public par le biais du site sous forme de visites guidées dans les grottes et le musée. Des conférences et exposés sont également organisés en événementiel afin de diffuser les avancées réalisées chaque année (comité scientifique). Enfin des publications et des ouvrages sont également mis à disposition.

La connaissance des relations entre les pertes et résurgences étant partielle, le deuxième volet de cette étude permettra de définir plus précisément le fonctionnement du karst ainsi que les limites de son bassin d'alimentation.

Ce deuxième volet a donc pour objectifs de :

- exploiter les mesures de débits et de températures obtenues depuis 2013,
- évaluer les réponses d'un point de vue hydrologique et hydrogéologique du système karstique en fonction des différentes mesures acquises sur une année (débits, températures, analyses physico-chimiques, etc...),
- établir les liens entre les pertes et les résurgences à l'aide d'un multi-traçage colorimétrique.

Ceci permettra :

- toujours dans le cadre du contrat de rivière du Mâconnais, de pouvoir prévenir les risques d'inondations et les origines d'une pollution, pour une meilleure gestion de l'eau,
- d'améliorer notre connaissance sur le système karstique et ainsi mieux appréhender sa morphologie et ses conditions hydrodynamiques en vue de sa modélisation,
- de confirmer la provenance de l'alimentation en eau du karst et les connexions entre apports d'eau et pertes au niveau des bassins versants.

## II) Contexte hydrologique et hydrogéologique.

### 1) Objet d'étude.

#### 1.1) La zone d'étude

La zone d'étude s'étend du nord d'Azé (71 260), commune du Mâconnais - Val de Saône, jusqu'au nord de Cruzille sur une surface totale d'environ 34 km<sup>2</sup> (Fig. 1). Elle concerne une partie du 2<sup>ème</sup> chaînon calcaire du Mâconnais, monoclinale de direction N 10-20° E et de pendage moyen 20° E-SE, formant un relief dit de « cuestas » (Guillot, Morel & Simonnot, 2005).

La zone d'étude englobe partiellement les communes de Donzy-le-Pertuis, Blanot St-Gengoux-de-Scissé, Bissy-la-Mâconnaise, Cruzille. Elle concerne une population totale d'environ 1300 personnes.

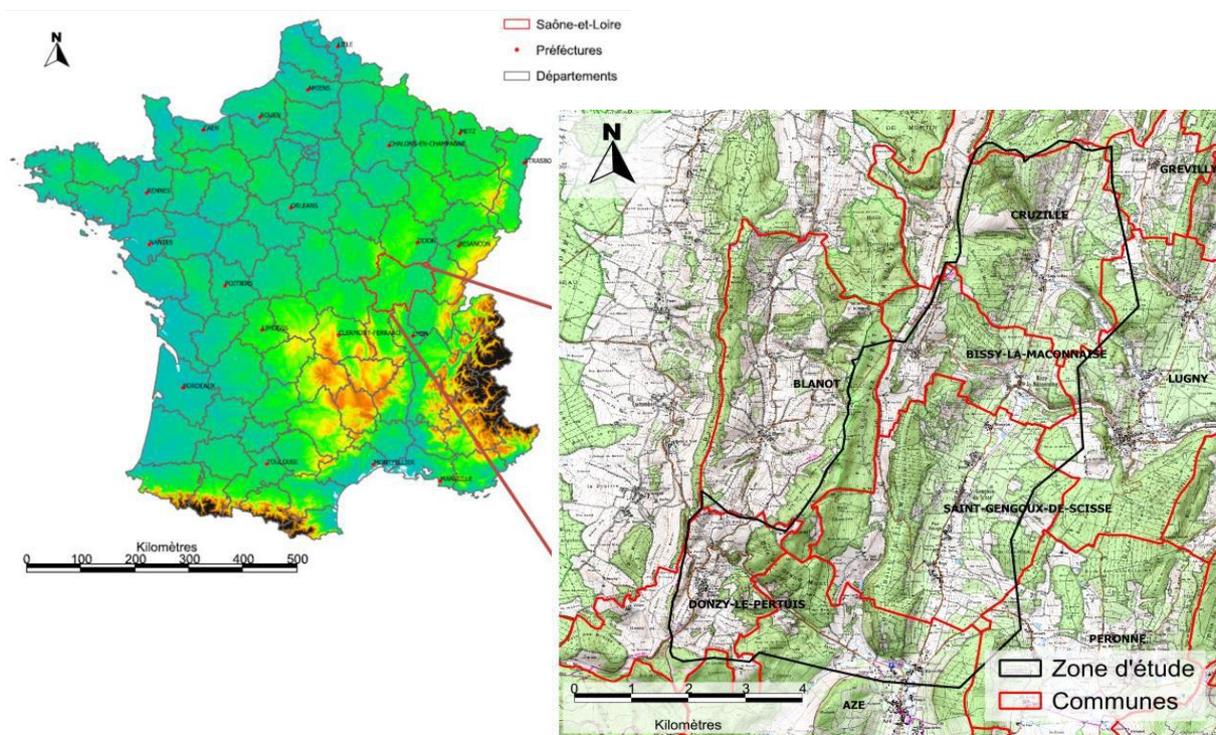


Fig. 1 : Localisation de la zone dans son contexte régional, carte réalisée à l'aide de données SIG.

#### 1.2) Occupation du sol

Ce territoire est majoritairement recouvert de forêts. Les autres terrains sont principalement utilisés pour une exploitation agricole du sol, avec une dominante viticole. Restent ainsi sur la zone, quelques prairies utilisées pour l'élevage, et le tissu urbain (Fig. 2).

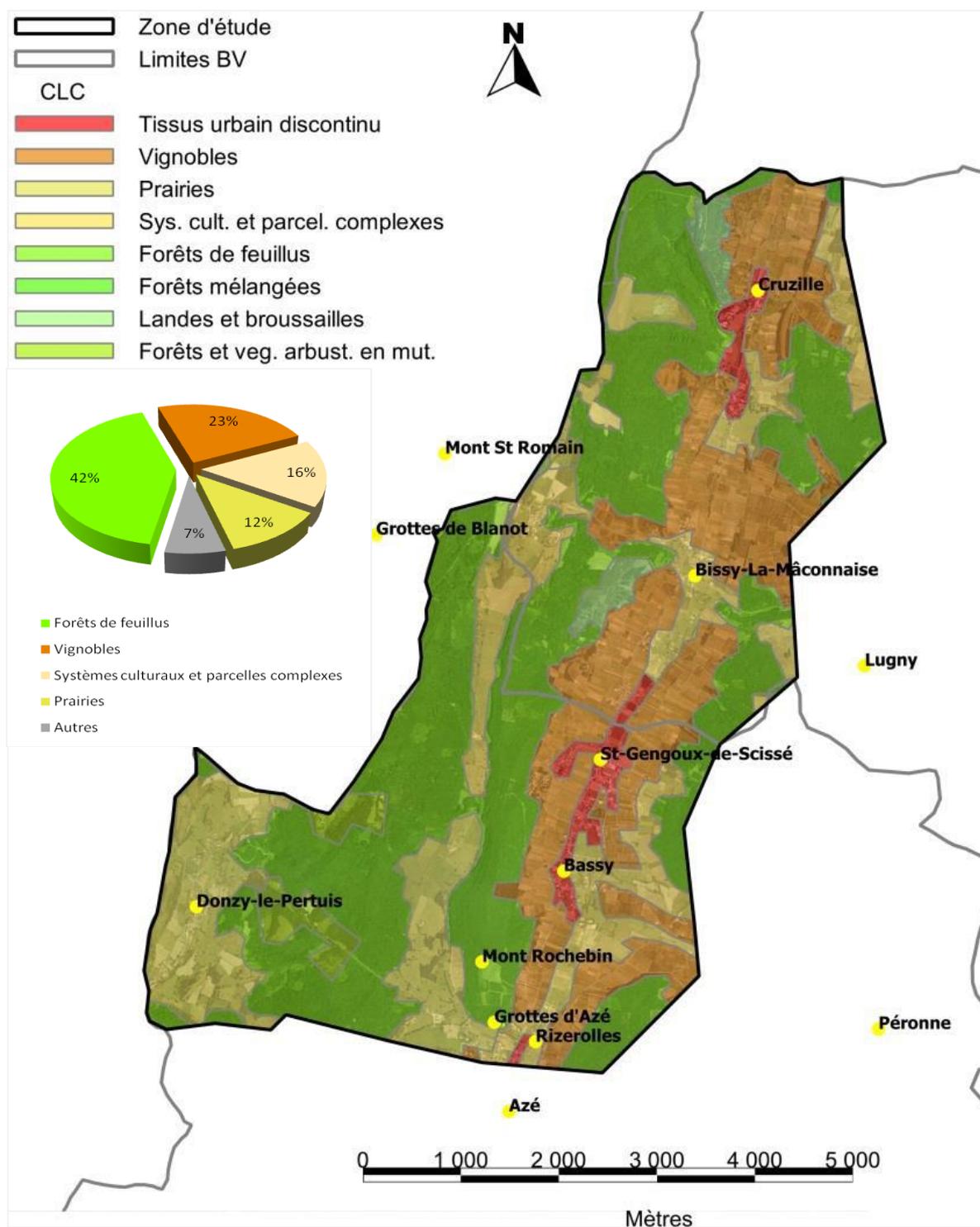


Fig. 2 : Carte d'occupation des sols de la zone, carte réalisée à l'aide de données SIG.

### 1.3) Géologie de la zone

Les monts du Mâconnais présentent une structure formée de chaînons répétitifs (5 chaînons), inclinés et pentus, orientés NNE-SSO. Ils sont délimités à l'ouest et au nord par la Grosne, au sud par les monts cristallins du Beaujolais, (Guillot, Morel & Simonnot, 2005). L'effondrement du fossé Bressan, dû à la divergence est-ouest du rift ouest-européen, créé une structure horst-graben avec de nombreuses failles normales de direction NNE-SSO en bordure de ce fossé. Ainsi un pendage moyen de 20° E-SE est observé.

La structure géologique du 2<sup>ème</sup> chaînon, comme celle des autres chaînons (motif, cf. : Fig. 3), s'organise suivant différents ensembles :

- Au nord-ouest le Mont Saint-Romain (579 m) et jusqu'au sud-ouest le Mont Epinet (567 m) forment une bande de socle granitique (microgranite rhyolitique et rhyolite porphyrique), plus ou moins séparés par les quartzites du Trias.
- Ensuite vient le contact Trias/Lias dans la combe creusée dans les marnes, avec tout de même un niveau plus dur calcaire, qui correspond au Sinémurien et son calcaire à gryphées arquées.
- La crête correspondant à l'Aalénien-Bajocien-Bathonien, calcaire à entroques et polypiers, revers de calcaire oolithique et marneux se terminant par un niveau détritique dur.
- De nouveau une combe plus évasée que la précédente avec les marnes calcaires calloviennes et oxfordiennes.
- Puis, la crête du Jurassique supérieur, en général moins haute que la précédente qui comporte des sédiments tertiaires (argiles, silex, conglomérats calcaires).
- Enfin, au niveau des vallées, les alluvions et colluvions récentes du Quaternaire.

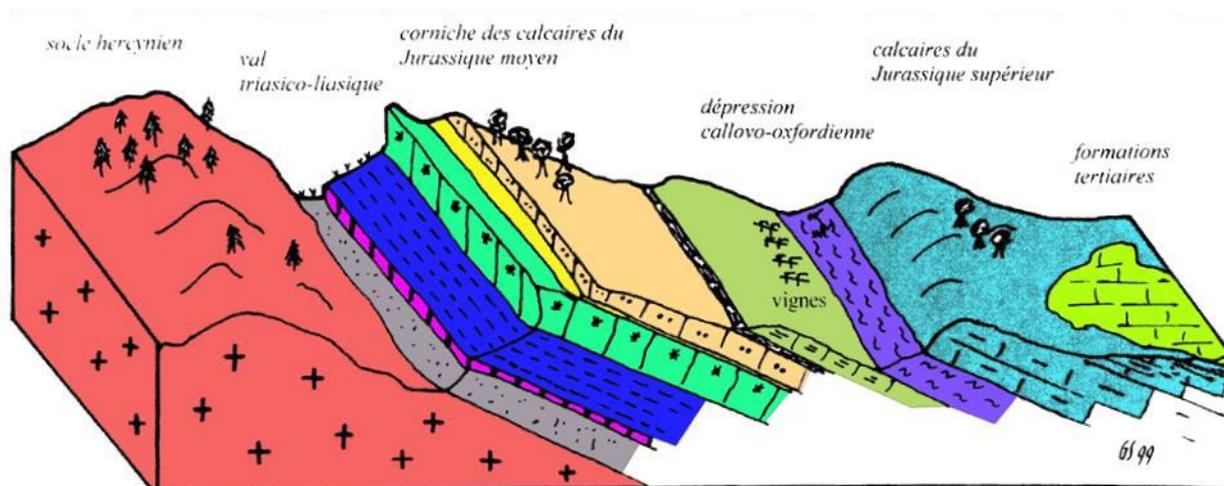


Fig. 3 : Motif type d'un chaînon des monts du Mâconnais (Guillot, Morel & Simonnot, 2005).

## 2) Hydrologie et Hydrogéologie de la zone d'étude.

### 2.1) Hydrographie de la rive droite de la Saône.

Appartenant au bassin RMC (Rhône Méditerranée et Corse), le bassin versant de la Saône s'étend sur une surface de 29 950 km<sup>2</sup>.

Dans le Mâconnais, quatre bassins versants correspondant à quatre affluents principaux sont référencés : La Petite Grosne, la Mouge, la Bourbonne et la Natouze (Fig. 4). Répartis sur une superficie de 518 km<sup>2</sup>, ils prennent leur source sur les coteaux à l'ouest entre 400 et 800 m d'altitude, puis ils traversent l'espace viticole jusqu'à la Saône à l'est. Plusieurs affluents annexes alimentent en eau ces rivières (Contrat des rivières du Mâconnais, Tome 1).

Les cours d'eau sont en connexion avec le système aquifère. Différentes sources ont été captées dans le but de pouvoir alimenter en eau la population locale. La DCE a caractérisé les masses d'eau et les a référencées afin de pouvoir assurer les objectifs pour l'atteinte de leur bon état écologique (Tab. 1).

La zone d'étude se situe sur la jonction des deux parties amont respectives des bassins versants de la Mouge et de la Bourbonne.

La délimitation de la zone a été effectuée en fonction :

- des bassins versants hydrologiques (concernent les eaux de surface uniquement, dans notre cas deux bassins, celui de la Mouge et de la Bourbonne).
- de la lithologie (différence dans la région entre le Primaire : les granites où le ruissellement superficiel sera prépondérant ; et le Secondaire : les calcaires fracturés du Jurassique où l'infiltration sera un vecteur de l'alimentation du karst en eau).
- de la topographie qui influence les sens d'écoulement et donc les relations entre les différents bassins d'alimentation en eau (rejoint la notion de bassin versant).
- des points recensés lors du premier volet de l'étude (les sources, les résurgences, les pertes, les drains de routes, les lavoirs...), et de leur rôle au niveau du système. Dans cette zone majoritairement calcaire, les gouffres, les cavités et les réseaux de galeries sont importants à prendre en compte.

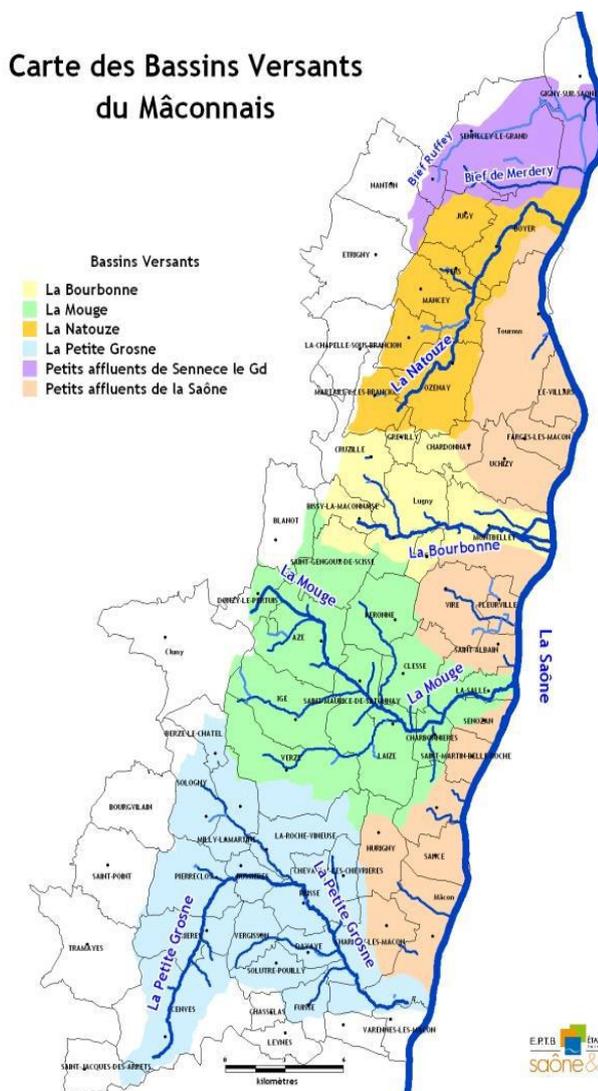


Fig. 4 : Carte des bassins versants du Mâconnais, Contrat des rivières du Mâconnais, Tome 2.

Masse d'eau souterraine	- Désignation	Superficie
n°FRDG305C	« alluvion de la Saône du Doubs au monts d'or et ceux de la Grosne »	810 km <sup>2</sup>
n°FRDG503	« Formation sédimentaire de la Côte Mâconnaise et Chalonnaise »	1245 km <sup>2</sup>

Tab. 1 : Masses d'eau souterraines du Mâconnais, Contrat des rivières du Mâconnais, Tome 3.

## 2.2) Les points caractéristiques de l'étude.

Lors du premier volet de l'étude, un inventaire de tous les apports d'eau et pertes au sein du système karstique a été effectué. De nouvelles pertes ont également été recensées cette année grâce aux conditions météorologiques particulièrement sèches du mois de Mars au mois de Juin. Ses informations sont donc venues compléter le travail déjà réalisé. Le repérage de ces points a été réalisé grâce à un GPS (Fig. 5).

Pour les points participant le plus aux variations du volume d'eau et ceux dont le rôle est encore à déterminer, une fiche synthétique (Tab. 2) rappelant les différentes informations le concernant est disponible en annexes (Ann. 1).

Tab. 2 : Liste des différentes fiches synthétiques présentes en annexes.

Points	Type	N° de Fiche
Résurgence de la Balme	Résurgence	1
Perte de la Goulouze	Perte	2
Source près de la Goulouze (Peuplier)	Source	3
Source de la Goulouze	Source	4
Source du Suc	Source	5
Source de la Verzée	Source	6
Source de la Vèvre	Source	7
Source Simon	Source	8
Gouffre du Vautiant	Perte Fossile ?	9
Tranquiou 1	Résurgence	10
Tranquiou 2	Résurgence	11
Source de la Combe	Source	12
Source du Chaudron	Source	13
Gueule du Loup	Résurgence	14
Gouffre du Tunnel de Saint-Gengoux-de-Scissé	Perte avec alimentation artificielle	15
Résurgence de la Gueule du Loup	Résurgence	16
Gouffre des Teppes	Perte Fossile ?	17
Lavoir de Bassy	Lavoir	18
Lavoir de Boye	Lavoir	19
Lavoir de Bonzon	Lavoir	20
Lavoir Pinagot	Lavoir	21
Lavoir Saint-Pierre-de-Lanque	Lavoir	22
Perte Verzée Nord	Perte	23
Mare du site des Grottes d'Azé	Source	24

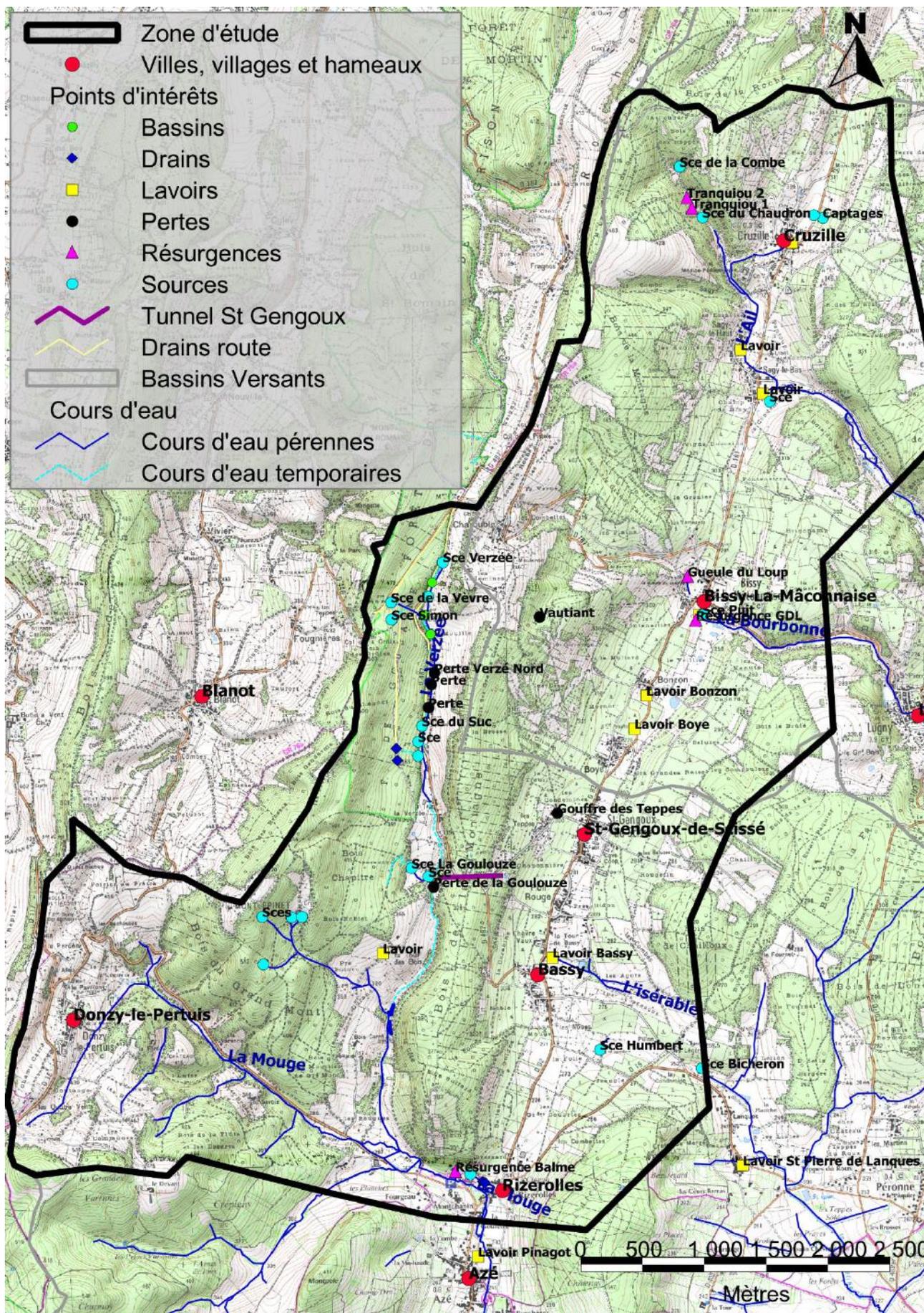


Fig. 5 : Carte de recensement des points d'intérêts, réalisée à l'aide de données SIG.

### 2.3) Les Grottes d'Azé.

Le site d'Azé comprend essentiellement deux grottes, la Grotte Préhistorique et la Grotte de la Rivière Souterraine. La Grotte Préhistorique correspond à une grotte fossile, tandis que la Grotte de la Rivière Souterraine est dite "active" du fait de la présence de la rivière s'y écoulant.

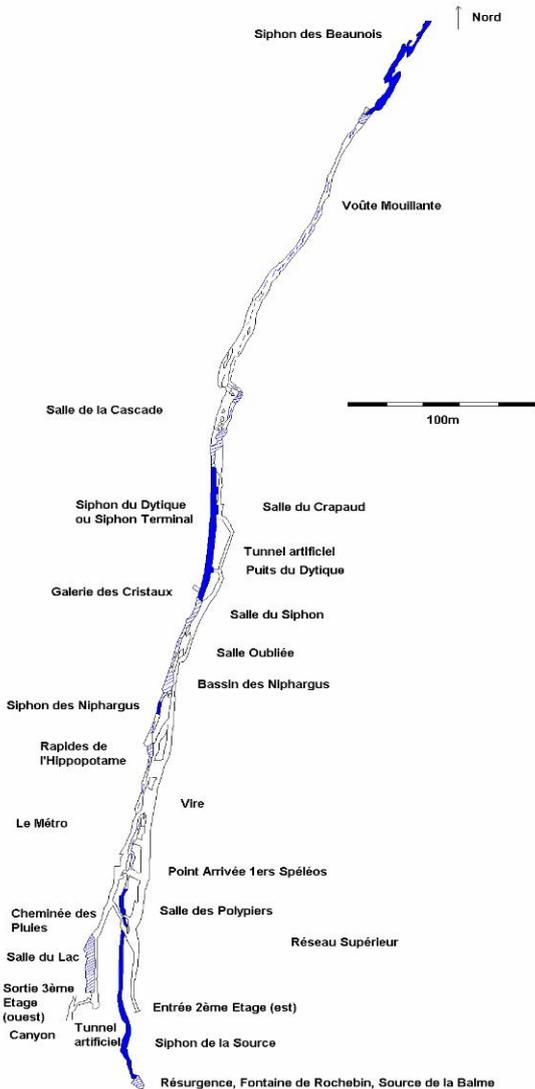


Fig. 6 : Topographie de la Grotte de la Rivière Souterraine, Simonnot & Guillot, 1999-2003.

● Fluorimètres 2<sup>ème</sup> campagne

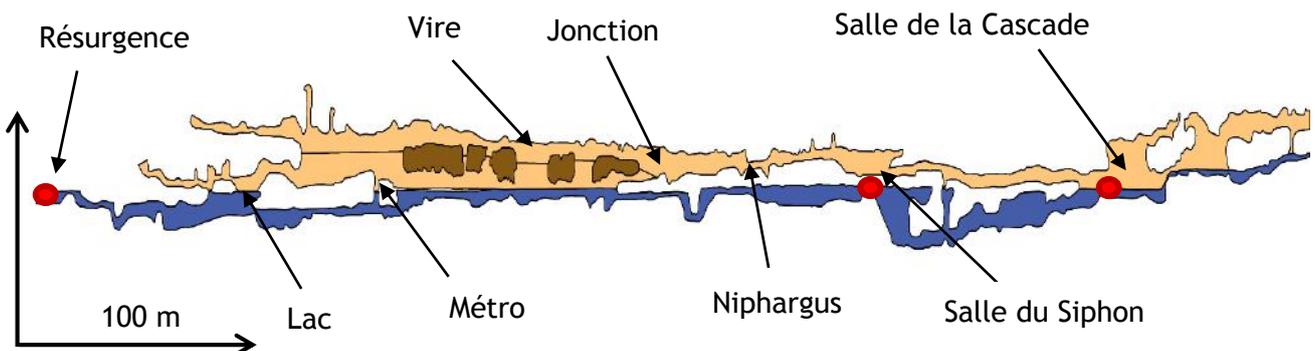


Fig. 7 : Coupe longitudinale de la Grotte de la Rivière Souterraine.

#### a) La Grotte Préhistorique.

L'entrée de la grotte est située à une altitude de 275 m et est connue depuis longtemps. La grotte est creusée dans les calcaires du Bajocien supérieur et du Bathonien inférieur (165 Ma). Elle est marquée par l'occupation de l'Homme et par les découvertes d'ossements de faunes préhistoriques. Des concrétions calcaires ornent les différentes galeries.

Des études sur la formation du karst par fantômisation de roche sont actuellement en cours. Les désobstructions se poursuivent dans l'espoir de trouver d'autres galeries inexplorées (Barriquand, Guillot, Nykiel, 2011).

#### b) La Grotte de la Rivière Souterraine.

Découverte en 1963 grâce à une opération de pompage, la grotte abrite la Balme, rivière souterraine dont la résurgence redirige l'eau en surface. Elle rejoint par la suite la Mouge qui coule en contrebas du site. Creusée dans les calcaires à entroques et à polypiers de l'Aalénien supérieur jusqu'au Bajocien inférieur, la grotte se termine par le siphon des Beaunois à 800 mètres de l'entrée.

Les noms des différentes parties de la grotte mentionnées dans le rapport sont reportés sur la topographie (Fig. 6), ainsi que sur la coupe (Fig. 7).

c) *Tunnel de St-Gengoux-de-Scissé.*

*Fig. 8 : Gouffre du Tunnel, photo S. Dautun.*

Vers 1930, un tunnel fût creusé d'ouest en est dans le massif, afin de pouvoir subvenir aux besoins en eau de la commune de Saint-Gengoux-de-Scissé. Il avait pour rôle d'acheminer l'eau captée au niveau de la Goulouze. Lors du forage, les ouvriers ont mis à jour un gouffre (*Fig. 8*), utilisé par la suite pour évacuer le trop-plein des canalisations. A l'heure actuelle, le Gouffre du Tunnel est alimenté en permanence par de l'eau s'échappant de fuites au niveau du tuyau servant à acheminer l'eau.

A l'époque de la construction du Tunnel, l'ingénieur Guiraudet fait une coloration à la fluorescéine qui ressortira à Azé (*Guillot, Morel & Simonnot, 2005*), mais nous n'avons aucune certitude sur le point exact d'injection dans le Tunnel.

Une prospection menée le 21 Juin 2014 a mis à jour une nouvelle galerie comblée d'argile.

### III) Matériels et méthodes.

#### 1) Mesures des volumes d'eau et des débits.

Afin de réaliser un suivi sur plusieurs années des variations volumiques de l'eau transitant au sein du massif et des cours d'eau, des sondes de mesure et d'enregistrement de pression et de température ont été disposées à différents points stratégiques, choisis au préalable. Celles-ci permettront également de vérifier les relations entre les masses d'eau, de quantifier les temps de réponse entre l'hydrologie de surface et les circulations hydrauliques au sein du massif, de voir les connexions au niveau du karst (corrélation entre les différents volumes) et d'identifier les multiples apports et/ou pertes hydrauliques. Une meilleure appréhension des volumes d'eau permettra une meilleure compréhension du système. Ainsi des actions de gestion et de prévention pourront être mises en œuvre dans les domaines de la pollution et des inondations.

##### 1.1) Les sondes et le choix de ces sondes.

Le choix des sondes s'est porté sur le fait qu'elles doivent assurer un suivi sur un an minimum, elles doivent être précises, fiables, robustes, et pratiques d'utilisation.

Les sondes sont des Sensus Ultra, sondes canadiennes de la marque "Reefnet". Cette sonde est un dispositif permettant l'enregistrement de deux variables que sont la hauteur d'eau via la pression, et la température de l'eau. Elles sont robustes et de petite taille, environ 2,5 cm x 3,3 cm x 4,5 cm (Fig. 9) ; ce qui les rend très pratiques. Grâce à leur grande autonomie, elles permettent ici de réaliser le suivi. Les mesures de température ont une résolution au centième (0,01°C) et les mesures de hauteurs d'eau ont une résolution au cm près. Les résultats obtenus correspondent à des mesures à intervalles d'échantillonnage réguliers et paramétrables de la pression d'eau appliquée sur l'appareil, ainsi que de la température de l'eau ([reefnet.ca](http://reefnet.ca)). Ces sondes conviennent parfaitement pour l'étude et leur utilisation sera ici détournée pour mesurer régulièrement la pression et la température de l'eau.

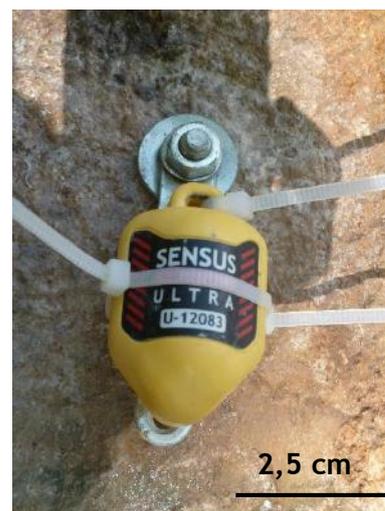


Fig. 9 : Exemple d'une sonde Reefnet, photo S. Dautun.

