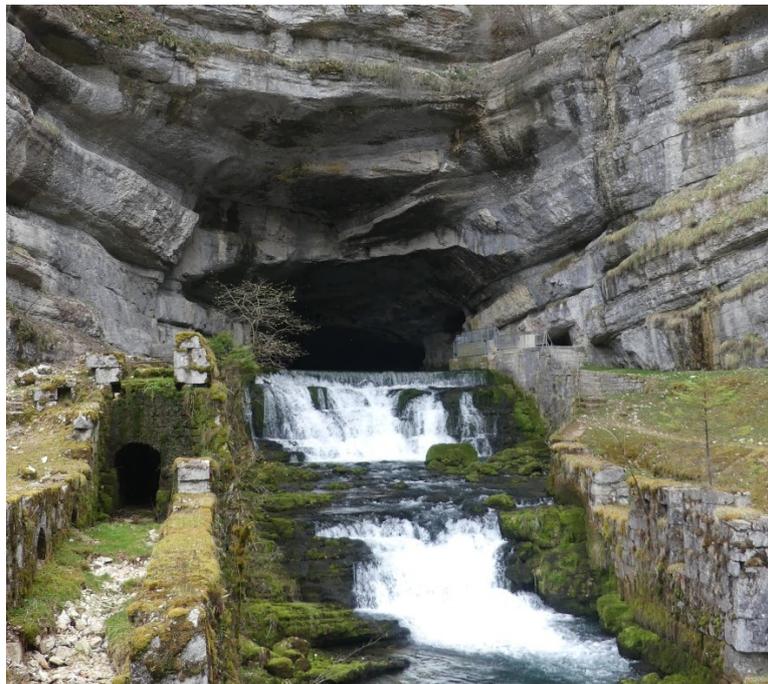


Master Sciences de l'Eau

Hydrosystèmes et Bassins Versants - HBV

*Rapport de stage de fin d'études pour l'obtention  
de la 2<sup>nd</sup>e année de Master*

## Spatialisation des caractéristiques hydrogéologiques des systèmes karstiques du bassin de la Loue (25)



**BENOIT Sylvain**

21/08/2023

*Année universitaire : 2022 - 2023*

*Encadrement : Aurélien VALLET*

# Remerciements

Je remercie mon tuteur Aurélien Vallet et Jean Baptiste Charlier de m'avoir accompagné régulièrement au cours de ce stage. Les discussions, leurs connaissances et leurs points de vue parfois divergents ont été particulièrement enrichissant.

Je remercie également toute l'équipe du BRGM de Dijon pour leur bienveillance, Alexine, Clément, Ingrid et Nejema qui m'ont apporté fréquemment leurs conseils et avec qui j'ai pu effectuer des missions de terrain variées.

## Table des matières

1. Introduction .....	1
2. Contexte .....	2
2.1. Géologie.....	3
2.2. Hydrologie – Hydrogéologie .....	1
2.3. Géomorphologie.....	1
3. Matériels et méthodes .....	2
3.1. Echanges entre surface et souterrain sur le bassin de la Loue.....	2
i Données de débits .....	2
ii Débits différentiels.....	4
iii Modules (2000 – 2019) et surface d'alimentation .....	5
iv Caractérisation de la contribution des affluents et des sources au débit de la Loue	5
3.2. Délimitation des bassins hydrogéologiques.....	6
3.3. Exploration des liens entre géochimie, géologie et occupation des sols.....	8
4. Résultats .....	9
4.1. Echanges entre surface et souterrain sur le bassin de la Loue.....	9
i Caractérisation des tronçons.....	9
ii Surface d'alimentation.....	13
iii Caractérisation de la contribution des affluents et des sources au débit des cours d'eau .....	13
4.2. Délimitation des bassins hydrogéologiques.....	15
4.3. Exploration des liens entre géochimie, occupation des sols et géologie.....	17
i Interaction eau – occupation du sol.....	17
ii Interaction eau – roche.....	17
5. Discussion.....	18
5.1. Echanges entre surface et souterrain sur le bassin de la Loue.....	18
i Caractérisation des tronçons.....	18
ii Surface d'alimentation.....	20

iii	Caractérisation de la contribution des affluents et des sources aux débits de la Loue 21	
iv	Comparaison des jaugeages de la Loue (2021/2022) et des sources et affluents (1998/1999).....	23
v	Synthèse .....	25
5.2.	Délimitation des bassins hydrogéologiques .....	27
5.3.	Exploration des liens entre géochimie, occupation du sol et géologie .....	28
i	Interaction eau – occupation du sol .....	28
ii	Interaction eau – roche.....	29
6.	Conclusion .....	30
7.	Bibliographie.....	31
8.	Référence web .....	33
9.	Liste des figures .....	34
10.	Liste des tableaux.....	36
11.	Liste des annexes.....	37

# 1. Introduction

L'impact anthropique sur la ressource en eau des bassins carbonatés est aggravé par le caractère vulnérable des hydrosystèmes karstiques qui favorise l'infiltration de l'eau tout en limitant les processus de filtration au niveau du sol. Suite au constat de la dégradation de l'eau des rivières Comtoises et avant de prioriser les actions à mettre en place pour limiter les impacts d'origine anthropique, il est nécessaire de déterminer les modalités de transfert des nutriments au sein des hydrosystèmes en passant en partie par une analyse hydrogéologique des systèmes karstiques du secteur.

Le projet NUTRI-Karst, coordonné par le BRGM en partenariat avec la chambre d'agriculture de Bourgogne Franche-Comté et l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, vise à améliorer les connaissances sur les transferts de nutriments au sein des hydrosystèmes du Jura. Ce stage s'intègre au sein de l'un des principaux axes de ce projet qui vise à caractériser le fonctionnement hydrogéologique des systèmes karstiques du bassin de la Loue.

L'objectif de ce stage est d'utiliser une approche multi-méthode et un large type de données (débit, traçage, géologie, topographie, occupation des sols, cavités souterraines, géochimie...) afin de préciser les relations entre surface et souterrain, d'obtenir une meilleure compréhension de l'organisation spatiale des systèmes karstiques du bassin de la Loue et d'explorer les liens entre la chimie des eaux de ces sources et la géologie et l'occupation des sols des zones contributives.

Trois principaux travaux ont été réalisés au cours de ce stage :

- Une étude des jaugeages réalisés sur les principaux cours d'eau lors de périodes hydrologiques contrastées, auxquels s'ajoutent des données historiques des affluents (sources karstiques et cours d'eau) de la Loue ;
- Une délimitation des zones contributives au débit des principales sources karstiques du secteur, qui combine géologie, topographie, traçages et cavités, qui servira de base à des analyses ultérieures ;
- Le début d'une étude statistique combinant les couches géologiques affleurant et l'occupation des sols des bassins hydrogéologiques délimités avec des données géochimiques de l'eau des sources au niveau des sources.

Ce rapport présente successivement une présentation du contexte de l'étude, les données et les méthodes utilisés, les résultats et une analyse détaillée des travaux réalisés.

## 2. Contexte

Le karst peut être défini comme un type particulier de paysage contenant des grottes et de vastes systèmes d'eau souterraine qui se développent sur des roches particulièrement solubles (Ford, et al., 2013). Ces aquifères se caractérisent par leur triple porosité (Bakalowicz, 2005), soit la porosité matricielle, de fracture et de conduit.

Les sols, généralement peu développés sur ces systèmes, et la présence de drains verticaux favorisent une infiltration rapide et limitent la filtration des eaux (Bakalowicz, 2005; Aquilina, et al., 2006). La recharge de ces aquifères peut être autigénique (infiltration directe diffuse dans l'impluvium calcaire) ou allogénique (ruissellement sur terrain plus imperméable puis infiltration via des cavités ou des pertes) (Goldscheider, et al., 2007). L'hétérogénéité de porosité induit une dualité des processus d'infiltration et d'écoulements (Kiraly, 1998) :

- Lents, faibles et stables dans la matrice ;
- Rapides, forts et fluctuants dans les conduits.

Enfin, l'exutoire d'un réseau souterrain peut être constitué d'une ou de plusieurs sources karstiques, qui peuvent s'activer ou non selon les périodes hydrologiques (Figure 1). De par leurs propriétés hydrodynamiques, les aquifères karstiques sont donc particulièrement vulnérables vis-à-vis de la sensibilité des eaux souterraines à la contamination. Près de 35% du territoire français est composé de terrains karstiques (Chen, et al., 2017), ce qui fait d'autant plus de territoires et d'aquifères vulnérables.

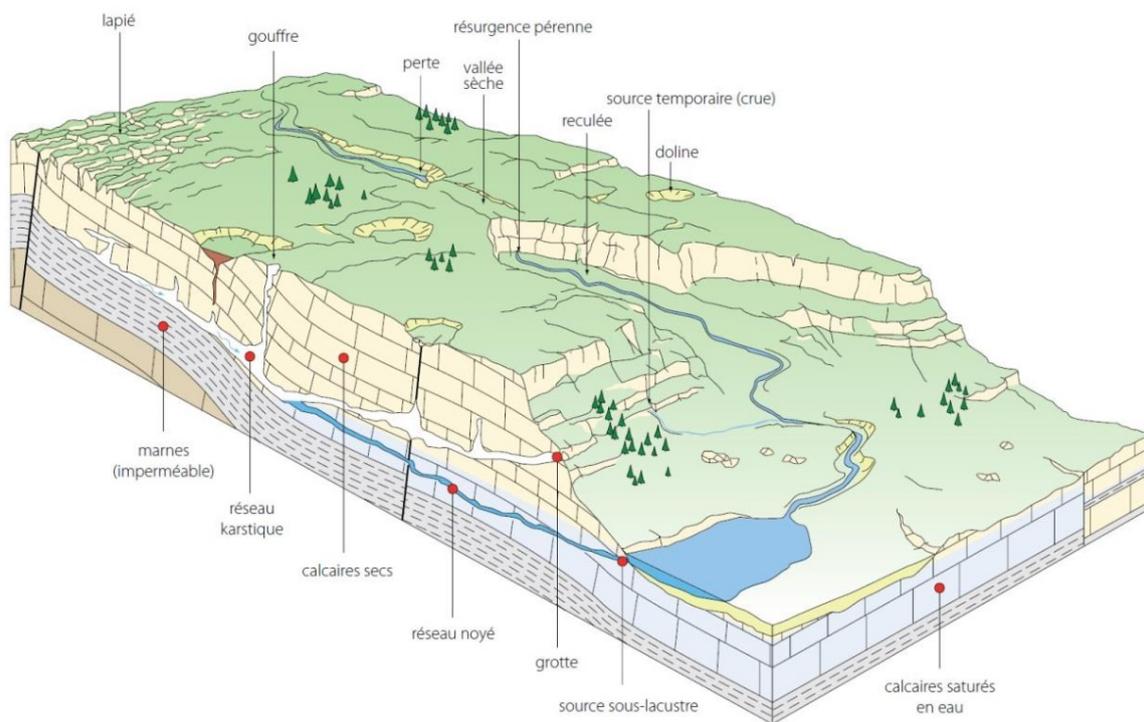


Figure 1 : Schéma conceptuel du milieu karstique des plateaux du massif du Jura (Bichet, et al., 2008)

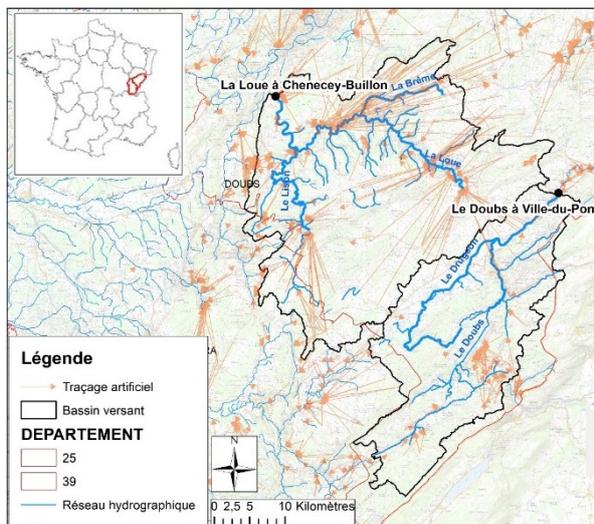
Dans le Jura, plusieurs épisodes de mortalité piscicoles récents (Comité de bassin Rhône Méditerranée, 2012) traduisent une dégradation de la qualité des eaux des rivières, qui se manifeste par des augmentations de la minéralisation et de la température de l'eau (Jeannin,

et al., 2016) et par une eutrophisation qui s'accompagne d'une prolifération algale pour certain cours d'eau (Villeneuve, et al., 2012). A première vue, le territoire du Jura semble être peu impacté par une pression anthropique ou par une activité agricole intensive. Ainsi, la dégradation de la qualité des cours d'eau semble être aggravé par le caractère vulnérable des aquifères karstiques jurassiens.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet de recherche NUTRI-Karst, qui vise à obtenir une meilleure compréhension de l'impact des activités anthropiques d'origine agricole ou domestique sur le devenir des nutriments dans les eaux. Ce projet comporte 4 tâches :

- Tâche 1 : Etude des réponses des agro-hydrosystèmes du massif du Jura face au changement climatique et aux activités anthropiques (Charlier, et al., 2023) ;
- Tâche 2 : Caractérisation hydrogéologique des interactions surface/souterrain et délimitation des zones contributives au débit des rivières à l'échelle des systèmes karstiques et du bassin de la Loue ;
- Tâche 3 : Transferts de nutriments d'origine agricole aux différentes échelles du sol, de la source karstique et du bassin de la Loue ;
- Tâche 4 : Porter à connaissance pour construire une vision partagée des causes de la perturbation des rivières.

Ce stage s'inscrit principalement au sein de la tâche 2 du projet et a pour objectif d'obtenir une meilleure compréhension de l'organisation des systèmes karstiques du bassin de la Loue et des interactions surfaces – souterrain, en utilisant une approche pluridisciplinaire : analyse de débits, délimitation de bassins hydrogéologiques et exploration de relation entre la géochimie, l'occupation des sols et la géologie.



Le bassin de la haute Loue (en amont de Chenecey-Buillon) se situe au cœur du massif du Jura, au sud-est du département du Doubs (

Figure 2). La zone d'étude s'étend jusqu'au bassin du haut Doubs en amont de Ville-du-Pont en raison de tracés qui démontrent des connexions avec les sources de la Loue. Il existe des pertes dans le lit du Doubs en aval de Ville-du-Pont mais leur connexion avec la Loue n'a jamais été démontrée. Les bassins versants représentés ne limitent en aucun cas le secteur d'étude.

Figure 2 : Situation géographique de la zone d'étude (Fond SCAN 100® IGN)

## 2.1. GEOLOGIE

Le massif du Jura est une ceinture de chevauchement qui résulte de l'orogénèse alpine. Ce massif comporte 3 grandes zones structurales (Bichet, et al., 2008) : les avant-monts, les zones de plateaux compartimentés par les faisceaux et la Haute-Chaîne.

La géologie du massif et du bassin de la haute Loue est principalement composée de formations calcaires et marneuses du Jurassique, entre un substratum triasique et de rares affleurements du Crétacé en altitude (Figure 3).