##### 1.2) Implantation des sondes et définition du protocole.

Le choix d'implantation des sondes dépend de l'importance du point de mesure (cours d'eau, sources, volume d'eau...). La favorisation des écoulements karstiques et les points dont le rôle reste à déterminer au sein du massif sont retenus.

L'implantation des sondes doit correspondre à un schéma qui permette de suivre l'évolution du volume d'eau (changement de débit) en différents points de la zone d'étude. Cela permet d'analyser la réponse de chaque point de mesure et éventuellement déterminer leur rôle dans le système. Les sondes ont donc été implantées en 8 points de la zone d'étude (Tab. 3). Comme pour les points d'intérêts, des fiches synthétiques sont disponibles dans les annexes (Ann. 2) détaillant chaque site où une sonde a été implantée.

Tab. 3 : Rôle des sondes et leur implantation.

Sonde	Rôle	N° Fiche
Sonde Extérieure	Mesure de la pression atmosphérique et de la température extérieure.	1
Sonde Résurgence	Mesures de débits et de température de l'eau, vérifie flux sortants.	2
Sonde Grotte de la Rivière Souterraine (Cascade)	Mesures de débits et de température de l'eau, voir les potentiels apports ou pertes au sein du réseau.	3
Sonde Grotte de la Rivière Souterraine (Sous Cascade)	Variation du niveau et de la température de l'eau, sécurité en cas de mise en charge de la rivière.	4
Sonde Perte	Mesure de débits et de température de l'eau, corrélations potentielles avec la Rivière Souterraine.	5
Sonde Tunnel	Mesure de débits et de température de l'eau, corrélations potentielles avec la Rivière Souterraine.	6
Sonde Gueule du Loup	Variation du niveau et de la température de l'eau, déterminer le rôle au sein du karst.	7
Sonde Tranquiou	Variation du niveau d'eau, déterminer le rôle au sein du karst.	8

Chaque site d'implantation de sonde est unique et impose des contraintes différentes. La méthode la plus simple est de fixer solidement la sonde à un bloc de roche et de déposer le bloc au fond de l'eau. La sonde va mesurer à intervalles de temps réguliers paramétrés au préalable la pression de l'eau qui lui est appliquée. Ici, l'intervalle de temps est de 10 minutes afin de pouvoir détecter des variations fines du débit.

Il est important de protéger la sonde avec un sac en plastique. Il faut le percer de trous pour que l'eau puisse pénétrer dans la sonde. Il protégera la sonde des charges en suspensions présentes dans l'eau, pouvant venir obstruer le capteur.

Plusieurs conditions doivent être réunies au niveau du site. Tout d'abord l'implantation des sondes doit se faire dans un bassin sans remous pour avoir une mesure de la variation de la hauteur d'eau du bassin par la pression de l'eau. Ensuite il doit exister un déversoir pour ce bassin comme un seuil ou une chute d'eau. Il faut que ce seuil soit bien calibré et ses dimensions doivent être connues, de façon à simplifier les calculs de débit ultérieurs.

Un seuil bien calibré est :

- un seuil de niveau,
- sans fuites pour avoir la totalité de l'eau passant en ce point,
- ayant une forme bien régulière (pouvant être rectangulaire ou triangulaire), car il représente la section du déversoir.

Tous ces paramètres sont importants car ils interviennent dans l'application de la formule pour calculer le débit. Pour valider la fiabilité, il faut également des mesures de débit indépendantes afin de pouvoir comparer avec celles obtenues par la Reefnet.

Dans le cas où le seuil est inexistant, ou si l'un des paramètres n'est pas respecté, cela implique un aménagement de seuil ou un réaménagement du seuil existant. Ainsi il vaut mieux privilégier les sites où les seuils existent déjà. Plusieurs possibilités peuvent être envisagées suivant les conditions du site d'implantation, allant de la planche en bois au coffrage.

### 1.3) Les sondes mesurant seulement les variations de hauteur d'eau.



Fig. 10 : Exemple d'implantation de sonde à la Gueule du Loup, photo L. Guillot.

Certaines sondes, comme celles implantées au Tranquiou et à la Gueule du Loup, ont été placées dans des bassins sans seuil. Ces sondes ne mesureront pas un débit mais seulement une hauteur d'eau. Cela nous renseignera sur les variations de hauteur d'eau dans les galeries de ces deux cavités. Il n'y a pas d'exutoire pour ces cas, mais en période de hautes eaux, le réseau se met en charge et la sonde permettra d'enregistrer la période et la quantité d'eau accumulée dans les galeries. La sonde a été placée et fixée dans un tube en PVC, percé de trous pour que l'eau puisse pénétrer (Fig. 10). Le tube est par la suite fermé hermétiquement aux deux extrémités. Une corde permet de fixer le dispositif, et de pouvoir remonter facilement la sonde, du bassin qui est profond pour le Tranquiou, et du gouffre pour la Gueule du Loup.

### 1.4) La sonde extérieure.

Afin de pouvoir obtenir la variation de hauteur d'eau, une sonde doit rester en dehors de l'eau, à l'extérieur pour mesurer la pression atmosphérique. Une sonde sous l'eau va enregistrer une pression. Cette pression résulte de la somme de la pression atmosphérique et de celle appliquée par l'eau sur la sonde. La sonde extérieure permettra donc une correction de nos données de pression, pour avoir seulement la pression de l'eau pour les autres sondes. Elle est placée à l'intérieur d'un abri météo (Fig. 11) pour ne pas être perturbée par les précipitations et pour pouvoir par la même occasion mesurer une température extérieure.



Fig. 11 : Sonde extérieure dans l'abri météo, photo S. Dautun.

### 1.5) Données de la sonde et calcul des débits.

Chaque sonde avait été mise en place l'année dernière à des dates différentes (Tab. 4) suivant l'avancé des aménagements et des sites d'implantations.

Tab. 4 : Sondes, positionnement et date de pose.

Ref	Positions au sein des seuils	Dates de pose
U-12086	Extérieure	04/06/2013
U-12087	Gueule du Loup	07/09/2013
U-12090	Perte	22/07/2013
U-12085	Tranquiou	08/09/2013
U-12089	Tunnel	25/07/2013
U-12088	GRS Cascade	30/07/2013
U-12082	GRS Sous Cascade	07/09/2013
U-12083	Résurgence	23/05/2013

**a) Données de la sonde.**

La sonde enregistre la pression et la température au cours du temps. La pression mesurée correspond au cumul de la pression de la lame d'eau exercée sur la sonde et la pression atmosphérique. Une correction est donc nécessaire pour obtenir seulement la pression de l'eau.

Le protocole a été défini sur la sonde placée à la Résurgence. Un suivi test a été effectué du 23 mai 2013 au 04 juin 2013. Une fois la sonde implantée, il faut déterminer la période de mesure et relater tous les effets externes pouvant intervenir sur les mesures, comme les opérations de pompage et autres actions anthropiques diverses. Une fois la sonde sortie et sèche, les données peuvent être extraites informatiquement à l'aide d'un connecteur USB et sont consultables à l'aide du logiciel "Sensus Manager". Le logiciel permet d'exporter les données des sondes sous forme d'un tableur afin de pouvoir les traiter plus facilement.

**b) Calcul du débit.**

Une fois les données extraites et corrigées sous forme de tableur, les pressions obtenues correspondent à la pression de la lame d'eau au-dessus de la sonde. Afin d'obtenir un débit, une retranscription de ces pressions en hauteurs d'eau est nécessaire.

Démonstration :

**1<sup>ère</sup> étape : correction de la pression.**

- Mesure de pression effectuée par une sonde dans l'eau :  
 $P_1 = \Delta P \text{ lame d'eau} + \Delta P \text{ atmosphère}$ , obtenue en mbar et convertie en Pa.
- Mesure de pression effectuée par une sonde dans l'air :  
 $P_2 = \Delta P \text{ atmosphère}$ , obtenue en mbar et convertie en Pa.
- $P_1 - P_2$  donne  $\Delta P$  lame d'eau.

**2<sup>ème</sup> étape : retranscrire en hauteur d'eau.**

- D'après la dynamique des fluides :  $\Delta P \text{ lame d'eau} = \rho_{\text{eau}} \times g \times \Delta H$   
avec  $\rho_{\text{eau}}$  la masse volumique de l'eau en  $\text{kg/m}^3$ ,  $g$  la pesanteur en  $\text{m/s}^2$  et  $\Delta H$  les variations de hauteur d'eau en m (*Fig. 12*).

$$\text{Par conséquent } \Delta H = \frac{\Delta P}{\rho_{\text{eau}} \times g}$$

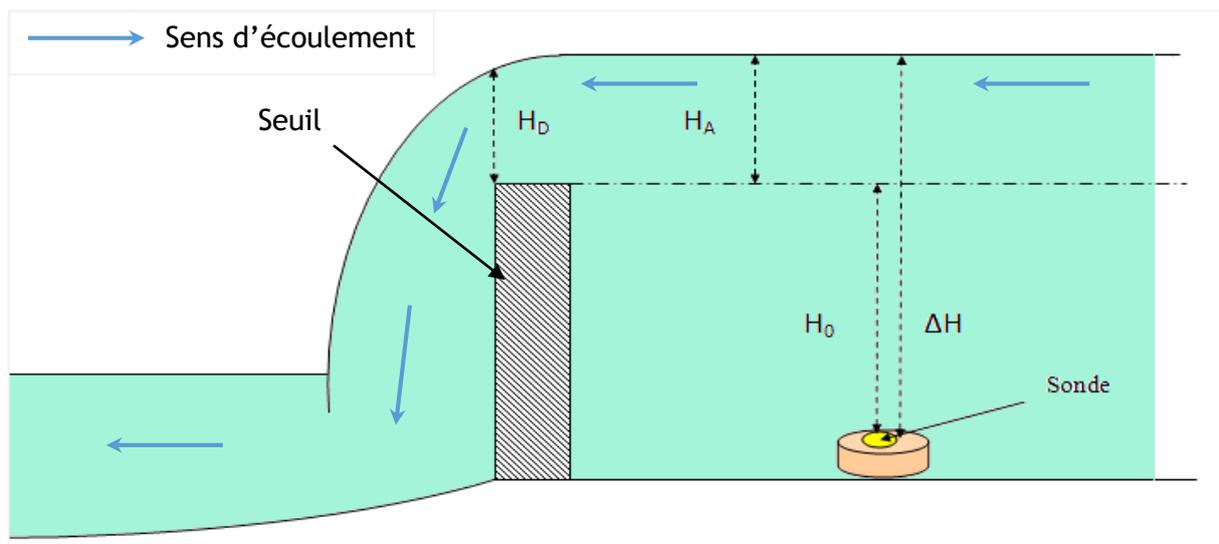


Fig. 12 : Modèle représentant un site de mesure avec seuil.

### 3<sup>ème</sup> étape : déterminer $H_0$ , la hauteur constante.

- Le calcul de  $H_0$  (qui est considérée comme une hauteur constante) se fait sur une mesure à un temps donné. Une  $H_D$ , hauteur d'eau au-dessus du déversoir, doit être mesurée à un temps donné (par exemple,  $H_D$  du 04 Juin 2013 à 15h10 au niveau de la Résurgence faisait 8,2 cm). Il permet de déterminer la  $H_A$  (Fig. 12).
- D'après la loi de débit en seuil frontal de section rectangulaire (Degoutte, 2012)  
 $H_A = 3/2 H_D$  (dans notre cas 12,3 cm).

Le  $\Delta H$  est donné par les calculs effectués avec les pressions obtenues avec la sonde (il valait 86,4 cm à ce moment précis).

- Déduction du  $H_0 = \Delta H - H_A$  (86,4 - 12,3 = 74,1 cm à la résurgence).

### 4<sup>ème</sup> étape : calcul de la hauteur $H_A$ au cours du temps.

- $H_A$  et  $H_D$  sont des valeurs oscillant au cours du temps. Il faut déterminer les variations de  $H_A$  afin de les utiliser pour calculer les débits. La sonde mesure le  $\Delta H$  à intervalles de temps réguliers (revoir étape 2).

$H_A = \Delta H - H_0$  (Fig. 12). Pour chaque valeur de hauteur mesurée par la sonde ( $\Delta H$ ), un  $H_A$  sera calculé. La hauteur  $H_A$  correspond à la partie de la lame d'eau oscillant au cours du temps. Si  $H_A = 0$ , alors le débit est nul, il ne coulera plus d'eau au niveau du déversoir.

**5<sup>ème</sup> étape : Calcul du débit.**

- L'obtention d'un débit se réalise en passant par la formule de "Francis" qui est la suivante :

$$Q = 0,415 \times \sqrt{2 \times g} \left( L - \frac{HA}{5} \right) \times HA^{\frac{3}{2}}$$

avec Q le débit m<sup>3</sup>/s, g = 9,81 m/s<sup>2</sup>, L la largeur du déversoir en mètre, et HA les hauteurs obtenues (revoir étape 4) en mètre.

Les dimensions de chaque seuil sont données sur leurs fiches synthétiques respectives (*Ann. 1*). Une fois chaque étape effectuée, un débit est finalement obtenu sur la période de temps, avec des variations nettes et précises.

Toutes les sondes ont été testées avant de les laisser mesurer les débits sur un an. Pour une meilleure approche des débits de la zone, une conversion des débits en L/s a été effectuée.

**1.6) Validation des mesures de débits par les sondes**

Une mesure de débit indépendante permet de pouvoir comparer les données obtenues avec la sonde pression et de vérifier dans un même temps les résultats et leur fiabilité. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Les mesures de débit indépendantes sont ponctuelles dans le temps, et il faut donc veiller à en réaliser un maximum afin d'avoir une comparaison de qualité avec les débits mesurés par la sonde.

**a) Le jaugeage chimique.**

Le jaugeage chimique est la méthode la mieux adaptée aux écoulements turbulents. Elle consiste à introduire un traceur dans le cours d'eau et de suivre l'évolution du nuage au cours du temps. Ici c'est le chlorure de sodium qui a été utilisé comme traceur, d'où le nom de mesure de débit au sel.

Le principe consiste à injecter dans la rivière une solution de saumure et à rechercher dans quelle proportion cette solution a été diluée dans la rivière. Les quantités de sel utilisées ici sont de l'ordre de 50 à 100 g et ne présentent par conséquent aucun danger pour le milieu aquatique. A l'aide d'un conductimètre VWR CO310, une mesure de la conductivité est effectuée à intervalles de temps réguliers dans le cours d'eau. Le passage du nuage de sel est marqué par une montée brutale de la conductivité (*Fig. 13*), la fin du passage correspondant au retour à la conductivité initiale du cours d'eau (*Audra P., 2001*). La distance entre le point d'injection et celui de la mesure de la conductivité doit être suffisante pour assurer un bon mélange. Elle est de l'ordre de quelques mètres pour les petits cours d'eau à plusieurs dizaines de mètres pour un cours d'eau de plus grande envergure. En théorie, elle serait de l'ordre de 50 fois la largeur du cours d'eau (*Audra P., 2001*).

Les limites de la méthode sont les suivantes :

- Devient difficile à utiliser pour les débits dépassant plusieurs m<sup>3</sup>/s.
- Problème de dilution ou mauvais mélange.
- Présence de pertes méconnues.

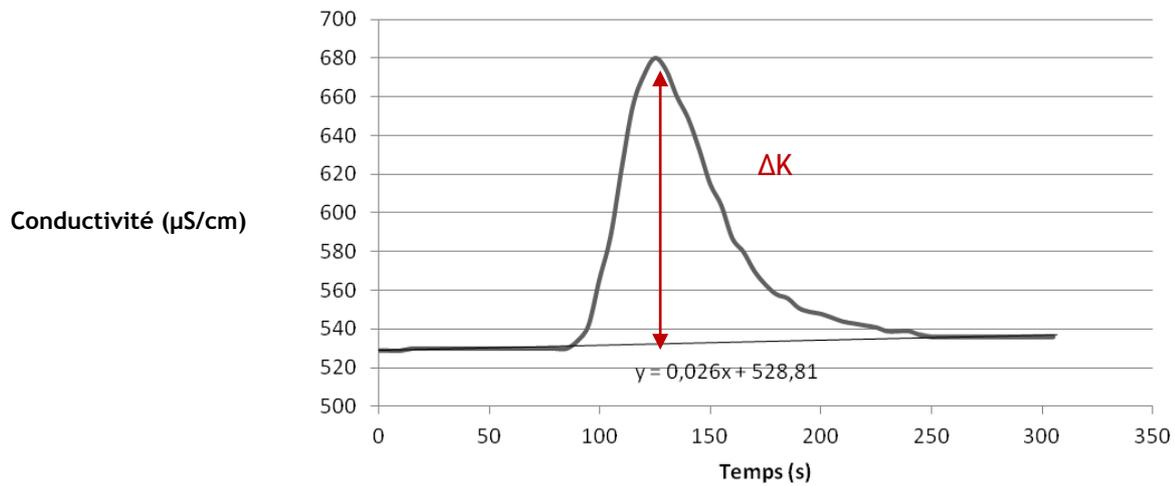


Fig. 13 : Exemple de mesure de débit au sel effectuée à la résurgence le 04 Juin 2013.

Démonstration :

- La variation de conductivité  $\Delta K$  (en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cf : Figure 25) correspond à la différence ( $K_{\text{mesuré}} - K_{\text{ini}}$ ).

Sachant que la constante de conversion est  $k = 2083 \mu\text{S}/\text{cm}$  pour 1 kg de sel dans 1  $\text{m}^3$  d'eau (Audra, 2001) :

$$\frac{\Delta K}{k} = \Delta C$$

avec  $\Delta C$  la variation de la concentration de sel au cours du temps (en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

- Connaissant  $\Delta C$  :

$$Q_{\text{sel}} = \Delta C \times Q_{\text{eau}}$$

avec respectivement  $Q_{\text{sel}}$  débit du sel et  $Q_{\text{eau}}$  débit du cours d'eau,

- Sachant la masse de sel  $M_{\text{sel}}$  :

$$M_{\text{sel}} = \int_0^{\infty} Q_{\text{sel}} dt = \int_0^{\infty} \Delta C \times Q_{\text{eau}} dt$$

Comme  $Q_{\text{eau}}$  est une constante (car c'est une seule mesure de débit), elle sort de l'intégrale :

$$M_{\text{sel}} = Q_{\text{eau}} \int_0^{\infty} \Delta C dt,$$

$$\text{d'où } Q_{\text{eau}} = \frac{M_{\text{sel}}}{\int_0^{\infty} \Delta C dt}$$

Dans l'exemple, la masse de sel était de 500 g, et avec les données obtenues et après calcul des variations de concentration au cours du temps, on obtient un débit 133 L/s ou 0,133  $\text{m}^3/\text{s}$  pour le 04 Juin 2013 à 15h10.

### b) Mesures de débit à la résurgence (jaugeage "au flotteur").

Des mesures de débit ont pu être effectuées au niveau des buses situées au niveau de la Résurgence de la Balme (Fig. 14). Une application d'une sorte de jaugeage "au flotteur" a pu être mise en place. Cette méthode ne demande qu'une instrumentation sommaire et donne des estimations d'une précision acceptable (Audra P., 2001). En effet il suffit d'un mètre et d'un chronomètre pour réaliser une mesure. Dans le cas habituel, il faut déterminer la section du cours d'eau. Ici, le travail est facilité par les 4 buses.

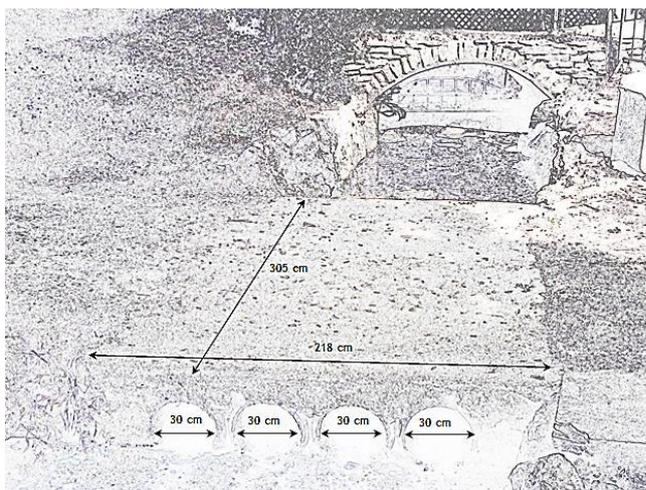


Fig. 14 : Buses se situant près de la Résurgence.

Pour déterminer la section totale d'eau, il faut calculer la section d'eau d'une buse et la multiplier par quatre. De plus les buses sont des éléments calibrés permettant un écoulement régulier de l'eau. Dans un premier temps, les dimensions de l'ouvrage ont été prises (Fig. 14). Ensuite, un modèle pour le calcul de section de l'ellipse d'eau circulant dans les buses a été construit. Cela permet par la suite de mesurer seulement une hauteur d'eau au niveau de la buse pour déterminer l'air de la section d'eau (Fig. 15).

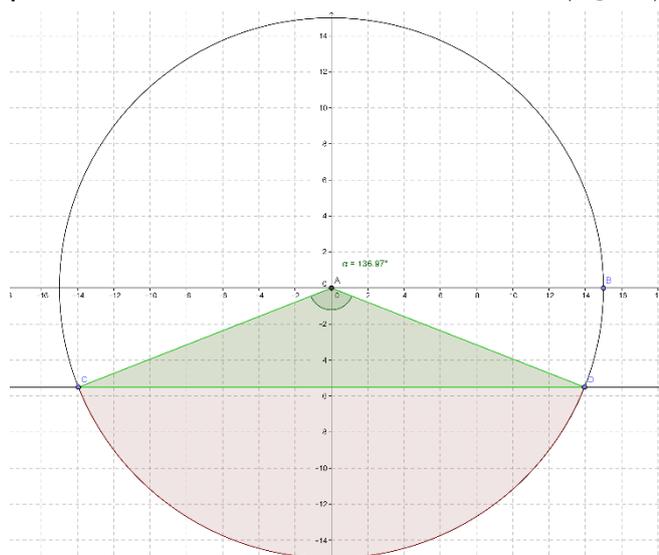


Fig. 15 : Exemple illustrant le modèle pour calculer la section d'eau d'une buse, hauteur d'eau 9,5 cm.

Ainsi une mesure de débit s'obtient facilement en mesurant la hauteur d'eau à la sortie d'une buse, et en chronométrant le temps qu'un flotteur met à parcourir la longueur de la buse (ici 3,05 m). En ce qui concerne le temps, l'opération est répétée 10 fois puis les valeurs obtenues sont moyennées. Le temps obtenu divisé par la distance parcourue de l'objet dans la buse donne une vitesse. La hauteur mesurée donne par le biais du modèle la section d'eau. Le débit résulte alors du produit de la section par la vitesse.

## 2) Caractéristiques physico-chimiques des eaux.

### 2.1) Analyses physico-chimiques.

Des séries d'analyses d'eau ponctuelles ont été réalisées au sein du site et ses alentours. C'est le laboratoire CARSO basé à Lyon qui a été mandaté pour le traitement des différents échantillons d'eau (Fig. 16). Les échantillons ont été transportés par glaciaire du site au laboratoire à Lyon, dans les 24 à 48 heures après prélèvements.

Une première série avait été faite en 2006, et une nouvelle série a eu lieu cette année afin de caractériser les éléments majeurs en solution, au niveau de différents points caractéristiques. Ceci permet d'avoir une approche sur les apports d'eau potentiels en fonction des éléments trouvés en solution entre eaux superficielles et eau du karst.

## 2.2) Analyses hebdomadaires pH et conductivité, suivi annuel.

Des analyses d'eau hebdomadaires ont été planifiées sur l'année hydrologique. Le suivi sur 27 points a débuté en novembre 2013. Ces analyses ont été effectuées à l'aide d'un pH-mètre SevenEasy S20K avec électrode InLab® Expert Pro de chez Mettler Toledo et d'un conductimètre CDM210 de chez Radiometer Analytical en laboratoire. Les prélèvements se sont déroulés une fois par semaine à l'aide de flacons en verre.

## 2.3) Température de l'eau et relation avec le débit.

Avec l'aide des sondes Reefnet implantées, un suivi de la température s'effectuera en parallèle avec celui de la pression. Ainsi, une corrélation avec le débit à l'instant  $t$  nous permettra de voir les réponses du système karstique en fonction de l'événement auquel il est soumis. Par exemple, suite à un épisode pluvieux, si la température de l'eau diminue, le cas d'une dynamique en drain direct ou dominant s'appliquerait. A l'inverse, si la température augmente suite à l'événement, le cas d'un déstockage de l'eau contenue dans la porosité et/ou de la fracturation de la roche par « effet piston » pourrait expliquer ce phénomène, comme également des apports par drains interconnectés. La température mesurée dans l'eau par les appareils est donnée au centième, ce qui permet de bien suivre les variations.

# 3) Multi-traçage colorimétrique.

## 3.1) Introduction.

Le traçage artificiel des eaux souterraines est une méthode rapide et pratique de reconnaissance des écoulements souterrains. Une opération de traçage consiste à introduire un traceur (marqueur chimique initialement non contenu dans l'eau) en un point donné d'un karst pour mettre en évidence une relation avec un ou plusieurs points de sorties des eaux (*Audra P., 2001*). Les premiers vrais essais de traçage remontent à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle entre le Danube et la source de l'Aach en Allemagne (*BRGM/RP-58237-FR, 2010*). Un multi-traçage, c'est-à-dire l'utilisation de plusieurs traceurs sur la même opération, permet de différencier les connexions entre les différents apports et sorties d'eau. Avec une mesure de la concentration du traceur (traçage quantitatif) et en examinant sa courbe de restitution à l'émergence, il est aussi possible d'extraire des informations importantes sur la structure du système karstique.

Quelques anciens traçages ont été répertoriés sur le massif (*Tab. 5*), ce qui nous donne des informations sur les potentiels résultats de notre opération, ainsi que des indications sur les types de traceurs employés déjà potentiellement présents en trace dans l'eau (bruit de fond), ou encore l'ordre de grandeur de la quantité de traceur à injecter.

Tab. 5 : Historique des anciens traçages sur Azé, (Extrait de Guillot, Morel &amp; Simonnot, 2005).

Lieu d'injection	Commune	Coordonnées	Date	Traceur	Quantité en kg	Etat hydrologique	Lieu(x) de réapparition	Commune	Coordonnées	Temps en h	Distance en m	Dénivelé en m	Vitesse en m/h	Opérateurs	Bibliographie
Perte de la Goulouze	Saint-Gengoux-de-Scissé	786 2165.1 324	3 - 08 1970	Fluo	0.3	Débit faible (étiage)	Source de la Balme de Rizerolles	Azé	786.18 162.06 250	114	2400	74	21	Lagroste L. Morel J.	FSBS n°4, 1972
Perte de la Goulouze	Saint-Gengoux-de-Scissé	786 2165.1 324	1930	?			Source de la Balme de Rizerolles	Azé	786.18 162.06 250	36	2400	74	67		
Gouffre du Tunnel	Saint-Gengoux-de-Scissé	786.525 2165.175 336	1930	?			Source de la Balme de Rizerolles	Azé	786.18 162.06 250		2450	86			

Dans un premier temps, un travail de diffusion d'information au niveau des organismes et des communes concernés a été réalisé afin de les avertir et de les éclairer sur l'opération. L'utilisation des traceurs, en l'occurrence ici des colorants, peut amener à penser à une pollution ou à effrayer de par son aspect visuel percutant. Afin d'assurer une bonne communication sur le sujet, un courrier a été distribué aux organismes et fut également communiqué au niveau des communes dans le compte rendu des conseils municipaux.

Le choix de la période s'est porté en fonction de la disponibilité du matériel d'une part, et d'autre part en fonction des potentielles conditions hydrologiques. Une injection de colorant est à privilégier lors d'une période faisant immédiatement suite à des crues prolongées, avant d'aborder une phase de tarissement (Audra P., 2001). La période considérée s'est donc étendue de fin avril à début juin.

### 3.2) Les traceurs.

Les traceurs doivent présenter une bonne stabilité chimique et avoir un comportement qui se rapproche au mieux de celui de l'eau, de façon à représenter les mouvements de cette eau (Rodier J., Legube B., Merlet N. & al, 2009). Pour ce traçage, des traceurs fluorescents (Tab. 6) ont été choisis. Leurs avantages sont d'avoir une adsorption souvent faible et une limite de détection basse. Leur présence initiale dans les eaux (bruit de fond) est également la plupart du temps faible. Il n'impacte pas le milieu naturel et sont sans danger pour la faune et la flore. Enfin ils sont d'un faible coût d'achat et d'analyse.

Tab. 6 : Quelques caractéristiques des traceurs fluorescents, (Extrait de l'OFEG, groupe de travail traçage de la société suisse d'hydrogéologie, 2002).

Dénomination (Synonymes entre parenthèses)	Index couleur I.C.	Spectre excitation / émission [nm] <sup>4</sup>	Evaluation toxicologique <sup>5</sup>	Limite de détection ++++ = très bonne + = moyen	Retardement (dû à l'adsorption réversible) - = faible - - - = élevé	Restitution du traceur ++++ = élevée + = faible	Rapport qualité/prix du traceur <sup>6</sup> ++++ = très bon + = mauvais	Propriétés particulières	Remarques (voir aussi commentaires du chap. 2.3.2)
Uranine (Fluorescéine disodique) (Fluorescéine hydraulique)	45350	490 / 515	inoffensif	++++	-	++++	++++	peut être endommagée par des oxydants (p. ex. chlore, ozone)	globalement, le meilleur traceur
Amidorhodamine G (Sulforhodamine G extra)	45220	530 / 555	inoffensif	+++	- - -	+	++		
Tinopal (T-CBS-X, T-ABP liquide)		346 / 435	inoffensif	+	- - -	+	+	bruit de fond élevé à la mesure	

<sup>4</sup> Longueurs d'onde produisant le signal de fluorescence maximal avec la technique du double balayage (selon les types d'appareil, de légers écarts sont possibles).

<sup>5</sup> UMWELTBUNDESAMT 1997, groupe de travail «Human- und ökotoxikologische Bewertung von Markierungsmitteln in Gewässern» et BEHRENS et al. 2001.

<sup>6</sup> Evaluation de la qualité des traceurs d'après la sensibilité de détection et la mobilité (capacité de transport dans l'eau souterraine).

Dans notre cas, 3 colorants différents, utilisés habituellement en hydrogéologie, ont été sélectionnés :

- **Uranine® (fluorescéine)** : poudre de couleur orange donnant une coloration **vert** fluorescent avec un fort impact visuel. C'est le colorant le plus utilisé en raison de sa très grande sensibilité de détection (visible à l'œil à 10 ppb suivant le volume d'eau), de sa faible tendance à l'adsorption et de son prix relativement bas (Office Fédéral des Eaux et de la Géologie et SSH, 2002).
- **Amido-rhodamine G** : plus souvent appelée sulfo-rhodamine G, son innocuité pour l'homme en fait un traceur de choix pour les eaux souterraines, alors que son usage pour les eaux de surface est limité par sa toxicité sur les plantes (Rodier J., Legube B., Merlet N. & al, 2009). Elle se présente sous forme de poudre **rouge** et son point faible réside dans son adsorption assez élevée.
- **Tinopal CBS-CL** : le Tinopal® appartient à la catégorie des azurants optiques. Anhydre il se présente sous forme d'une poudre de couleur blanche devenant **bleue** à la dilution. Il est très peu visible à l'œil nu et ses inconvénients majeurs sont une haute photosensibilité (dégradation aux UV) et que son spectre se confond à celui de la matière organique (création de parasites et d'artefacts).

Ces colorants ont été également choisis de par leur compatibilité aux fluorimètres GGUN-FL30 et FL-24, matériel de mesure que nous avons à disposition et détaillé dans la partie ci-après.



Fig. 16 : Equipe d'injection au Vautiant, photo L. Barriquand.