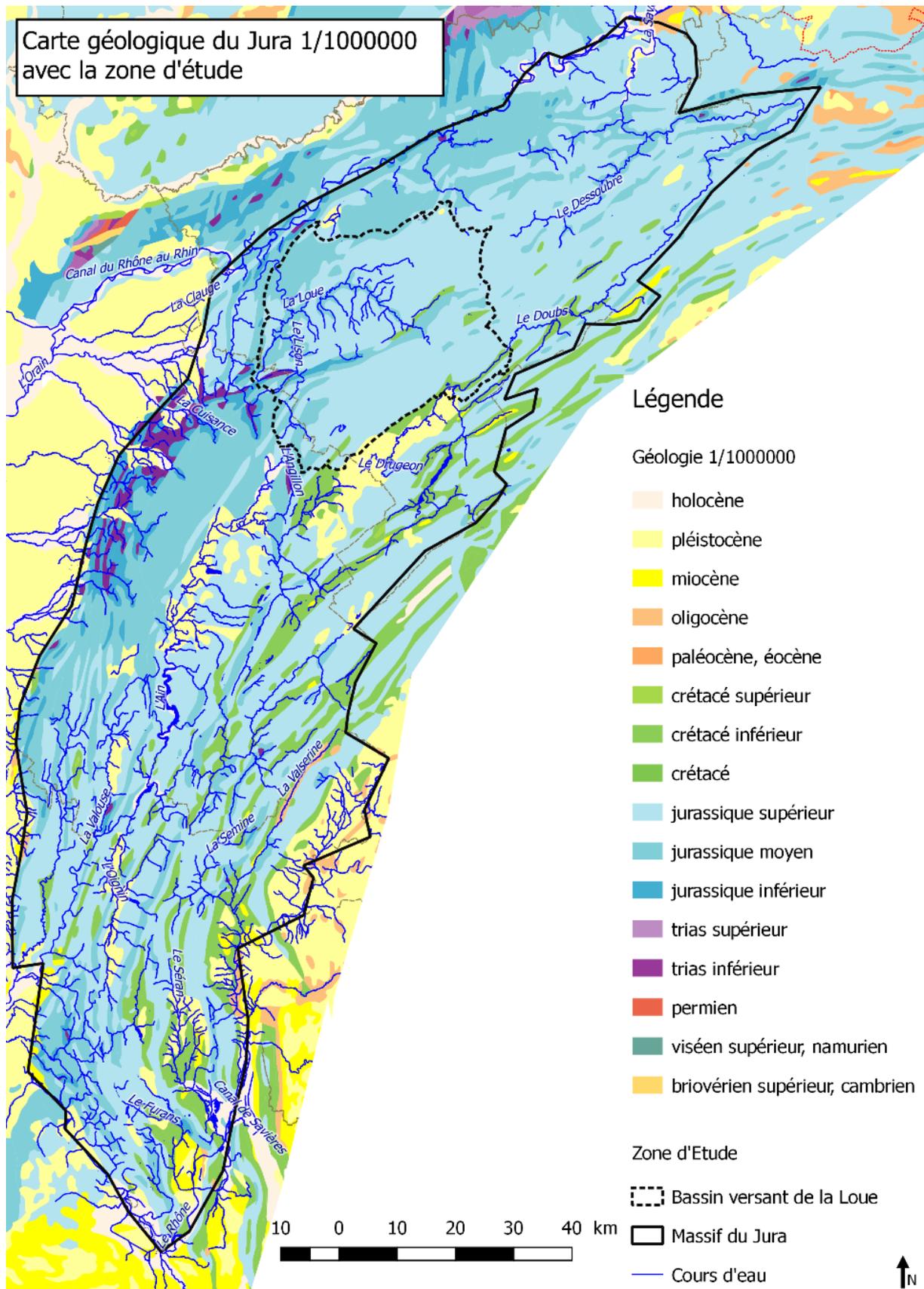
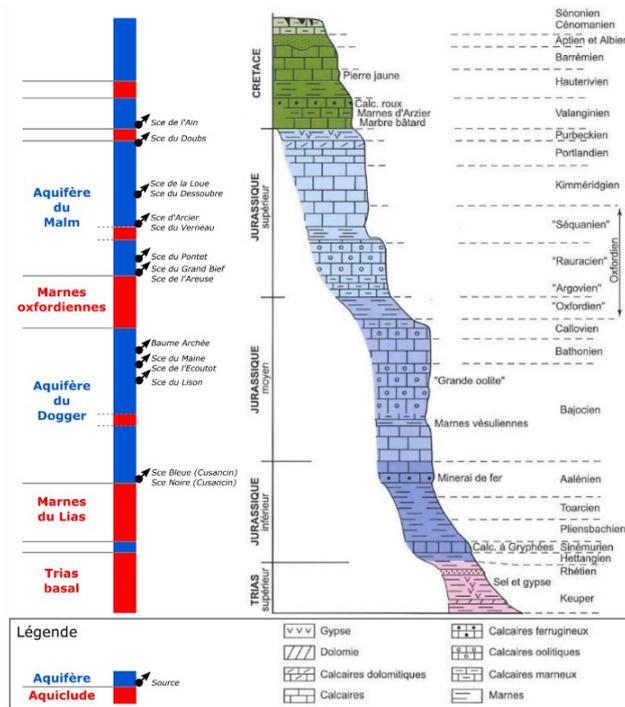


Figure 3 : Carte géologique du Jura (1/1 000 000 BRGM)

## 2.2. HYDROLOGIE – HYDROGEOLOGIE



Les principales formations aquifères (Chauve, 2006) ainsi que les principales sources du bassin de la haute Loue et du Doubs (Charlier, et al., 2014) sont localisés au sein des séries carbonatées du Malm (jurassique supérieur) et du Dogger (jurassique moyen). Ces deux séries sont séparées par les marnes oxfordiennes (Figure 4).

Sur les plateaux, les systèmes karstiques développés dans les séries du Malm et du Dogger sont des systèmes superposés. Le drainage par les vallées de la Loue et du Lison se fait vers les zones basses, entaillées par les gorges.

Figure 4 : Log géologique du massif du Jura (Chauve, 2006) et localisation des principaux aquifères, aquicludes et sources des bassins Loue - Doubs (Charlier, et al., 2014)

## 2.3. GEOMORPHOLOGIE

La haute Loue (et le Lison) traverse 4 secteurs géomorphologiques distincts : le plateau de Levier, le faisceau Salinois, le plateau d'Ornans, et le plateau de Montrond.

Les sources de la Loue et du Lison sont situées au niveau du plateau de Levier. Ce plateau a une altitude comprise entre 650 et 850 mNGF et cache des réseaux karstiques très développés, qui absorbent toutes les eaux de ruissellement. La vallée du Doubs, dont une partie des débits alimentent la source de la Loue, constitue la bordure est du plateau.

En aval du plateau de Levier, la Loue et le Lison traversent le faisceau Salinois, une étroite bande plissée et faillée d'orientation nord-est/sud-ouest. La structure du faisceau a joué un rôle majeur lors du développement des réseaux souterrains qui ont la même orientation que le faisceau. Sur le bassin de la Loue, ce secteur draine les eaux de plusieurs sources notables : Baume Archée, Bief Poutot, Tuffière, Moulin Miguet, Pontet et Grand Bief.

En aval de la commune de Vuillafans, la Loue entaille le plateau d'Ornans. L'affleurement des marnes oxfordiennes permet le développement du réseau hydrographique, alimenté en partie par de petits systèmes karstiques du Malm (jurassique supérieur). Ce plateau contient le système karstique complexe Brême-Maine-Ecoutot. Ce système regroupe le ruisseau de la Brême qui est connectée au puits de la Brême, gouffre d'une trentaine de mètres de profondeur fonctionnant en apport ou en inversac selon les périodes, et les sources du Maine et de l'Ecoutot qui alimentent la Loue en aval de la confluence avec la Brême.

Enfin, le plateau de Montrond contient la confluence entre la Loue et le Lison, qui drainent de petits systèmes karstiques développés dans le Dogger (jurassique moyen).

## 3. Matériels et méthodes

### 3.1. ECHANGES ENTRE SURFACE ET SOUTERRAIN SUR LE BASSIN DE LA LOUE

Les objectifs de ces travaux sont :

- De localiser, le long des cours d'eau principaux, des tronçons avec des apports ou des pertes afin de mettre en évidence les échanges avec le milieu souterrain, à l'aide de mesures de débits différentielles dans différentes conditions hydrologiques ;
- De hiérarchiser les tronçons ayant les apports et les pertes les plus importants en les pondérant par la surface drainée ;
- De spatialiser les zones contributives et les flux moyens associés ;
- De quantifier les apports provenant des principales zones contributives (sources et affluents).

Les données utilisées proviennent de deux campagnes de jaugeage sur les cours d'eau principaux (Drugeon, Doubs, Loue, Brême et Lison) réalisées dans le cadre du projet et d'une campagne réalisée par la DREAL, de données historiques (cabinet Reilé) issues de deux campagnes de jaugeages des sources et des affluents latéraux de la Loue, de la Brême et du Lison (Figure 5 et détail ci-dessous) et de données issues de stations hydrométriques de la DREAL. L'ensemble des données de débits issus des jaugeages ont une incertitude de mesure estimée à 5%.

#### i Données de débits

- *Campagnes BRGM (janvier 2021/ septembre 2022)*

Deux campagnes de jaugeages commandées par le BRGM ont été réalisées par le bureau d'étude Gestion Hydro en période de hautes eaux (Hydro Gestion, 2021) et basses eaux (Hydro Gestion, 2022), respectivement du 26 au 28 janvier 2021 et du 5 au 6 septembre 2022. Douze points de mesure sont répartis sur les cours d'eau de la Brême, du Doubs, de la Loue et du Lison lors de la campagne de basses eaux. La campagne de hautes eaux comporte un point de mesure en moins (Lo8b) en raison des conditions trop dangereuses pour effectuer la mesure. Les données ont fait l'objet d'une correction pour réduire l'impact de l'augmentation des débits suite à un épisode pluvieux lors des campagnes (Correction des débits, campagnes BRGMAnnexe 1).

Ces 2 campagnes se sont appuyées en complément sur les données de 12 stations hydrométriques de la DREAL. Les valeurs de débit mesurées et corrigées sont récapitulées en Annexe 2.

- *Campagne DREAL (mars 2022)*

Une campagne de 7 jaugeages le long de la Loue a été réalisée par la DREAL le 23 mars 2022 (DREAL Bourgogne-Franche-Comté, 2022). Les données de débit moyen journalier du 23 mars 2023 de 10 stations hydrométriques de la DREAL le long du Doubs, du Drugeon, de la Loue et du Lison ont été également analysées pour compléter la série de mesures. Les valeurs de débits sont disponibles en Annexe 3.

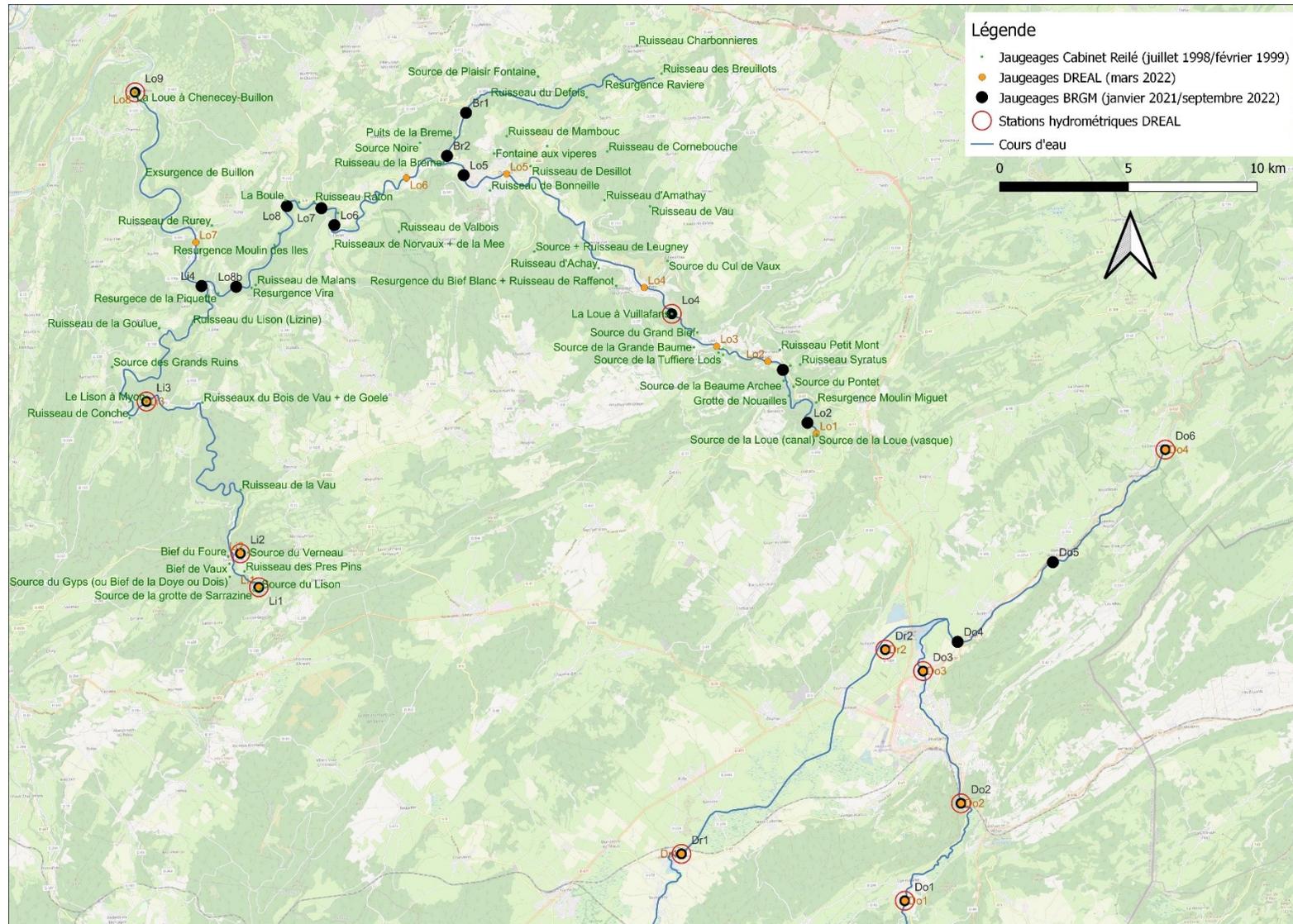


Figure 5 : Localisation des points de mesures des campagnes de jaugeages (Cabinet Reilé, 1998-1999) (Hydro Gestion, 2021) (Hydro Gestion, 2022)

- *Campagnes Reilé (juillet 1998/ février 1999)*

Deux campagnes de jaugeages des sources et affluents latéraux de la Loue, du Lison et de la Brême ont été réalisées par le cabinet Reilé (Cabinet Reilé, 1998-1999) en basses-eaux (juillet 1998) et hautes eaux (février 1999).

Les données de débit des 3 stations de la DREAL de Vuillafans et de Chenecey-Buillon situées sur la Loue et de Myon sur le Lison ont été ajoutées pour être comparées aux données de sources et affluents mesurés lors de ces campagnes. En l'absence d'informations précises sur les dates des campagnes de mesures du cabinet Reilé intitulées « crue de février 1999 » et « étiage de juillet 1998 », les données de débits sélectionnées aux stations DREAL correspondent au débit moyen sur les 3 jours avec les débits les plus importants en hautes eaux (20, 21 et 22 février 1999) et au débit moyen sur les 12 jours avec les débits les plus faibles en basses eaux (14 au 26 juillet 1998). L'approximation sur ces dates engendre donc une incertitude plus importante sur l'interprétation des données.

Le débit de la source de la Loue (vasque) mesuré en basses eaux par le cabinet Reilé ( $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) ne prend pas en compte le débit prélevé par EDF et a donc été corrigé (à  $2,81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) afin que le débit cumulé des sources et affluents au niveau de Vuillafans corresponde au débit mesuré à la station DREAL, tout comme lors de la campagne de hautes eaux (Figure 6).