L'**Uranine®** et la **Rhodamine®** étaient sous forme de poudre, contrairement au **Tinopal®** qui lui était déjà sous forme liquide. L'inconvénient des colorants sous forme de poudre est leur volatilité. Ceci augmente le risque de contamination d'échantillon ou la perte d'une partie du colorant lors de sa dilution. Une combinaison intégrale et des lunettes et des gants sont nécessaires pour la protection de la ou des personne(s) injectant le colorant (Fig. 16). Il faut également faire attention au transport par le biais des bottes ou chaussures.

Ainsi deux équipes bien distinctes ont été constituées pour chaque campagne, la première équipe s'occupant des injections et la deuxième équipe des prélèvements et analyses au fluorimètre. Les prélèvements manuels permettent d'avoir une sécurité vis à vis des fluorimètres, et nous concernant, ces prélèvements contrôlaient également des points auxiliaires comme des lavoirs et des cours d'eau.

### 3.3) Les fluorimètres.

Pour ce traçage, 3 fluorimètres de type GGUN FL30 (Fig. 17) et 1 fluorimètre GGUN-FL24 dont on se sert habituellement pour les forages ont été utilisés. Parmi ces 4 appareils, 2 ont été loués à une société Suisse Albillia de l'Université de Neuchâtel, et les 2 autres nous ont été prêtés par Jacques Mudry et Catherine Bertrand du Laboratoire Chrono environnement UMR 6249 CNRS, avec l'aide également de Didier Cailhol (FFS).



Fig. 17 : Exemple de GGUN-FL30, photo V. Reynard.

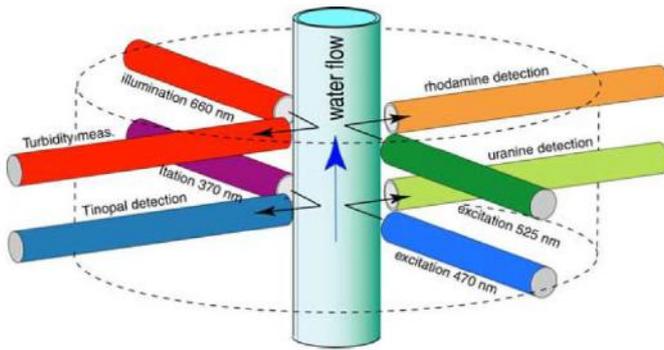


Fig. 18 : Fonctionnement à l'intérieur du fluorimètre, Schnegg 2012.

qu'une section de détection, orientés à 90° de la source du rayon d'excitation permettent de déterminer la trace ou non de colorant par photo-détection (Schnegg P.A., 2012). L'intensité de la coloration mesurée est proportionnelle à la concentration en traceur. Le système s'apparente à un spectrofluorimètre de terrain. Le seuil de détection est inférieur à 0,05 ppb, et le seuil de saturation est de l'ordre de 1500 ppb. La mesure de la turbidité va de 0,02 à 400 NTU.

L'appareil est relié, par un câble étanche, à un système d'alimentation et d'acquisition de données. La fréquence d'échantillonnage est paramétrable à l'aide d'un boîtier électronique, l'alimentation s'effectue par une batterie soit de 6 volts soit de 12 volts suivant le type d'appareil, et les informations relevées par le fluorimètre sont stockées dans un carte mémoire compact flash (Fig. 19).

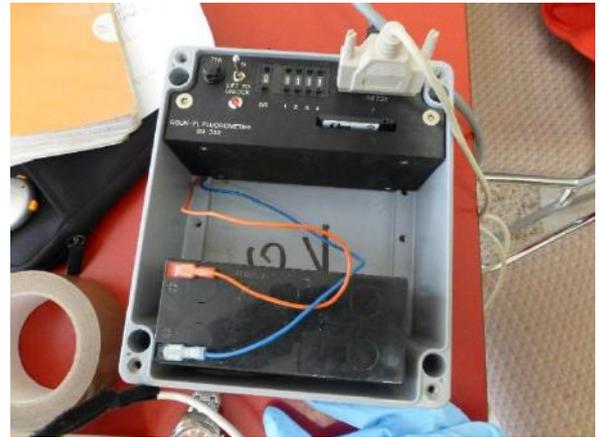


Fig. 19 : Appareil externe du fluorimètre, photo S. Dautun.

### 3.4) 1<sup>ère</sup> campagne.

Pour cette première campagne de traçage, les fluorimètres ont été disposés au niveau de la Salle de la Cascade pour la Grotte de la Rivière Souterraine, dans la petite mare devant le musée du site des grottes, et enfin à la Gueule du Loup. Les 3 colorants vus précédemment ont été utilisés comme suit (Tab. 7) :

Tab. 7 : Synthèse de la 1<sup>ère</sup> campagne.

Colorants	Lieu d'injection	Date & heure de l'injection	Masse Injectée	Distance apparente Résurgence à Azé
Uranine®	Gouffre du Vautiant	02/05/2014 10:30	470 g	4,5 km
Rhodamine®	Perte de la Goulouze	02/05/2014 9:15	500 g	2,3 km
Tinopal®	Gouffre Tunnel Saint-Gengoux	02/05/2014 9:05	527 mL	2,3 km

Les quantités à injecter ont été estimées à l'aide de différentes formules (Tab. 8) et en se basant sur une sortie de colorant à la résurgence à Azé.

Tab. 8 : Estimation des quantités de colorants à injecter.

Quantité en g	UNESCO	BENDEL	JAILLET	MARTEL	FINAL
Formule	$k \times L$	$0,25 \times Q \times L$	$0,50 \times Q \times L$	$Q \times L$	
<b>1ère campagne</b>					
Perte Goulouze/Résurgence	460 2300	57,5	115	230	500
Tunnel/Résurgence	460 2300	57,5	115	230	500
Vautiant/Résurgence	900 4500	112,5	225	450	500
<b>2ème campagne</b>					
Perte Verzée/Résurgence	600 3000	75	150	300	500
Teppes/Résurgence	800 4000	100	200	400	500
<b>Totaux</b>					
	3220 16100	402,5	805	1610	2500

#### a) Injection au Tunnel de Saint-Gengoux-de-Scissé.

L'injection au Tunnel était la plus simple à réaliser. Le produit à injecter étant le **Tinopal®** sous forme liquide, les 500 mL ont été transportés dans une bouteille de 50 cL en PET à l'abri de la lumière. Le Gouffre du Tunnel est alimenté en eau, par de l'eau s'échappant d'une fuite de l'ancienne canalisation d'adduction d'eau. Dans un premier temps le produit est dilué dans une bassine, puis dans un second temps le mélange est injecté dans le courant d'eau et non dans le gouffre lui-même afin d'éviter la perte de colorant sur les parois.

#### b) Injection à la Perte de la Goulouze.

Comme pour le Tunnel, la Perte est alimentée en eau par la Goulouze et la source Peuplier. La poudre de **Rhodamine®**, transportée dans un seau plastique étanche, est d'abord diluée dans une bassine (Fig. 20) avec un mélange d'eau (8 L) et d'alcool à brûler (2 L, le colorant se dilue mieux avec l'alcool à brûler et évite ainsi la formation de grumeaux problématiques).



Fig. 20 : Equipe d'injection à la Perte de la Goulouze, photo L. Barriquand.



Fig. 21 : Citernes pour l'alimentation du Vautiant, photo L. Barriquand.

#### c) Injection au gouffre du Vautiant.

Contrairement aux deux premières injections, le Gouffre du Vautiant est sec et situé sur un secteur fracturé et éloigné de tout cours d'eau. Il a donc fallu amener de l'eau via deux citernes, (1,5 m<sup>3</sup> et 3 m<sup>3</sup>, Fig. 21). Un peu plus de 180 mètres de tuyaux ont été tirés du pré où les citernes pouvait accéder, jusqu'au gouffre.



Fig. 22 : Récupération d'eau au niveau des tuyaux, photo L. Barriquand.

Dans un premier temps, une rotation de citerne a permis de créer un courant d'eau. Dans un second temps, toujours à l'aide d'une bassine et comme pour la Rhodamine®, l'Uranine® a été diluée dans de l'eau et de l'alcool à brûler (Fig. 22) dans les mêmes proportions. Le mélange a été introduit dans un entonnoir relié à un tuyau qui descendait jusqu'à l'étréture du gouffre. Une fois l'injection effectuée et dans un dernier temps, les rotations de citernes se sont alternées afin de pousser le colorant dans le gouffre. Au total, 12 m<sup>3</sup> d'eau ont été envoyés dans le Vautiant.

Au total, une dizaine de bénévoles auront prêté main forte pour réaliser les injections dans la matinée.

### 3.5) 2<sup>ème</sup> campagne.

Avec les quantités de colorant prévues (Tab. 8) et restantes, une deuxième campagne visant à délimiter les limites nord et est du bassin a été réalisée. Elle concerne deux points :

- Une perte de la Verzée découverte au nord grâce aux faibles précipitations de cette année du mois de mars au mois juin.
- Le Gouffre des Teppes, dont le rôle était à déterminer, possédant une position intéressante entre le Tunnel au sud et le Vautiant au nord (Fig. 5).

Les fluorimètres ont tous été placés dans la grotte comme sur la coupe (Fig. 7).

Colorants	Lieu d'injection	Date & heure de l'injection	Masse Injectée	Distance de la Résurgence à Azé
Uranine®	Gouffre des Teppes	15/05/2014 21:00	530 g	3,0 km
Tinopal®	Perte Verzée Nord	15/05/2014 18:40	473 mL	4,0 km

#### a) Gouffre des Teppes à Saint-Gengoux-de-Scissé.

Le Gouffre des Teppes (Fig. 23) correspond à un puit de 4 mètres de profondeur creusé dans les calcaires du Bajocien. Il est complètement sec. Comme pour le Vautiant, il a dû être alimenté en eau. Dans ce cas-ci nous sommes passés par l'utilisation d'une borne à incendie et 220 mètres de tuyaux de pompier de diamètre 45. Une séance de réalimentation en eau a été organisée le lendemain pour être sûr de bien faire progresser le traceur au sein du réseau. Toute l'eau envoyée a été absorbée sans débordement.



Fig. 23 : Injection d'Uranine® dans le Gouffre des Teppes, photo S. Dautun.

### b) Perte de la Verzée Nord.

La Perte de la Verzée Nord constitue la perte la plus au nord du cours d'eau jusqu'ici connue. Afin de vérifier la connectivité entre la Verzée et le réseau karstique comme pour la Goulouze, ce point fût choisi pour la deuxième opération de traçage. Le Tinopal®, colorant bleu, a donc été injecté en ce lieu (Fig. 24). Le même protocole que précédemment a été respecté. Cinq personnes bénévoles ont participé aux injections.



Fig. 24 : Injection de Tinopal® à la Perte de la Verzée Nord, photo S. Dautun.

### 3.6) Prélèvements d'eau.

Lors des campagnes de traçage, un circuit de prélèvement a été défini afin qu'un binôme puissent effectuer une tournée de 12 points, comprenant des lavoirs, cours d'eau et sources (Ann. 3). Suivant les analyses en directe sur le fluorimètre garder en « appareil de laboratoire » fixe, la résolution maximum était d'un prélèvement toutes les demi-heures. Ceci dépendait également du nombre de personnes disponibles, les personnes participant à l'opération étant bénévoles. Ainsi, des rotations de binômes se sont succédées, de jour comme de nuit, afin de suivre l'évolution du colorant. La première et la deuxième campagne ont mobilisé un peu plus d'une vingtaine de personnes.

Les prélèvements ont été effectués dans des flacons en PET, sur lesquels figuraient pour chacun la date et l'heure du prélèvement, le lieu et les initiales du préleveur. Pour chaque point différent, afin d'éviter les contaminations, le port de gants et changement de cette paire de gants à chaque point a été respecté. Chaque échantillon d'eau prélevé a été par la suite protégé de la lumière pour la photosensibilité du colorant, et a été de suite ramené pour analyse en fin de tournée.

### 3.7) Modélisation de la réponse sur une partie connue du réseau.

Afin de pouvoir modéliser une réponse au niveau de la Grotte de la Rivière Souterraine, une injection de fluorescéine a été effectuée le 03/06/2014 à 22:30 au niveau du Siphon des Beaunois. Les quatre fluorimètres ont été disposés dans la grotte (Fig. 7) en amont de la



Fig. 25 : Fluorimètre et Uranine® à la Salle du Siphon, photo JJ Mépas.

Cascade Naturelle, dans la Salle de la Cascade, dans la Salle du Siphon (Fig. 25), et à la Résurgence (Tab. 9). Le mélange est constitué de 20 grammes de fluorescéine, dilués avec 80 mL d'alcool à brûler. Le tout est redilué dans un bidon de 5 L avec de l'eau.

Tab. 9 : Caractéristiques des sections de traçages.

Section	Type d'écoulement	Distance (m)
Beaunois - Cascade Naturelle	Écoulement libre	30
Cascade Naturelle - Salle de la Cascade	Écoulement siphon + libre	250
Salle de la Cascade - Siphon	Écoulement siphon	340
Siphon - Résurgence	Écoulement siphon + libre	770

## IV) Résultats.

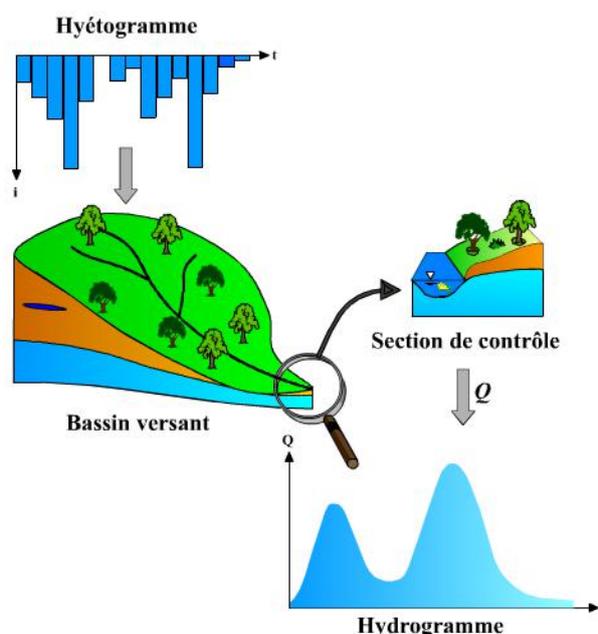
### 1) Les débits et la réponse à la pluie.

#### 1.1) La réponse hydrologique.

Afin de pouvoir interpréter les résultats, il faut les réunir et les intégrer sur un même pas de temps. Cela permet de les uniformiser, de voir leurs corrélations potentielles et sera utile par la suite pour pouvoir calculer par exemple les temps de réponse entre un événement pluvieux et la réaction du débit. Les données météorologiques sont issues de la station météorologique la plus proche, qui est pour nous celle d'Igé. Ces données ont été achetées chez le fournisseur météo Promété.

Ainsi pour chaque sonde mesurant le débit, (Tunnel de Saint-Gengoux-de-Scissé (*Fig. 27*), de la Perte de la Goulouze (*Fig. 28*), de la Grotte de la Rivière Souterraine (*Fig. 29*) et de la Résurgence de la Balme (*Fig. 30*)), des graphiques récapitulatifs ont été constitués.

Pour chaque graphique, une corrélation se distingue entre le débit et la météorologie. Un événement pluvieux donné correspond à une augmentation du débit. Cette réaction est définie comme étant la réponse hydrologique du bassin versant, c'est-à-dire la façon dont le bassin versant va réagir à un événement ou une suite d'événements météorologiques. La réponse hydrologique (*Fig. 26*), dépend de plusieurs facteurs ce qui explique des réactions et des réponses par conséquent différentes pour des événements similaires. Les conditions climatiques propres au milieu constituent le principal facteur dit externe. Intervient ensuite la pluviosité qui correspond à la répartition spatiale et temporelle des pluies au niveau du bassin (durée et intensité). Viennent ensuite des facteurs dits plutôt internes comme la morphologie du bassin (surface, topographie et forme), ses propriétés physiques (nature et occupation des sols, lithologie), la répartition des cours d'eau en son sein, et enfin l'état antécédent d'humidité des sols étant assimilé à l'eau contenue dans la porosité de celui-ci (état de saturation) (<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>). L'augmentation du débit se définit sous la forme d'un pic.



*Fig. 26 : Illustration de la réponse hydrologique d'un bassin versant (<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>).*

Les différences de débit s'expliquent par le type de milieu. Un milieu ouvert à l'extérieur comme la Résurgence et la Perte, n'aura pas la même dynamique et des réponses différentes par rapport à un milieu fermé (non exposé à l'extérieur) comme le Tunnel et la Grotte de la Rivière Souterraine faisant intervenir les mécanismes karstiques (infiltrations, effets, pistons, apports et pertes...).

Débit au Tunnel de Saint-Gengoux-de-Scissé.

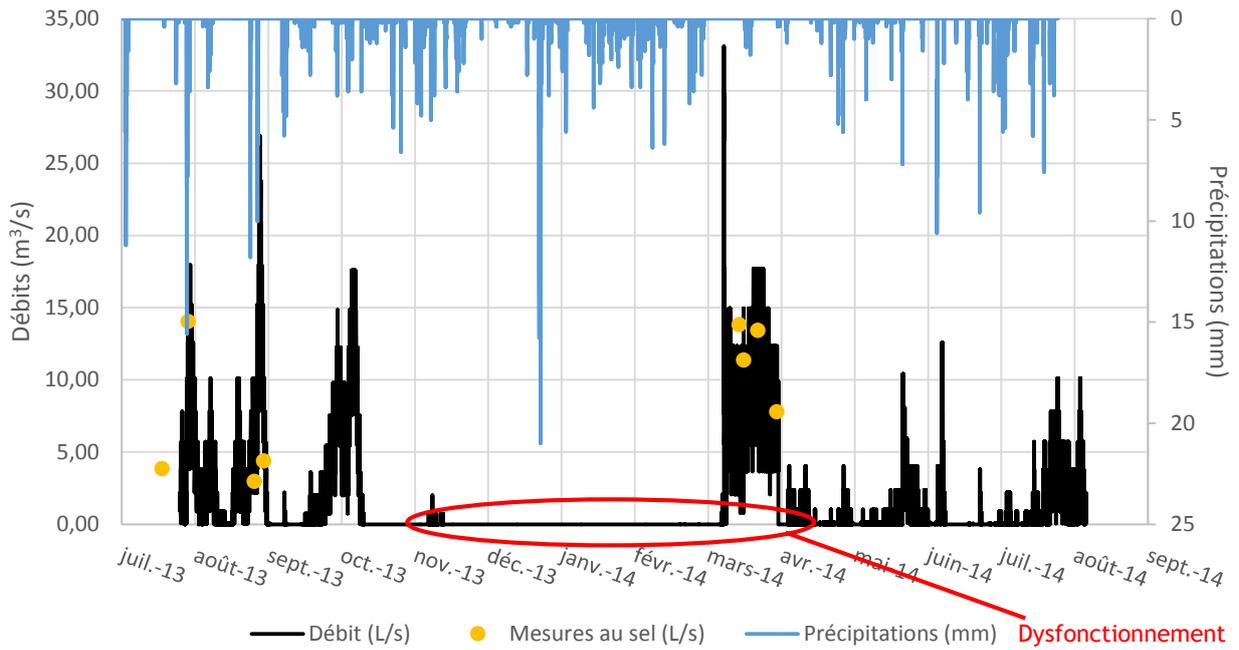


Fig. 27 : Variations des débits à la station "Tunnel de St Gengoux" et des précipitations journalières à Igé de juillet 2013 à août 2014.

Débit à la Perte de la Goulouze.

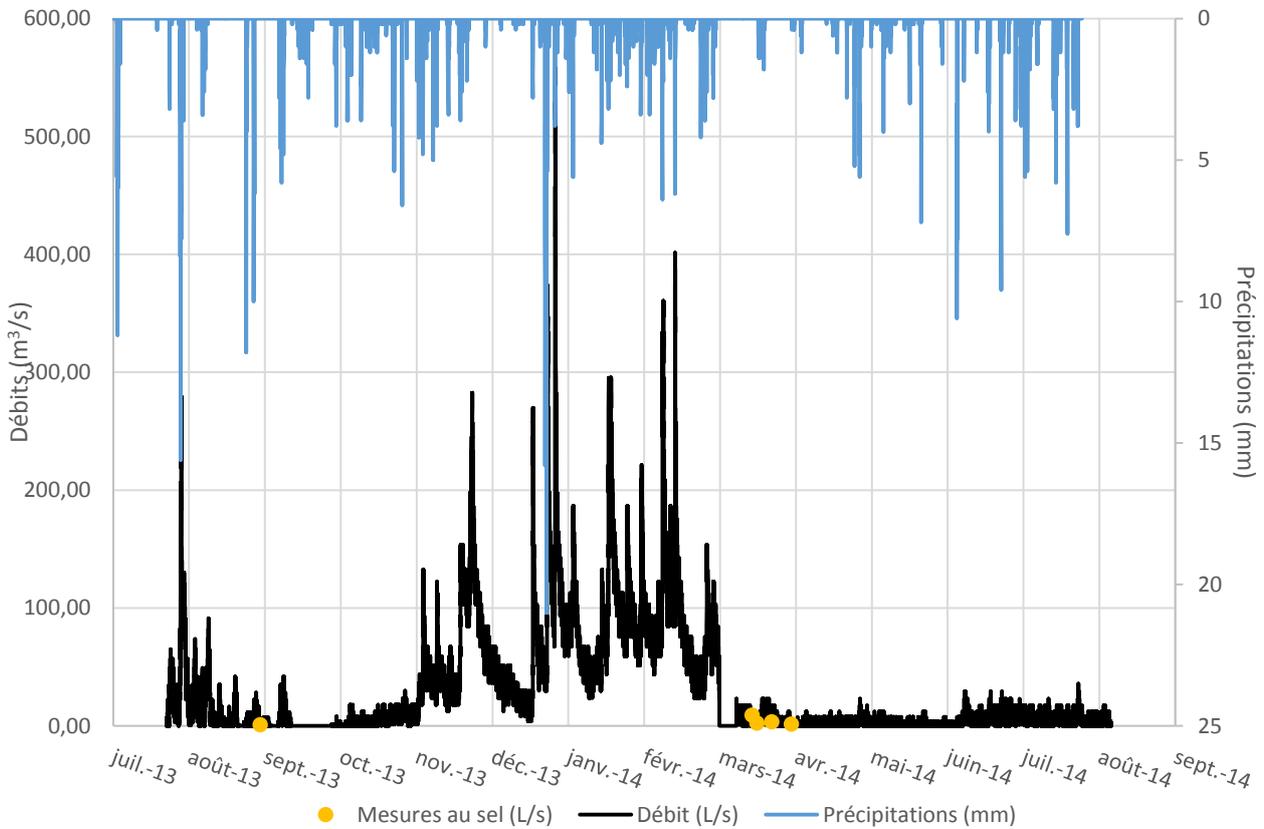
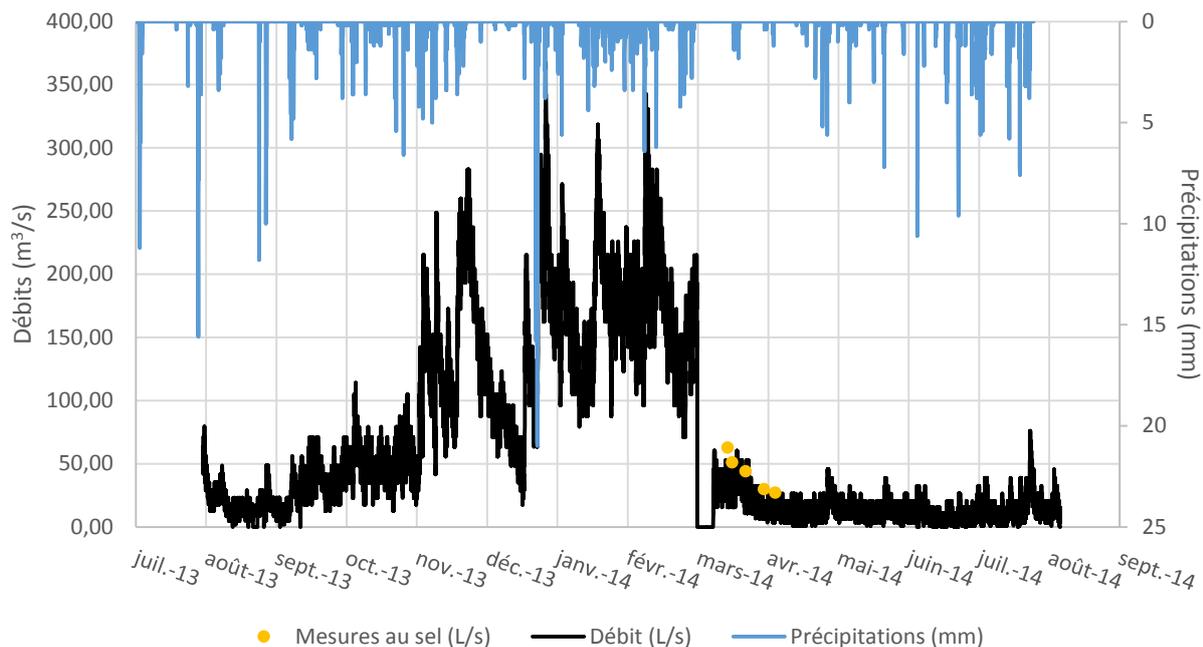


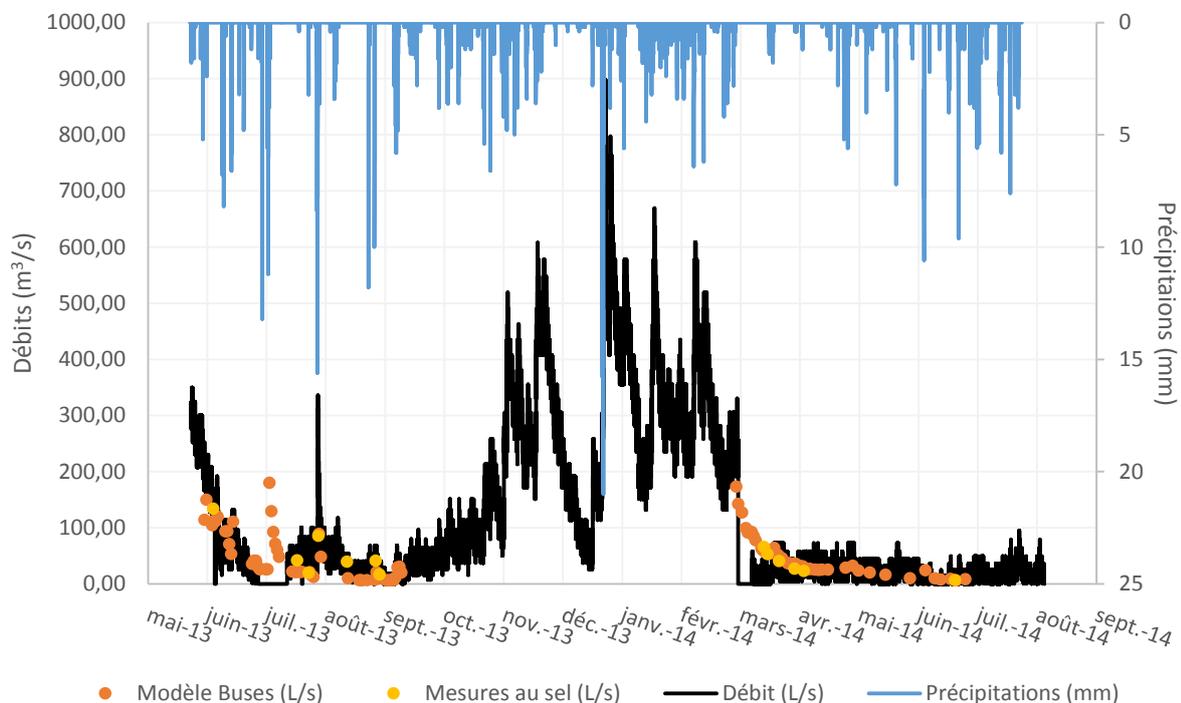
Fig. 28 : Variations des débits à la station "Perte de la Goulouze" et des précipitations journalières à Igé de juillet 2013 à août 2014.

## Débit à la Salle de la Cascade.

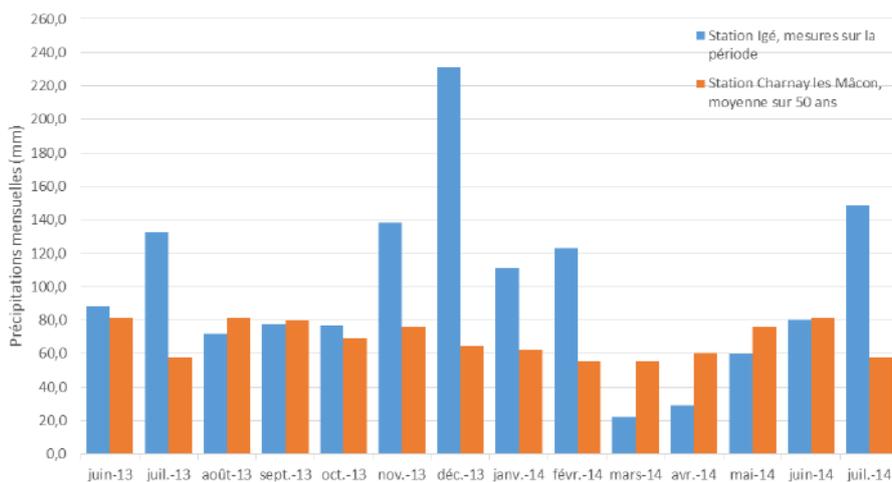


**Fig. 29 :** Variations des débits à la station "Salle de la Cascade" dans la grotte, et des précipitations journalières à Igé de juillet 2013 à août 2014..

## Débit à la Résurgence.



**Fig. 30 :** Variations des débits à la station "Résurgence" et des précipitations journalières à Igé de mai 2013 à août 2014.



**Fig. 31 : Précipitations mensuelles de la station d'Igé sur la période de mesure des débits, comparées aux normales de la station de Charnay-les-Mâcon, IPSEAU 1996.**

La période de mesure se caractérise par un début riche en eau jusqu'à juillet 2013, avec mai 2013 enregistrant des crues dans plusieurs départements. De août à octobre 2013, les précipitations mensuelles sont proches des normales. Pour la période hivernale de novembre 2013 à février 2014, beaucoup de précipitations, avec notamment des épisodes neigeux en décembre 2013 occasionnant de forts débits dans les cours d'eau (précipitations presque 4 fois supérieures à la normale, *Fig. 31*). De mars à juin 2014 en revanche, une période pauvre en précipitations (mars et avril, 3 fois inférieure à la normale, *Fig. 31*). Enfin, un mois de Juillet 2014 deux fois supérieur à la normale vient clôturer la période.

#### a) Tunnel de Saint-Gengoux-Scissé.

Concernant le Tunnel de Saint-Gengoux-de-Scissé (*Fig. 27*), la période de mesure de la sonde s'étale de fin Juillet 2013 à début Juin 2014.

Un problème a été rencontré au niveau du Tunnel. En effet, la sonde ne semblait plus mesurer de variation de pression depuis le début du mois de septembre, et aucune réponse n'est visible en ce qui concerne la suite d'événements pluvieux durant cette période (*Fig. 27*). Ceci peut être attribué à la présence de boue qui transite avec l'eau dans le Tunnel. Cette boue aux particules très fines vient recouvrir la sonde et l'empêche peut être de fonctionner en colmatant les capteurs. Les particules très fines arrivent à pénétrer à l'intérieur de la sonde malgré la protection du sac plastique. Ceci a été problématique pour le suivi sur un an. Ainsi une méthode à l'essai consiste à enfermer la sonde dans un sac rempli d'eau et de placer l'ensemble en l'état (*Fig. 32*).



**Fig. 32 : Test sur la sonde du Tunnel, photo S. Dautun.**

Les mesures de débit au sel ne concordent pas parfaitement avec le débit mesuré par la sonde. Ceci peut s'expliquer par le fait que les mesures de débit au sel effectuées au Tunnel sont victimes des limites de la méthode. En effet, le mélange du sel s'effectue très difficilement et de plus la distance pour permettre un bon mélange ne peut pas être respectée.