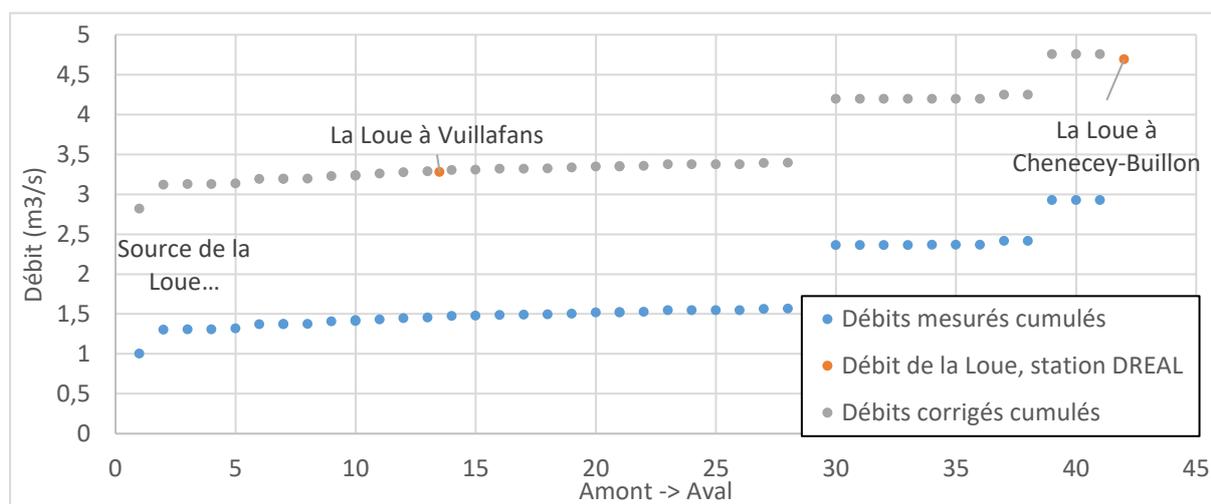


Figure 6 : Correction du débit de la Loue (vasque) en basses eaux 1998.

## ii Débits différentiels

L'études des débits différentiels sur un tronçon compris entre 2 mesures amont-aval à partir des campagnes de jaugeages permet d'identifier les apports ou pertes significatives ou l'absence significative d'écoulements latéraux. Les débits différentiels rapportés à la distance de linéaire des tronçons permettent eux de comparer et de hiérarchiser l'intensité des échanges latéraux que cela soit en perte ou en apport. Les débits différentiels tiennent compte de l'incertitude de mesure de 5% et ont été minimisés. Si la différence de débit entre deux points de mesure est inférieure à la différence maximale entre les incertitudes, alors le débit différentiel est considéré comme non significatif.

De manière générale, la présentation et l'analyse des résultats portera principalement sur les campagnes de mesures réalisées par le BRGM, qui ont une plus grande densité de point de mesure et qui permettent une comparaison entre hautes et basses eaux.

### iii Modules (2000 – 2019) et surface d'alimentation

L'objectif est d'estimer une surface d'alimentation au niveau des stations DREAL de la zone à partir des modules (débit moyen interannuel), et des modules spécifiques (module rapporté à la surface), et ce pour 2 types de bassins :

- À l'échelle de bassins emboîtés (surface amont drainée à une station)
- À l'échelle de bassins intermédiaires (surface drainée comprise entre 2 stations sur un même tronçon de rivière)

Les modules spécifiques peuvent être comparés au module spécifique moyen en Bourgogne-Franche-Comté (qui représente le flux drainé moyen de la région, tous types d'hydrosystèmes confondus). Les surfaces d'alimentation calculées peuvent être comparées aux surfaces des bassins versants topographiques à l'aide d'un taux de variation afin d'identifier les bassins hydrogéologiques alimentés par des aires bien plus étendues que les limites topographiques ou inversement. Cette méthode a pour but de fournir une information supplémentaire pour aider à la délimitation des bassins hydrogéologiques et n'a pas vocation à fournir une surface d'alimentation absolue.

Les taux de variations représentent la différence entre la surface d'alimentation calculée et la surface des bassins topographiques en pourcentages.

Pour cette méthode les débits mensuels des stations DREAL du secteur ont été utilisés pour obtenir les modules (débits moyens interannuels) sur la période 2000-2019. Comme lors de l'analyse des débits différentiels des campagnes de jaugeages, une incertitude de 5% a été appliquée aux données et prise en compte lors des calculs de modules pour les bassins intermédiaires. Ces derniers sont donc significatifs et minimisés. Le module minimisé de 5% a été utilisé pour les bassins amonts (Do1, Dr1, Lo1, Li1 et Li2). La surface d'alimentation a été calculée à partir du module spécifique moyen en Bourgogne-Franche-Comté (DREAL Bourgogne-Franche-Comté, 2020) suivant l'équation :

$$\text{Surface d'alimentation} = \frac{\text{Module différentiel}}{\text{Module spécifique BFC}}$$

### iv Caractérisation de la contribution des affluents et des sources au débit de la Loue

L'étude du cabinet Reilé sur les affluents de la Loue (Cabinet Reilé, 1998-1999), détaille de manière exhaustive les affluents et sous-affluents de la Loue et du Lison (y compris ceux ayant des assecs) et qualifie parmi eux 16 affluents et 10 sous-affluents (parmi la soixantaine dénombrée) d'affluents « à circulation superficielle ». Ils diffèrent des autres (sources, grottes, résurgences, ruisseau) en disposant « d'un cours aérien suffisant » (Cabinet Reilé, 1998-1999). Malgré leur classement en ESU (eau de surface), ces cours d'eau peuvent être alimentés en grande partie voir en totalité par des eaux d'origine souterraine.

Les mesures réalisées par le cabinet peuvent permettre d'identifier les parts d'eau souterraine et de surface contributives au cours d'eau principaux (Loue, Brême et Lison) et de caractériser le fonctionnement spécifique de certains systèmes karstiques. Les données de débits des stations hydrométriques du Lison à Myon et de la Loue à Vuillafans et à Chenecey-Buillon permettent de contextualiser les mesures des affluents et sources latéraux et d'identifier des pertes ou des apports non pris en compte par leurs jaugeages.

### 3.2. DELIMITATION DES BASSINS HYDROGEOLOGIQUES

L'objectif est de fournir une délimitation spatiale des zones contributives au débit des principales sources du secteur. Ces délimitations permettront d'explorer les liens entre la chimie de l'eau des sources, la géologie et l'occupation des sols, et pourra servir de base à de futures analyses.

Les données utilisées pour la délimitation des zones contributives au débit des sources (bassins hydrogéologiques) sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Synthèse des données utilisées pour la délimitations des bassins hydrogéologiques.

Donnée	Commentaire	Source
Carte géologique harmonisée (1/50 000)	Les couches ont été simplifiées pour correspondre aux principales formations aquifères et aquicludes du Jura (Figure 4).	BRGM
Base de données traçages	Points d'injections et circulations identifiées	DREAL BFC, 2023
Bases de données cavités souterraines des départements du Doubs et du Jura		Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2023
Indices karstiques	Base de données recensant les indices karstiques du Doubs (dolines, diaclases, gouffres, pertes, fontis...) réalisées sur la base de la cartographie des risques naturels et technologiques du département du Doubs (Préfet du Doubs, 2023)	Communication personnelle
Base de données Topage		Sandre, 2019
Modèle numérique de terrain RGEALTI 5m	Le mnt a servi de base aux construction des isohypse 5 et 20m ainsi qu'au calcul de la pente	IGN

La méthodologie pour la délimitation des bassins (Figure 7) a été construite en fonction des données disponibles. Cette méthodologie vise à déterminer le caractère ruisselant ou infiltrant des zones afin d'identifier les paramètres déterminant la délimitation.

Les circulations souterraines identifiées (traçages artificiels) constituent le premier facteur de décision pour la délimitation des bassins. On considère que l'eau qui ruissèle vers un point d'injection ou qui s'infiltré à proximité est directement lié au réseau souterrain correspondant au traçage, cela quel que soit l'état des paramètres de décision suivants. Cependant, certains points d'injections peuvent être connectés à plusieurs points (sources) de restitution différents. Dans ce cas, un même point d'injection (et sa zone d'alimentation) peut être intégré au sein de plusieurs bassins hydrogéologiques différents. Ces traçages montrent alors une connexion entre plusieurs exutoires par le réseau souterrain.

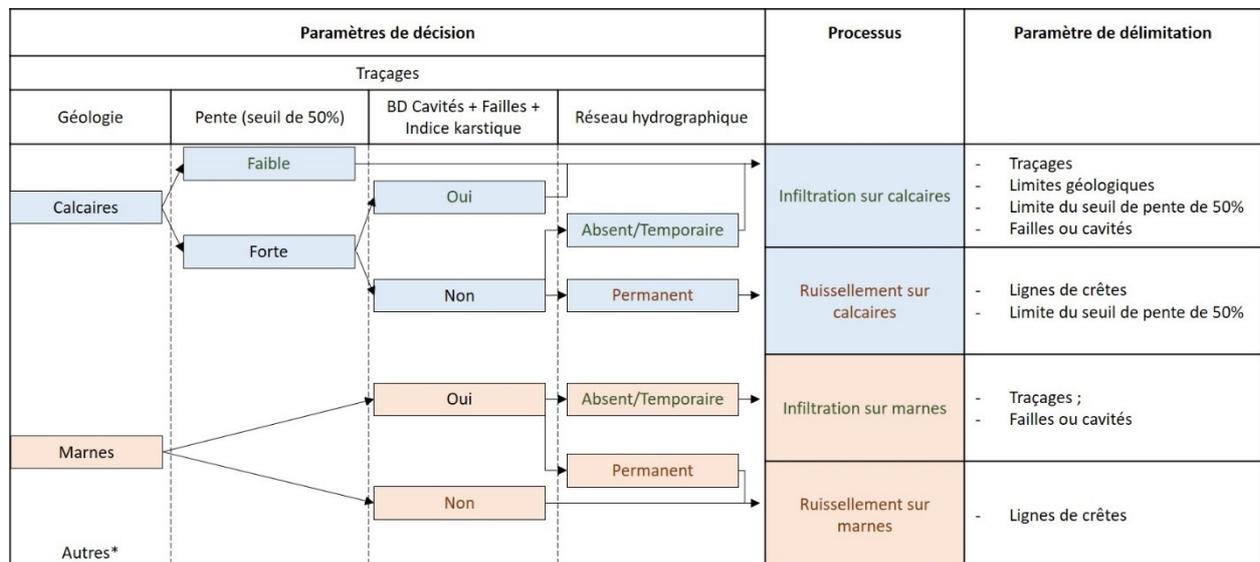
La géologie simplifiée (calcaires ou marnes) constitue le deuxième facteur de décision. Sur les marnes, l'hypothèse a été faite que le ruissellement était majoritaire indépendamment de la pente des terrains.

Sur les calcaires un seuil de pente de 50%, issu de la méthodologie PaPRIKa de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques (Dörfliger, et al., 2009), a été fixé pour définir le partage entre ruissellement (pente >50%) et infiltration (pente <50%). D'autres seuils de pentes inférieurs à 50% sont utilisés dans cette méthode. Ici, toutes les pentes inférieures à 50% ont été considérées comme favorables à l'infiltration.

Les cavités, les indices karstiques et les failles sont traités de la même manière, comme des indicateurs de zones d'infiltration et d'écoulement souterrain préférentielles. Sur marnes, l'absence de ces indicateurs valide définitivement l'absence d'infiltration. A l'inverse, la présence de ces indicateurs peut traduire une faible épaisseur de la couche marneuse et une infiltration vers les couches sous-jacentes.

Le dernier paramètre est la présence ou non d'un réseau hydrographique et son caractère permanent ou temporaire. Sur calcaires et marnes, l'absence de réseau superficiel est déterminant pour indiquer une zone d'infiltration et inversement en présence de cours d'eau.

Cette méthode permet d'aboutir à quatre processus d'écoulement (ruissellement ou infiltration sur calcaires ou marnes) auxquels sont associés des paramètres à suivre pour la délimitation. Différents tests ont été effectués avec des jeux de paramètres différents (abstraction de la pente ou modification du seuil de 50%, ajout de l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux) avant d'aboutir à cette méthode.



\* Quasi exclusivement des moraines dont le fonctionnement est considéré comme semblable à celui des marnes

Figure 7 : Logigramme synthétisant la méthodologie appliquée pour la délimitation des bassins hydrogéologiques

### 3.3. EXPLORATION DES LIENS ENTRE GEOCHIMIE, GEOLOGIE ET OCCUPATION DES SOLS

Des analyses physico-chimiques ont été réalisées au niveau de plusieurs sources karstiques du bassin de la Loue et du Lison en hautes eaux (11/2020) et basses eaux (09/2022). L'objectif est d'explorer les liens entre la chimie de l'eau au niveau des sources, les couches géologiques affleurant et l'occupation des sols au sein des bassins hydrogéologiques délimités grâce à des méthodes statistiques (analyses en composantes principales).

L'étude porte sur les sources dont la physico-chimie a été analysée et dont le bassin hydrogéologique a été délimité, soit :

- Source du Grand Bief
- Source du Pontet
- Source de la Baume Archée
- Source du Dessoubre
- Source Bleue Malbuisson
- Source du Verneau
- Source du Bief Poutot
- Source de l'Ain
- Source du Doubs
- Source de la Reverotte
- Source du Moulin Miguet
- Source du Lison et grotte Sarrazine
- Système Brême-Maine-Ecoutot
- Source de la Loue

Pour les bassins qui regroupent plusieurs sources karstiques (bassins de la Loue, du Lison et système Brême-Maine-Ecoutot), les valeurs physico-chimiques utilisées (disponibles en Annexe 8) correspondent à la moyenne des données disponibles.

Les proportions des types d'occupation du sol des bassins hydrogéologiques issus de la base de données *Corine Land Cover* (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2018) ont été simplifiées en 5 classes : forêts, prairies, territoires artificialisés, milieu à végétation arbustive ou herbacée et zones agricoles hétérogènes. Les proportions des principales couches géologiques affleurant au sein des bassins ont été intégrées à l'étude.

Des tests ont été effectués pour essayer d'intégrer les stations d'épuration localisées sur les bassins (liées aux zones urbaines ou aux fromageries locales), leur capacité en équivalent habitants et la population effectivement raccordée ou non. Ces tests n'ont pas été concluants.

Les analyses ont été divisées en deux catégories : interaction entre eau et occupation du sol d'une part et interaction entre eau et roche d'autre part. Plusieurs répétitions ont été effectuées afin de ne garder que les variables qui expriment une part suffisamment importante de la variance.

## 4. Résultats

### 4.1. ECHANGES ENTRE SURFACE ET SOUTERRAIN SUR LE BASSIN DE LA LOUE

#### i Caractérisation des tronçons

Les valeurs de débits corrigés des campagnes du BRGM et les incertitudes de mesures sont représentés en fonction du point kilométrique amont des différents cours d'eau (Figure 8).

Les échanges latéraux (débits différentiels), la contribution des tronçons au débit de la Loue à Chenecey-Buillon et l'intensité des échanges pour les campagnes de basses eaux (septembre 2022) et hautes eaux (janvier 2022) du BRGM et de mars 2022 de la DREAL sont disponibles en Annexe 5.

Une carte synthétisant les débits différentiels (Figure 9) ainsi qu'une carte synthétisant les débits différentiels rapportés à la distance de linéaire (Figure 10) en basses eaux (à l'intérieur des tronçons) et en hautes eaux (à l'extérieur des tronçons) des campagnes du BRGM ont été réalisées. La carte synthétisant les débits différentiels de la campagne réalisée par la DREAL est disponible en Annexe 6.

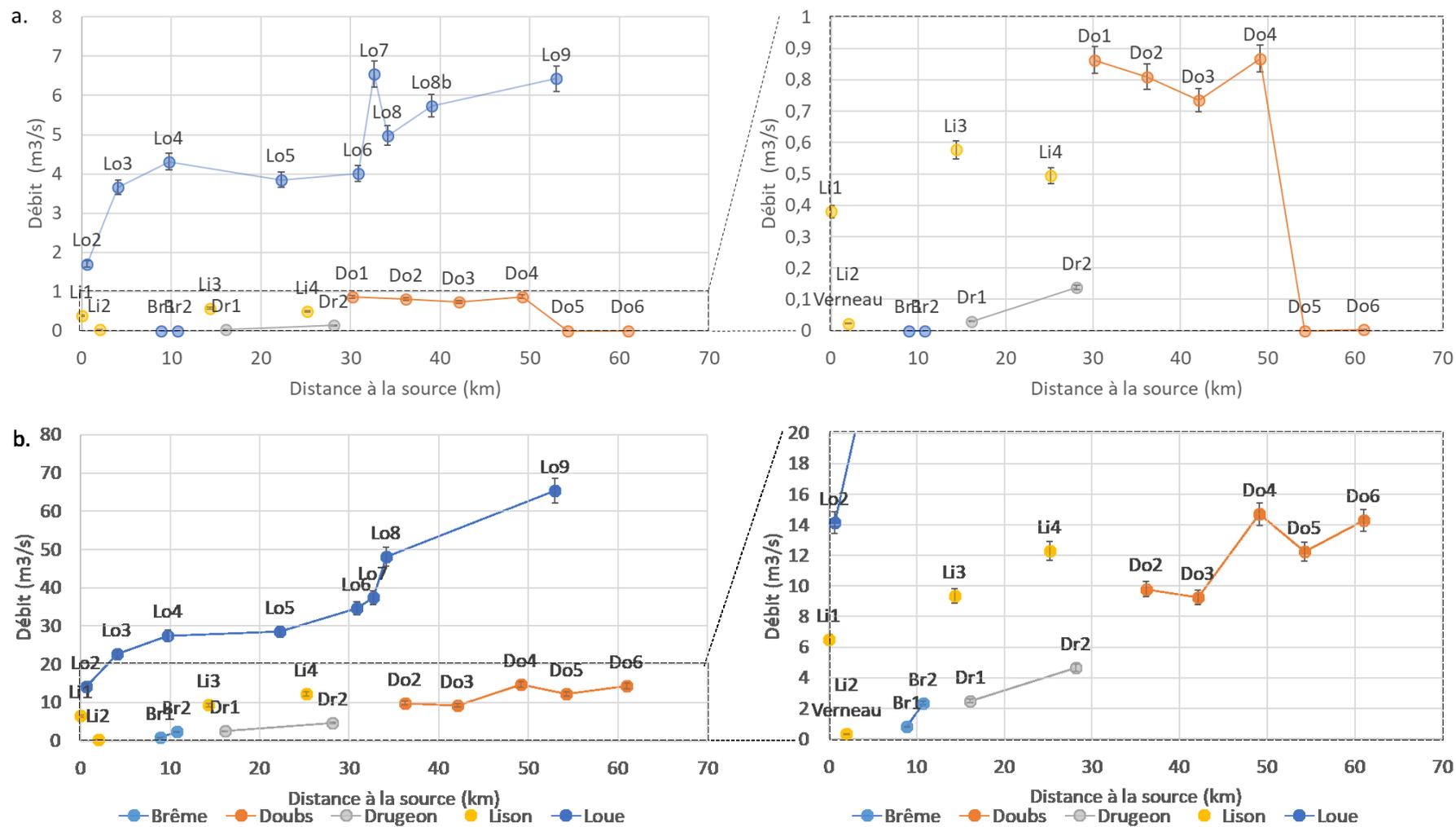


Figure 8 : Débits en fonction de la distance à la source des cours d'eau, campagnes BRGM. a : Basses eaux (09/2022). b : Hautes eaux (01/2021)

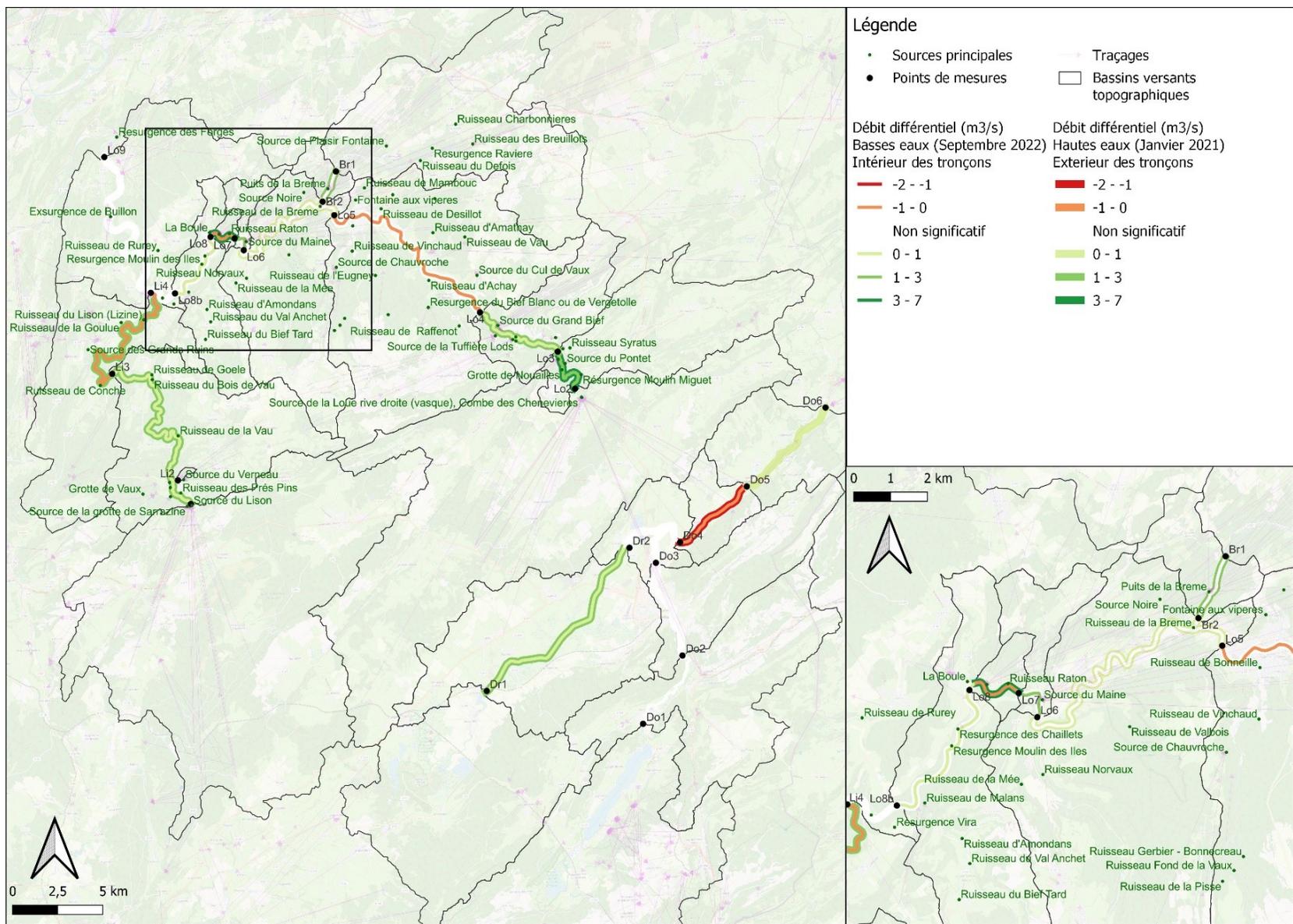


Figure 9 : Synthèse des débits différentiels. Campagnes BRGM hautes et basses eaux

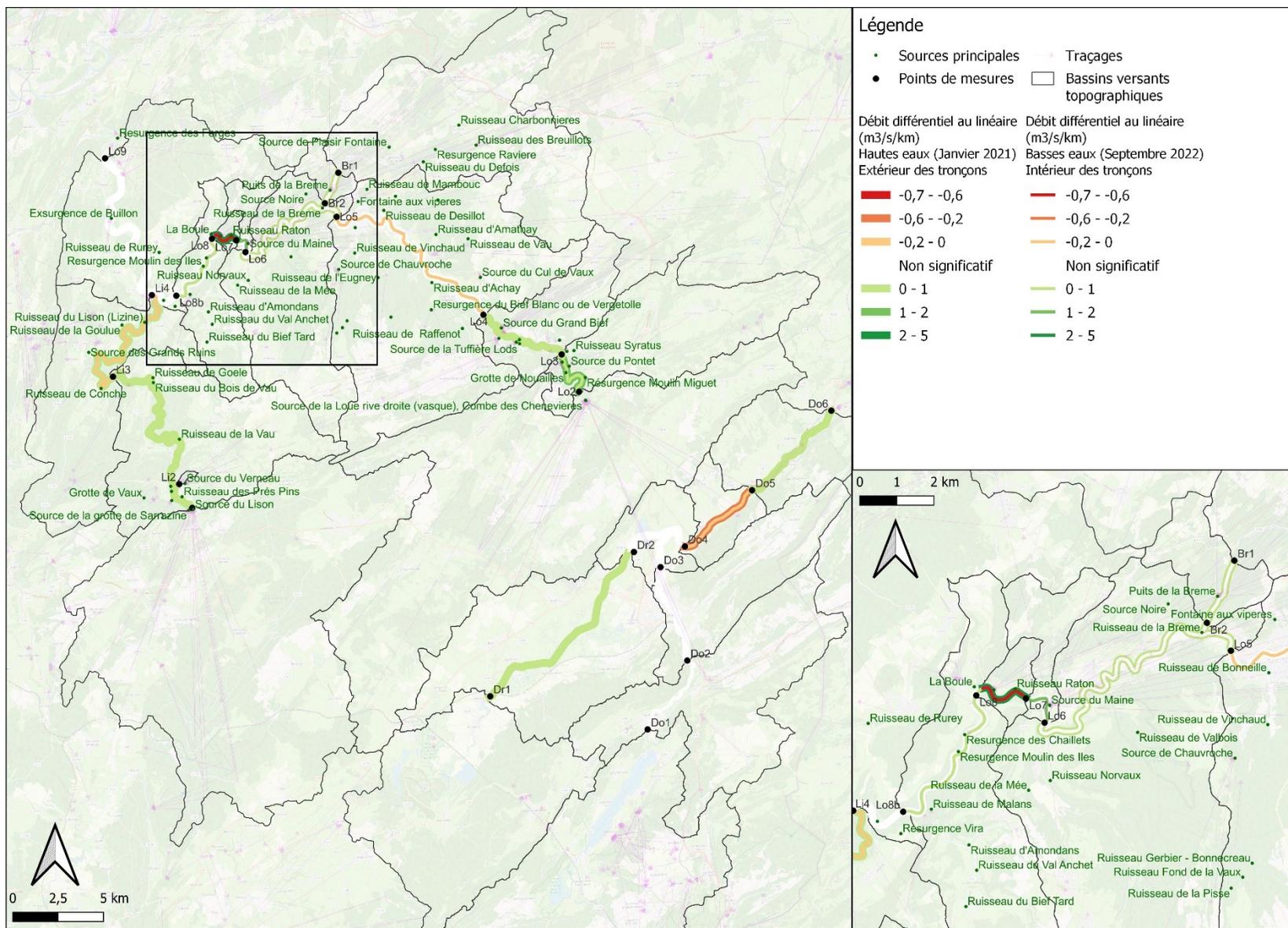


Figure 10 : Synthèse des débits différentiels par kilomètres de linéaire. Hautes et basses eaux.

## ii Surface d'alimentation

Les données utilisées et calculées qui permettent d'aboutir à du cartographie du taux de variation entre la surface du bassin versant topographique et la surface d'alimentation estimée au niveau des stations hydrographiques de la DREAL (Figure 11) sont disponibles en Annexe 7.

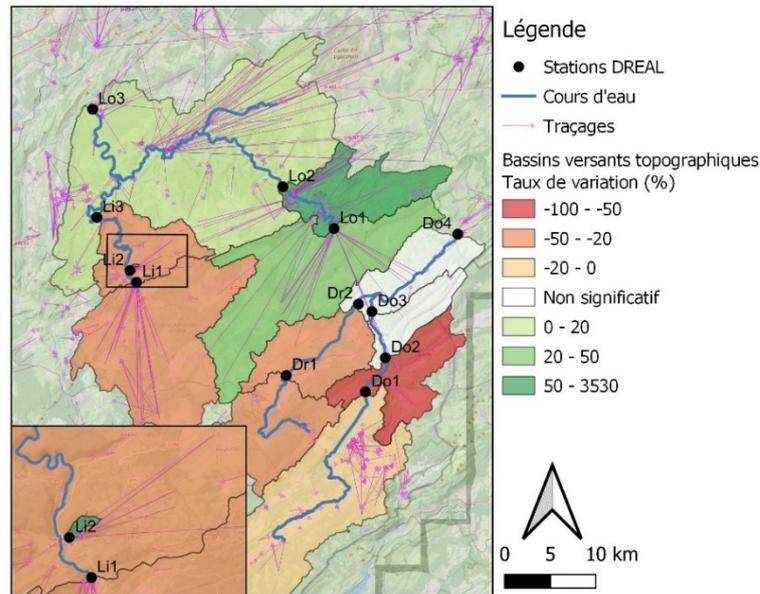


Figure 11 : Taux de variation entre les surfaces d'alimentation calculées et les surfaces des bassins versants topographiques. Une surface en rouge-orangée sur la figure a un taux de variation négatif. La surface calculée est donc inférieure à la surface du bassin topographique.

## iii Caractérisation de la contribution des affluents et des sources au débit des cours d'eau

En hautes eaux, il existe une forte différence entre le débit total des sources et affluents mesuré par le cabinet Reilé et le débit de la Loue à la station de Vuillafans (Figure 12). La part d'eau de surface (ESU) varie fortement entre hautes et basses eaux : respectivement de 24 à 3%.

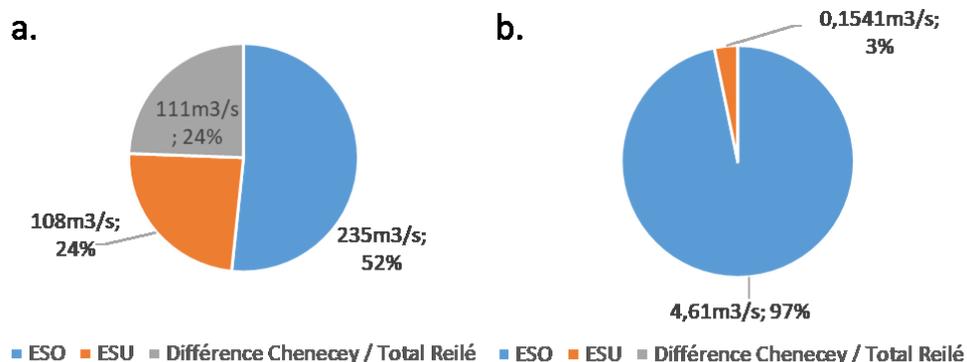


Figure 12 : Débit et part relative des eaux souterraines (ESO), des eaux de surface (ESU) et de la différence entre le débit à la station de Chenecey-Buillon et le débit total jaugé des sources et affluents. a. Hautes eaux. b. Basses eaux.

En hautes eaux (Figure 13.a.) les apports latéraux sont répartis de façon plus homogènes qu'en basses eaux (Figure 13.b.). Le détail de la contribution de la part des ESU/ESO au débit des cours d'eau de la Loue est détaillé en discussion, ainsi qu'une comparaison entre les données mesurées par le cabinet Reilé et les données issues des campagnes de jaugeages du BRGM.