Pour cette période, les débits mesurés au Tunnel oscillent principalement entre 0,015 et 15 L/s avec toutefois quelques augmentations de débit autour des 20 L/s. Deux pics sont observés, l'un aux environs de 27 L/s fin août, l'autre aux alentours de 33 L/s mi-mars. Ils sont respectivement corrélés à de gros événements pluvieux. Il est toutefois difficile de se prononcer concernant le comportement du Tunnel vis-à-vis du système, dû à ce dysfonctionnement nous privant de la période de septembre à mars.

#### *b) Perte de la Goulouze.*

Concernant la Perte de la Goulouze (*Fig. 28*), la période de mesure de la sonde s'étend de mi-juillet 2013 à début juin 2014.

Les réponses hydrologiques s'observent rapidement car la Perte correspond à un milieu extérieur. Les débits mesurés par la sonde sont compris principalement dans la fourchette de 0,8 à 100 L/s. Lors de fortes précipitation, les débits montent rapidement et atteignent en général 200 à 300 L/s. Un fort débit de 560 L/s a été enregistré suite aux chutes de neige et pluies de décembre. En revanche, la réponse hydrologique pour les deux événements pluvieux de fin août est beaucoup moins marquée. Ceci est dû au temps de réhydratation des sols. En effet l'absence de précipitations sur plusieurs jours et les températures estivales rencontrées lors de ce mois d'août 2013 impliquent un assèchement des sols. La porosité du sol va alors être constituée d'air. Lors d'un événement pluvieux, il va falloir remplir cette porosité et saturer le sol en eau avant de retrouver un phénomène de ruissellement superficiel venant alimenter les cours d'eau. Ainsi une bonne partie de l'eau déversée sur le bassin va être absorbée par le sol (dépend du type de sol), et la réponse hydrologique mesurée sera par conséquent moins importante. La période de mars à mai 2014 fut très faible en précipitations et l'on remarque le même phénomène qu'en août 2013 : les précipitations n'ont aucune incidence sur le débit.

Une problématique est observée au niveau du seuil de la Perte. En effet, des éléments grossiers tels que des feuilles, des branches, des morceaux de bois et de ronces s'accumulent au niveau de la planche freinant le débit. En période d'étiage, les débits étant plus faibles, ces éléments provoquent un arrêt temporaire du débit créant des oscillations au niveau de la mesure de débit de la sonde. Ces éléments sont évacués lorsque le débit subit une augmentation, mais resteront problématique à l'étiage, créant des interruptions du débit. Une surveillance est donc nécessaire.

#### *c) Grotte de la Rivière Souterraine.*

Concernant la Grotte de la Rivière Souterraine (*Fig. 29*), la période de mesure de la sonde se déroule de fin juillet 2013 à fin juin 2014.

Les mesures de débit au sel ont tendance à être au-dessus de la valeur de débit mesuré par la sonde. Ces mesures de débits étant faites à des endroits différents de celui de l'implantation de la sonde, des apports ou des pertes non connues peuvent interagir et modifier le débit. De plus, les mesures de débit au sel effectuées dans la grotte présentent les mêmes inconvénients que ceux rencontrés au Tunnel (problème de mélange et distance non respectée). Enfin, il apparaît quelques fuites au niveau du seuil.

Les débits mesurés par la sonde oscillent entre 0,9 et 60 L/s pour la période d'étiage allant jusqu'à octobre. La période hivernale fut riche en précipitations, avec des débits oscillant entre 100 L/s et 300 L/s. Un débit maximum fut enregistré à 370 L/s, toujours pour cet événement du mois de décembre. De mars 2014 à juin 2014 de nouveau cette période assimilée à l'étiage avec des débits de l'ordre de 20 à 40 L/s.

#### d) *Résurgence de la Balme.*

Concernant la Résurgence de la Balme (*Fig. 30*), la période de mesure est plus longue que pour les autres, puisqu'un test du protocole d'implantation de la sonde et de mesure du débit a été effectué en ce point. Le débit a donc été enregistré de mi-mai 2013 à début juin 2014.

Les mesures de débit au sel, ainsi que les mesures de débit données par le modèle instauré au niveau des buses sont proches du débit obtenu à partir de la sonde, à quelques L/s de différence. Cette différence est plus petite après les réaménagements effectués sur le seuil ce qui conforte le fait d'avoir un seuil bien calibré pour obtenir un débit de plus en plus juste et précis. Cela prouve également que la sonde est relativement fiable pour la mesure de débit.

Les débits observés au niveau de la Résurgence sont compris dans une plus grande fourchette. Ceci est dû à l'influence directe des précipitations, mais aussi au fait que la Résurgence correspond à une sortie du réseau karstique. De mai à septembre, le débit oscille entre 0,9 et 100 L/s. Une augmentation progressive est observée au mois d'octobre corrélée à des précipitations soutenue et à la fin de l'étiage. Des crues successives se sont échelonnées de novembre à février, dont un pic à 900 L/s pour celle de la plus grande ampleur survenue le 25 décembre 2013 suite à la neige et aux fortes pluies. Comme vu précédemment, la période de mars à juin présente des débits faibles s'apparentant à ceux de la période d'étiage.

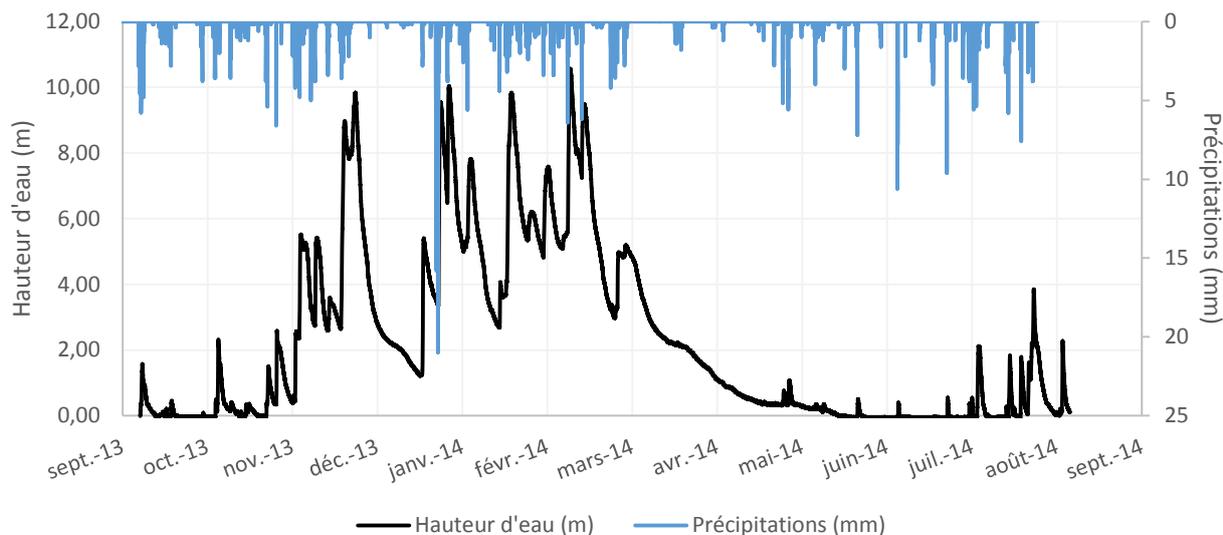
#### 1.2) *Gueule du Loup et Tranquiou.*

Les hauteurs d'eau ont été mesurées par les sondes Reefnet dans la Gueule du Loup et le Tranquiou depuis leur implantation le 7 septembre 2013. Ces hauteurs d'eau sont également en relation avec le volume d'eau précipité à l'extérieur.

La Gueule du Loup correspond à un puit de 12 mètres avant d'atteindre la zone de galerie en transit horizontal. Des variations de hauteur d'eau maximales ont été enregistrées à 10,56 m (*Fig. 33*). La zone de transit horizontale est alors complètement ennoyée, et le puit est quasi plein. Un relevé de la section de galerie permettrait de calculer à partir de quelle hauteur d'eau l'ennoiement est complet. Il serait intéressant également de pouvoir obtenir le débit lorsque l'eau peut circuler dans les galeries.

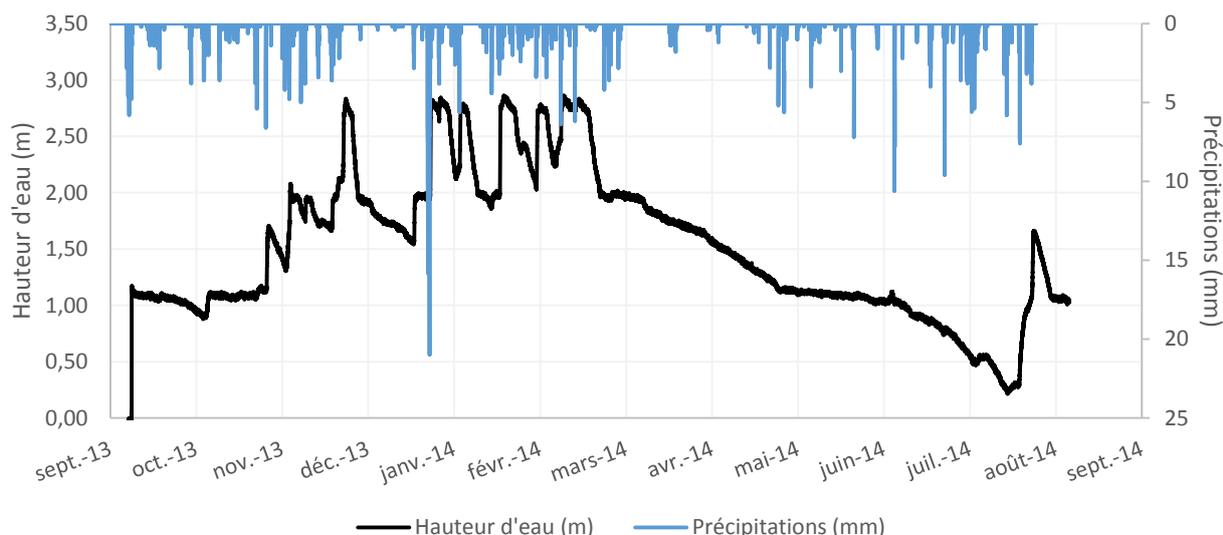
Le Tranquiou 1 est une résurgence temporaire avec un réseau de galerie menant à une salle avec un siphon. C'est dans cette salle, pour la plupart du temps remplie d'eau, que la sonde fut placée. La hauteur d'eau maximale mesurée est de 2,86 m et est atteinte à plusieurs reprises dans l'année (*Fig. 34*). Il semble que cette hauteur ne puisse pas être dépassée et l'eau s'évacue donc par l'extérieur.

## Variations de la hauteur d'eau à la Gueule du Loup.



**Fig. 33 :** Variations des hauteurs d'eau à la station "Gueule du Loup" et des précipitations journalières à Igé de septembre 2013 à août 2014.

## Variations de la hauteur d'eau au Tranquiou 1.



**Fig. 34 :** Variations des hauteurs d'eau à la station "Tranquiou 1" et des précipitations journalières à Igé de septembre 2013 à août 2014.

### 1.3) Les temps de réponse.

Le temps entre l'événement pluvieux et la réponse hydrologique peut être calculé en mesurant le temps entre le pic du hétérogramme et le pic de débit. Ceci est défini comme étant le temps de réponse. Celui-ci diffère entre un milieu extérieur où l'effet des précipitations est direct et rapide, et un milieu karstique où un effet retard s'instaure. La mesure de ce temps est intéressante lors d'un épisode de crue, ainsi que pour la prévention des inondations.

La Grotte possède toujours un effet retard pour l'évolution du débit suite à un événement météorologique. Tout ceci est dû aux différents processus de transits et transferts karstique comme par exemple l'infiltration.

Les temps de réponse sont tout de même de l'ordre de quelques heures (Fig. 35). La moyenne calculée sur plus d'une trentaine d'événements, pour les temps de réponse pour la période de mesure est d'environ 9 à 11 heures. La station météo n'étant pas basée sur site, des différences de temps entre la précipitation locale et mesurée peuvent être notifiées, ce qui implique un biais (coefficient de corrélation à 0,56). Pour la crue du 25 avril 1989, un décalage de 16 heures entre la montée des eaux de la Mouge et la montée des eaux de la Grotte avait été observé (Témoignage M. Bonnefoy).

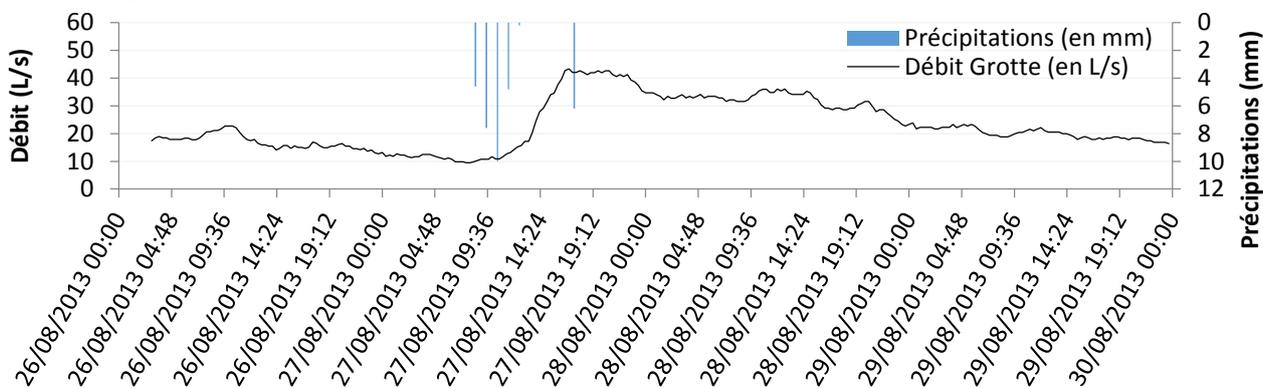


Fig. 35 : Exemple d'un temps de réponse de la Grotte de la Rivière Souterraine (Salle de la Cascade).

## 2) Composition physico-chimique des eaux (variabilité spatiales et temporelles).

### 2.1) Analyses physico-chimiques.

Une représentation des résultats d'analyses d'eau dans un diagramme de Piper, permet de représenter le pourcentage d'éléments dissouts aux différents points de prélèvements. Un classement du type d'eau peut être établi suivant les différents pôles. Dans le cas d'un système karstique, ceci peut différencier les apports d'eau ou les changements opérés au sein de sa constitution, suivant la période de prélèvement. Les résultats complets sont disponibles en annexe (Ann. 4). Dans un premier temps, la balance ionique doit être vérifiée. Celle-ci correspond à la somme des produits de la concentration molaire par la charge ionique de tous les cations et anions présents. Cette somme des éléments majeurs (cations/anions) doit être égale à zéro, car la somme des cations vaut la somme des anions. Si une différence de plus ou moins 5% est obtenue, l'échantillon peut être particulier ou pollué. Au-delà de 10%, la marge d'erreur est trop grande et les analyses (voir même les prélèvements) sont à refaire.

$$\text{Erreur} = \frac{\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions}}{\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}}$$

Tab. 10 : Balance ionique pour chaque échantillon d'eau.

Lieux	Sce Simon	Perte Goulouze	Tunnel	Conc. Jonction	Conc. 14 Juillet	Siphon Beaunois	Résurgence	Tranquiou	Gueule du Loup
%	0,32	0,24	0,23	0,19	0,17	0,06	0,21	0,21	0,21

La balance ionique pour tous les échantillons (Tab. 10) est en dessous de 5 % ce qui signifie qu'aucun échantillon n'est particulier ou pollué par la manipulation.

La plupart des points du Piper (Fig. 36) représentent un groupe très proche indiquant que nous sommes sur un type d'eau similaire très riche en calcium et en carbonates/hydrogencarbonates donnant une eau très calcique.

Un point se démarque, celui de la source Simon issue du primaire. Son eau ne possède pas de cations ou d'anions dominants et ceci s'explique par sa faible teneur en élément (conductivité = 58  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Des analyses effectuées en 2006 ont été intégrées également dans le Piper. Etant représentatives d'un moment précis dans le temps, elles se détachent du groupe de points concernant celles de cette année. L'eau était plus riche en sulfates et en nitrates en Octobre 2006 ce qui la classe en hyper sulfatée calcique. La teneur plus élevée en sulfate doit être reliée aux éléments alcalins et alcalinoterreux de la minéralisation et les ions nitrates

provient essentiellement du lessivage des sols et de l'infiltration pour les eaux profondes (Rodier J. & al, 2009). L'érosion étant plus importante par les précipitations hivernales d'ampleur suffisante, ceci pourrait expliquer leur augmentation.

## 2.2) Suivi hebdomadaire de pH et conductivités.

Les résultats détaillés se trouvent en annexe (Ann. 4). Par rapport aux conditions météorologiques particulières ayant avancé la période d'étiage aux mois de mai/juin, l'évolution de la conductivité est en augmentation sur toutes la période de mesure (Fig. 37). Ceci s'explique par un effet concentratif des éléments dans la masse d'eau à débits relativement faibles sur la période. Les conductivités de la grotte évoluent entre 400 et 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Celles de la perte et du Tunnel sont un peu plus basses de 200 à 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ceci peut s'expliquer par les apports des différentes sources issues du primaire, puis par la dissolution du calcaire s'opérant suivant l'acidité de l'eau. La Source Simon se démarque par sa faible conductivité inférieure à 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La conductivité de la rivière (Fig. 35) reste la plus élevée de mars à juin, une concordance avec la période faible en précipitations. Elle reste supérieure aux concrétions Bajociennes, moyenne sur les concrétions rencontrées dans la grotte.

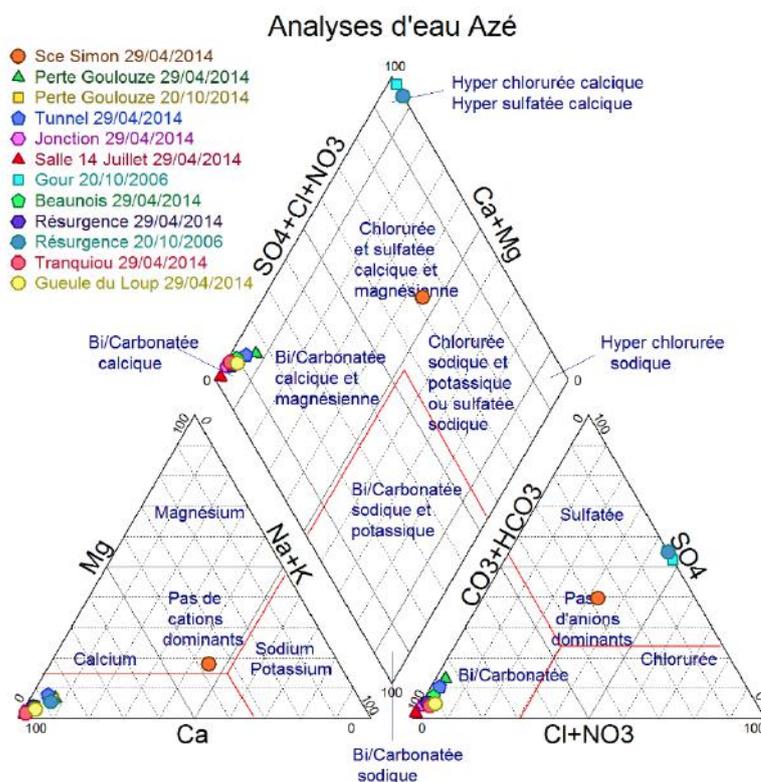


Fig. 36 : Diagramme de Piper.

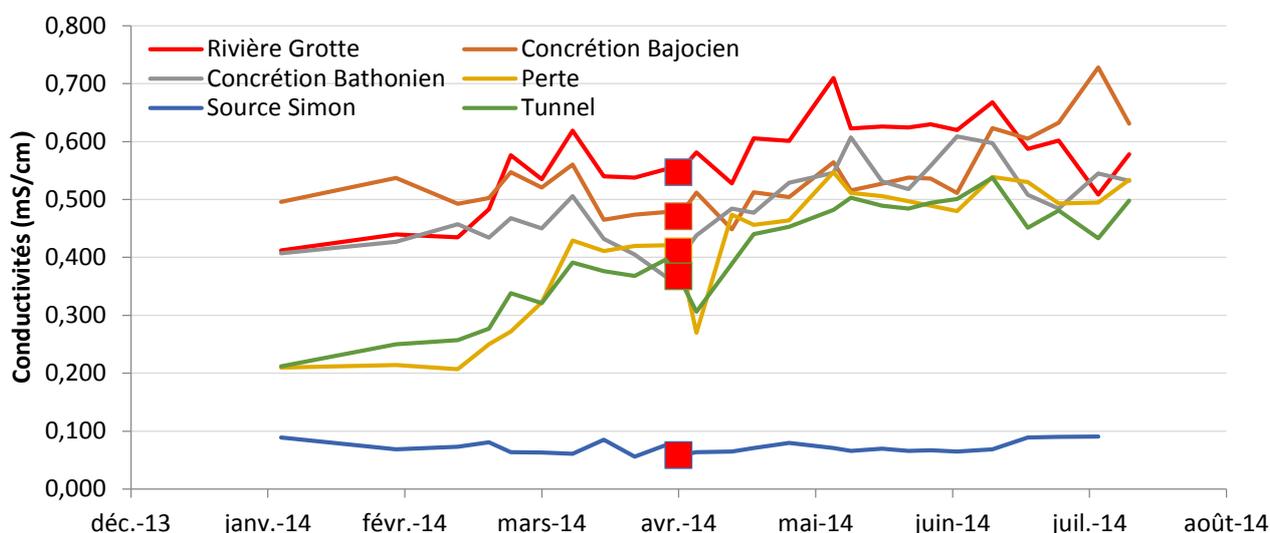


Fig. 37 : Evolution des conductivités sur la période de suivi.

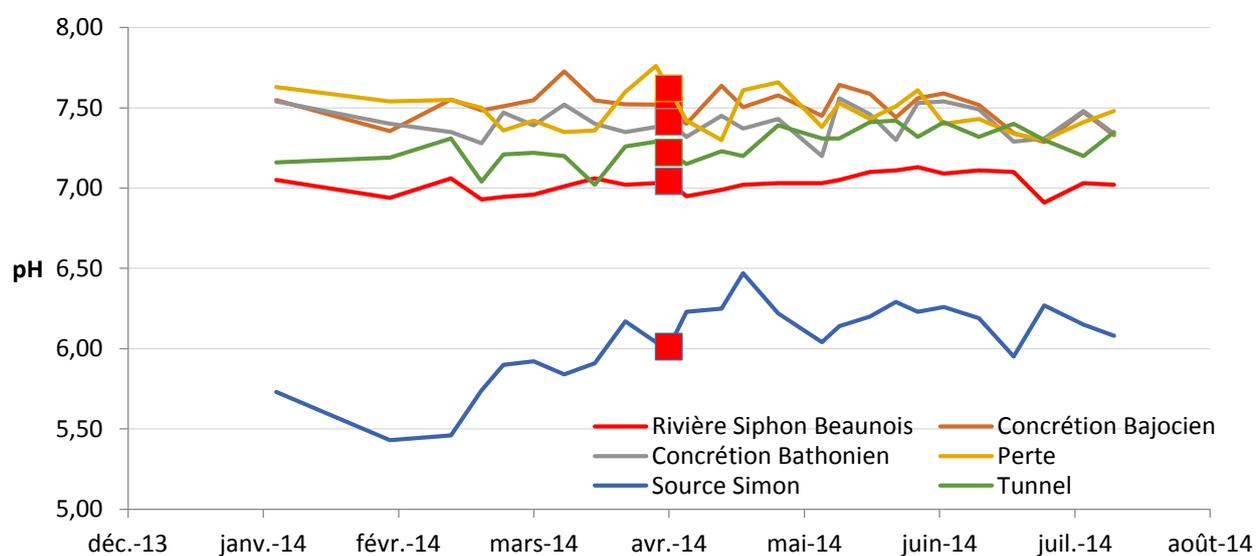


Fig. 38 : Evolution du pH sur la période de suivi.

Le pH pour la plupart des points de mesure évolue sur une fourchette de 7,00 à 7,50, avec peu de variation au cours du temps (Fig. 38). Encore une fois, la source du primaire se détache par son pH plus acide aux alentours de 5,50 à 6,50. Beaucoup plus de variations sont observées pour ce qui la concerne.

La rivière arrivant par le siphon terminal dans la grotte présente un pH proche de 7 et reste le plus bas de toutes les eaux hormis celle de la source Simon. Comparé à celui de la Perte évoluant entre 7,30 et 7,70 ; un processus vient donc abaisser le pH de la rivière. Un apport d'eau méconnu venant du primaire ou une augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$  dissout peuvent expliquer cette diminution, des hypothèses à vérifier. Les carrés rouges sur les deux figures (Fig. 35 et 36) représentent les données obtenues lors de l'analyse physico-chimique du 29/04/2014.

### 2.3) Température.

Comme pour le débit, l'impact de la température extérieure s'observe sur les milieux ouverts comme la Résurgence et la Perte. Cet impact est moins marqué à la Résurgence car l'eau conserve l'influence de la grotte et donc une température moins rythmée par le cycle journalier. Deux points de vue sont intéressants. Le premier concerne ce qu'il se passe sur la partie accessible de la grotte, un changement de température entre la Salle de la Cascade et la Résurgence indiquerait un ou des apport(s) d'eau par exemple.

Le deuxième est de voir l'impact extérieur, l'eau de la perte de la Goulouze, qui correspond aux plus grands apports d'eau connue de la grotte, a-t-elle une influence sur la température de l'eau observée à la Cascade.

La température de l'eau (Fig. 39) est relativement stable tout au long de l'année, exceptée lors de la période hivernale où elle diminue de quelques degrés. L'eau du Tunnel de Saint-Gengoux-de-Scissé est la plus froide comparée à celle de la grotte, avec des minimums allant jusqu'à 7°C et une moyenne de 10°C. Les températures de la Salle de la Cascade et de la Résurgence sont relativement proches avec une moyenne respective de 11,21°C et 11,32°C. Il semble n'y avoir aucune différence (delta relativement constant à 0,37°C) sur la température entre ces deux points, donc il n'y aurait pas d'apports d'eau.

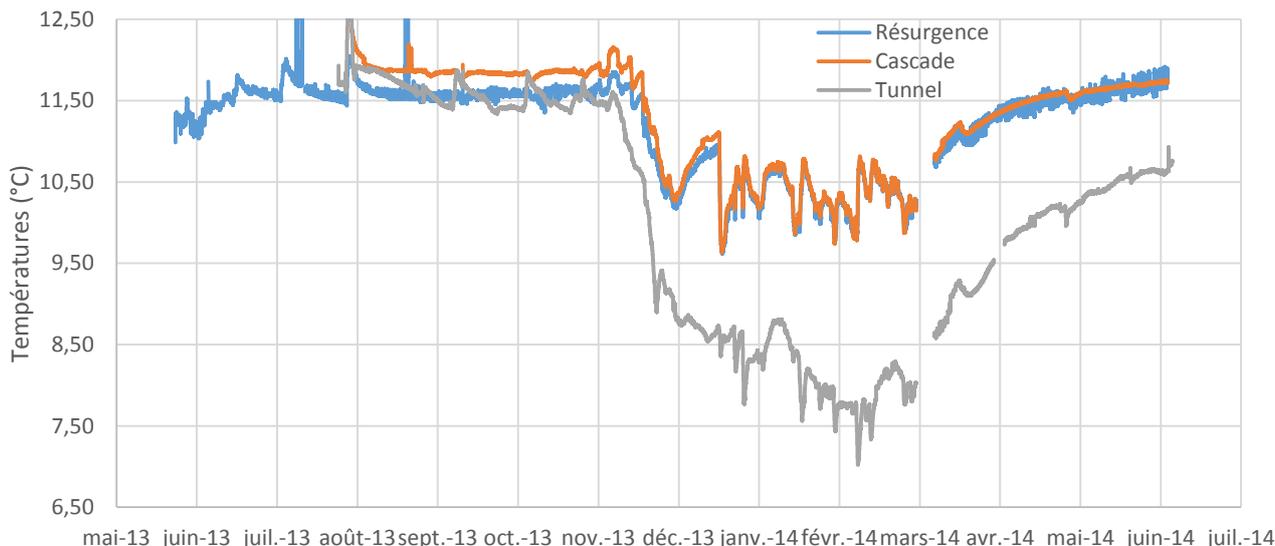


Fig. 39 : Evolution de la température dans la Grotte, Perte et Tunnel.

Il est difficile de comparer la température de la Perte de la Goulouze avec celle de la Salle de la Cascade, car l'impact des cycles journaliers fait évoluer la température de la Goulouze sur une plus grande gamme de température. Mais en faisant des focus sur certains événements (Fig. 40), une corrélation apparaît très nettement entre la Perte et la Cascade, avec un décalage entre les deux points. L'eau de la Perte a donc un impact important sur la température de l'eau de la grotte.

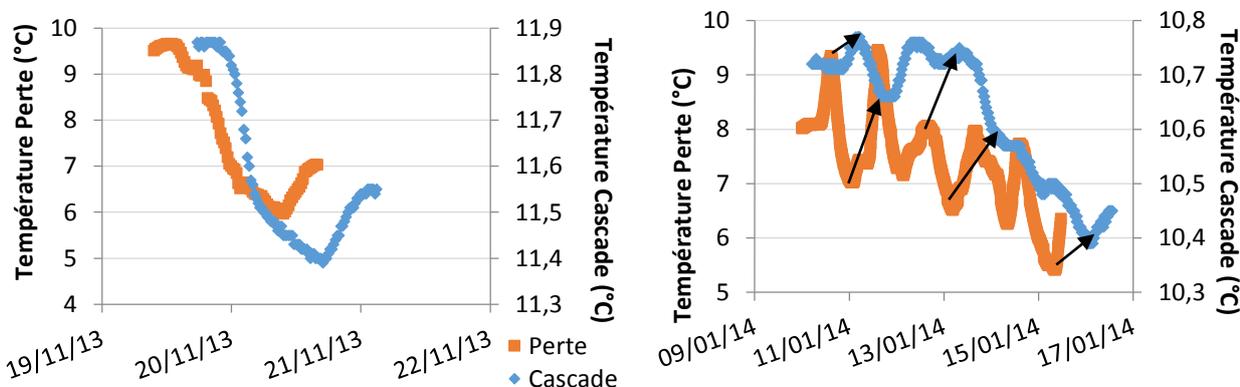
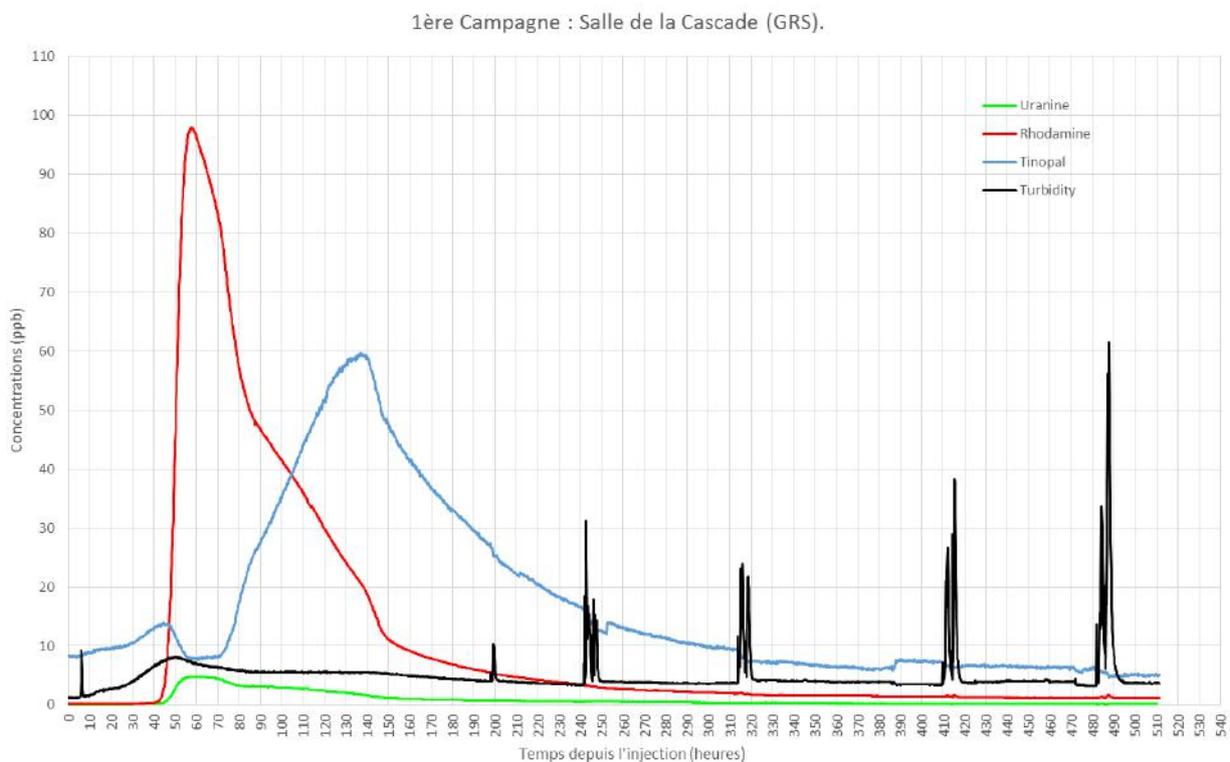


Fig. 40 : Variations temporelles de la température de l'eau sur les sites de Perte et de Cascade en novembre 2013 et en janvier 2014.

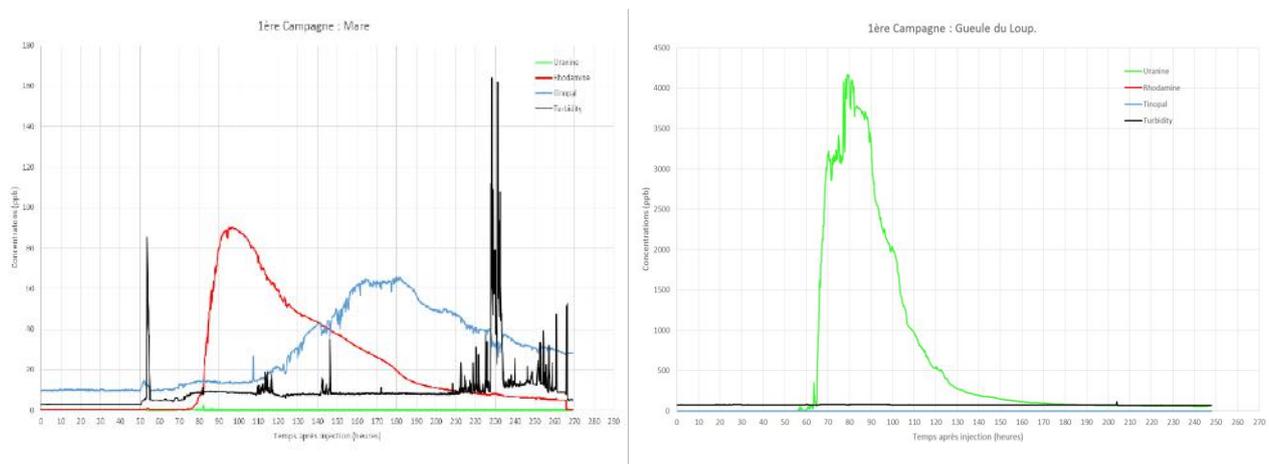
### 3) Résultats des traçages.

#### 3.1) 1<sup>ère</sup> campagne.

Lors de cette 1<sup>ère</sup> campagne, des réponses positives aux trois colorants ont été mesurées et observées dans la grotte et dans la mare du site (*Fig. 41 et 42*). Après 40 heures suite à l'injection, la **Rhodamine®** de la Perte de la Goulouze est arrivée au niveau de la Salle de la Cascade, suivie trois heures plus tard par l'**Uranine®** du Vautiant. Il aura fallu attendre 70 heures pour le **Tinopal®** du Tunnel. Une réponse positive à l'**Uranine®** fut également enregistrée à la Gueule du Loup (*Fig. 40*) après 56 heures, ainsi qu'au niveau du Lavoir de Bissy-la-Mâconnaise et la Résurgence de la Gueule du Loup. En ce qui concerne les autres points de prélèvements, aucune trace de colorant n'a été décelée, preuve de leur indépendance vis-à-vis des points d'injection (*Ann. 5*).



**Fig. 41 : Courbes de restitution de traceurs dans la grotte à la Salle de la Cascade.**



**Fig. 42 : Courbes de restitution de traceur dans la Mare (à gauche) et la Gueule du Loup (à droite).**

A partir des courbes obtenues dans la grotte (*Fig. 41*), des paramètres sur le transit du colorant peuvent être déterminés :

- $t_{\min}$ , temps de transit minimum, est le temps écoulé entre l'heure de l'injection et l'heure de la première apparition de colorant.
- $t_{\max}$  correspond à la durée totale de restitution de colorant, lorsque la concentration de celui rejoint la concentration initiale (le bruit de fond).
- $t_m$ , temps modal de transit, est le temps écoulé entre l'heure d'injection et l'heure du maximum de concentration.
- $L_a$  est égal à la distance à l'horizontale entre le point d'injection et l'exutoire, la distance "apparente".
- $V_{\max}$ , correspond à la vitesse maximale de transit, et est obtenue par l'expression suivante :  $V_{\max} = L_a/t_{\min}$
- $V_m$ , vitesse modale de transit, est calculé :  $V_m = L_a/t_m$

Ceci permet à partir des concentrations, du débit et des temps d'obtenir des informations sur le système et son fonctionnement :

- Le calcul de masse de colorant restitué passe par l'intégration du flux de traceur :

$$Mr = \int_0^{+\infty} Q(t)C(t)dt$$

- S'en déduit le taux de restitution du traceur par rapport à la masse initiale injectée :

$$r = Mr/Mi \times 100$$

- Avec le débit, des volumes d'eau peuvent être obtenus, comme  $v_i$  le volume d'eau passé à l'exutoire avant la première apparition de colorant et  $v_r$  le volume d'eau tracé, c'est-à-dire écoulé à l'exutoire durant le transit du traceur. Ils sont calculés comme suit :

$$v_i = \int_0^{t_{\min}} Q(t)dt \qquad v_r = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} Q(t)dt$$

- Ayant la concentration et le débit, une réflexion en termes de flux permet d'obtenir le temps moyen de transit  $t_{\text{moy}}$  considéré comme l'abscisse du centre de gravité du nuage de traceur, et la vitesse apparente  $V_{\text{app}}$ , vitesse de déplacement du nuage de colorant dans son ensemble :

$$t_{\text{moy}} = \int_0^{+\infty} t \times \frac{Q(t) \times C(t)}{\int_0^{+\infty} Q(t) \times C(t)} dt \qquad V_{\text{app}} = \frac{L_a}{t_{\text{moy}}}$$

- Enfin, le volume d'eau parcouru par le traceur ainsi que la section moyenne du système, appelés volume et section de Allen ( $v_a$  et  $S_a$ ) donnent des informations sur la structure karstique traversée par le colorant :

$$v_a = \int_0^{t_{\text{moy}}} Q(t) dt \qquad S_a = \frac{v_a}{L_a}$$

- L'utilisation de la CCM (the cumulative curve method) développée par Fried et Combarous (1971) permet de calculer un coefficient d'homogénéité appelé  $P_D$  et s'obtenant de la façon suivante :

$$S(t) = \frac{\int_0^t C(t)dt}{\int_0^\infty C(t)dt} \quad PD = \frac{1}{8} \left( \frac{t16 - t84}{t50} \right)^2$$

S(t) correspond à la courbe cumulative de concentration en fonction du temps. Par le biais de cette courbe,  $t_{16}$ ,  $t_{50}$  et  $t_{84}$  peuvent être déterminés, représentant respectivement le temps au bout duquel nous avons atteint 16, 50 et 84 % de la concentration en traceur.  $P_D$  peut être calculé et représente un coefficient d'homogénéité aussi appelé paramètre de dispersion. Sur une échelle de 0 à 2, un  $P_D$  proche de 0 indique peu de dispersion donc un système homogène, tandis qu'un  $PD = 2$  définit un réseau extrêmement hétérogène (Leibundgut & al, 2009).

Tab. 11 : Interprétations de la restitution des traceurs pour la 1<sup>ère</sup> campagne.

1 <sup>ère</sup> campagne		Grotte Rivière Souterraine			GDL*
		Uranine®	Rhodamine®	Tinopal®	Uranine®
Lieu d'injection		Vautiant	Perte Goulouze	Tunnel	Vautiant
Temps de transit minimum (h)	$t_{\min}$	43	40	71	56
Durée de restitution (h)	$t_{\max}$	440	783	315	246
Temps modal de transit (h)	$t_m$	57	57	135	79
Distance apparente (m)	$L_a$	4500	2300	2300	1250
Vitesse maximale de transit (m/h)	$V_{\max}$	105	58	32	22
Vitesse modale de transit (m/h)	$V_m$	79	40	17	16
Bruit de fond initial (ppb)		0,10	0,15	8,31	2,00
Masse initiale injectée (g)	$M_i$	470	500	527	470
Masse restituée (g)	$M_r$	18	253	308	
Taux de restitution (%)	$r$	3,8	50,6	58,4	
Volume d'eau avant apparition traceur (m <sup>3</sup> )	$v_i$	1794	1670	2958	
Volume d'eau tracé (m <sup>3</sup> )	$v_r$	16612	31236	10237	
Temps moyen de transit (j)	$t_{\text{moy}}$	8	5,5	6,5	
Vitesse apparente (m/h)	$V_{\text{app}}$	23	18	15	
Volume de Allen (m <sup>3</sup> )	$v_a$	8050	5454	6403	
Section de Allen (m <sup>2</sup> )	$S_a$	1,8	2,4	2,8	
Coefficient d'homogénéité	$P_D$	0,10	0,21	0,10	

(\*Gueule du Loup)

D'après les résultats rassemblés dans le tableau ci-dessus (Tab. 11), ainsi que la forme des courbes de restitution de traceur, le système karstique d'Azé serait plutôt homogène (d'après le paramètre de dispersion). Ces sections de galeries seraient de l'ordre de 1,5 à 3 m<sup>2</sup>, et la forme de la courbe de restitution de traceur semble indiquer un système à drains majeurs voir interconnectés suivant les ruptures de pente.

La courbe de restitution pour la mare située devant le musée du site est similaire à celle constatée dans les grottes, mais à des concentrations plus faibles. L'alimentation de la mare se fait en partie par un drain artificiel provenant de la Résurgence. Une alimentation par un drain naturel avait été illustrée par tomographie électrique en 2009, mais il semblerait que celui-ci soit indépendant des points d'injection.

Les taux de restitution pour la **Rhodamine®** et le **Tinopal®** sont de l'ordre de 50 à 60 %. Avec des débits fiables mesurés par les sondes, ces résultats laissent la possibilité d'un autre exutoire ou bien l'existence de zone(s) de piégeage et de phénomènes de sorption. Le taux de restitution de 3,8 % d'**Uranine®** dans la grotte montre une connexion avec le Vautiant. Mais au vue de la courbe de restitution obtenue à la Gueule du Loup (Fig. 42), avec des concentrations de l'ordre de 4100 ppb contre 4,75 ppb maximum à la grotte, la Gueule du Loup constitue l'exutoire dominant du Vautiant. L'absence de données sur le débit en ce point ne nous permet pas l'interprétation complète du traçage dont le calcul du taux de restitution. Ceci n'exclue en rien le fait que le réseau karstique d'Azé s'étend sur plus de 4,5 km en direction du nord.

### 3.2) 2<sup>ème</sup> campagne.

Au cours de cette 2<sup>ème</sup> campagne, une réponse positive à l'**Uranine®** des Teppes a été mesurée dans la grotte 263 heures après injection. Le **Tinopal®** de la Perte Verzée Nord quant à lui mettra 288 heures après son injection pour arriver à la Salle de la Cascade. En toute rigueur, le traçage ne peut pas être interprété complètement, puisque la courbe de restitution du traceur est incomplète. Cette troncature est due à un temps de restitution trop long ne concordant plus avec la période de mesure et de rendu des fluorimètres.

Aucun résultat positif n'a été obtenu pour les prélèvements manuels.

2<sup>ème</sup> Campagne : Salle de la Cascade.

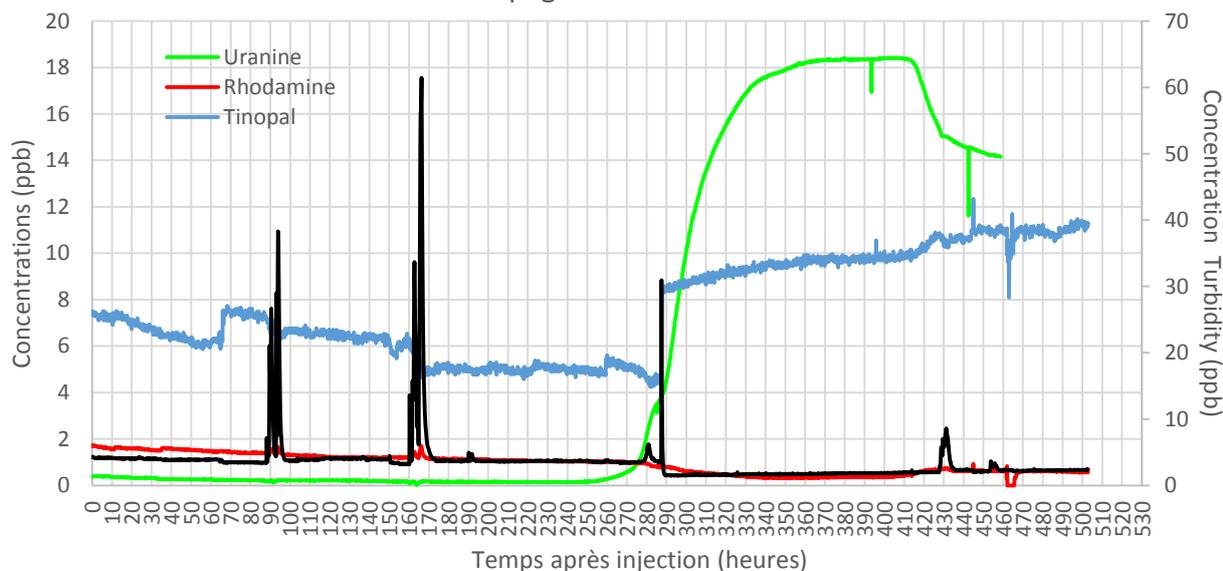


Fig. 43 : Courbes de restitution de traceurs à la Salle de la Cascade.

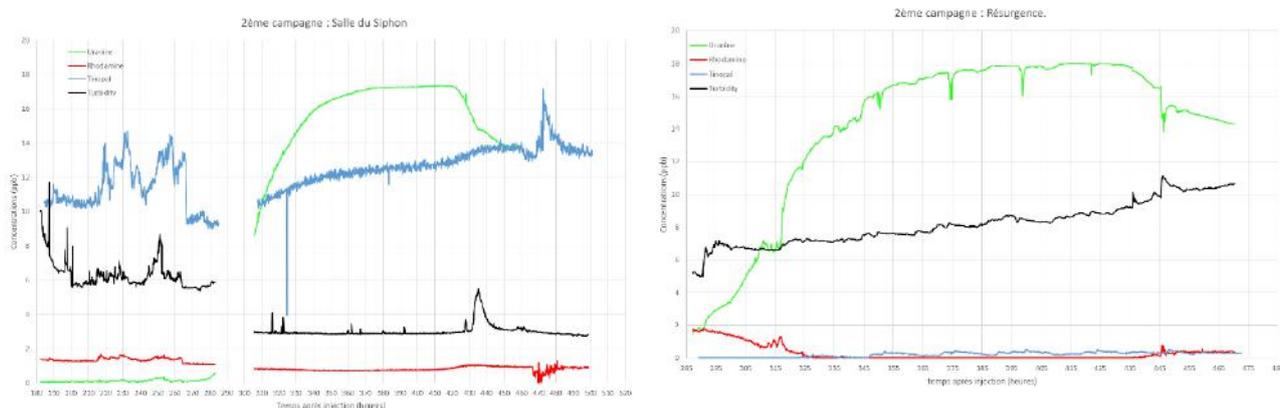


Fig. 44 : Courbes de restitution de traceurs à la Salle du Siphon (à gauche) et à la Résurgence (à droite).

Les courbes de restitution montrent des concentrations en colorant relativement faibles, de l'ordre de 18 ppb maximum (Fig. 43). De plus elles présentent certaines irrégularités, traduisant des conditions de transport assez complexes. Les débits étant faibles, il aura fallu un temps de parcours très long et surtout des précipitations pour pouvoir "pousser" le colorant jusqu'à la grotte. Sur la période de mesure, le Tinopal® n'est pas arrivé jusqu'à la Résurgence, piégé dans le siphon précédent la sortie (Fig. 44). Sur la courbe de restitution de l'Uranine®, des ruptures de pentes similaires à celles observées sur la première campagne sont à noter. Elles ne sont pas liées au débit, relativement constant lors de la période de mesure, mais traduiraient plutôt une ou des zone(s) de stockage ou de piégeage du traceur, relâchant celui-ci avec une certaine dynamique.

Ces courbes très étalées avec un taux de dilution élevé et des vitesses faibles, dénotent un écoulement plutôt difficile entre le point d'injection et l'émergence. Ainsi le système pourrait s'apparenter à un réseau diffus avec de multiples fractures et fissures diluant le traceur et expliquant sa progression lente. Une autre hypothèse serait un système avec plusieurs zones de piégeage (siphons) stockant le traceur et le relâchant progressivement en fonction du débit, ou bien un secteur capacitif avec un faible déplacement du nuage de colorant (Gilli E. & al, 2004). Il est difficile de se prononcer d'après les conditions de traçage, et il serait préférable de renouveler le traçage pour de meilleurs résultats (Tab. 12).

Tab. 12 : Interprétation de la 2<sup>ème</sup> campagne.

2ème campagne		GRS	
		Uranine®	Tinopal®
Lieu d'injection		Gouffre des Teppes	Perte Verzée Nord
Temps de transit minimum (h)	$t_{\min}$	263	288
Durée de restitution (h)	$t_{\max}$	?	?
Temps modal de transit (h)	$t_m$	463	?
Distance apparente (m)	$L_a$	3000	4000
Vitesse maximale de transit (m/h)	$V_{\max}$	11	14
Vitesse modale de transit (m/h)	$V_m$	6	?
Bruit de fond initial (ppb)		0,15	4,99
Masse initiale injectée (g)	$M_i$	530	473

Suite à ces deux campagnes de traçage, chaque point d'injection peut être affilié au réseau karstique dont l'émergence correspond à la Grotte de la Rivière Souterraine à Azé. Les traçages peuvent être représentés sous forme d'une carte synthétique (Fig. 45) avec les trajets potentiels suivis par le traceur. Il est intéressant de mettre en parallèle avec la géologie pour voir les couches empruntées ainsi que les accidents rencontrés (failles), pouvant interagir sur le cheminement du colorant.

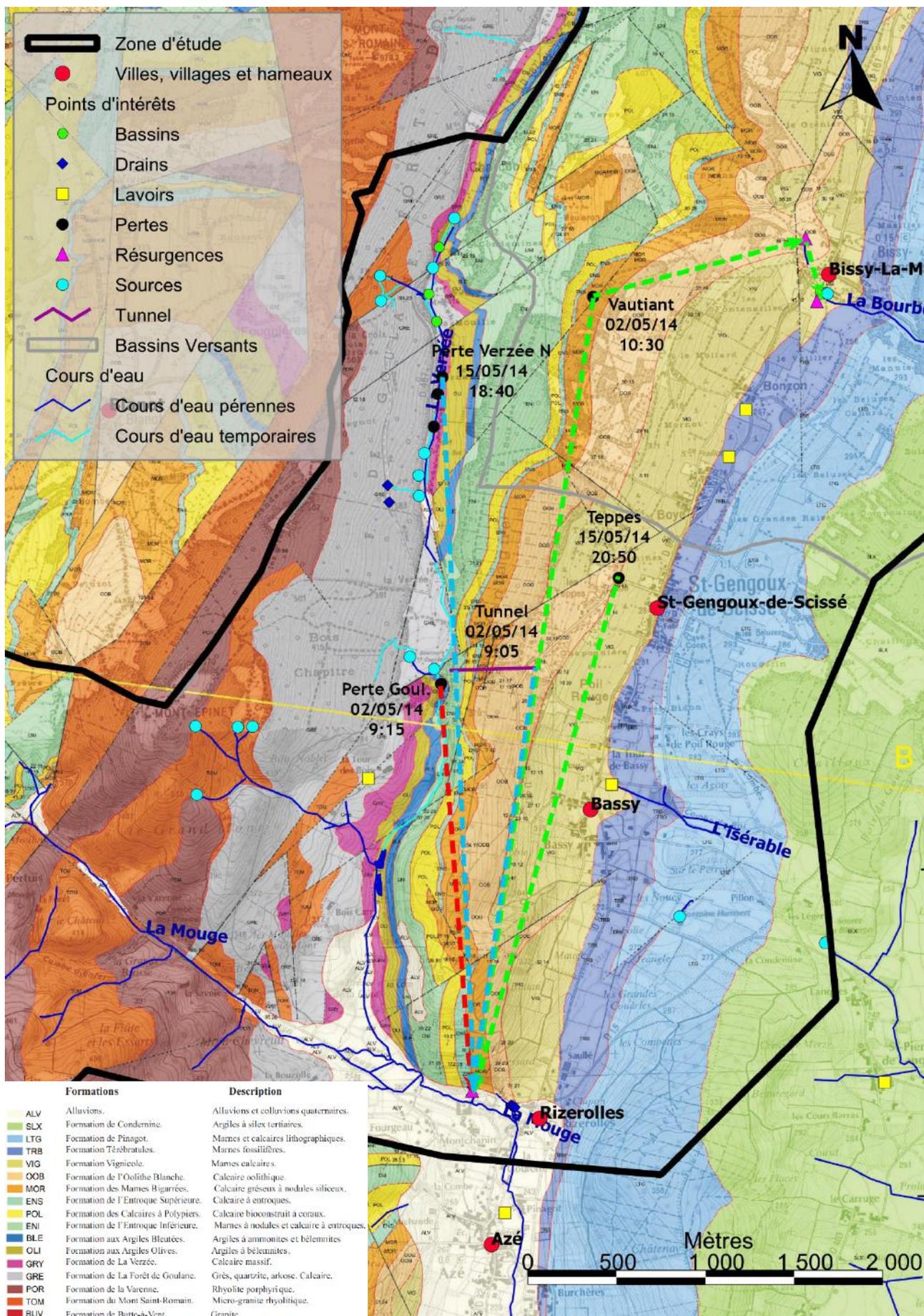


Fig. 45 : Carte synthétique des tracés, géologie par S. Dechamps.

### 3.3) Modélisation sur une partie connue du réseau.

Les résultats suite à l'injection d'**Uranine®** au niveau du fond de la grotte sont représentés par les courbes de restitution (Fig. 46) de colorant obtenues grâce aux 4 fluorimètres. Le pic de restitution sur la partie écoulement libre au fond est très concentré (1665 ppb). Les siphons rencontrés par le traceur vont tamponner progressivement la restitution pour arriver sous forme d'un dôme à la Résurgence. La partie uniquement Siphon est très irrégulière, le grand volume de stockage affecte la restitution et semble libérer de l'**Uranine®** par alternance.

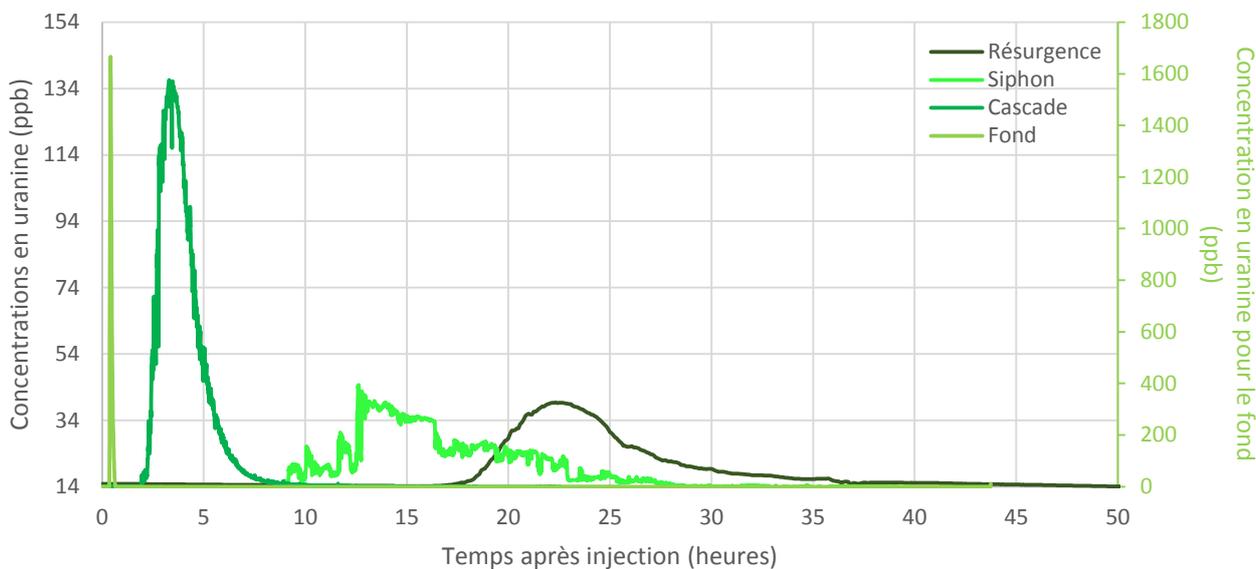


Fig. 46 : Courbes de restitution d'**Uranine®** mesurée par les 4 fluorimètres dans la grotte.

Les mêmes calculs que pour la première campagne ont été effectués et présentés sous forme de tableau (Tab. 13). Les résultats obtenus en termes de modélisation sont proches de la réalité. Ceci nous permet de valider la méthode employée ainsi que nos résultats sur la première campagne de traçage. Les coefficients d'homogénéité sont très faibles, indiquant un système très homogène.

La partie écoulement libre proche du point d'injection donne des résultats très rapides. Il faut seulement 21 minutes au traceur pour atteindre le point de mesure situé une trentaine de mètres plus loin (Tab. 13). Le coefficient d'homogénéité est proche de 0, et il est vrai que la section sur cette portion de la grotte varie très peu.

Il est intéressant de voir l'impact du Siphon sur le traçage. Il faudra plus de 6 heures pour voir la première apparition de colorant au Siphon ayant traversé la zone Cascade-Siphon. Les vitesses de transit du traceur sont plus faibles dans cette zone de stockage. Ainsi le volume du Siphon peut être calculé et est estimé aux alentours de 530 m<sup>3</sup>.

Le taux de restitution de 91 % sur la partie écoulement libre est très bon. En revanche, sur la transition du traceur jusqu'à la Salle de la Cascade, 40 % de perte sont observés. Plusieurs hypothèses peuvent être retenues. L'**Uranine®** étant peu adsorbé, cela nous laisse la possibilité d'une perte d'eau ou bien d'un apport venant diluer le traceur. Les débits sont constants sur toute la grotte, mais pour la période de mesure ils étaient faibles (de l'ordre de 10 L/s), donc cette hypothèse n'est pas à exclure.

Tab. 13 : Interprétations de la restitution d'Uranine® au sein de la grotte.

		Uranine Fond		Uranine Cascade		Uranine Siphon		Uranine Résurgence	
Temps de transit minimum (min & h)	$t_{\min}$	21	0,3	114	1,9	505	8,4	970	16,1
Durée de restitution (min & h)	$t_{\max}$	42	0,7	766	12,8	2399	40,0	2920	48,7
Temps modal de transit (min & h)	$t_m$	24	0,4	198	3,3	761	12,7	1335	22,2
Distance apparente (m)	$L_a$	30		250		340		770	
Vitesse maximale de transit (m/min & m/h)	$V_{\max}$	1,43	85,71	2,19	131,58	0,67	40,36	0,79	47,63
Vitesse modale de transit (m/min & m/h)	$V_m$	1,22	73,47	1,26	75,76	0,45	26,81	0,58	34,61
Bruit de fond initial (ppb)		13,64		14,18		13,63		14,20	
Masse initiale injectée (g)	$M_i$	20							
Masse restituée (g)	$M_r$	18,19		10,31		8,00		7,94	
Taux de restitution (%)	$r$	91,0		51,6		40,0		39,7	
Volume d'eau avant apparition traceur (m <sup>3</sup> )	$V_i$	13		76		343		661	
Volume d'eau tracé (m <sup>3</sup> )	$V_r$	138		444		1285		1317	
Temps moyen de transit (h & j)	$t_{\text{moy}}$	0,5	0,02	3,9	0,2	17,0	0,7	25,0	1,0
Vitesse apparente (m/h)	$V_{\text{app}}$	64,56		63,47		20,05		30,82	
Volume de Allen (m <sup>3</sup> )	$V_a$	19		160		691		1011	
Section de Allen (m <sup>2</sup> )	$S_a$	0,63		0,64		2,03		1,31	
Coefficient d'homogénéité	$P_D$	0,007		0,032		0,035		0,015	

## V) Synthèse et discussion.

### 1) Bilan hydrologique et surface d'alimentation.

Les limites du système ont pu être appréhendées et une surface hypothétique a été tracée en croisant les résultats des traçages (points d'injections) avec la lithologie, la topographie et les limites de bassins versants hydrologiques. Cette surface hypothétique représenterait environ 6,8 km<sup>2</sup> (Fig. 45).

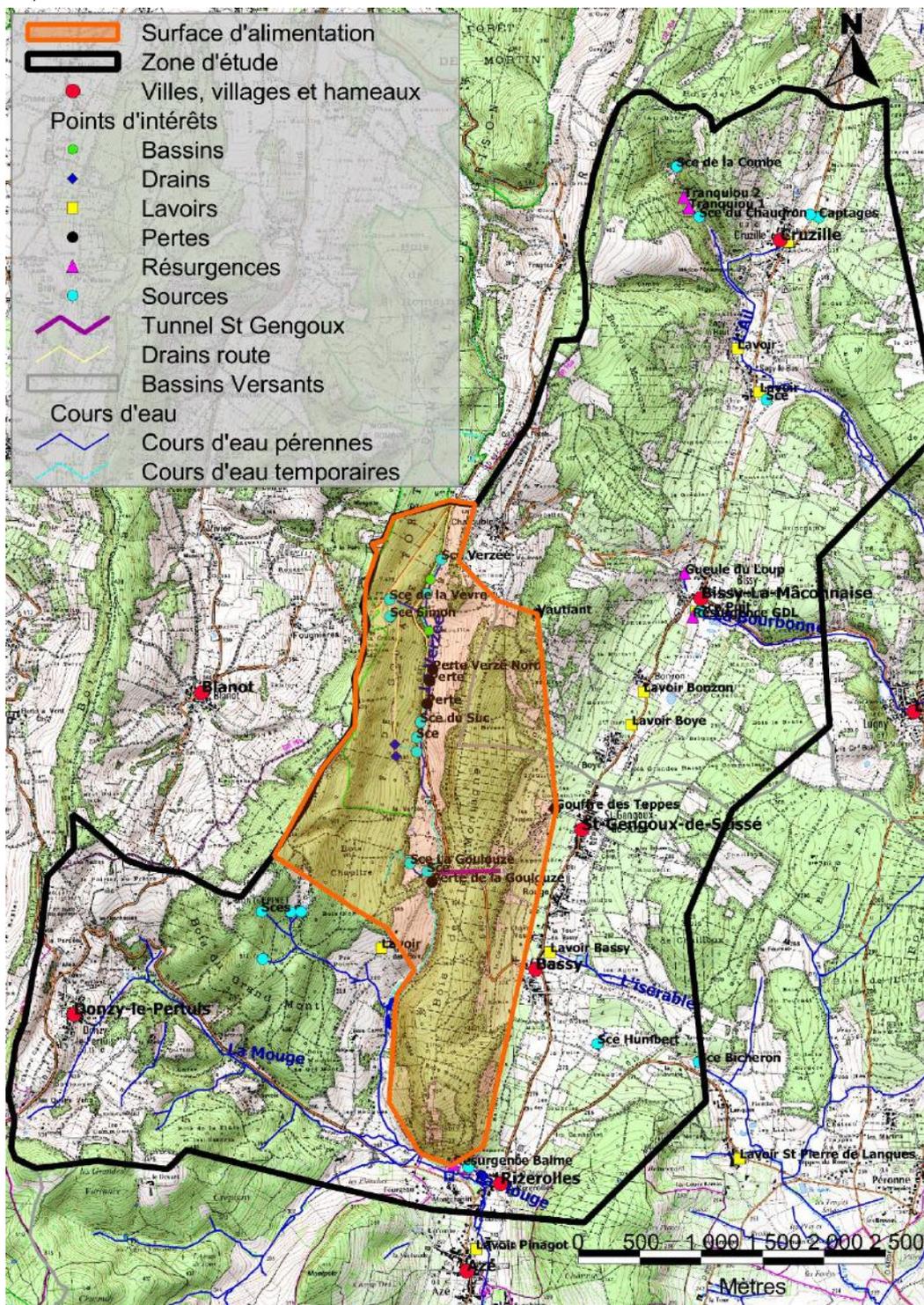


Fig. 47 : Carte de la surface d'alimentation hypothétique du système.