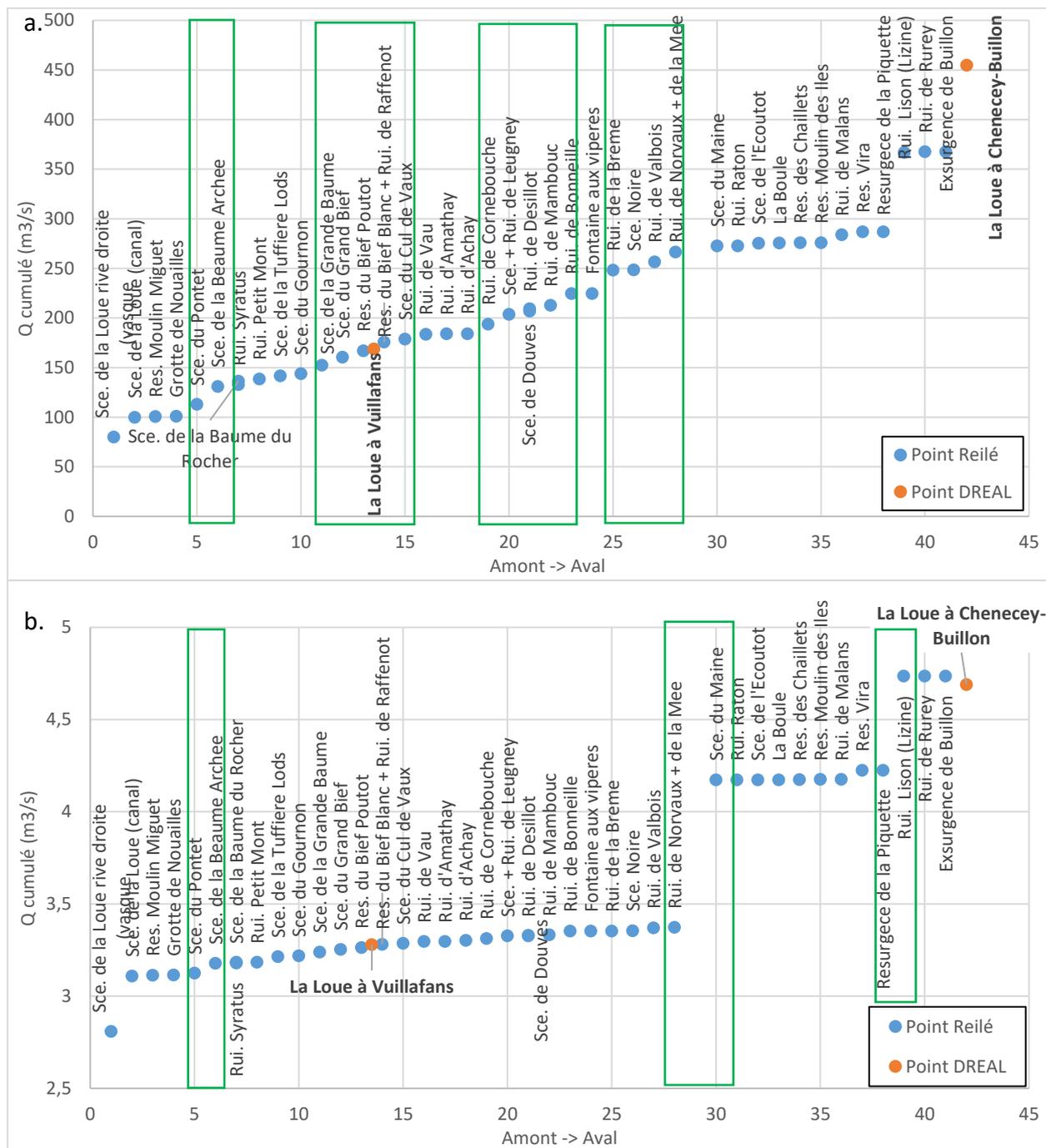


Figure 13 : Débits cumulés des sources et affluents et débits de la Loue à Vuillafans et Chenecey-Buillon. a. Hautes eaux (02/1999) b. Basses eaux (07/1998).

## 4.2. DELIMITATION DES BASSINS HYDROGEOLOGIQUES

Pour la majorité des sources et systèmes, deux bassins ont été délimités (min et max) (Figure 14). La différence entre ces délimitations représente l'incertitude liée à la méthode et aux données utilisées. Une comparaison a été faite avec une délimitation de plusieurs de ces bassins réalisée au cours d'une précédente étude (Charlier, et al., 2014). Des fiches de synthèse (Figure 15) ont été réalisées à la suite de chaque délimitation. Ces fiches rassemblent des informations sur l'altitude et la géologie des bassins délimités (et sur les données de débits si disponibles). Certains bassins comme celui de la Loue peuvent être divisé en plusieurs zones d'infiltration (Figure 15), séparées localement par des secteurs ruisselant en surface. Un tableau récapitulatif des données d'altitude et de géologie des bassins est disponible en annexe.

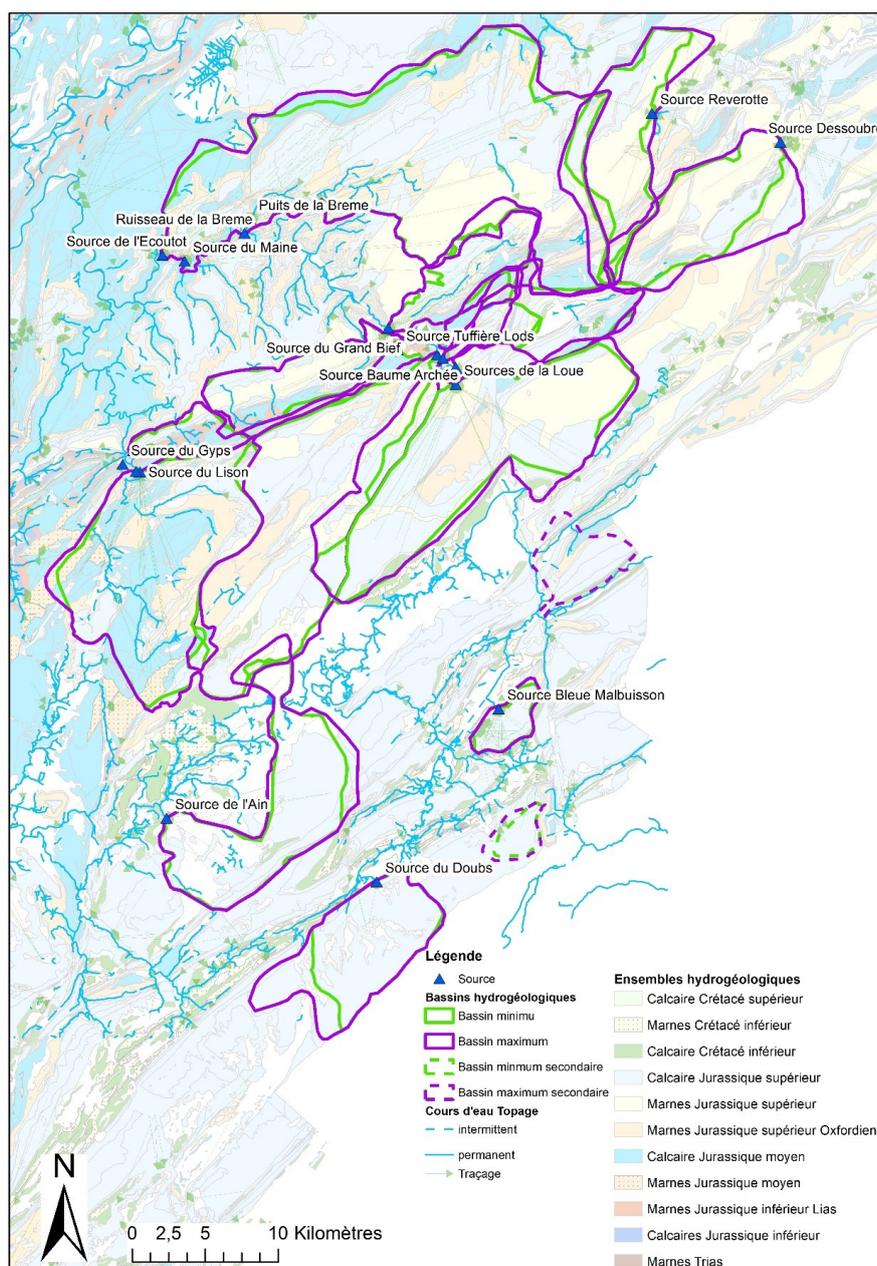


Figure 14 : Carte de synthèse des bassins délimités

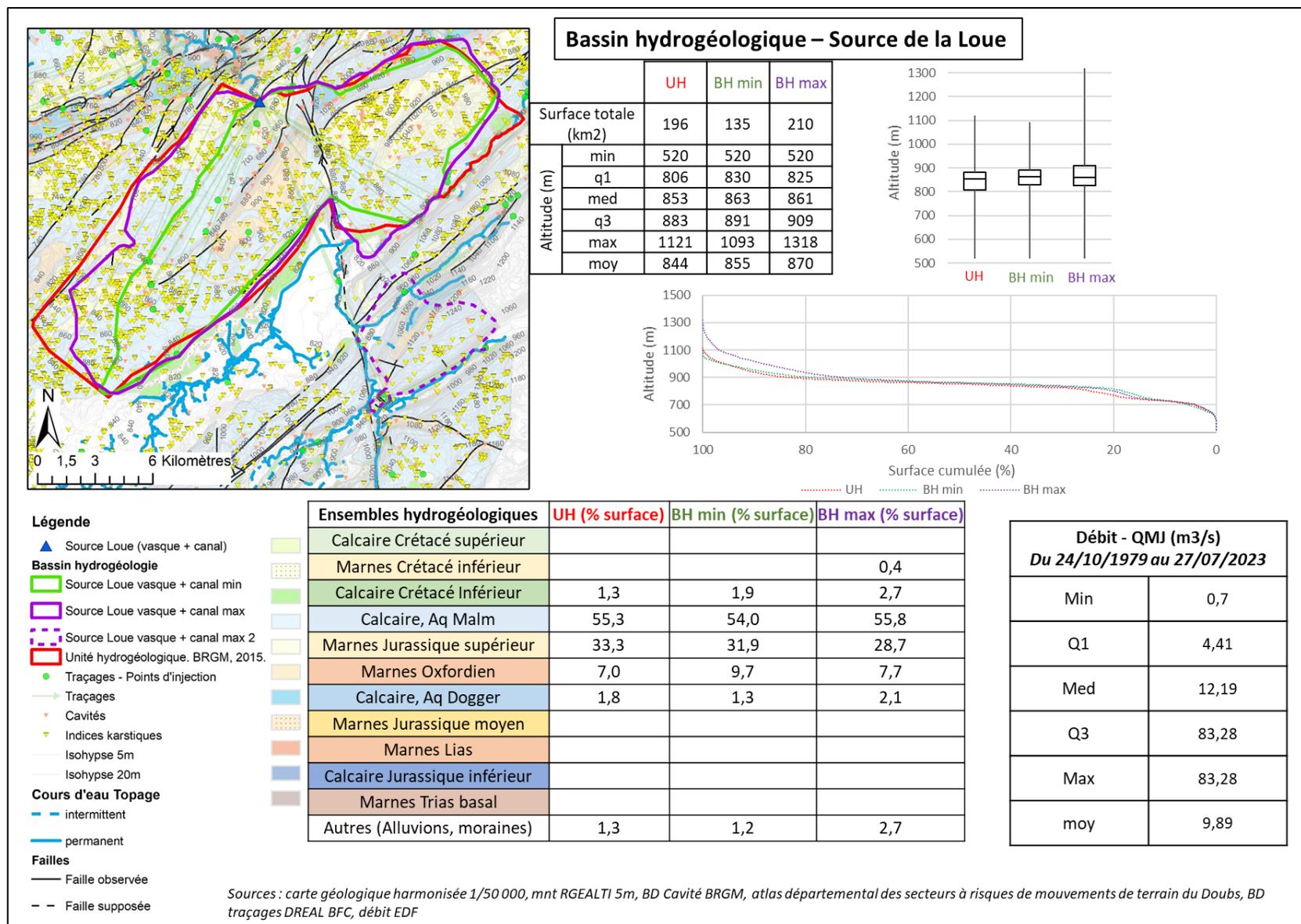


Figure 15 : Fiche de synthèse – Bassin hydrogéologique de la source de la Loue

### 4.3. EXPLORATION DES LIENS ENTRE GEOCHIMIE, OCCUPATION DES SOLS ET GEOLOGIE

Les analyses présentées regroupent les données physico-chimiques des deux campagnes (hautes et basses eaux).

#### i Interaction eau – occupation du sol

L'analyse effectuée regroupe l'occupation des sols (forêts, prairies, milieux à végétation arbustive ou herbacée et territoires artificialisés), l'altitude médiane des bassins et les paramètres physico-chimiques suivants : concentration en ammonium, carbone organique total, nitrates, phosphates, phosphore total, potassium et azote Kjeldahl.

L'analyse montre une relativement bonne structuration des données puisque les deux premiers facteurs suffisent à exprimer 70% de la variance. La matrice de corrélation (Tableau 2) permet d'identifier trois pôles de variables corrélés entre elles :

- La part couverte par des forêts, l'altitude médiane, le carbone organique total et la part couverte de végétation arbustive ou herbacée ;
- La part couverte par des prairies, les nitrates, les territoires artificialisés, le potassium et les zones agricoles hétérogènes ;
- Les phosphates, le phosphore total, les nitrates et l'azote Kjeldahl.

Les deux premiers pôles décrits sont négativement corrélés entre eux.

Tableau 2 : matrice de corrélation de l'ACP portant sur les interactions eau - occupation du sol

Variables	alt_med	Forets	Milieux végétation arbustive herbacée	Prairies	Territoires artificialisés	Zones agricoles heterogene	NH4	Azote Kjeldahl	COT	NO3	PO4	P tot	K
alt_med	1	<b>0,667</b>	<b>0,893</b>	<b>-0,626</b>	<b>-0,731</b>	-0,487	-0,164	-0,350	0,201	<b>-0,778</b>	-0,445	-0,526	<b>-0,693</b>
Forets		1	<b>0,690</b>	<b>-0,752</b>	<b>-0,809</b>	<b>-0,649</b>	-0,174	0,110	<b>0,662</b>	<b>-0,723</b>	-0,433	-0,519	<b>-0,759</b>
Milieux a végétation arbustive ou herbacée			1	<b>-0,832</b>	<b>-0,571</b>	-0,283	-0,136	-0,149	0,093	<b>-0,659</b>	-0,503	<b>-0,558</b>	<b>-0,703</b>
Prairies				1	0,477	0,031	0,229	-0,003	-0,358	<b>0,600</b>	<b>0,553</b>	<b>0,631</b>	<b>0,772</b>
Territoires artificialisés					1	<b>0,699</b>	0,317	0,180	-0,482	<b>0,766</b>	0,389	0,492	<b>0,580</b>
Zones agricoles heterogene						1	-0,038	-0,079	-0,422	0,474	0,077	0,105	0,310
NH4							1	<b>0,620</b>	-0,023	0,315	<b>0,656</b>	<b>0,778</b>	-0,079
Azote Kjeldahl								1	0,192	0,225	0,199	0,422	-0,097
COT									1	-0,528	-0,055	-0,118	<b>-0,564</b>
NO3										1	<b>0,581</b>	<b>0,634</b>	<b>0,774</b>
PO4											1	<b>0,930</b>	0,288
P tot												1	0,370
K													1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha=0,05$

#### ii Interaction eau – roche

Après de nombreux tests, les paramètres physico-chimiques conservés sont : la conductivité électrique, les concentrations en bicarbonates, calcium, chlorures, magnésium, potassium, silice, sodium, strontium, le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  (noté d18O). Les données semblent peu structurées car la combinaison des trois premiers facteurs n'exprime que 65% de la variance. La matrice de corrélation est disponible en Annexe 9.

## 5. Discussion

### 5.1. ECHANGES ENTRE SURFACE ET SOUTERRAIN SUR LE BASSIN DE LA LOUE

#### i Caractérisation des tronçons

L'analyse porte sur les résultats présentés en partie 4.1.i (Figure 8 , Figure 9, Figure 10 et Annexe 5).

- *Doubs*

Certains tronçons semblent avoir le même fonctionnement entre les différentes campagnes. Le Doubs entre l'aval de la confluence avec le Dugeon et le linéaire de pertes en amont de Maison du Bois (tronçon Do4-Do5 sur les campagnes du BRGM) a toujours un débit différentiel négatif. Ce secteur est connu pour ses pertes qui alimentent la source de la Loue.

La diminution du pourcentage de perte sur ce secteur entre basses et hautes eaux (de 100% à 7% respectivement) pourrait indiquer un seuil maximal de débit de perte de l'ordre de quelques mètres cubes par seconde. Cependant, une étude réalisée à l'aide d'un modèle de propagation avec écoulements latéraux a estimé que les pertes du Doubs peuvent atteindre 10 à 20 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> en période de crue du Doubs (Charlier J.-B., 2014). Un tel écart s'explique par le fait que les jaugeages étudiés ici en période de hautes eaux (janvier 2021) n'ont pas été réalisés en période de forte crue. Mis à part les pertes en basses eaux sur le tronçon encadrant la source de l'Écoutot (Lo7 – Lo8 BRGM), le débit de perte normalisé à la distance de ce tronçon (Do4 – Do5 BERGM), environ – 0,2 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup> en basses et hautes eaux, est le plus important de la zone d'étude.