Cette surface d'alimentation peut être également déterminée par le bilan hydrologique. L'étude des bilans hydrologiques repose sur l'analyse de la cohérence existant entre les flux d'entrée et les flux de sortie à l'exutoire du système, et permet de caractériser globalement les limites de celui-ci. L'approche consiste à évaluer le volume d'eau écoulé à l'exutoire et le volume de pluie qui renouvelle les réserves et entretient l'écoulement. Vient la notion de pluie efficace qui constitue la part de précipitations mesurées après soustraction de l'évapotranspiration réelle (ETR).

$$P_{eff} = P - ETR$$

$$S_{alim} = V / P_{eff}$$

N'ayant pas de mesure de l'ETR, une estimation par la formule de Turc permet d'obtenir le déficit d'écoulement D qui s'affranchit des paramètres climatiques :

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

avec P les précipitations annuelles en mm

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

T la température moyenne de l'eau en °C

V le volume d'eau écoulé à l'exutoire en m<sup>3</sup>

$$\text{d'où : } S_{alim} = V / P - D$$

Pour une température moyenne annuelle de 11,18°C pour la rivière, un volume d'eau écoulé de 4413463 m<sup>3</sup> et 1171,72 mm de précipitations annuelles, la surface d'alimentation obtenue est de 7,4 km<sup>2</sup>. Ce résultat est proche de la surface hypothétique qui a été sous-estimée.

## 2) Relation débit et température.

La Perte de la Goulouze ayant un impact décelable au niveau de la température de l'eau de la Salle de la Cascade, des calculs de temps de réponse beaucoup plus fiables que ceux entre précipitations et réponses hydrologiques peuvent être obtenus sur les déphasages de température. En effet comme les précipitations correspondent à un paramètre vraiment local, les résultats obtenus n'avaient pas un très bon coefficient de corrélations ( $R^2 = 0,56$ ). Basé sur 25 événements avec intégration des traçages, les temps de réponses peuvent être modélisés (Fig. 46) en fonction du débit à la Perte avec une très bonne corrélation ( $R^2 = 0,91$ ). Ainsi en cas de crue, les temps de réponse au niveau de la grotte les plus rapides seraient de l'ordre de 7 à 8 heures.

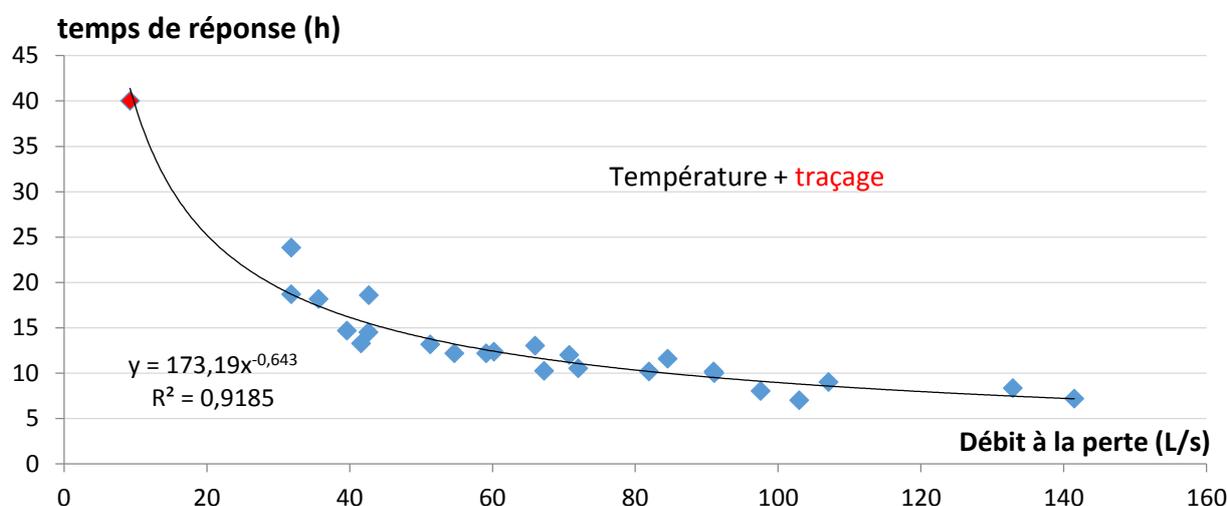
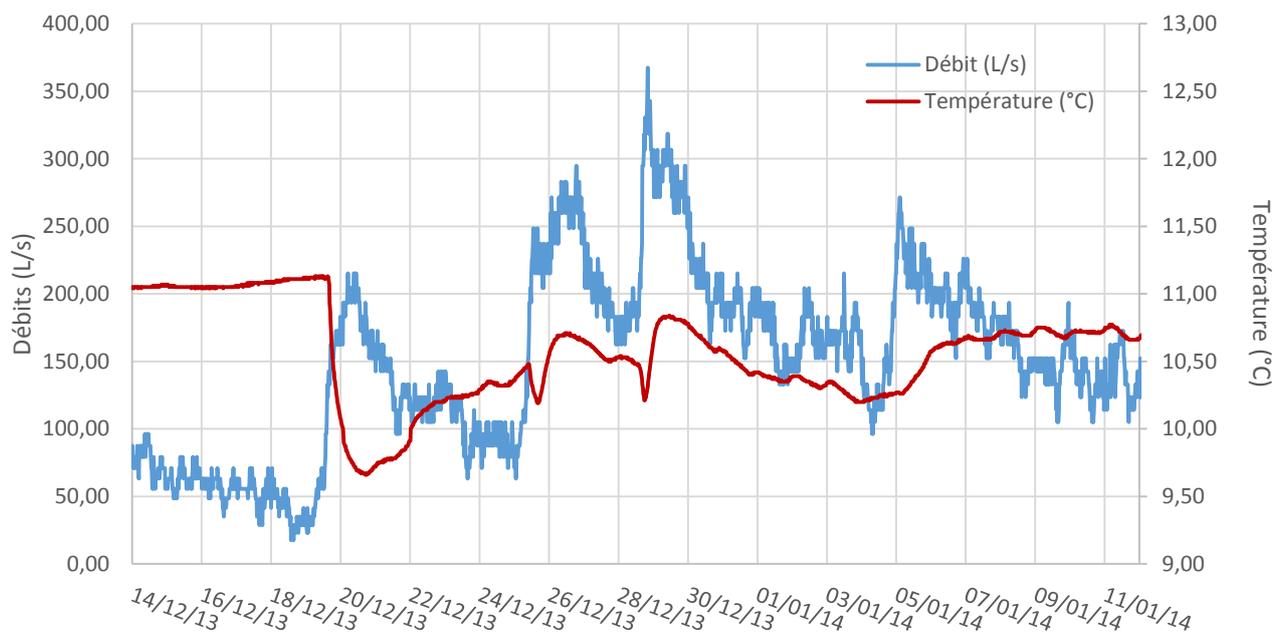


Fig. 48 : Corrélation des temps de réponse obtenus à partir des températures et du traçage, avec le débits.

La température de l'eau évolue en fonction du débit (*Fig. 46*) et nous renseigne sur le fonctionnement du karst. La dynamique dominante du système est celle observable du 19 au 21 décembre, à savoir une diminution de la température (ici perte de 1,5°C) suite à une augmentation de débit. Ceci correspond à une dynamique de drain majeur acheminant l'eau froide du ruissellement superficiel de la Perte. Un autre phénomène est observable au sein du système du 5 au 7 janvier (*Fig. 46*). La température augmente (0,5°C) suite à l'augmentation de débit. Cela signifie un apport d'eau chaude par effet piston. L'eau contenue dans la porosité et les fissures de la roche va par pression différentielle se déstocker et venir alimenter le débit de la rivière. Aucune précipitations n'ont été enregistrées lors de ces dates, comparé aux 16 mm d'eau précipité du 19 au 21 décembre.



**Fig. 49 : Relation débits et températures à la Salle de la Cascade.**

Les deux phénomènes peuvent également s'exécuter conjointement, occasionnant une diminution de la température par l'apport d'eau froide, puis une augmentation de température par l'apport d'eau chaude du karst. Ceci est observable du 25 au 27 décembre (baisse de 0,2°C, suivie d'une augmentation de 0,4°C) et du 28 au 30 décembre sur le graphique (*Fig. 46*).

Ainsi deux systèmes différents se distinguent. Le premier est en lien direct avec les apports d'eau extérieur, drain dominant acheminant l'eau de ruissellement dans le karst. Le deuxième système correspond aux apports d'eau stockée dans la roche, par effet piston suite à une différence de pression.

## **VI) Conclusion.**

La mise en place des sondes Reefnet a permis la mesure sur un an des débits et températures aux différents points d'implantation. Ceci permet d'avoir un suivi régulier de ces deux paramètres et enregistre les réponses du système karstique. Les débits ont servi dans l'interprétation des traçages, et mis en relation avec la température ont permis de mettre en évidence une corrélation sur les temps de réponse au niveau de la grotte. Ainsi lors de crues, le temps de réponse maximum sera de l'ordre de 7 à 8 heures.

Les analyses d'eau ont démontré une certaine homogénéité, sur une eau de type calcique au sein du massif. Une différence sur les eaux provenant du primaire en termes de pH et de conductivité se détache. Le suivi hebdomadaire révèle un pH de la rivière relativement bas pour un domaine calcaire et des conductivités assez hautes. L'hypothèse d'un apport d'eau méconnu venant acidifier le pH de la rivière pourrait être retenue, ainsi que celle d'une augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> dissout. L'existence d'apports d'eau annexes venant interagir avec la conductivité n'est pas à exclure.

Les traçages colorimétriques effectués ont affiné le rôle des points testés. La Perte de la Goulouze, le Gouffre du Tunnel de Saint Gengoux de Scissé, le Gouffre du Vautiant, le Gouffre des Teppes ainsi que la Perte Verzée Nord sont tous en relation avec la Grotte de la Rivière Souterraine. Egalement, il s'avère que la Gueule du Loup et sa Résurgence soit l'exutoire principal du Vautiant. La surface d'alimentation du système karstique serait de l'ordre de 7 km<sup>2</sup>. Les résultats du multi-traçage permettent une modélisation du système. Ainsi le karst serait relativement homogène avec des sections de galerie de l'ordre de 1 à 3 m<sup>2</sup> à dynamique de drain dominant voir drains interconnectés. Une partie reste à vérifier en ce qui concerne la deuxième campagne de traçage, laissant supposer plutôt une dynamique capacitive sur système diffus qui corroborerait les effets pistons constatés. Le Gouffre du Vautiant et la Perte Verzée Nord fixe la limite nord du système qui s'étendrait donc sur 4,5 km. Au sein de la grotte la modélisation effectuée estime le volume du Siphon à 530 m<sup>3</sup>, et soulève une question en ce qui concerne la restitution du traceur sur la portion en amont de la Salle de la Cascade.

## **VII) Perspectives.**

Cette étude montre les variations des paramètres hydrochimiques sur une période relativement courte. De plus, les années 2013 et 2014 ne sont pas représentatives d'un point de vue hydrologique (année très riche en eau pour 2013 sur la période de mai à juin, et au contraire un étiage avancé pour 2014). Ainsi, la poursuite du suivi sur ces paramètres devrait être maintenue.

Le suivi sur la conductivité et le pH reste un suivi partiel ne couvrant pas encore une année hydrologique et un minimum d'un an permettrait une meilleure interprétation des résultats. Pour aider sur ce suivi, la mise en place d'une sonde de conductivité en permanence à la Résurgence permettrait d'avoir une réponse rapide et précise sur l'évolution de la conductivité lors d'un événement pluvieux. Egalement, des analyses en période hivernale seraient à renouveler afin de compléter le Piper.

Un traçage par le radon contenu dans l'eau permettrait de lever ou non l'hypothèse d'un apport d'eau provenant du primaire.

Un relevé de section à la Gueule du Loup validerait l'interprétation du traçage effectué au Vautiant, et aiderait à l'obtention d'une modélisation karstique complète.

## Bibliographie

- Audra P.**, 2001, *Mesures de débit et traçages - Manuel à l'usage des spéléologues*, 43 p.
- Barriquand J. et L., Guillot L., Nykiel C.**, 2011, *Le site des grottes d'Azé, Spelunca* 123 7-16 p.
- Barriquand J. et L. & Al.**, 2010, *Azé and the Mâconnais, Geology and karst, Human occupation (from the Prehistory to Antiquity), Paleontology, Environment, History of research*, 16th International Cave Bear and Lion Symposium, 210 p.
- Bakalowicz M.**, 2002, *Hydrogéologie karstique, Hydrosiences Montpellier, DEA Paris*, 234 p.
- BRGM/RP-58237-FR, Mars 2010**, *Guide méthodologique, les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource*, 246 p.
- Conseil général de Saône-et-Loire**, *Grottes d'Azé*, disponible sur : <http://www.cg71.fr/jahia/Jahia/accueil/vivre-en-saone-et-loire/sortir/grottes-aze> (consulté le 26/07/2014).
- EPTB Saône & Doubs**, Septembre 2012, *Contrat des Rivières du Mâconnais, Tome 1 : Etat des lieux mâconnais*, 125 p.
- EPTB Saône & Doubs**, Janvier 2013, *Contrat des Rivières du Mâconnais, Tome 2 : Atlas mâconnais*, 67 p.
- EPTB Saône & Doubs**, Janvier 2013, *Contrat des Rivières du Mâconnais, Tome 3 : Contrat mâconnais*, 64 p.
- EPTB Saône & Doubs**, *Rapport 03-117-71 Petite Grosne - Etat des Lieux*, 171 p.
- EPTB Saône & Doubs**, disponible sur : <http://www.eptb-saone-doubs.fr/> (consulté le 26/07/2014)
- Degoutte G.**, 2012, *Les déversoirs sur digues fluviales, Quae*, 181 p.
- Gilli E.**, 2012, *Karstologie, Karsts, grottes et sources*, Dunod, 244 p.
- Gilli E., Mangan C. et Mudry J.**, 2004, *Hydrogéologie, Objets, méthodes, applications*, Dunod, 340 p.
- Guillot L., Morel J. & Simonnot G.**, 2005, *Gouffres et cavernes des Monts du Mâconnais*, 196 p.
- Leibundgut C., Piotr M., Külls C.**, 2009, *Tracers in Hydrology*, Wiley-Blackwell, 415 p.
- IPSEAU**, Etude N°02-71-043-Juillet 2002, *Projet d'aménagements touristiques autour du site de la grotte d'Azé, Etude hydraulique, conseil général de Saône et Loire IPSEAU, ingénierie pour l'eau le sol et l'environnement*, 19 p.
- IPSEAU**, Etude N°95-71-196-Février 1996, *Bassin versant de la Mougé, Etude complémentaire au Schéma d'Aménagement, Analyse des dernières crues et propositions de mesures conservatoires*, 137 p.
- Jaillet S.**, 1999, *La crue sous terre, Les cahiers de l'E. F. S. N°10*, 85 p.
- Musy A. & Schenk C.**, *Cours hydrologie générale, Section SIE et GC, 4ème semestre 2005*, disponible sur : <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/> (Consulté le 24/04/2014).
- Rodier J.**, 2009, *L'Analyse de l'eau, 9<sup>e</sup> édition*, Dunod, 1526 p.
- Schnegg P.A & Thueler L.**, 2012, *Application of multi-LED field fluorometer for simultaneous detection of hard to separate dye tracers and fluocapteurs*, XI Congreso Latinoamericano de Hidrogeologia Cartagena de Indias, Colombia, 20-24 August, 5 p.
- Schudel B., Biaggi D., Dervev T., Kozel R., Müller I., Hennig Ross J., Schindler U.**, 2002, *Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie, Guide pratique, groupe de travail Traçage de la Société suisse d'hydrogéologie SSH, l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie*, 87 p.

## ANNEXES

### *Annexe 1 : Fiches points*

<i>1 : Fiches points 1 à 4. ....</i>	<i>58</i>
<i>2 : Fiches points de 5 à 8.....</i>	<i>59</i>
<i>3 : Fiches points de 9 à 12. ....</i>	<i>60</i>
<i>4 : Fiches points de 13 à 16.....</i>	<i>61</i>
<i>5 : Fiches points de 17 à 20.....</i>	<i>62</i>
<i>6 : Fiches points de 21 à 24.....</i>	<i>63</i>

### *Annexes 2 : Fiches sondes.*

<i>7 : Fiches sondes 1 et 2.....</i>	<i>64</i>
<i>8 : Fiches sondes 3 et 4.....</i>	<i>65</i>
<i>9 : Fiches sondes 6 et 7.....</i>	<i>66</i>
<i>10 : Fiches sondes 7 et 8. ....</i>	<i>67</i>

### *Annexes 3 : Cartes distribuées aux bénévoles pour les prélèvements manuels.*

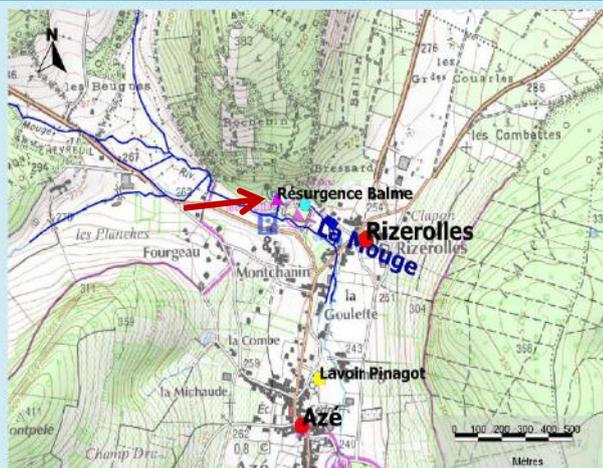
<i>11 : Cartes distribuées aux bénévoles pour les prélèvements manuels, 1ère campagne (à gauche) et 2ème campagne (à droite). ....</i>	<i>68</i>
--	-----------

### *Annexes 4 : Analyses CARSO et analyses hebdomadaires.*

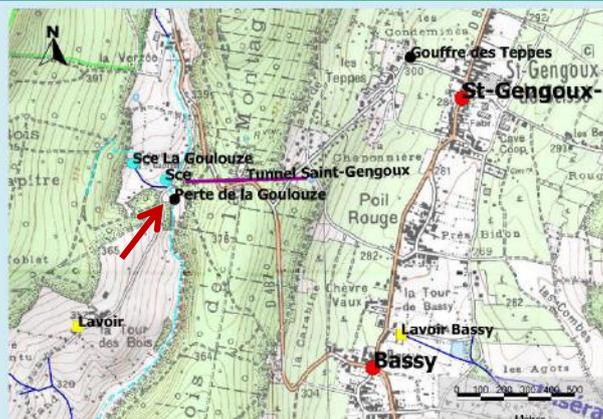
<i>12 : Analyses Carso et pH hebdomadaires. ....</i>	<i>69</i>
<i>13 : Conductivités hebdomadaires. ....</i>	<i>70</i>

### *Annexes 5 : Résultats des prélèvements lors de la première campagne de traçage.*

Résurgence de la Balme		Fiche N°1
Type de point	Résurgence	
Bassin Versant	La Mouge	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 835119,38 Y : 6594765,84	
Altitude	250 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Azé	
Localisation	Site des Grottes d'Azé, en aval de la Grotte de la Rivière Souterraine.	
Géologie	Calcaire	

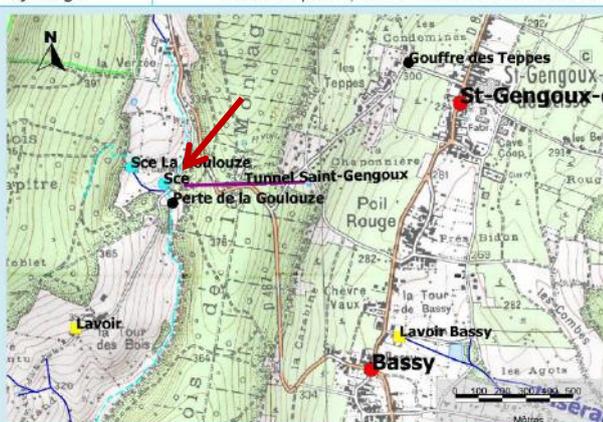


La Perte de la Goulouze		Fiche N°2
Type de point	Perte	
Bassin Versant	La Mouge	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 834942,00 Y : 6597077,68	
Altitude	323 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Saint-Gengoux-de-Scissé	
Localisation	Au Sud du hameau de la Verzée, prendre le chemin menant à la Tour des Bois, la perte se trouve dans le pré non loin de l'endroit où le chemin enjambe la Goulouze.	
Géologie	Marno-Calcaire	

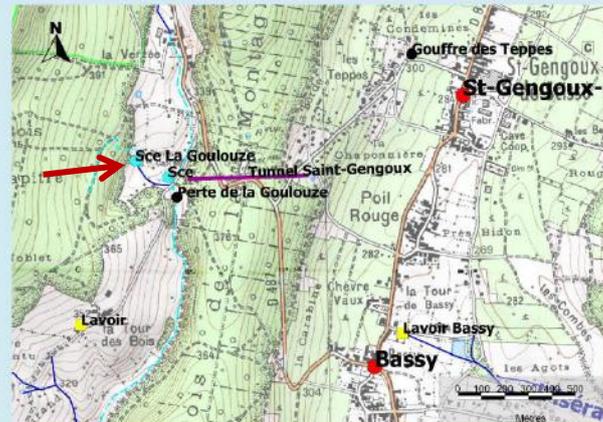


1 : Fiches points 1 à 4.

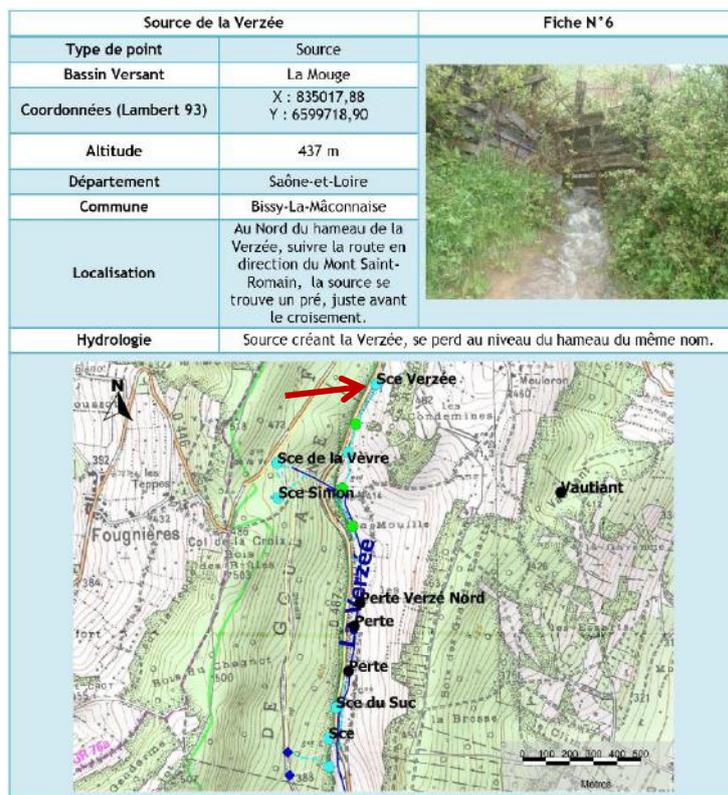
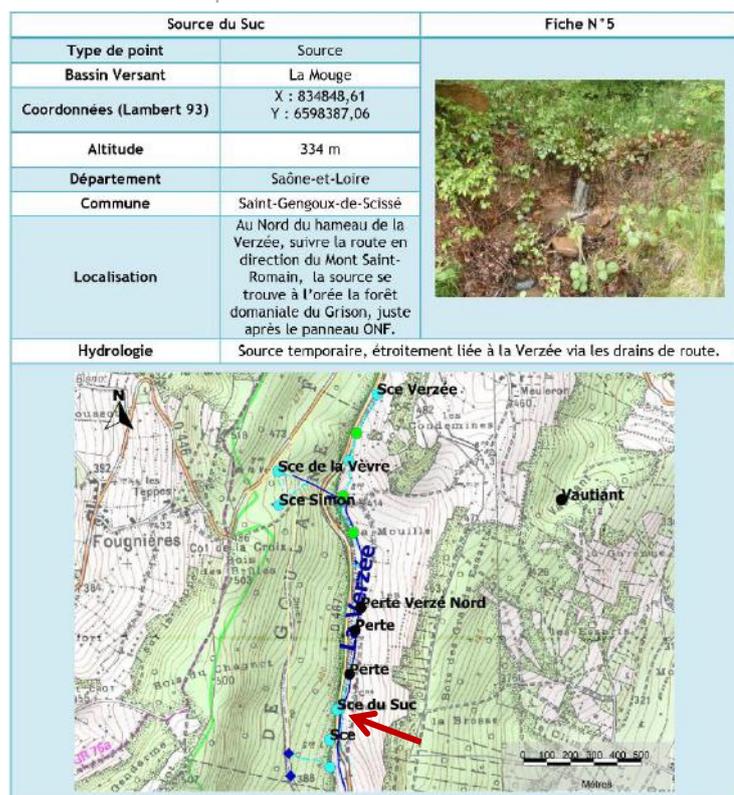
Source près de la Goulouze (Peuplier)		Fiche N°3	
Type de point	Source		
Bassin Versant	La Mouge		
Coordonnées (Lambert 93)	X : 834903,48 Y : 6597161,95		
Altitude	324 m		
Département	Saône-et-Loire		
Commune	Saint-Gengoux-de-Scissé		
Localisation	Au Sud du hameau de la Verzée, prendre le chemin menant à la Tour des Bois, la source se trouve dans le pré au pied du peuplier, non loin de l'endroit où le chemin enjambe la Goulouze.		
Hydrologie	Source temporaire, serait étroitement liée à la Verzée.		



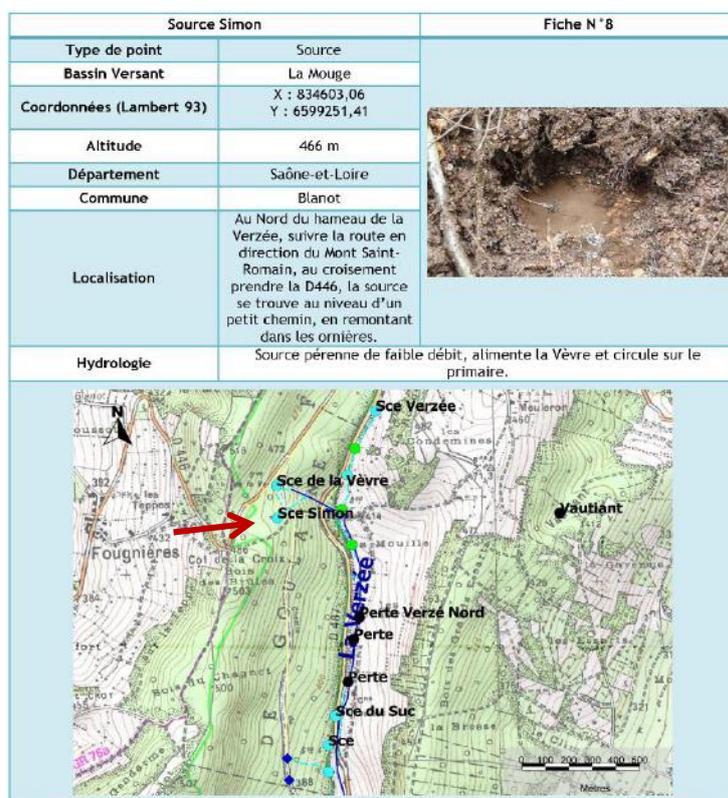
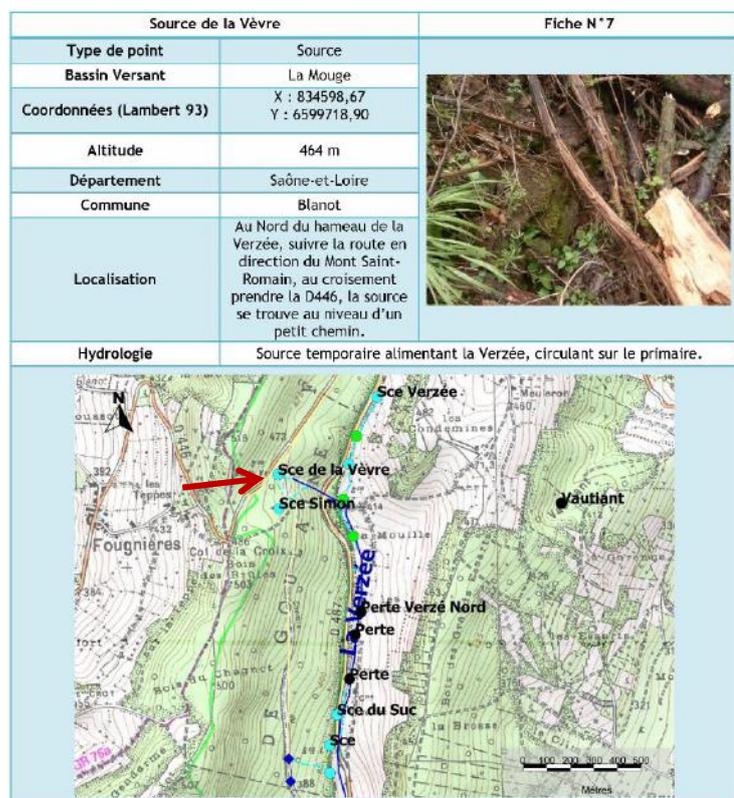
Source de la Goulouze		Fiche N°4	
Type de point	Source		
Bassin Versant	La Mouge		
Coordonnées (Lambert 93)	X : 834764,99 Y : 6597230,69		
Altitude	334 m		
Département	Saône-et-Loire		
Commune	Saint-Gengoux-de-Scissé		
Localisation	Au Sud du hameau de la Verzée, prendre le chemin menant à la Tour des Bois, suivre la Goulouze en passant dans le pré, la source se trouve à l'orée du bois.		
Hydrologie	Source temporaire, serait étroitement liée à la Verzée.		



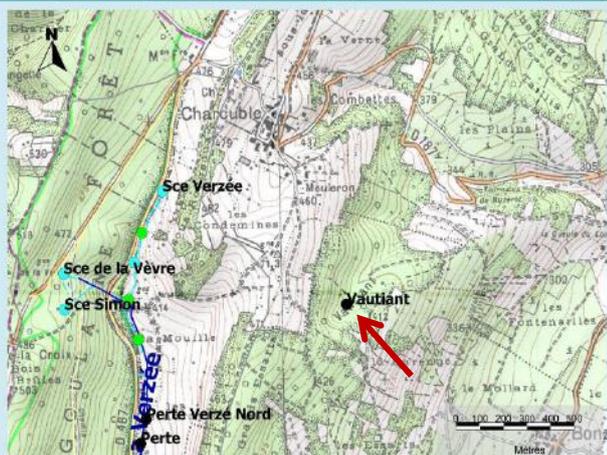
Annexes 1 : Fiches points.



2 : Fiches points de 5 à 8.