Du fait du nombre inférieur de points de mesure lors de la campagne de la DREAL, le secteur en perte s'étend en amont de la confluence avec le Dugeon (Do3) et en aval jusqu'à Ville-du-Pont (Do6 BRGM). Toutefois, la partie aval de Maison du Bois jusqu'à Ville-du-Pont (Do5-Do6 campagne BRGM) étant en apport lors des deux campagnes BRGM indique que les pertes sont bien localisées en amont du point Do5. Des traçages ont toutefois montrés l'existence de pertes sur ce secteur mais non liées au bassin de la source de la Loue (Cabinet Reilé., 2018).

Lors la campagne de mars 2022 de la DREAL, le secteur à l'amont de la confluence avec le Dugeon (Do2-Do3) montre également une zone de perte, elle aussi connue pour être en connexion avec la source de la Loue à partir de jaugeages différentiels (Chauve, 2006) ou par traçages (Cabinet Reilé., 2018).

Ce secteur ne montre toutefois pas de pertes significatives lors des campagnes de basses et hautes eaux réalisées par le BRGM.

- *Lison*

Le tronçon amont de la rivière du Lison (Li1-Li3) reçoit les eaux de la source du Verneau (Li2), dont les débits ont été pris en compte pour le calcul des débits différentiels. Ce tronçon présente un apport lors des trois campagnes, pouvant atteindre 1,75 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> en hautes eaux. Ces apports peuvent s'expliquer par l'arrivée des sources, biefs et ruisseaux présents le long de ce tronçon (Figure 5).

Le secteur aval du Lison (Li3-Li4) montre un fonctionnement particulier de pertes en basses eaux (-5% du débit amont au point Li3) et d'apports en hautes eaux (15% du débit du Lison et 2,8% de

la Loue à Chenecey-Buillon) lors des campagnes BRGM. En basses eaux, les pertes sur ce tronçon normalisées à la distance sont les plus faibles de la zone d'étude ( $- 0,002 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ). Cela pourrait s'expliquer par des pertes très localisées ou par une connexion diffuse avec le souterrain tout le long du tronçon. Le cabinet Reilé évoquait en 2005 une zone de perte située en amont de la confluence avec le ruisseau de la Goulue (Cabinet Reilé, 2005).

- *Brême*

Le débit différentiel entre l'amont et l'aval du puits de la Brême (Br1 – Br2) est positif en haute eaux et représente près de 60% du débit de la Brême avant la confluence avec la Loue et 2% du débit de la Loue à Chenecey-Buillon, tandis que le débit total de la Brême représente 3,5% du débit de la Loue à Chenecey-Buillon. Le puits de la Brême, qui fait partie du système Brême-Maine-Ecoutot, est en inversac, fonctionne en apport et contribue donc aux écoulements de surface.

Le ruisseau est en assec lors de la campagne de basses eaux. En général, le réseau souterrain n'est pas en charge et le puits fonctionne en perte lorsque la Brême a un écoulement.

- *Loue*

Seules les campagnes du BRGM (janvier 2021 et septembre 2022) sont interprétées en raison d'une plus grande densité de points de mesure sur la Loue.

Le tronçon de l'aval du barrage EDF à la source de la Loue jusqu' à l'aval de résurgence de la Baume Archée (Lo2-Lo3) récolte les eaux de plusieurs arrivées d'eau souterraines (Moulin Miguet, Nouailles, Pontet, Baume Archée, Baume du rocher) et du ruisseau Syratius. Ce secteur est donc en apport lors des deux campagnes et représente 26% du débit de Chenecey-Buillon en basses eaux et 10% en hautes eaux.

Le secteur Lo2 – Lo3 présente de forts apports par kilomètre de tronçon en hautes eaux (près de  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ). En basses eaux, le débit des apports latéraux par kilomètre est près de quatre fois plus faible qu'en hautes eaux. Cela peut s'expliquer par l'arrivée des eaux d'une partie des sources du faisceau Salinois, dont la résurgence de la Baume Archée qui est un fort contributeur du débit de la Loue en hautes eaux et qui a donc potentiellement une surface d'alimentation très étendue.

Le tronçon de l'aval de la résurgence de la Baume Archée à Vuillafans (Lo3-Lo4) draine les eaux du ruisseau Petit Mont et des sources de la Tuffière Lods, du Gournon, du Bief Poutot, de la Grande Baume, du Grand Bief et de la Truite d'Or. Les apports en basses eaux représentent 4% du débit à Chenecey-Buillon et 3% en hautes eaux.

Le tronçon L4 – Lo5 (de Vuillafans à l'amont de la confluence avec la Brême) se situe au cœur du plateau d'Ornans où de petits affluents (ruisseau de Boneille, ruisseau de Norvaux) se sont développés en partie sur les marnes oxfordiennes. Ces ruisseaux, qui subissent des assècs en période de basses eaux, peuvent devenir des contributeurs important en hautes eaux. Le débit différentiel est négatif en basses eaux et indique une perte significative mais faible d'environ 1% du débit amont à Vuillafans (Lo4). La variation de débit n'est pas significative en hautes eaux.

Le tronçon de l'amont de la confluence Loue-Brême jusqu'à l'amont de la source du Maine (Lo5-Lo6) reçoit les eaux des ruisseaux de Valbois, de la Mée, de Norvaux et de la source Noire. Il montre un faible apport en hautes eaux (<1% du débit de la Loue à Chenecey-Buillon) non lié à la Brême (prise en compte dans le calcul du débit différentiel).

Le tronçon suivant (Lo6-Lo7) encadre la source du Maine. Cette source est connectée au réseau souterrain Brême-Maine-Ecoutot. En basses eaux, l'apport de  $2,013 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  représente 31% du

débit de la Loue à Chenecey-Buillon et place ce tronçon comme deuxième contributeur le plus important après la source de la Loue.

En basses eaux (code couleur de remplissage des tronçons sur l'Figure 10), le tronçon qui encadre la source de l'Ecoutot (Lo7- Lo8) présente les plus fortes pertes, de l'ordre de  $0,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , soit près de respectivement 4 et 3 fois plus que les pertes du Doubs (Do4 – Do5) en basses eaux et hautes eaux. Ces pertes montrent donc une **connexion avec le réseau souterrain au niveau du lit mineur de la Loue**. Cette connexion (sur des alluvions récentes développées sur des calcaires du Jurassique supérieur) pourrait être un prolongement du système souterrain Brême-Maine-Ecoutot ou un autre réseau différent de ce dernier. Notons que ce tronçon est celui qui présente le plus fort contraste de fonctionnement entre des pertes dans le lit mineur en basses eaux et des apports de la source de l'Ecoutot (et potentiellement au sein du lit) de  $4.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  en hautes eaux.

Le jaugeage au niveau du point Lo8b n'a pas été effectué lors de la campagne de hautes eaux en raison des conditions (non praticable). Le tronçon entre l'aval de la source de l'Ecoutot et l'amont de la confluence avec le Lison draine quelques ruisseaux et sources dont les plus importants sont le ruisseau de Malans et la résurgence de Vira. En basses eaux, l'apport de  $0,221 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  représente 3,4% du débit de la Loue à Chenecey-Buillon.

En hautes eaux, le dernier tronçon (Lo8-Lo9) ne montre pas d'échanges latéraux significatifs.

## ii Surface d'alimentation

Les bassins du Dugeon (Dr) et du Doubs amont (Do1 et Do2) présentent un taux de variation négatif et ont donc potentiellement une surface d'alimentation plus réduite que celle de leur bassin topographique (Figure 11), ce qui peut être lié aux pertes au niveau du lit des cours d'eau ou à des zones d'infiltrations non connectées aux cours d'eau. Etrangement, les modules différentiels au niveau du linéaire de perte du Doubs (tronçon Do3/Dr2 – Do4) ne sont pas significatifs.

Le bassin de la source du Verneau (Li2) présente un taux de variation de près de 3500% ce qui montre bien l'étendue spatiale de la zone d'alimentation de cette source (Mudry, 1987) et la non pertinence de l'utilisation des bassins versants topographique pour la caractérisation des sources.

Le bassin de la source de la Loue (Lo1) a un taux de variations de plus de 40% lié aux apports provenant des pertes du Doubs et de l'infiltration sur le plateau de Levier.

Le bassin intermédiaire Lo2 a un taux de variation de 280%. Ce secteur reçoit les apports des sources du faisceau Salinois comme le montrent les traçages qui présentent des connexions souterraines plus étendues que le bassin versant topographique. Ce qui confirme que les contributions principales sont hydrogéologiques et pas liées aux ruissellement de surface inclus dans le bassin topographique.

Les bassins ayant un taux de variations compris entre -20 et 20% (Do1 et Lo3) ont une surface d'alimentation calculée relativement semblable à celle de leurs bassins topographiques. En revanche, même si les surfaces pourraient être relativement similaires, les limites des bassins sont à redéfinir au regard des traçages artificiels qui indiquent que les axes d'écoulements souterrains ne sont pas superposés à ceux de surface. Le bassin de la Loue à Chenecey-Buillon (Lo3) par exemple, qui draine les eaux du système Brême-Maine-Ecoutot (entre les confluences Brême-Loue et Lison-Loue), a fait l'objet de traçages qui démontrent des axes de drainage appartenant à un bassin d'extension bien plus large que celui défini par la topographie au nord-est.

Ces résultats sont cohérents avec ceux d'une précédente étude (Le Mesnil, 2021), qui montrent que les écoulements souterrains interbassins (issus de l'écart des bilans établis sur bassins topographiques) sont en pertes sur le Doubs et en gain sur la Loue.

### **iii Caractérisation de la contribution des affluents et des sources aux débits de la Loue**

Les hypothèses sur les apports manquants en hautes eaux sont i) des apports par ruissellement de surface, et ii) la présence de zones de résurgence temporaire en lien avec la mise en charge de certains systèmes (trop-plein). Cette zone se situerait en aval de la station de Vuillafans (Figure 13), dont le débit concorde avec les débits cumulés. Cette zone pourrait être la connexion du lit mineur de la Loue avec le souterrain comme évoqué dans la partie 5.1.i.

La part d'eau de surface (ESU) jaugée varie aussi fortement : de 24% en hautes eaux à 3% en basses eaux. La contribution des eaux souterraines reste la plus élevée, entre 50 et 97%, ce qui confirme l'importance des contributions des eaux souterraines d'origine karstique aux écoulements de surface du bassin de la Loue. En basses eaux, le débit est assuré quasi exclusivement par les eaux souterraines (Figure 16.b.).

En basses eaux (Figure 13.b.), seuls quatre sources et affluents sont majoritairement contributifs au débit de la Loue lors de cette période : la source de la Loue avec ses 2 émergences Loue vasque avec  $2.81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (débit corrigé), Loue canal avec  $0,30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , la source du Maine avec  $0,81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et le Lison avec  $0,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Figure 16.b.).

En hautes eaux (Figure 13.a. et Figure 16.a.), les apports des affluents sont répartis de façon plus homogènes qu'en basses eaux avec principalement les contributions de la source de la Loue vasque, de la source de la Baume Archée, de la Brême et du Lison.

La source de la Baume Archée a une contribution plus importante en hautes eaux qu'en basses eaux. Des traçages de plus d'une vingtaine de kilomètres ont montrés que cette source draine les eaux d'une partie du plateau de Levier et du jeu de failles du faisceau Salinois.

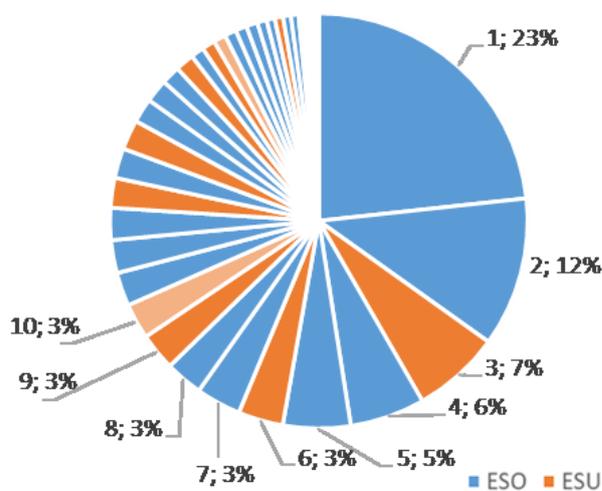
Les sources dans le secteur de Vuillafans (Grande Baume, Grand Bief, Bief Poutot, Bief Blanc) drainent à la fois l'est et l'ouest du faisceau Salinois et une partie du plateau d'Ornans en rive gauche et droite de la Loue. Les apports quasiment nuls en période de basses eaux pourraient indiquer des systèmes karstiques avec de faibles réserves et/ou de petites tailles.

Les ruisseaux situés en amont de la source du Maine (Cornebouche, Desillot, Mambouc, Bonneille) ont des débits relativement important (quelques % du débit de la Loue) en hautes eaux et sont pour la plupart en assec en basses eaux. Développés sur des marnes de l'Oxfordien, ces cours d'eaux drainent les eaux souterraines des calcaires du Jurassique supérieur (aquifère du Malm) du plateaux d'Ornans et du ruissellement sur les marnes.

La source du Maine présente un débit relativement fort en étiage mais un débit en hautes-eaux à un moment où une forte proportion de cet hydrosystème contribue au débit de la Brême. Le système souterrain lié à cette source possède donc une réserve significative résiliente aux étiages.

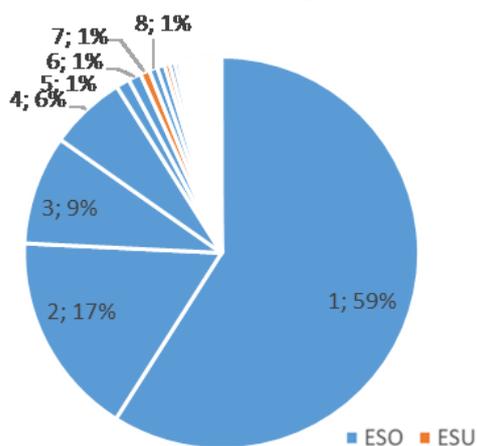
Lors des deux campagnes, la source de l'Écoutot ne semble que peu contribuer au débit de la Loue. Cette source est en réalité un trop-plein de la source du Maine situé en amont. De plus, bien que située en aval de la source du Maine, elle possède une altitude plus élevée, ce explique son tarissement en basses eaux.

a. Débit de la Loue à Chenecey-Buillon : 455 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>



N°	Nom	Débit (m <sup>3</sup> /s)	% du débit à Chenecey-Buillon
1	Sc. de la Loue rive droite (vasque)	80	17,58
2	Sc. du Lison	40	8,79
3	Rui. de la Breme	23,48	5,16
4	Sc. de la Loue (canal)	20	4,4
5	Sc. de la Beaume Archee	18	3,96
6	Rui. de Bonneille	12	2,64
7	Sc. du Pontet	12	2,64
8	Sc. + Rui. de Leugney	10	2,2
9	Rui. de Norvaux + de la Mee	10	2,2
10	Rui. de Cornebouche	9,5	2,09

b. Débit de la Loue à Chenecey-Buillon : 4,69 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>



N°	Nom	Débit (m <sup>3</sup> /s)	% du débit à Chenecey-Buillon
1	Sc. de la Loue rive droite (vasque)	2,81	59,91
2	Sc. du Maine	0,8	17,06
3	Sc. du Lison	0,43	9,17
4	Sc. de la Loue (canal)	0,3	6,4
5	Sc. de la Beaume Archee	0,053	1,13
6	Res. Vira	0,05	1,07
7	Rui. du Bois de Vau + de Goele	0,037	0,79
8	Sc. du Verneau	0,032	0,68

Figure 16 : Part relative au débit total jaugé et débits des sources et affluents de la Loue et du Lison. a : Hautes eaux (02/1999) b : Basses eaux (07/1998)

#### iv Comparaison des jaugeages de la Loue (2021/2022) et des sources et affluents (1998/1999)

Les débits différentiels des campagnes BRGM permettent de quantifier les échanges latéraux (apports des sources et affluents, mais également apports et pertes en rivière), alors que les débits des campagnes de Reilé sont des mesures directes des apports (sources et affluents).

La forte différence de gamme de débit entre les campagnes de hautes eaux du cabinet Reilé (source de la Loue à  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en février 1999) et du BRGM (source de la Loue à  $14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en janvier 2021) rend difficile une comparaison de ces deux campagnes. En effet, la campagne du cabinet Reilé a été réalisée en forte crue au vu des valeurs de débit, alors que celle du BRGM a été réalisée en étiage de hautes eaux. Toutefois la comparaison des campagnes hautes et basses eaux permet d'apporter des éléments de compréhension des échanges latéraux.

Les apports de la source de la Loue représentent 66% du total jaugé en basses eaux (Figure 17. a.) et 27% en hautes eaux (Figure 17. b.). Les tronçons Lo4 – Lo5 et Lo5 – Lo6 sont de faibles contributeurs au débit de la Loue en basses eaux. Le tronçon L4 – Lo5 (de Vuillafans à l'amont de la confluence avec la Brême) se situe au sein du plateau d'Ornans où de petits réseaux hydrographiques (ruisseau de Boneille, ruisseau de Norvaux) se sont développés sur les marnes oxfordiennes. Ces ruisseaux, qui subissent des assecs en période de basses eaux, deviennent des contributeurs important en hautes eaux. De la même manière, le tronçon Lo5 – Lo6, principalement alimenté par le ruisseau de la Brême, devient un contributeur important en hautes eaux.

On retrouve le fonctionnement différent entre basses et hautes eaux pour le tronçon qui encadre la source du Maine (Lo6 – Lo7) avec un apport de 17% du débit total jaugé en basses d'eaux (ce qui en fait le deuxième tronçon le plus contributif au débit de la Loue) contre 2% en hautes eaux (7<sup>ème</sup> tronçon le plus contributif). Les tronçons Lo8b – Lo9 en basses eaux et Lo8 – Lo9 en hautes eaux intègrent les apports de la rivière du Lison et sont respectivement les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> contributeurs au débit de la Loue en hautes et basses eaux.

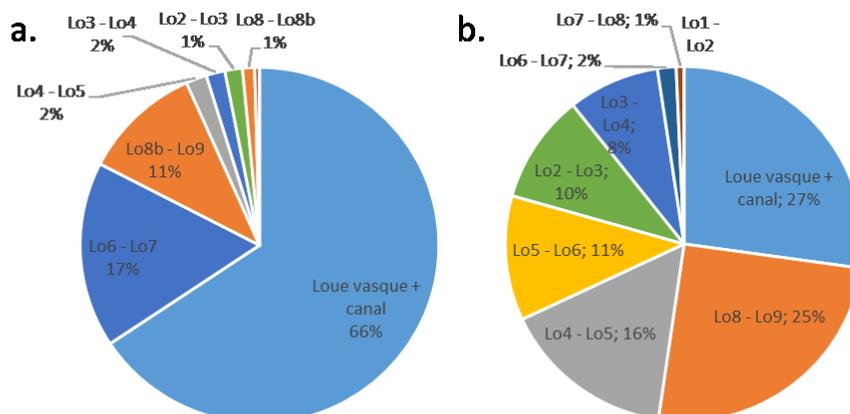


Figure 17 : Contribution relative des sommes des débits des affluents et sources jaugés par la cabinet Reilé par tronçon de cours d'eau des campagnes réalisées par le BRGM. a : Basses eaux. b : Hautes eaux

Sur le tronçon de la source de l'Écoutot (Lo7 – Lo8), on observe une grande différence entre les débits différentiels et les débits mesurés par le cabinet Reilé, aussi bien en hautes eaux qu'en basses eaux. Les débits rapportés au linéaires en basses eaux (Figure 10) suggéraient l'existence d'une connexion entre la Loue et le réseau souterrain (potentiellement le système Brême-Maine-Écoutot ou un autre système). Ici, en hautes eaux, le débit relativement faible de la source de l'Écoutot mesurés par le cabinet Reilé ( $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), en orange sur la Figure 19,

représente moins de 1% du débit total jaugé, et est inférieur au débit différentiel sur ce tronçon lors de la campagne du BRGM (avec des débits normalement moins importants). En basses eaux, l'absence d'apport mesuré par le cabinet Reilé (Figure 18) et le débit différentiel négatif sur ce tronçon confirme à la fois l'hypothèse d'une connexion du lit mineur de la Loue avec le réseau souterrain et le fonctionnement de la source de l'Écoutot en trop-plein de la source du Maine.

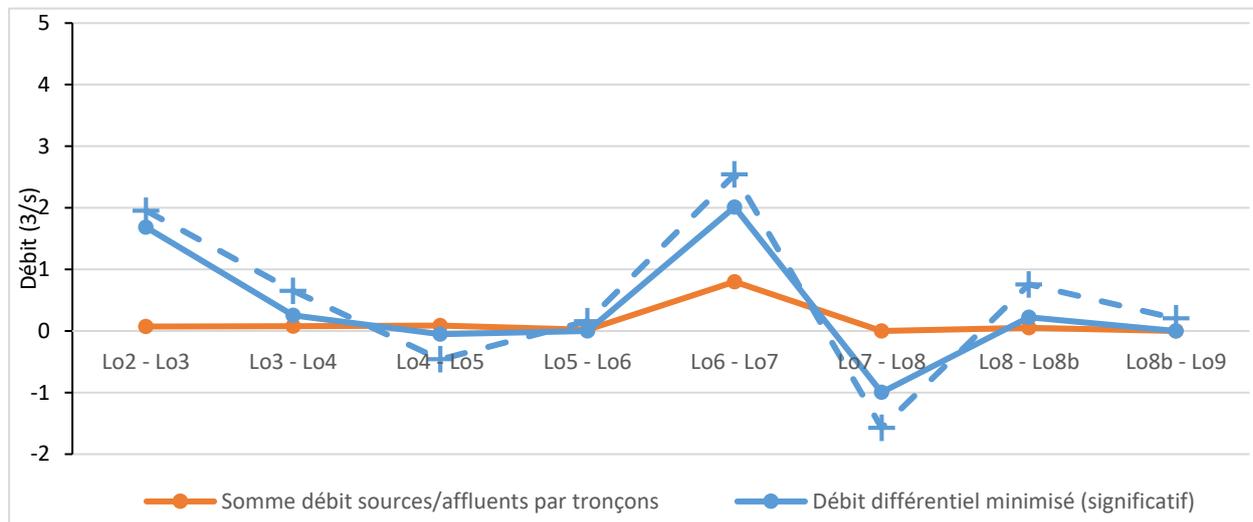


Figure 18 : Débit différentiel de la campagne de basses eaux du BRGM (09/2022) et somme des débits des sources et affluents de la campagne du cabinet Reilé (07/1998) par tronçon

En hautes eaux (Figure 19) les mesures du cabinet Reilé montrent un apport important entre Vuillafans et l'amont de la confluence avec la Brême (tronçon Lo4 – Lo5), principalement lié aux ruisseaux (Boneille, Leugney, Cornebouche et Raffenot). Le débit différentiel de la campagne de janvier 2021 sur ce secteur est relativement faible voir non significatif. Cette différence entre les campagnes peut s'expliquer par des conditions météorologiques différentes avec un ruissellement plus important lors de la campagne du cabinet Reilé (forte crue).

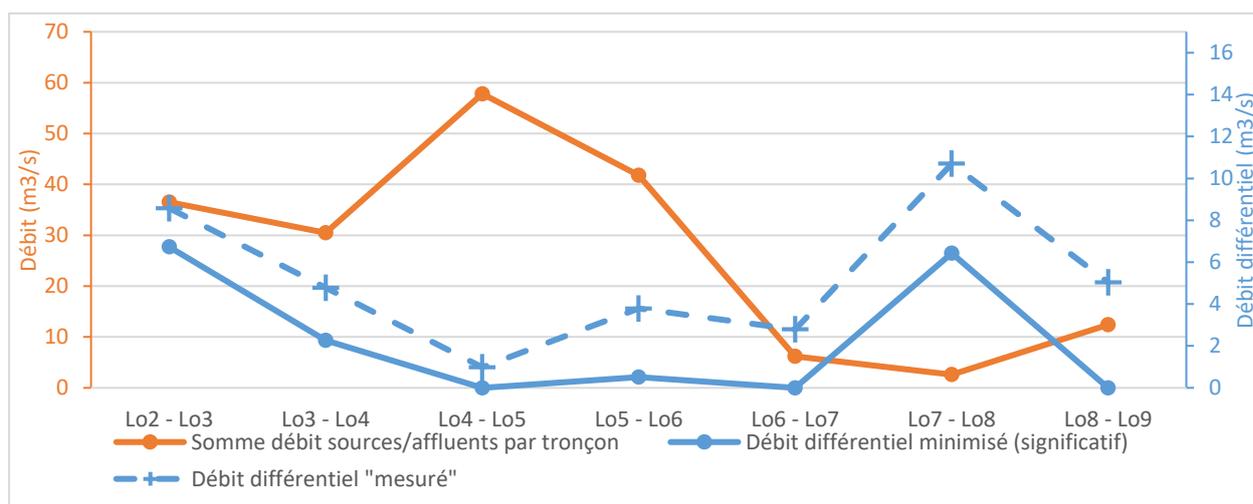


Figure 19 : Débit différentiel de la campagne de hautes eaux du BRGM (01/2021) et somme des débits des sources et affluents de la campagne du cabinet Reilé (02/1999) par tronçon

## v Synthèse

La Figure 20 présente les principales conclusions tirées de l'analyse des débits, à savoir :

- La localisation des principales pertes du Doubs au profit de la source de la Loue entre l'aval de la confluence avec le Dugeon et Maison-du-Bois ;
- Les pertes secondaires du Doubs entre la Cluse-et-Mijoux et Doubs. Celles-ci ne sont significatives que lors de la campagne de la DREAL en mars 2022 ;
- La contribution importante de la source de la Loue (vasque + canal), entre 63 et 22% du débit à Chenecey en basses et hautes eaux respectivement ;
- Les apports, plus conséquent en hautes eaux, des ruisseaux développés sur les marnes oxfordiennes et des sources du faisceau Salinois ;
- Le fonctionnement du réseau Brême-Maine-Ecoutot, développés dans les calcaires du Jurassique moyen, sous les marnes oxfordiennes (Aquifère du Dogger).
  - En basses eaux, la Brême en assec et le réseau souterrain non saturé induisent un soutien au niveau de base de la Loue par un apport de la source du Maine seule du fait de sa plus basse altitude, tandis que des pertes localisée dans le secteur de la source des Ecoutot pourraient montrer une connexion avec ce même système ou avec une source plus en aval (résurgence des Chaillets / Moulin des Isles).
  - En hautes eaux, le réseau souterrain est en charge et le puit de la Brême est en inversac. Le débit de la source du Maine reste plus important que celui de la source de l'Ecoutot, du fait de la différence d'altitude ou des connexions dans le lit de la Loue proche de la source de l'Ecoutot.
- Le fonctionnement et les apports des sources en amont de la rivière du Lison :
  - La source du Lison est le principal contributeur du Lison (70 à 80% du débit), et apporte 5 à 10% du débit de la Loue à Chenecey ;
  - Le trop-plein de la grotte Sarrazine n'apporte un débit qu'en période de hautes eaux qui peut être conséquent, allant jusqu'à 15% du débit du Lison ;
  - La source du Verneau qui est un des principaux contributeurs apporte un peu moins de 10% du débit du Lison.

Deux tronçons en pertes en basses eaux ne sont pas évoqués sur le schéma de synthèse. Ces pertes sont en réalité minimales lorsqu'elles sont rapportées à la distance du tronçon (de l'ordre du millième de  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ). Il s'agit du tronçon Lo4 – Lo5, qui s'écoule sur des alluvions récentes développées sur des marnes oxfordiennes et du tronçon Li3 – Li4 qui s'écoule sur des alluvions modernes développées sur des calcaires du Jurassique moyen. Les débits du Dugeon ne sont également pas mentionnés car ils ne permettent pas de montrer une interaction particulière avec le souterrain.

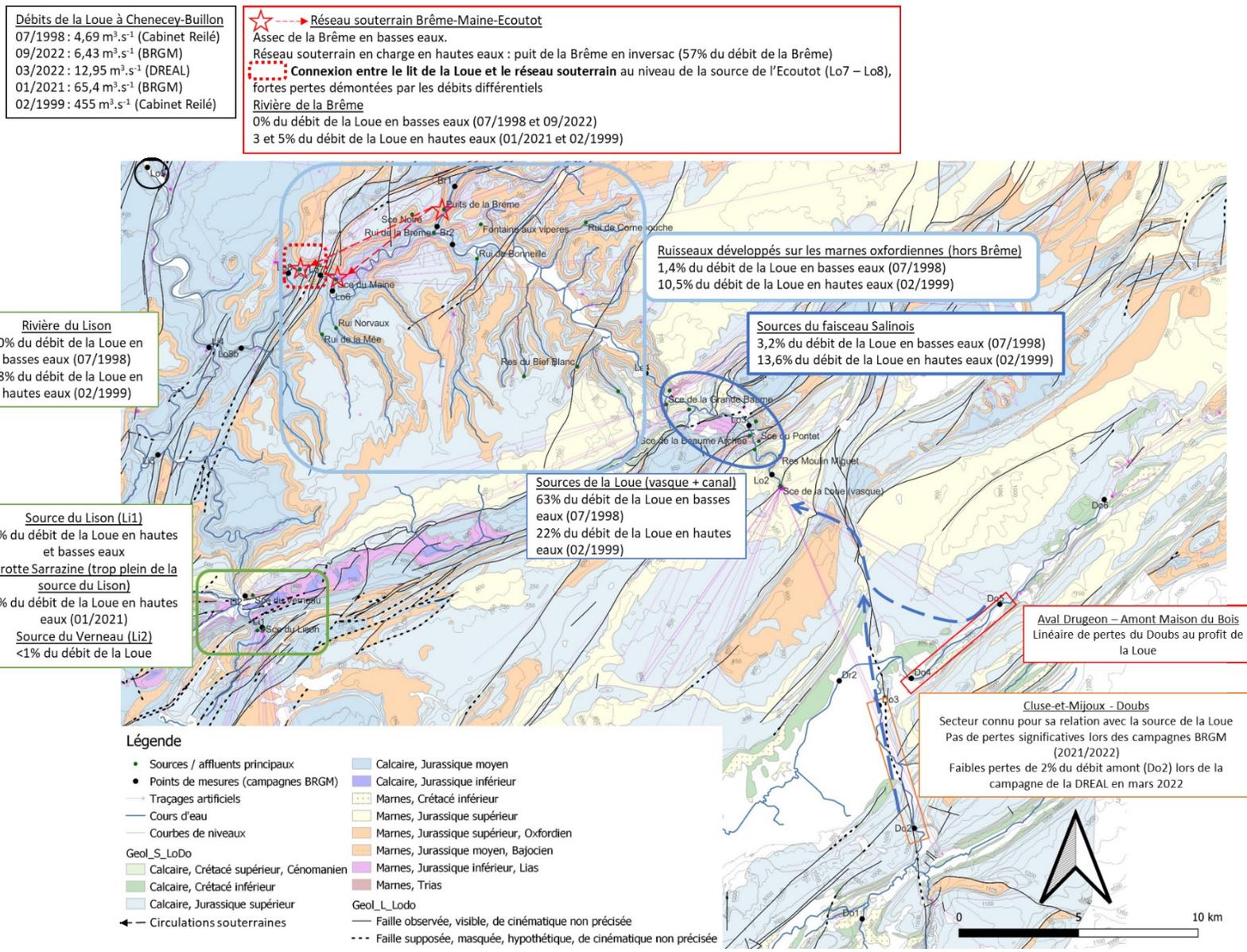


Figure 20 : Synthèse de l'analyse des débits. Le débit de la Loue   Chenecey fait office de débit de référence.

## 5.2. DELIMITATION DES BASSINS HYDROGEOLOGIQUES

Au total, plus d'une quinzaine de bassins d'alimentation de sources et systèmes ont été délimités. Ces délimitations complètent et semblent généralement plus précises que celle issues de l'étude précédente (Charlier, et al., 2014). Toutefois, la méthodologie appliquée est largement perfectible.