Le Gouffre du Vaultiant		Fiche N°9
Type de point	Perte fossile ?	
Bassin Versant	La Bourbonne	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 835797,68 Y : 6599272,73	
Altitude	410 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	St-Gengoux-de-Scissé	
Localisation	Sud du hameau de Charcuble, après Meuleron, dans la combe boisée.	
Géologie	Calcaire, marno-calcaire	j2a Bathonien inférieur à Bajocien supérieur



Tranquiou 1		Fiche N°10
Type de point	Résurgence	
Bassin Versant	La Bourbonne	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 837027,52 Y : 6602594,24	
Altitude	325 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Cruzille	
Localisation	Au Nord-Ouest de la commune de Cruzille, près de l'ancienne carrière de Chaneau, un peu plus au Nord dans le Bois des Buis.	
Géologie	Calcaire	l6b-j1a Aalénien supérieur, Bajocien inférieur

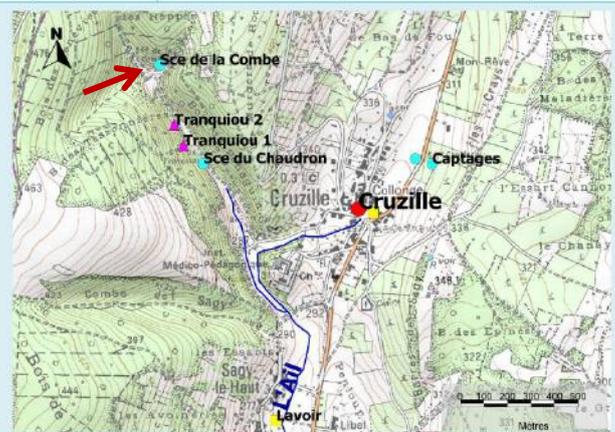


3 : Fiches points de 9 à 12.

Tranquiou 2		Fiche N°11
Type de point	Résurgence	
Bassin Versant	La Bourbonne	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 836988,46 Y : 6602681,82	
Altitude	320 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Cruzille	
Localisation	Au Nord-Ouest de la commune de Cruzille, près de l'ancienne carrière de Chaneau, un peu plus au Nord dans le Bois des Buis.	
Géologie	Calcaire	l6b-j1a Aalénien supérieur, Bajocien inférieur



Source de la Combe		Fiche N°12
Type de point	Source	
Bassin Versant	La Bourbonne	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 836927,85 Y : 6602933,34	
Altitude	365 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Cruzille	
Localisation	Au Nord-Ouest de la commune de Cruzille, près de l'ancienne carrière de Chaneau, suivre le chemin au Nord jusqu'à la lisière du Bois des Reppes.	
Hydrologie	Source temporaire en amont des Tranquioux.	



Annexes 1 : Fiches points.

Source du Chaudron		Fiche N° 13
Type de point	Source	
Bassin Versant	La Bourbonne	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 837111,95 Y : 6602520,35	
Altitude	294 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Cruzille	
Localisation	Au Nord-Ouest de la commune de Cruzille, près de l'ancienne carrière de Chaneau, un peu plus au Nord dans le Bois des Buis.	
Hydrologie	Source temporaire peut être en relation avec le Tranquiou 1.	



La Gueule du Loup		Fiche N° 14
Type de point	Résurgence	
Bassin Versant	La Bourbonne	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 836993,85 Y : 6599602,40	
Altitude	267 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Bissy-la-Mâconnaise	
Localisation	Au Nord-Ouest de la commune de Bissy-La-Mâconnaise, lisière de bosquet en contre bas d'un pré.	
Géologie	Calcaire	j2b Bathonien moyen



4 : Fiches points de 13 à 16.

Le Gouffre du Tunnel de Saint-Gengoux-de-Scissé		Fiche N° 15
Type de point	Perte avec alimentation artificielle	
Bassin Versant	La Mouge	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 835500,96 Y : 6597166,73	
Altitude	336 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Saint-Gengoux-de-Scissé	
Localisation	Il existe deux entrées, l'une est située non loin de la perte de la Goulouze, l'autre est située près d'habitations sur la route qui descend à Poil Rouge.	
Géologie	Calcaire	j2b Bathonien moyen

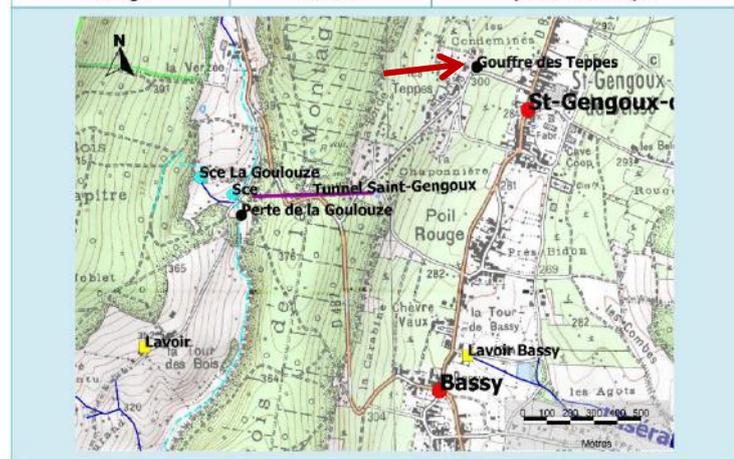


Résurgence de la Gueule du Loup		Fiche N° 16
Type de point	Résurgence	
Bassin Versant	La Bourbonne	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 835119,38 Y : 6594765,84	
Altitude	252 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Bissy-la-Mâconnaise	
Localisation	En aval du lavoir, près de la confluence avec le fossé, remonter légèrement dans le pré.	
Géologie	Calcaire	j2b Bathonien moyen

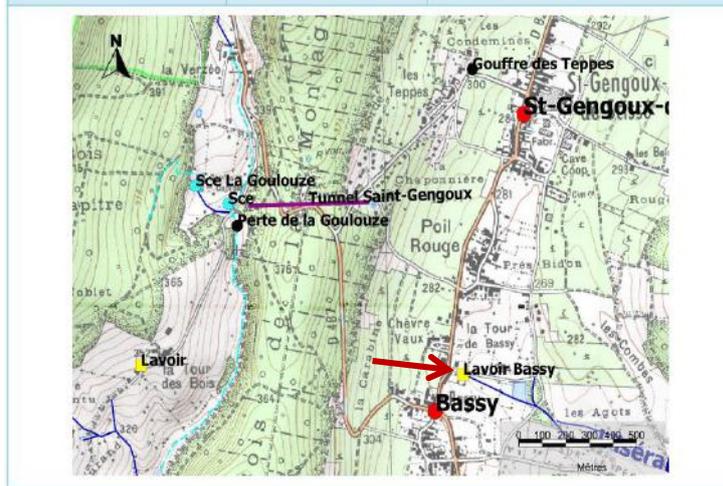


Annexes 1 : Fiches points.

Gouffre des Teppes		Fiche N° 17
Type de point	Perte fossile ?	
Bassin Versant	La Mouge	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 835953,71 Y : 6597676,49	
Altitude	296 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Saint-Gengoux-de-Scissé	De Saint-Gengoux-de-Scissé, prendre direction les Teppes. Le gouffre est situé dans le virage en bord de vigne, sous friche.
Localisation		
Géologie	Calcaire	

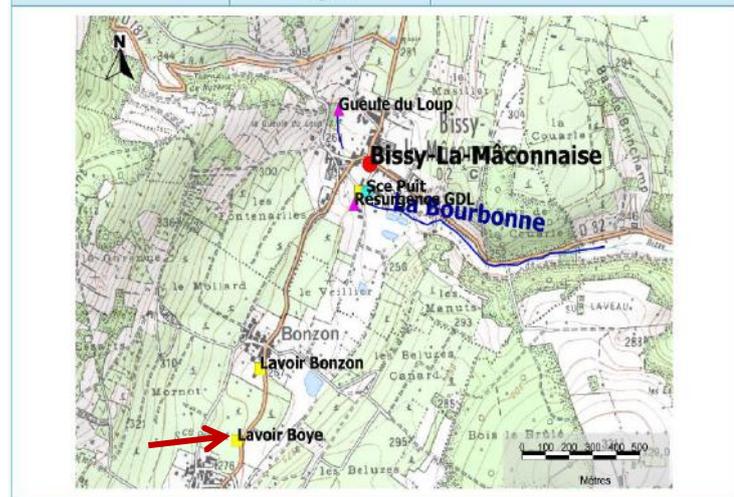


Lavoir de Bassy		Fiche N° 18
Type de point	Lavoir	
Bassin Versant	La Mouge	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 835902,59 Y : 6596505,36	
Altitude	266 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Saint-Gengoux-de-Scissé	A Bassy, se diriger vers la Tour. Le lavoir est en bord de route proche de l'intersection.
Localisation		

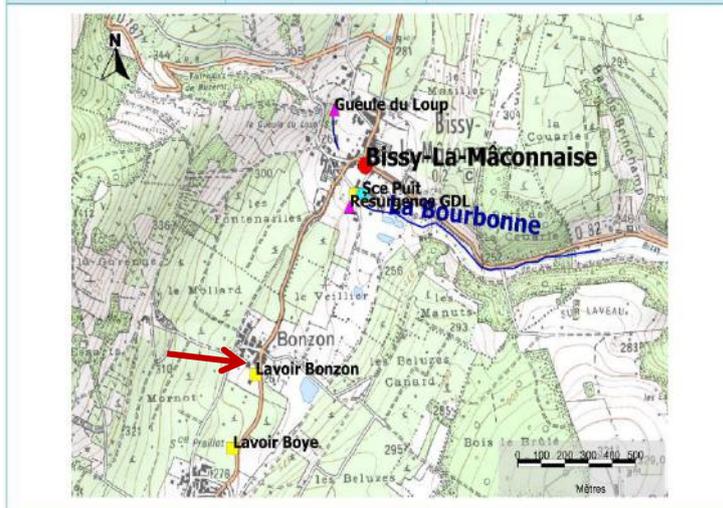


5 : Fiches points de 17 à 20.

Lavoir de Boye		Fiche N° 19
Type de point	Lavoir	
Bassin Versant	La Bourbonne	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 836562,06 Y : 6598365,17	
Altitude	275 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Saint-Gengoux-de-Scissé	Entre Boye et Bonzon, le long de la route proche des vignes.
Localisation		

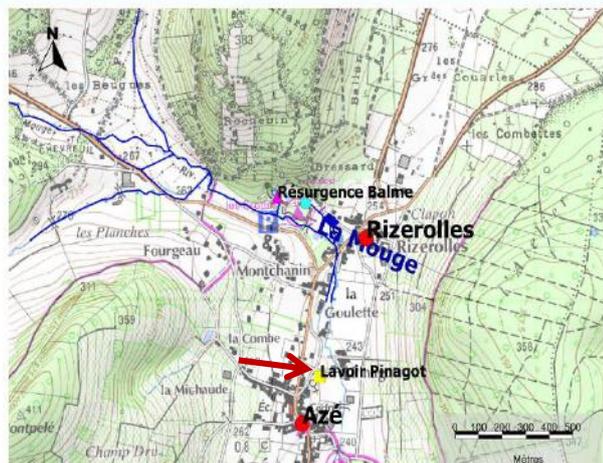


Lavoir de Bonzon		Fiche N° 20
Type de point	Lavoir	
Bassin Versant	La Bourbonne	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 836658,53 Y : 6598634,02	
Altitude	267 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Saint-Gengoux-de-Scissé	En bord de route menant à Bonzon, au sud du hameau.
Localisation		

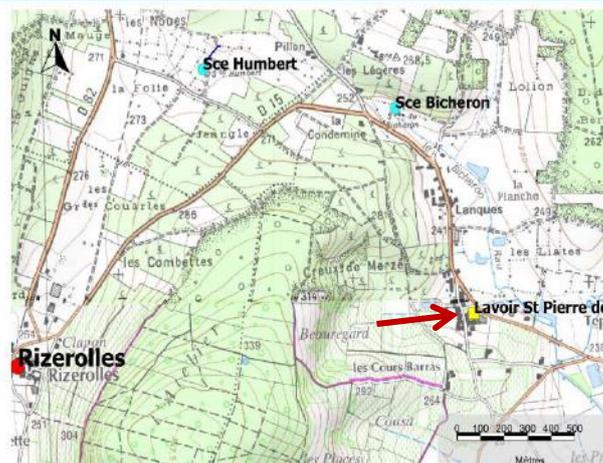


Annexes 1 : Fiches points.

Lavoir Pinagot		Fiche N° 21
Type de point	Lavoir	
Bassin Versant	La Mouge	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 835276,75 Y : 6594088,12	
Altitude	241 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Azé	
Localisation	A Azé prendre la route descendant à Pinagot. Le lavoir se trouve au niveau du carrefour.	

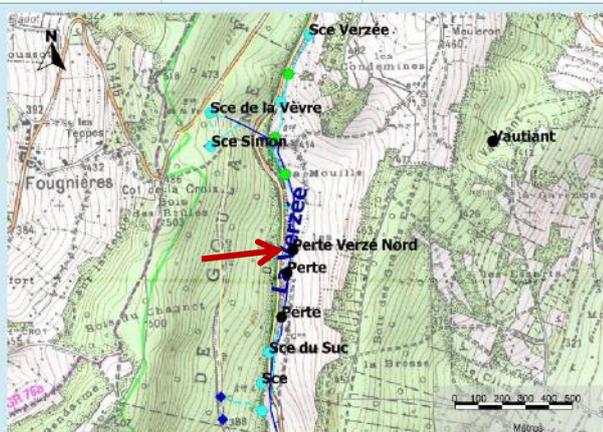


Lavoir de Saint-Pierre-de-Lanque		Fiche N° 22
Type de point	Lavoir	
Bassin Versant	La Mouge	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 837450,04 Y : 6594824,16	
Altitude	241 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Péronne	
Localisation	Dans le hameau de Saint-Pierre-de-Lanques, en bord de route près du Domaine du Bicheron.	

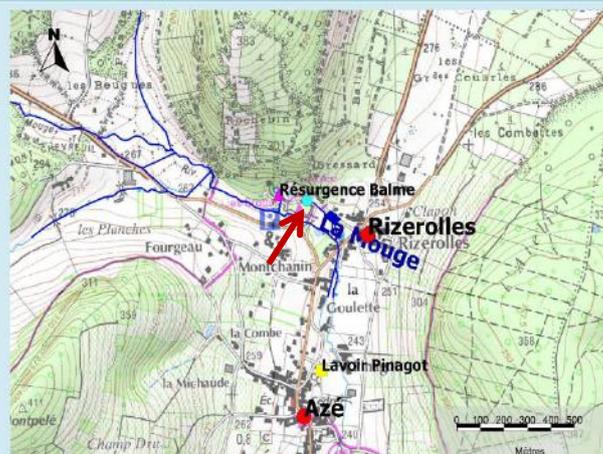


6 : Fiches points de 21 à 24.

Perte Verzée Nord		Fiche N° 23
Type de point	Perte	
Bassin Versant	La Mouge	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 834946,67 Y : 6598817,28	
Altitude	379 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Saint-Genoux-de-Scissé	
Localisation	Du hameau de la Verzée, longer celle-ci en direction du nord. La perte est en amont des peupliers bordant l'entrée du pré en bord de route.	
Géologie	Calcaire	B Sinémurien



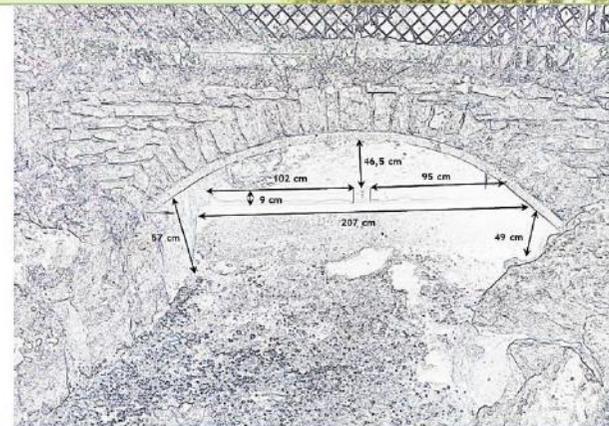
Mare du site des Grottes d'Azé		Fiche N° 24
Type de point	Source	
Bassin Versant	La Mouge	
Coordonnées (Lambert 93)	X : 835261,61 Y : 6594746,92	
Altitude	248 m	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Azé	
Localisation	Site des Grottes d'Azé, devant le Musée des Grottes.	
Hydrologie	Alimentation par la Résurgence de la Balme par drain artificiel, et présence d'une alimentation par drain naturel.	



Sonde Extérieure		Fiche N°1
Cours d'eau	∅	
Bassin Versant	∅	
Emplacement	Camping d'Azé	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Azé	
Localisation de la sonde	Abri météo, dans l'enceinte du camping d'Azé, derrière la piscine.	
Type de Seuil	∅	
Mensuration du Seuil	∅	
Mesures	Pression atmosphérique et température extérieure	
Mise en place de la sonde	04/06/2013	



Sonde Résurgence		Fiche N°2
Cours d'eau	La Balme	
Bassin Versant	La Mouge	
Emplacement	Résurgence de la Grotte de la Rivière Souterraine	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Azé	
Localisation de la sonde	Fixer sur un morceau de calcaire dans le bassin, légèrement en amont du seuil	
Type de Seuil	Planches de bois scellées au béton, fuites colmatées à l'argile	
Mensuration du Seuil	L = 2,07 m	
Mesures	Débit à la Résurgence	
Mise en place de la sonde	23/05/2013	

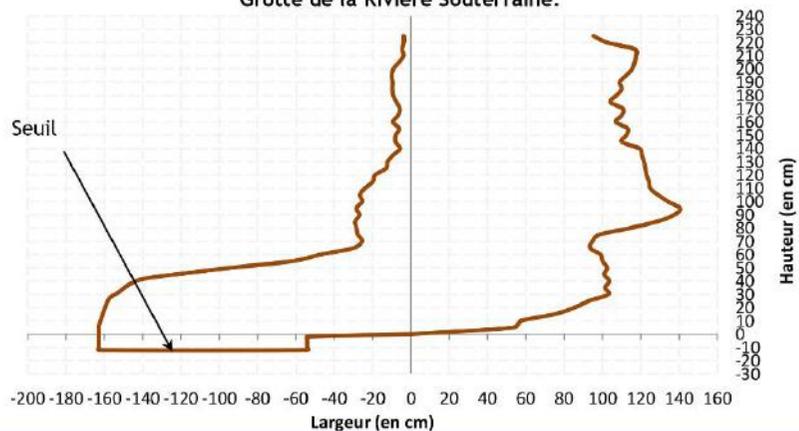


7 : Fiches sondes 1 et 2.

Sonde Grotte Rivière Souterraine (Cascade)		Fiche N°3
Cours d'eau	La Balme	
Bassin Versant	La Mouge	
Emplacement	Grotte de la Rivière Souterraine	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Azé	
Localisation de la sonde	Grotte de la Rivière Souterraine, suite à la salle de la cascade, en amont du seuil, fixée sur un morceau de calcaire (cablé).	
Type de Seuil	Entièrement béton, fuites colmatées à l'argile	
Mensuration du Seuil	0,825 m	
Mesures	Débit de la Balme dans la grotte	
Mise en place de la sonde	30/07/2013	

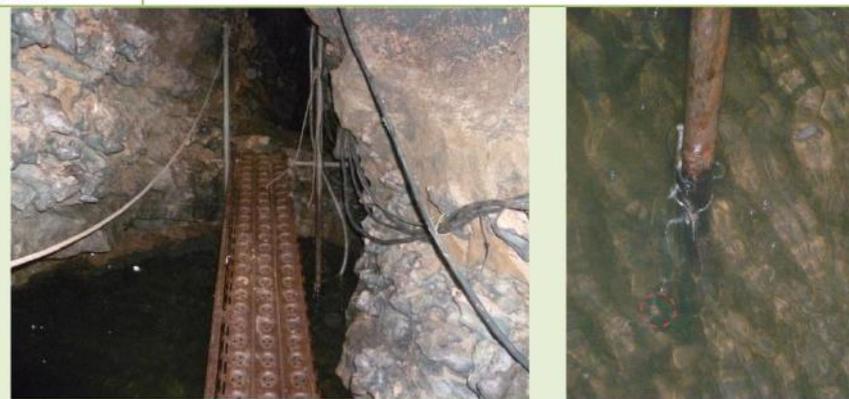


Topographie de la galerie au niveau du seuil de la Cascade dans la Grotte de la Rivière Souterraine.



8 : Fiches sondes 3 et 4.

Sonde Grotte Rivière Souterraine (Sous Cascade)		Fiche N°4
Cours d'eau	La Balme	
Bassin Versant	La Mouge	
Emplacement	Grotte de la Rivière Souterraine	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Azé	
Localisation de la sonde	Fixée à une tige, arrimée au poteau de la passerelle de la salle de la cascade.	
Type de Seuil	Ø	
Mensuration du Seuil	Ø	
Mesures	Variations de hauteur d'eau à l'aval du seuil, indicateur de mise en charge de la rivière	
Mise en place de la sonde	07/09/2013	

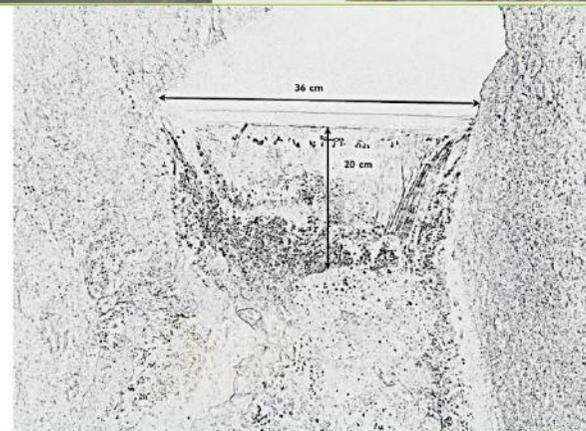


Annexes 2 : Fiches sondes.

Sonde Perte		Fiche N°5
Cours d'eau	La Goulouze et La Verzée	
Bassin Versant	La Mouge	
Emplacement	Perte de la Goulouze	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Saint-Gengoux-de Scissé	
Localisation de la sonde	Fixée à une armature métallique, derrière le seuil, à l'endroit où le chemin de la Tour des Bois enjambe la rivière.	
Type de Seuil	Planche de bois, scellée au béton	
Mensuration du Seuil	0,90 m	
Mesures	Débit au niveau de la perte	
Mise en place de la sonde	22/07/2013	



Sonde Tunnel		Fiche N°6
Cours d'eau	Trop plein de la Goulouze et fuites des canalisations du Tunnel	
Bassin Versant	La Mouge	
Emplacement	Tunnel de Saint-Gengoux-de-Scissé	
Département	Saône-et-Loire	
Commune	Saint-Gengoux-de Scissé	
Localisation de la sonde	Fixée à la canalisation en plastique, sous le trop plein du Tunnel.	
Type de Seuil	Planche de bois, scellée au béton	
Mensuration du Seuil	0,36 m	
Mesures	Débit du Tunnel	
Mise en place de la sonde	25/07/2013	



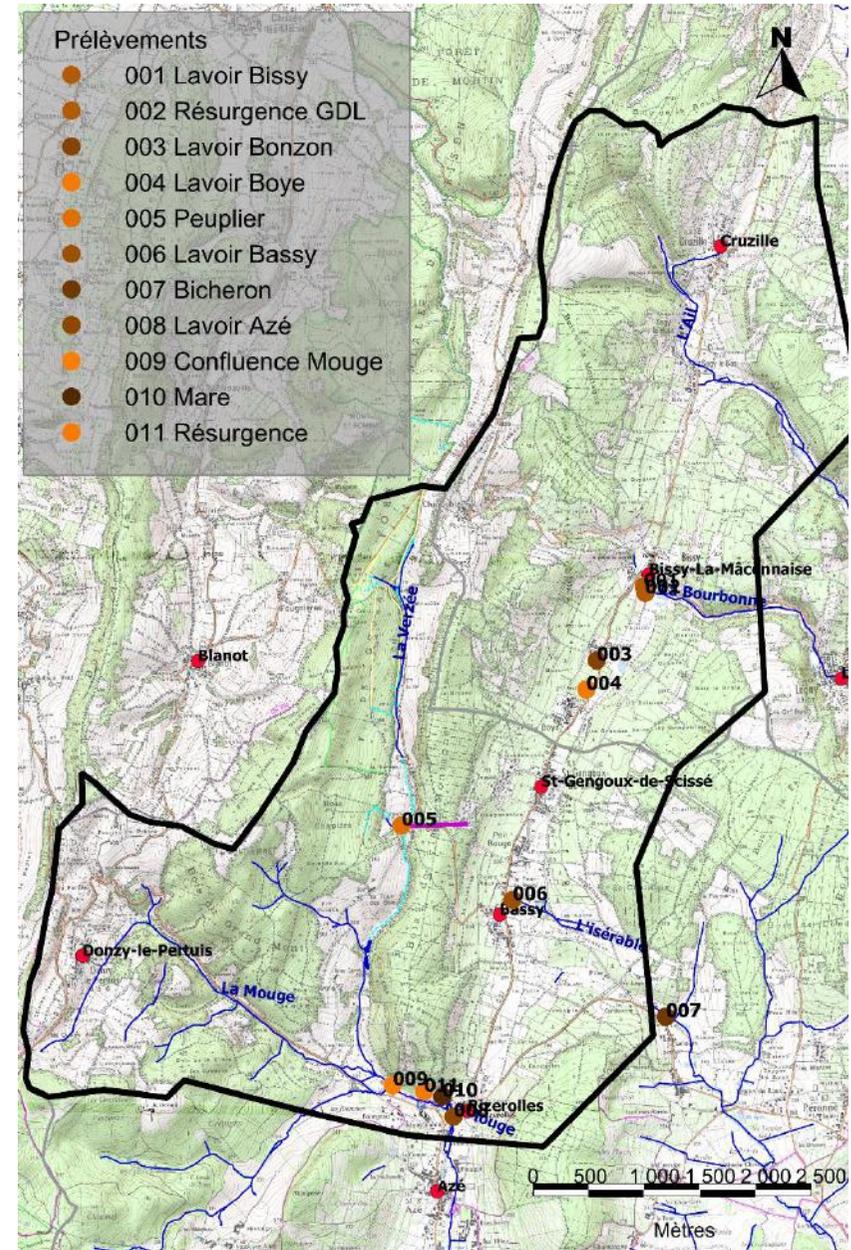
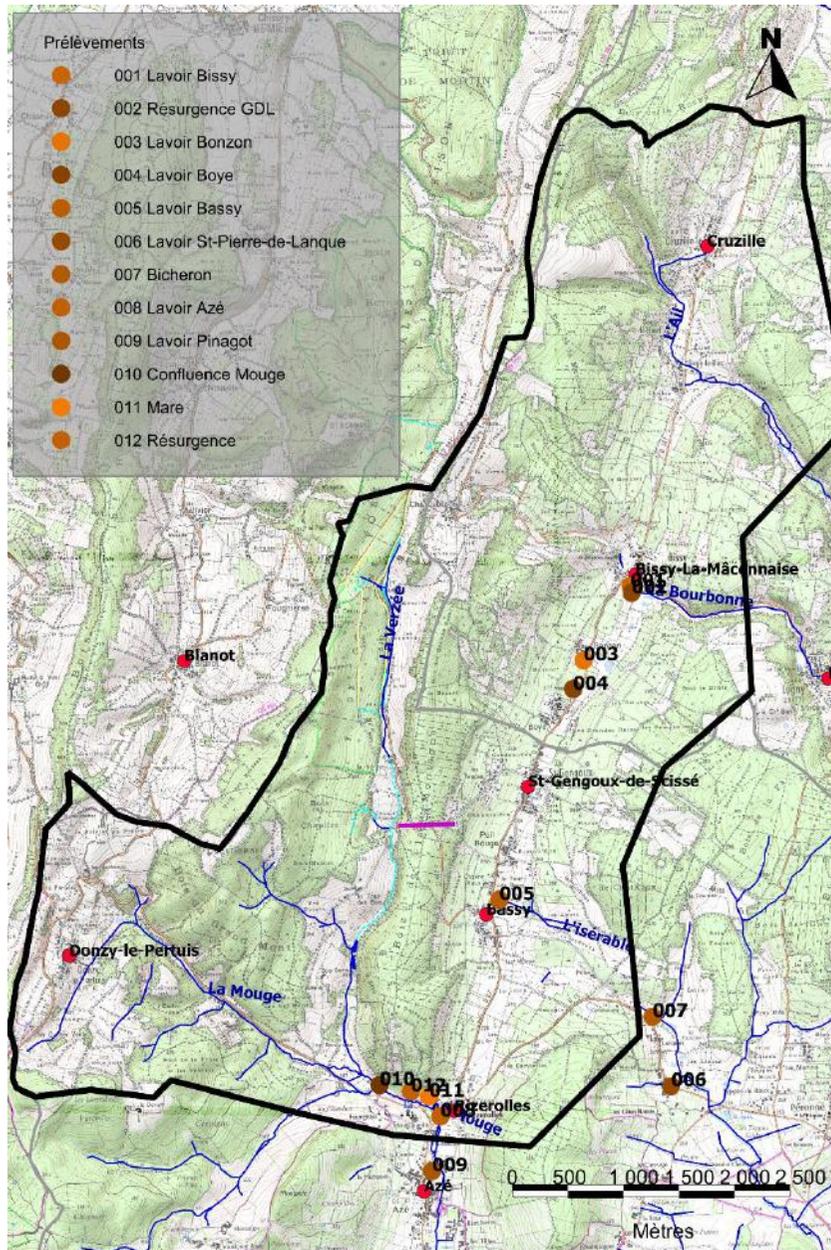
9 : Fiches sondes 6 et 7.

Annexes 2 : Fiches sondes.

Sonde Gueule du Loup		Fiche N°7	Sonde Tranquiou		Fiche N°8
Cours d'eau	Source de la Gueule du Loup		Cours d'eau	Source du Tranquiou	
Bassin Versant	La Bourbonne		Bassin Versant	La Bourbonne	
Emplacement	Gueule du Loup		Emplacement	Tranquiou 1	
Département	Saône-et-Loire		Département	Saône-et-Loire	
Commune	Bissy-La-Mâconnaise		Commune	Cruzille	
Localisation de la sonde	Descendre dans la Gueule du Loup, la sonde est située dans un trou d'eau, accrochée avec une corde.		Localisation de la sonde	Descendre dans le Tranquiou, la sonde est située dans l'eau, accrochée avec une corde, juste avant le siphon du Tranquiou.	
Type de Seuil	Ø		Type de Seuil	Ø	
Mensuration du Seuil	Ø		Mensuration du Seuil	Ø	
Mesures	Variations de la hauteur d'eau dans la Gueule du Loup		Mesures	Variations de la hauteur d'eau dans le Tranquiou 1	
Mise en place de la sonde	07/09/2013		Mise en place de la sonde	08/09/2013	
					
					

10 : Fiches sondes 7 et 8.

Annexes 3 : Cartes distribuées aux bénévoles pour les prélèvements manuels.



11 : Cartes distribuées aux bénévoles pour les prélèvements manuels, 1ère campagne (à gauche) et 2ème campagne (à droite).

Annexes 4 : Analyses CARSO et analyses hebdomadaires.

Analyses CARSO	Date	TA °F	TAC °F	Chlore mg/l Cl <sub>2</sub>	Calcium mg/l Ca <sup>2+</sup>	Magnésium mg/l Mg <sup>2+</sup>	Sodium mg/l Na <sup>+</sup>	Potassium mg/l K <sup>+</sup>	Carbonates mg/l CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Bicarbonates mg/l HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Sulfates mg/l SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Nitrates mg/l NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Orthophosphates mg/l PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Aluminium total mg/l Al	Fer total mg/l Fe	Zinc total mg/l Zn	Plomb total mg/l Pb
Source Simon	29/04/2014	0	0,5	< 0,05	3,3	0,97	3,5	1,9	0	6	6,8	7,2	0,05	0,361	0,28	< 0,01	0,003
Perte Goulouze	29/04/2014	0	20,65	< 0,05	89,7	4,29	6,7	3	0	252	31	8,3	0,05	0,178	1,62	< 0,01	< 0,002
	20/10/2006	/	16,8	/	86,6	4	6,1	2,4	0	/	38,7	40,6	0,12	0,61	0,25	/	/
Tunnel	29/04/2014	0	20,1	< 0,05	85,7	4,63	4,1	1,6	0	245	23,3	6,7	0,08	0,066	0,09	< 0,01	< 0,002
Concrétion jonction	29/04/2014	0	31,2	< 0,05	137,6	2,22	1,6	0,5	0	381	14,3	4,7	0,03	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,002
Concrétion Salle 14 juillet	29/04/2014	0	30,65	< 0,05	134,1	1,37	1,4	0,3	0	374	5,4	0,1	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,002
Concrétion Gour	20/10/2006	/	28,4	/	123	3,4	2,9	1,4	0	/	16,7	19,6	0,11	< 0,01	5,96	/	/
Siphon des Beaunois	29/04/2014	0	22,6	< 0,05	136,1	3,45	3,3	1,1	0	276	17,4	7,3	0,07	0,049	0,083	< 0,01	< 0,002
Résurgence	29/04/2014	0	32,3	< 0,05	135,1	3,44	3,3	1,1	0	394	17,5	7,4	0,07	0,026	0,032	< 0,01	< 0,002
	20/10/2006	/	21,9	/	96,9	3,76	6,5	2,6	0	/	21,9	23,1	0,11	0,158	0,25	/	/
Tranquiou	29/04/2014	0	34,75	< 0,05	149,9	1,66	1,9	0,7	0	424	14,7	13,6	0,06	0,071	0,051	< 0,01	< 0,002
Gueule du Loup	29/04/2014	0	33,4	< 0,05	143,2	2,98	4,8	1,6	0	407	16,9	17,7	0,11	0,11	0,088	< 0,01	< 0,002

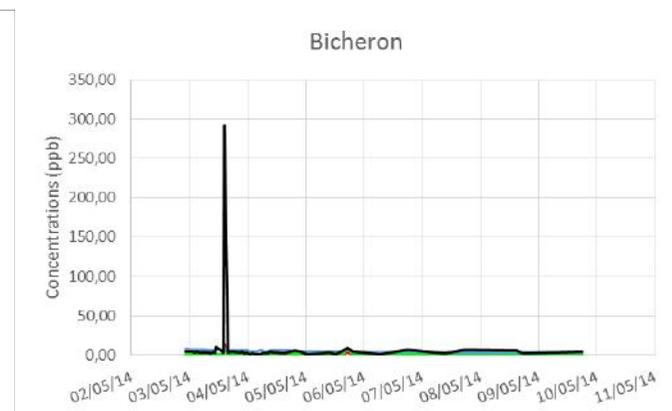
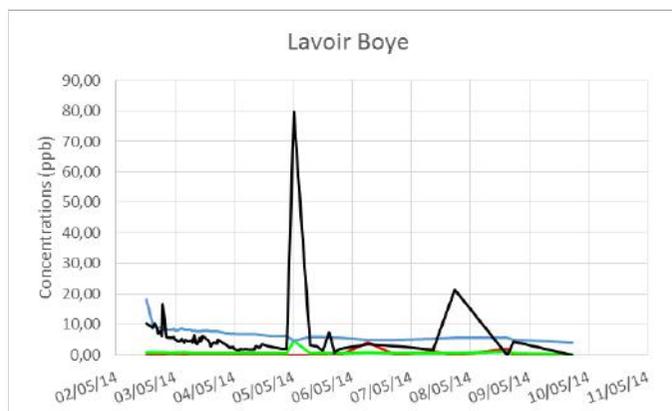
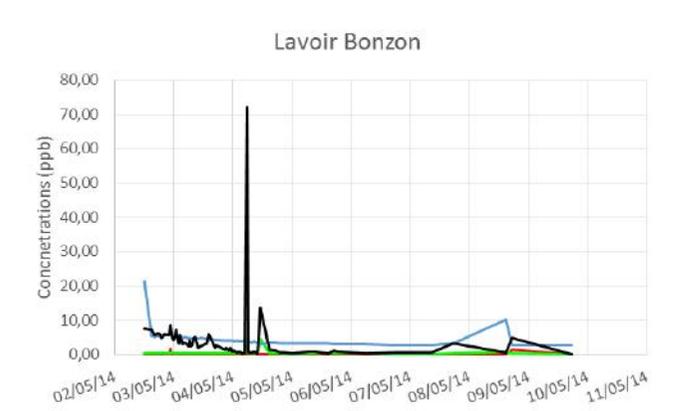
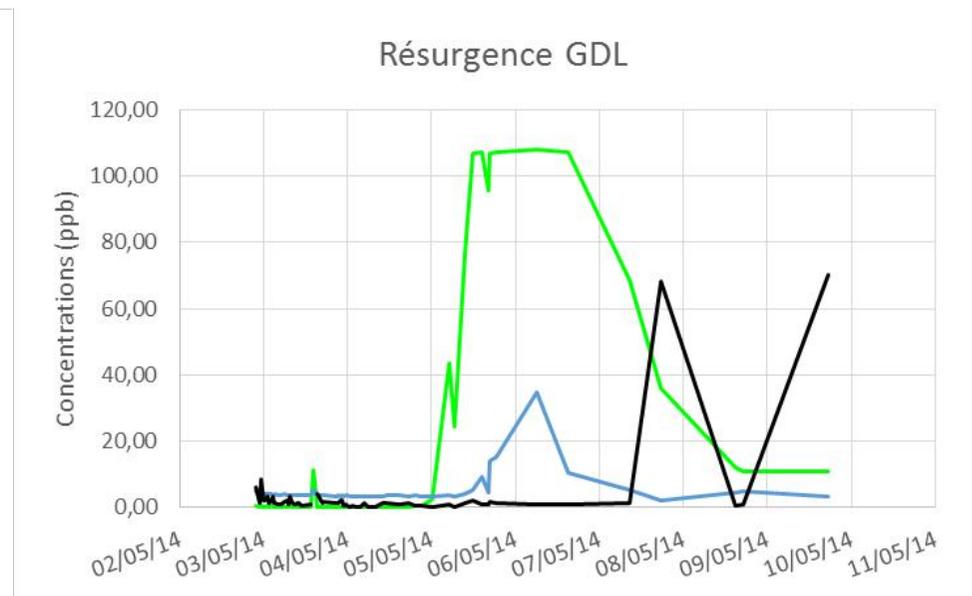
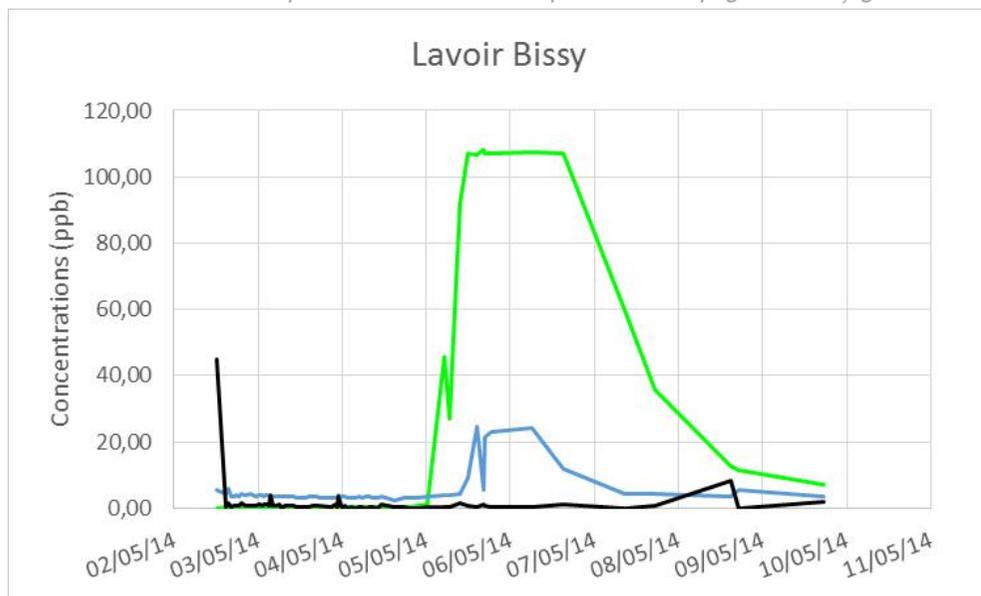
12 : Analyses Carso et pH hebdomadaires.

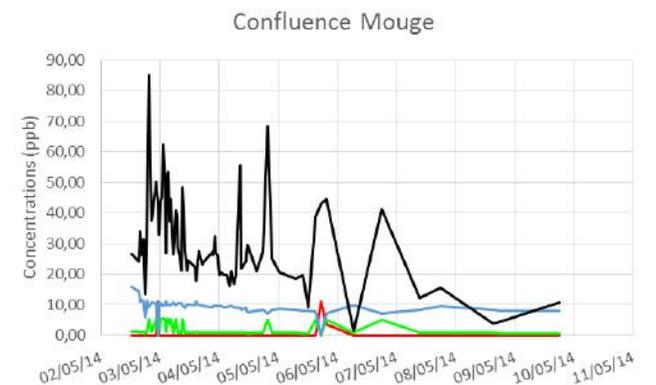
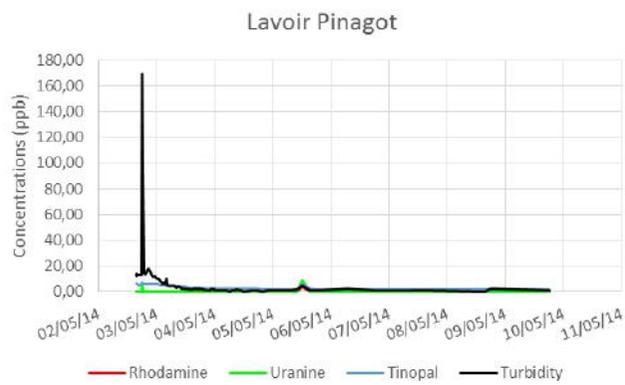
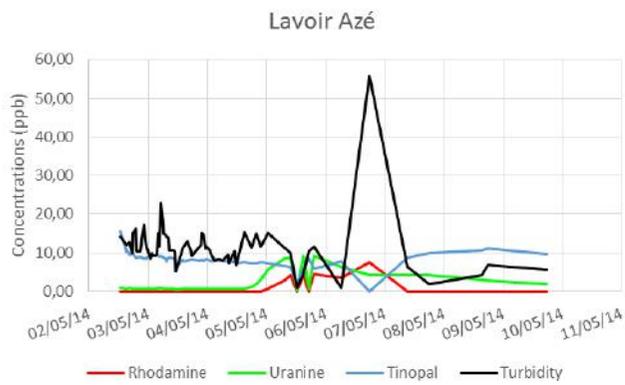
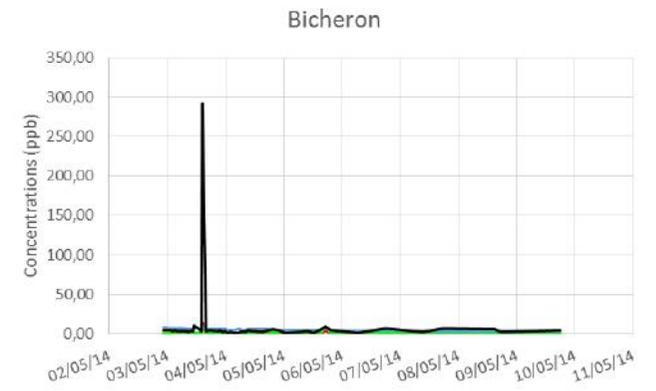
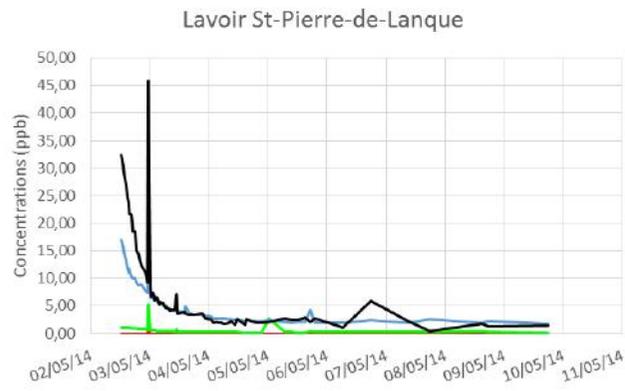
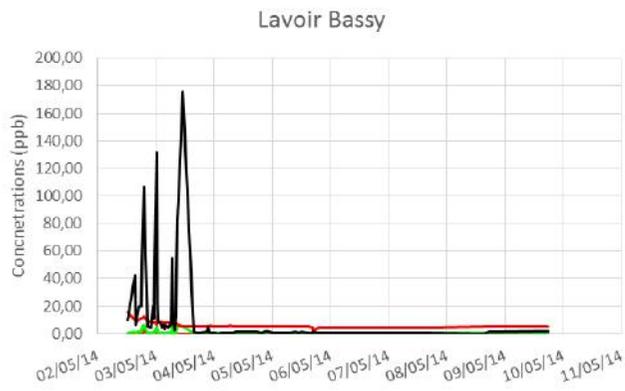
Analyses Hebdomadaires			pH																											
Mesure	lieu	Q (L/s)	Beaunois	Amont Cascade Nat.	Salle Cascade	Conc. Siphon	Niphargus	Hippopotame	Méto	Lac	Conc. Méto	Salle du Siphon	Vire	Jonction	Concrétion 60m	Salle du 14/7	Résurgence	Perte Goulouze	Goulouze	Scie Ouest Goulouze	Scie Verzé	Scie Simon	Vèvre	Scie Plâtre	Scie Suc	Tunnel	Tranquiou 1	Gueule du Loup	Trop plein tunnel	
1	19/02/2013														7,44	7,43														
2	23/05/2013	301						6,82																						
3	04/06/2013	111						6,97				7,52	7,51	7,58	7,93	7,71														
4	04/07/2013	129						7,06				7,22	7,63	7,20	7,49	7,38	7,08	7,44												
5	06/07/2013	71						7,08				7,59	7,61	7,65	7,43	7,34	7,08	7,60	7,54				7,30							
6	12/07/2013	34						7,15				7,44	7,48	7,47	7,60	7,39	7,35	7,40	7,39				7,17							
7	20/08/2013	11						7,14				7,29	7,40	7,40	7,38	7,21	7,39	7,21	7,39											
8	26/08/2013	17						7,13				7,37	7,27	7,27			6,85	7,47	7,50				7,50							
9	10/09/2013	13						7,08				7,32	7,27	7,27			7,08	7,52	/											
10	16/10/2013	92						6,93				7,29	7,29	7,29			7,03	7,14	7,14				7,16							
11	17/11/2013	249						6,94				7,48	7,74	7,50	7,95	7,77	7,06													
12	10/12/2013	149						7,07				7,65	7,62	7,63	7,87	7,52	7,28	7,64	7,60				7,34							
13	22/12/2013	164						7,08				7,38	7,58	7,39	7,66	7,49	7,12	7,54	7,55				7,66							
14	12/01/2014	254						7,07				7,61	7,74	7,58	7,73	7,73	7,14	7,60	7,54				7,77				7,40		7,27	
15	28/01/2014	332	7,05	7,06	7,06	7,07	7,04	7,09	7,10	7,25	7,69	7,49	7,59	7,42	7,65	7,54	7,14	7,63	7,61				7,78	5,73	5,69		7,16		7,29	
16	23/02/2014	220	6,94	6,95	6,96	6,96	7,02	7,00	7,01	7,34	7,22	7,46	7,46	7,28	7,54	7,40	7,00	7,54	7,46				7,73	5,43	5,63	5,56	6,77	7,19	6,91	
17	09/03/2014	99	7,06	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,07	7,27	7,18	7,62	7,78	7,63	7,45	7,35	7,10	7,55	7,65		6,87	7,60	5,46	5,56	5,59	6,22	7,31		7,22	
18	16/03/2014	38	6,93	6,94	6,98	6,97	7,02	6,99	7,03	7,15	7,29	7,47	7,70	7,48	7,40	7,28	7,08	7,50	7,56		6,73	7,28	5,74	5,40	5,65	6,22	7,04		7,05	
19	21/03/2014	26			7,03	7,04	7,05	7,08	7,12	7,27	7,33	7,59	7,67	7,45	7,92	7,47	7,12	7,36	7,46		6,64	7,21	5,90	5,51	5,67	6,27	7,21		7,18	
20	28/03/2014	32	6,96	6,96	7,00	7,00	7,04	7,08	7,15	7,26	7,55	7,50	7,59	7,55	7,49	7,39	7,28	7,42	7,56		6,89	7,47	5,92	5,39		6,89	7,22		7,15	
21	04/04/2014	17	7,01	6,99	7,03	7,06	7,07	7,12	7,17	7,31	7,65	7,68	7,87	7,71	7,92	7,52	7,26	7,35	7,42		7,02	7,31	5,84	5,56		6,39	7,20		7,09	
22	11/04/2014	34	7,06	7,07	7,08	7,13	7,11	7,14	7,20	7,64	7,39	7,54	7,71	7,54	7,52	7,40	7,29	7,36	7,47		/	7,43	5,91	5,58		6,38	7,02			
23	18/04/2014	21	7,02	7,05	7,10	7,12	7,15	7,18	7,29	7,63	7,55	7,40	7,64	7,50	7,63	7,35	7,35	7,60	7,66		/	7,40	6,17	5,58	/		7,26		/	
24	25/04/2014	22	7,03	7,07	7,13	7,16	7,19	7,23	7,29	7,55	7,34	7,52	7,71	7,51	7,38	7,32	7,32	7,76	7,73			7,65	6,04	5,69		7,29				
25	28/04/2014	21	7,04	7,05	7,13	7,13	7,16	7,18	7,23	7,61	7,40	7,45	7,62	7,46	7,41	7,22	7,62	7,65				7,59	6,01	5,63		6,39	7,22	7,01	7,21	
26	02/05/2014	41	6,95	6,98	7,04	7,07	7,06	7,08	7,13	7,29	7,25	7,35	7,57	7,43	7,75	7,32	7,19	7,42	7,41			7,25	6,23	5,74		6,39	7,15			
27	10/05/2014	19	6,99	7,04	7,08	7,12	7,13	7,21	7,25	7,60		7,58	7,75	7,58		7,45	7,28	7,30	7,56			7,38	6,25	5,72		6,57	7,23			
28	15/05/2014	23	7,02	7,05	7,10	7,10	7,12	7,14	7,24	7,56	7,66	7,36	7,59	7,41		7,37	7,25	7,61	7,49			7,43	6,47	5,75		6,50	7,20		7,06	
29	23/05/2014	11	7,03	7,08	7,17	7,18	7,22	7,29	7,37	7,59	7,54	7,47	7,66	7,64		7,43	7,34	7,66	7,82			7,30	6,22	5,72		7,39				
30	02/06/2014	20	7,03	7,05	7,13	7,17	7,19	7,25	7,30	7,49		7,36	7,63	7,36		7,20	7,35	7,38	7,39			7,16	6,04	5,72		7,31				
31	06/06/2014	22	7,05	7,13	7,22	7,24	7,29	7,35	7,38	7,67	7,61	7,60	7,84	7,52		7,56	7,38	7,53	7,46			7,20	6,14	5,87		7,31				
32	13/06/2014	8	7,10	7,11	7,16	7,20	7,25	7,33	7,39	7,60	7,57	7,54	7,70	7,54		7,46	7,49	7,43	7,46			7,43	6,20	5,88		7,41				
33	19/06/2014	5	7,11	7,16	7,25	7,24	7,29	7,27	7,34	7,39	7,48	7,36	7,55	7,37		7,30	7,36	7,51	7,63			7,49	6,29	5,94		7,42				
34	24/06/2014	23	7,13	7,18	7,23	7,22	7,27	7,21	7,41	7,27	7,48	7,57	7,68	7,41		7,53	7,46	7,61	7,71			7,54	6,23	5,88		7,32				
35	30/06/2014	11	7,09	7,12	7,13	7,18	7,22	7,28	7,36	7,54	7,49	7,54	7,76	7,55		7,54	7,46	7,40	7,37			7,40	6,26	5,98		7,41				
36	08/07/2014	22	7,11	7,14	7,24	7,23	7,22	7,29	7,33	7,36	7,49	7,53	7,54	7,51		7,49	7,40	7,43	7,47			7,35	6,19	5,93		7,32				
37	16/07/2014	8	7,10	7,13	7,22	7,20	7,25	7,28	7,30	7,35	7,28	7,35	7,46	7,28		7,29	7,28	7,34	7,35			7,28	5,95	6,00		7,40				
38	23/07/2014	18	6,91	6,96	7,00	7,04	7,07	7,12	7,20	7,44	7,26	7,30	7,36	7,23		7,31	7,25	7,30	7,38			7,33	6,27	5,97		7,30				
39	01/08/2014	22	7,03	7,13	7,20	7,25	7,27	7,31	7,44	7,64	7,48	7,35	7,51	7,56		7,48	7,47	7,41	7,36			7,23	6,15	5,92		7,20				
40	08/08/2014	16	7,02	7,05	7,09	7,09	7,12	7,16	7,26	7,39	7,27	7,32	7,42	7,29		7,34	7,29	7,48	7,71			7,34	6,08	5,85		7,35				
	min		6,91	6,94	6,96	6,96	7,02	6,82	7,01	7,15	7,18	7,22	7,29	7,20	7,40	7,20	6,85	7,14	7,14		6,64	7,16	5,43	5,39	5,56	6,22	7,02	7,01	7,21	6,91
	max		7,13	7,18	7,25	7,25</																								

Annexes 4 : Analyses CARSO et analyses hebdomadaires.

Analyses Hebdomadaires			Conductivité (mS/cm)																									
Mesure	lieu	Q (L/s)	Beaunois	Amont Cascade Nat.	Salle Cascade	Conc. Siphon	Niphargus	Hippopotame	Métro	Lac	Conc. Métro	Salle du Siphon	Vire	Jonction	Concrétion 60m	Salle du 14/7	Résurgence	Perte Goulouze	Goulouze	Sce ouest Goulouze	Sce Simon	Sce Suc	Sce Plâtre	Vèvre	Tunnel	Trop plein tunnel	Sce Verzé	
1	19/02/2013											0,619		0,54	0,473	0,511												
2	23/05/2013	301					0,426					0,498	0,436	0,452														
3	04/06/2013	111					0,405					0,477	0,423	0,436	0,456	0,486												
4	04/07/2013	129					0,419					0,574	0,517	0,579	0,53	0,532	0,425	0,265										
5	06/07/2013	71					0,45					0,522	0,389	0,514	0,461	0,487	0,443	0,297	0,29									0,411
6	12/07/2013	34					0,541					0,544	0,388	0,523	0,342	0,443	0,519	0,471	0,406									0,498
7	20/08/2013	11					0,509						0,31	0,489		0,424	0,509	0,437										
8	26/08/2013	17					0,584						0,336	0,56			0,583	0,477	0,489									0,478
9	10/09/2013	13					0,568							0,531														
10	16/10/2013	92					0,564							0,599			0,57	0,469	0,436									0,525
11	17/11/2013	249					0,505					0,524	0,447	0,571	0,471	0,463	0,501											
12	10/12/2013	149					0,448				0,537	0,527	0,421	0,509	0,405	0,43	0,449	0,259	0,235									0,329
13	22/12/2013	164					0,355					0,447	0,385	0,452	0,36	0,376	0,341	0,213	0,248									0,225
14	12/01/2014	254					0,417					0,524	0,445	0,489	0,435	0,432	0,41	0,245	0,185						0,242	0,262	0,25	
15	28/01/2014	332	0,418	0,410	0,424	0,412	0,409	0,403	0,410	0,488	0,505	0,505	0,486	0,487	0,442	0,407	0,401	0,21	0,148		0,089	0,061			0,212	0,206	0,208	
16	23/02/2014	220	0,435	0,440	0,448	0,440	0,442	0,437	0,436	0,482	0,540	0,537	0,53	0,541	0,41	0,427	0,436	0,214	0,186		0,069	0,072	0,082	0,062	0,25	0,268	0,247	
17	09/03/2014	99	0,443	0,437	0,432	0,434	0,437	0,434	0,425	0,478	0,516	0,497	0,45	0,508	0,466	0,457	0,436	0,207	0,195	0,066	0,073	0,062	0,075	0,046	0,257	0,206	0,232	
18	16/03/2014	38	0,479	0,485	0,489	0,482	0,486	0,480	0,482	0,496	0,535	0,518	0,425	0,532	0,426	0,434	0,487	0,25	0,22	0,068	0,081	0,072	0,081	0,051	0,277	0,259	0,394	
19	21/03/2014	26			0,576	0,579	0,574		0,577	0,613	0,622	0,539	0,502	0,525	0,438	0,468	0,597	0,272	0,163	0,069	0,064	0,06	0,086	0,089	0,338	0,347	0,49	
20	28/03/2014	32	0,537	0,532	0,532	0,534	0,537	0,539	0,533	0,619	0,494	0,559	0,489	0,54	0,413	0,45	0,537	0,322	0,212	0,07	0,063	0,047		0,086	0,321	0,334	0,418	
21	04/04/2014	17	0,629	0,615	0,614	0,620	0,619	0,616	0,619	0,602	0,605	0,598	0,426	0,612	0,519	0,506	0,616	0,429	0,322	0,072	0,061	0,048		0,095	0,391	0,397	0,536	
22	11/04/2014	34	0,536	0,537	0,542	0,545	0,546	0,538	0,534	0,436	0,481	0,492	0,378	0,508	0,372	0,432	0,542	0,411	0,382		0,085	0,062		0,088	0,376		0,455	
23	18/04/2014	21	0,545	0,539	0,552	0,524	0,544	0,518	0,542	0,368	0,455	0,524	0,383	0,534	0,313	0,405	0,532	0,42	0,397		0,056			0,079	0,368		0,414	
24	25/04/2014	22	0,549	0,544	0,568	0,558	0,550	0,546	0,548	0,340	0,507	0,475	0,397	0,534		0,367	0,558	0,421	0,398		0,076				0,396		0,437	
25	28/04/2014	21	0,540	0,552	0,542	0,553	0,541	0,552	0,547	0,348	0,465	0,506	0,377	0,535		0,396	0,552	0,41	0,41		0,058			0,049	0,367		0,422	
26	02/05/2014	41	0,578	0,585	0,580	0,585	0,584	0,570	0,585	0,399	0,540	0,552	0,408	0,548	0,314	0,438	0,583	0,27	0,26		0,064	0,058		0,093	0,306		0,33	
27	10/05/2014	19	0,531	0,532	0,538	0,523	0,527	0,514	0,529	0,380		0,441	0,368	0,536		0,484	0,521	0,474	0,419		0,065	0,053		0,085	0,389		0,482	
28	15/05/2014	23	0,611	0,599	0,609	0,605	0,610	0,604	0,600	0,386	0,527	0,534	0,431	0,557		0,477	0,602	0,456	0,438		0,071	0,048		0,098	0,44	0,417	0,484	
29	23/05/2014	11	0,597	0,605	0,601	0,606	0,604	0,599	0,594	0,377	0,568	0,497	0,37	0,582		0,529	0,598	0,464	0,462		0,08			0,102	0,453		0,462	
30	02/06/2014	20	0,712	0,681	0,712	0,720	0,746	0,686	0,710	0,380	0,646	0,57	0,462	0,579		0,546	0,72	0,547	0,6		0,071			0,122	0,482		0,531	
31	06/06/2014	22	0,628	0,622	0,629	0,621	0,621	0,613	0,623	0,399	0,604	0,514	0,36	0,584		0,607	0,626	0,511	0,545		0,066			0,13	0,503		0,521	
32	13/06/2014	8	0,633	0,627	0,635	0,630	0,624	0,617	0,616	0,389	0,590	0,523	0,437	0,558		0,531	0,621	0,506	0,514		0,07			0,118	0,489		0,485	
33	19/06/2014	5	0,615	0,612	0,625	0,624	0,628	0,647	0,617	0,396	0,602	0,524	0,448	0,579		0,518	0,631	0,497	0,511		0,066			0,123	0,484		0,486	
34	24/06/2014	23	0,633	0,625	0,632	0,640	0,620	0,626	0,631	0,406	0,602	0,52	0,413	0,608		0,558	0,628	0,489	0,487		0,067			0,115	0,494		0,472	
35	30/06/2014	11	0,624	0,619	0,634	0,625	0,619	0,607	0,609	0,386	0,589	0,49	0,406	0,558		0,508	0,609	0,48	0,517		0,065			0,124	0,501		0,441	
36	08/07/2014	22	0,675	0,664	0,660	0,668	0,675	0,666	0,668	0,462	0,697	0,598	0,575	0,622		0,597	0,661	0,539	0,548		0,069			0,133	0,538		0,48	
37	16/07/2014	8	0,583	0,590	0,593	0,586	0,584	0,589	0,586	0,426	0,717	0,562	0,516	0,624		0,508	0,595	0,53	0,629		0,089			0,155	0,451		0,546	
38	23/07/2014	18	0,603	0,602	0,604	0,604	0,604	0,599	0,596	0,426	0,741	0,554	0,6	0,634		0,484	0,608	0,493	0,494		0,09			0,138	0,481		0,475	
39	01/08/2014	22	0,527	0,510	0,500	0,504	0,502	0,511	0,504	0,454	0,786	0,719	0,664	0,742		0,545	0,511	0,495	0,478		0,091			0,127	0,433		0,526	
40	08/08/2014	16	0,590	0,582	0,578	0,573	0,577	0,580	0,567	0,456	0,718	0,613	0,535	0,656		0,532	0,569	0,534	0,505		0,076			0,153	0,498		0,546	
	min		0,42	0,41	0,42	0,41	0,41	0,36	0,41	0,34	0,46	0,44	0,31	0,44	0,31	0,37	0,34	0,21	0,15	0,07	0,06	0,05	0,08	0,05	0,21	0,21	0,21	
	max		0,71	0,68	0,71	0,72	0,75	0,69	0,71	0,62	0,79	0,72	0,66	0,74	0,53	0,61	0,72	0,55	0,63	0,07	0,09	0,07	0,09	0,16	0,54	0,42	0,55	
	moyenne		0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,53	0,56	0,44	0,58	0,53	0,44	0,55	0,42	0,48	0,54	0,40	0,39	0,07	0,07	0,06	0,08	0,10	0,40	0,30	0,43	

13 : Conductivités hebdomadaires.





# Fonctionnement hydrogéologique du système karstique des Grottes d'Azé : mise en place d'un suivi hydrochimique et traçages colorimétriques.

Au niveau des Monts du Mâconnais, il existe un système karstique sur une zone s'étendant d'Azé à Cruzille. Une partie de ce réseau reste aujourd'hui encore inconnue malgré les recherches spéléologiques entreprises. La Grotte de la Rivière Souterraine située à Azé, fait partie de ce réseau et constitue un exutoire au niveau du site. Cette étude vise à définir les relations entre les entrées et sorties d'eau, afin de différencier les bassins versants et sous-bassins versants, prévenir les risques de pollution et d'inondation. Les connaissances acquises seront également diffusées au grand public par le site touristique des grottes.

Un protocole de mesure de débit a été mis en place pour quantifier les volumes d'eau sur la zone, ainsi qu'un suivi de la température de l'eau pour observer ces variations au sein du système. Des analyses physico-chimiques sur les eaux du massif ont été réalisées et un suivi régulier sur la conductivité et le pH a été effectué. Enfin des traçages colorimétriques ont été entrepris au niveau de plusieurs points afin de déterminer leur rôle et leurs connexions.

Mots clés : karst, bassin d'alimentation, hydrochimie, traçages colorimétriques, modélisation.

In the Mâconnais Mounts, the second limestone hill corresponds to an Azé Cruzille zone. In this area, there is a karst system, including a part of it unknown, despite all speleological research. In the Underground River Cave (Grotte de la Rivière Souterraine), the river makes her way, and stand out as resurgence at Aze. This study aims to define the relationship between inputs and outputs water, in order to differentiate watersheds and sub-watersheds, and the risk of flooding and pollution can be prevented too. The knowledge obtained will be disseminated to the public by the attraction of the caves.

A flow measurement protocol was established to quantify the volume of water, as well as monitoring of the water temperature to observe the variations in the system. Physico-chemical analyzes of water were realised and regular monitoring of conductivity and pH was made. Finally colorimetric tracing were undertaken at several points to determine their roles and connections.

Keywords: karst, catchment area, water chemistry, colorimetric tracing, modeling.