Tout d'abord, elle ne prend en compte ni la couverture des sols, ni l'épaisseur et la nature de la couverture pédologique, qui sont des variables pouvant fortement impacter le partage entre ruissellement et infiltration. Cependant, le caractère karstique de la zone d'étude suppose une épaisseur de sol généralement faible voire inexistante par endroit, et tend à diminuer l'impact de ces paramètres.

Concernant la géologie, le pendage des couches serait à ajouter à la méthode afin d'identifier des orientations et des sens de circulation souterraine et affiner la délimitation.

La classification des pentes pourrait être étendue pour correspondre aux différentes classes définies par la méthodologie PaPRIKa (Dörfliger, et al., 2009) voir revue et discutée en fonction de la nature des couches géologiques affleurant.

Les données de traçages utilisés sont les relations injections-restitutions avérées, ce qui peut fournir un biais sur l'interprétation, à savoir qu'une absence de relation avérée n'est pas synonyme d'une absence de connexion réelle entre deux points.

Les bassins hydrogéologiques pourraient avoir plusieurs délimitations en fonction de la période hydrologique. Cela nécessiterait une étude approfondie des données de traçages existantes et de la structure et de la saturation des réseaux de conduits souterrains.

Certaines sources ont dû être regroupées au sein d'un même bassin d'alimentation, bien souvent en raison de traçages qui indiquent la présence d'un réseau souterrain commun, ayant un ou plusieurs exutoires suivant les périodes hydrologiques. Le fonctionnement de certains systèmes rend également difficile une délimitation précise. C'est par exemple le cas des pertes du Doubs dont une partie des débits alimentent la source de la Loue mais qui ne capte que rarement la totalité du débit du Doubs, ou du système souterrain Brême-Maine-Ecoutot qui est saturé en période de hautes eaux et qui conserve donc une composante de surface.

Enfin, une analyse de la structure 3D de la géologie du secteur pourrait apporter des informations quant aux écoulements souterrains qui préciseraient les délimitations effectuées.

### 5.3. EXPLORATION DES LIENS ENTRE GEOCHIMIE, OCCUPATION DU SOL ET GEOLOGIE

#### i Interaction eau – occupation du sol

L'organisation des variables dans le nouvel espace F1-F2 (Figure 22) renseigne sur les relations entre les variables spatialisées (altitude et occupation du sols) et les variables physico-chimiques. Tout d'abord, la relation entre l'altitude médiane des bassins délimités renseigne sur l'organisation des types d'occupation du sol. Les forêts et les milieux à végétation arbustives sont situés plus en altitude, en comparaison des prairies, des territoires artificialisés et des zones agricoles, qui sont anticorrélées à l'altitude médiane. Le carbone organique total est corrélé à la proportion de forêts au sein des bassins. Les teneurs en nitrates et en potassium sont corrélées aux territoires artificialisés et aux prairies. Les teneurs en phosphore, phosphates, azote Kjeldahl et en ammonium sont corrélés entre elles mais ne semblent pas avoir de relation avec l'occupation du sol.

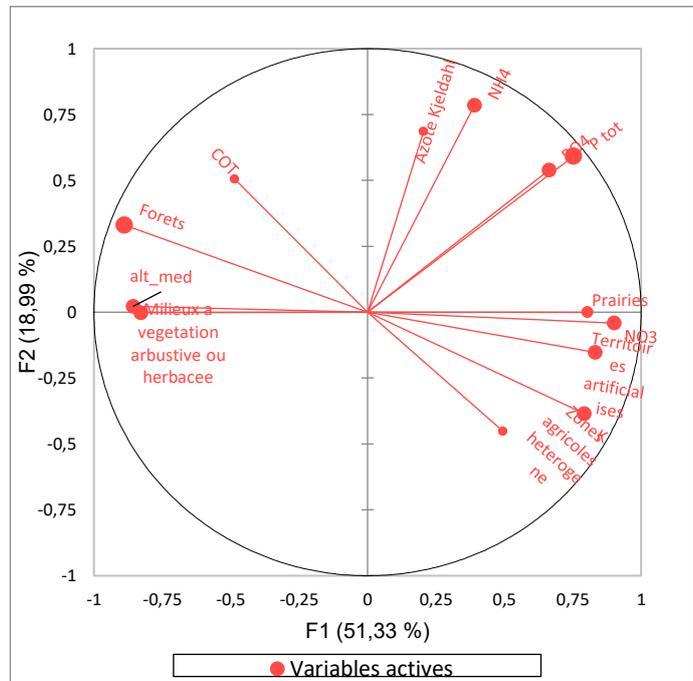


Figure 21 : Plan factoriel F1-F2 de l'ACP sur les interactions eau – occupation du sol. 70.% de la variance exprimée.

L'un des enjeux est la qualité de l'eau provenant des sources karstiques qui alimentent les rivières du Jura, et en particulier la teneur en nitrates qui accélère l'eutrophisation des cours d'eau. Le début d'analyse renseigne et confirme l'origine des nitrates (prairies et territoires artificialisés) et donc les bassins les plus à risques d'engendrer une contamination des eaux. Une analyse plus poussée pourrait prendre en compte les stations d'épuration des eaux urbaines et des fromageries locales. L'utilisation des registres parcellaires graphiques (au lieu de la base de données *Corine Land Cover*) pourrait également permettre de préciser les relations entre l'occupation des sols (types de culture ou d'élevage) avec la physico-chimie de l'eau des sources.

Enfin une analyse distincte entre hautes et basses eaux pourrait être associée à l'analyse des débits pour hiérarchiser les bassins les plus à risques selon les périodes hydrologiques.



## 6. Conclusion

L'objectif de ces travaux est d'obtenir une meilleure compréhension de l'organisation spatiale et du fonctionnement des systèmes karstiques du bassin de la Loue, en utilisant différentes approches.

L'analyse des débits des principaux cours d'eau et de leurs affluents (sources et ruisseaux latéraux) permet d'identifier et de hiérarchiser les secteurs les plus impactés par les systèmes souterrains (apport ou perte). Cette analyse permet également de préciser le fonctionnement de certains systèmes, comme celui de réseaux Brême-Maine-Ecoutot.

La méthodologie appliquée pour la délimitation des bassins permet d'être reproductible et d'utiliser les délimitations comme support pour de prochaines études. Elle manque encore toutefois de précision et pourrait être perfectionnée, notamment par l'utilisation d'un modèle géologique 3D du secteur.

L'analyse statistiques sur les interactions eau – occupation des sols permet de confirmer l'origine des nitrates et donc des pollutions observées lors des dernières décennies. L'analyse pourra être perfectionnée afin de préciser cette origine, notamment sur les types de cultures et d'élevage.

L'analyse sur les interactions eau – roche ne permet pas de montrer de réelles conclusion. L'utilisation des couches géologiques affleurant au sein des bassins fausse l'analyse. Là encore, l'utilisation d'un modèle géologique 3D permettrait de poursuivre l'analyse.

Les travaux réalisés améliorent les connaissances sur les systèmes karstiques du bassin de la haute Loue. Une analyse croisée entre les campagnes de jaugeages des débits et de mesure à haute fréquence de paramètres physico-chimiques de l'eau de la Loue pourra être réalisée pour améliorer les connaissances sur les échanges au sein du lit mineur.

## 7. Bibliographie

- Aquilina L, Ladouche B et Dörfliger N** Water storage and transfer in the epikarst of karstic systems during high flows periods. *Journal of Hydrology* 327(3), 472-485. - 2006.
- Bakalowicz M** Karst groundwater : a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal* 13(1), 148-160. - 2005.
- Bichet V et Campy M** Montagnes du Jura - Géologie et paysages. NEO Editions, 293p. - 2008.
- Cabinet Reilé** Bassin versant du Lison - Périmètre de protection des captages Nans-sous-Saint-Anne. - 2005.
- Cabinet Reilé** Etude des affluents du la Loue - 1998-1999.
- Cabinet Reilé.** Campagnes de reconnaissance des pertes du Doubs par traçages - 2018.
- Charlier J.-B. Desprats J.-F., Ladouche B.** Appui au SCHAPI 2014 - Module 1 - Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique dans les crues de la Loue à Chenecey-Buillon, Rapport BRGM/RP-63844-FR, 116p, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-63844-FR.pdf> [Rapport]. - 2014.
- Charlier Jean Baptiste [et al.]** NUTRI-Karst - Réponses des agro-hydro-systèmes du massif du Jura face au changement climatique et aux activités anthropiques.. - 2023.
- Chauve Pierre** Chapitre IX. Jura, in: *Aquifères et Eaux souterraines en France*. Roux, J.Cl., (Ed.), AIHIAH, BRGM Editions, Tome 2, pp 561-590. - 2006.
- Chen Zhao, Auler Augusto et Bakalowicz Michel** The world karst aquifer mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology Journal* 25(3).. - 2017.
- Comité de bassin Rhône Méditerranée** Conseil scientifique du comité de bassin Rhône Méditerranée, avis sur l'état de la rivière Loue. - 2012.
- Dörfliger N et Plagnes V** Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPriKa. Avec la collaboration de K. Kavouri et J. Gouin ; BRGM RP- 57527-FR, 105pp., 55 ill., 4ann.. - 2009.
- DREAL Bourgogne-Franche-Comté** Campagne de jaugeage ponctuel Loue amont du 23/03/2022.. - 2022.
- DREAL Bourgogne-Franche-Comté** Descriptif travaux vacation juillet-août 2020.
- Ford Derek et Williams Paul** *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons.. - 2013.
- Goldscheider N et Drew D** *Methods in Karst Hydrogeology : IAH : International Contributions to Hydrogeology*, 26. CRC Press.. - 2007.
- Hydro Gestion** Campagne de jaugeage en basses-eaux sur les rivières du Doubs, de la Loue, du Lison et de la Brême. Rapport de terrain.. - 2022.

**Hydro Gestion** Campagne de jaugeage en hautes-eaux et basses-eaux sur les rivières du Doubs, de la Loue, du Lison et de la Brême. Rapport de terrain.. - 2021.

**Jeannin Pierre-Yves [et al.]** Impact of global change on karst groundwater mineralization in the Jura Mountains. Science of the Total Environment 541: 1208-1221. DOI:10.1016/j.scitotenv.2015.10.008. - 2016.

**Kiraly L** Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach. Bulletin d'Hydrogéologie 16, 77-98. - 1998.

**Le Mesnil Martin** Signatures hydrologiques des bassins karstiques. - 2021.

**Mudry Jacques** Apport du traçage physico-chimique à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. - 1987.

**Villeneuve Aurélie [et al.]** Rapport d'expertise sur les mortalités de poissons et les efflorescences de cyanobactéries de la Loue. Etude du fonctionnement de la Loue et de son bassin versant. Rapport final. Office national de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) ; Université Pier. - 2012.

## 8. Référence web

DREAL Bourgogne Franche-Comté, 2023. Traçages des eaux souterraines. [en ligne] <<https://cartes.ternum-bfc.fr/?config=apps/dreal-bourgogne-franche-comte/carte-eau.xml#>> (consulté le 29/06/2023).

Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, CORINE Land Cover, 2018. [en ligne] <<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0>> (consulté le 27/07/2023)

Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, Géorisques, 2023. [en ligne]. <<https://www.georisques.gouv.fr/inventaire-des-cavites-souterraines>> (consulté le 18/07/2023).

Préfet du Doubs, 2023. Cartographie des risques naturels et technologiques dans le département du Doubs. [en ligne]. <<http://www.doubs.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite-et-protection-de-la-population/Risques-majeurs/Cartographie-des-risques-naturels-et-technologiques-dans-le-departement-du-Doubs>> (consulté le 17/08/2023)

Sandre, 2019. Cours d'eau – Métropole 2019 – BD Topage ®. [en ligne]. <<https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search#/metadata/3b3d3c56-d9b6-4625-a57e-ba054e798274>> (consulté le 07/06/2023)

## 9. Liste des figures

Figure 1 : Schéma conceptuel du milieu karstique des plateaux du massif du Jura (Bichet, et al., 2008).....	2
Figure 2 : Situation géographique de la zone d'étude (Fond SCAN 100@ IGN) .....	3
Figure 3 : Carte géologique du Jura (1/1 000 000 BRGM).....	4
Figure 4 : Log géologique du massif du Jura (Chauve, 2006) et localisation des principaux aquifères , aquicludes et sources des bassin Loue - Doubs (Charlier, et al., 2014) .....	1
Figure 5 : Localisation des points de mesures des campagnes de jaugeages (Cabinet Reilé, 1998-1999) (Hydro Gestion, 2021) (Hydro Gestion, 2022) .....	3
Figure 6 : Correction du débit de la Loue (vasque) en basses eaux 1998.....	4
Figure 7 : Logigramme synthétisant la méthodologie appliquée pour la délimitation des bassins hydrogéologiques .....	7
Figure 8 : Débits en fonction de la distance à la source des cours d'eau, campagnes BRGM. a : Basses eaux (09/2022). b : Hautes eaux (01//2021).....	10
Figure 9 : Synthèse des débits différentiels. Campagnes BRGM hautes et basses eaux .....	11
Figure 10 : Synthèse des débits différentiels par kilomètres de linéaire. Hautes et basses eaux. ....	12
Figure 11 : Taux de variation entre les surfaces d'alimentation calculées et les surfaces des bassins versants topographiques. Une surface en rouge-orangée sur la figure a un taux de variation négatif. La surface calculée est donc inférieure à la surface du bassin topographique. ....	13
Figure 12 : Débit et part relative des eaux souterraines (ESO), des eaux de surface (ESU) et de la différence entre le débit à la station de Chenecey-Buillon et le débit total jaugé des sources et affluents. a. Hautes eaux. b. Basses eaux.....	13
Figure 13 : Débits cumulés des sources et affluents et débits de la Loue à Vuillafans et Chenecey-Buillon. <b>a.</b> Hautes eaux (02/1999) <b>b.</b> Basses eaux (07/1998). ....	14
Figure 14 : Carte de synthèse des bassins délimités .....	15
Figure 15 : Fiche de synthèse – Bassin hydrogéologique de la source de la Loue .....	16
Figure 16 : Part relative au débit total jaugé et débits des sources et affluents de la Loue et du Lison. a : Hautes eaux (02/1999) b : Basses eaux (07/1998).....	22
Figure 17 : Contribution relative des sommes des débits des affluents et sources jaugés par la cabinet Reilé par tronçon de cours d'eau des campagnes réalisées par le BRGM. a : Basses eaux. b : Hautes eaux .....	23

Figure 18 : Débit différentiel de la campagne de basses eaux du BRGM (09/2022) et somme des débits des sources et affluents de la campagne du cabinet Reilé (07/1998) par tronçon .....	24
Figure 19 : Débit différentiel de la campagne de hautes eaux du BRGM (01/2021) et somme des débits des sources et affluents de la campagne du cabinet Reilé (02/1999) par tronçon .....	24
Figure 20 : Synthèse de l'analyse des débits. Le débit de la Loue à Chenecey fait office de débit de référence. ....	26
Figure 21 : Plan factoriel F1-F2 de l'ACP sur les interactions eau – occupation du sol. 70.% de la variance exprimée. ....	28
Figure 22 : Plan factoriel F1-F2 de l'ACP sur les interactions eau - roche. 52 % de la variance exprimée .....	29

## 10. Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des données utilisées pour la délimitations des bassins hydrogéologiques. .....	6
Tableau 2 : matrice de corrélation de l'ACP portant sur les interactions eau - occupation du sol .....	17

## 11. Liste des annexes

**Annexe 1** : Correction des débits, campagnes BRGM

**Annexe 2** : Synthèse des débits mesurés et corrigés des campagnes BRGM

**Annexe 3** : Synthèse des débits de la campagne DREAL

**Annexe 4** : Synthèse des données physico\*chimiques de l'eau des sources

**Annexe 5** : Données d'analyse des débits des campagnes de mesures BRGM et DREAL

**Annexe 6** : Synthèse des débits différentiels, campagne de mars 2022, DREAL

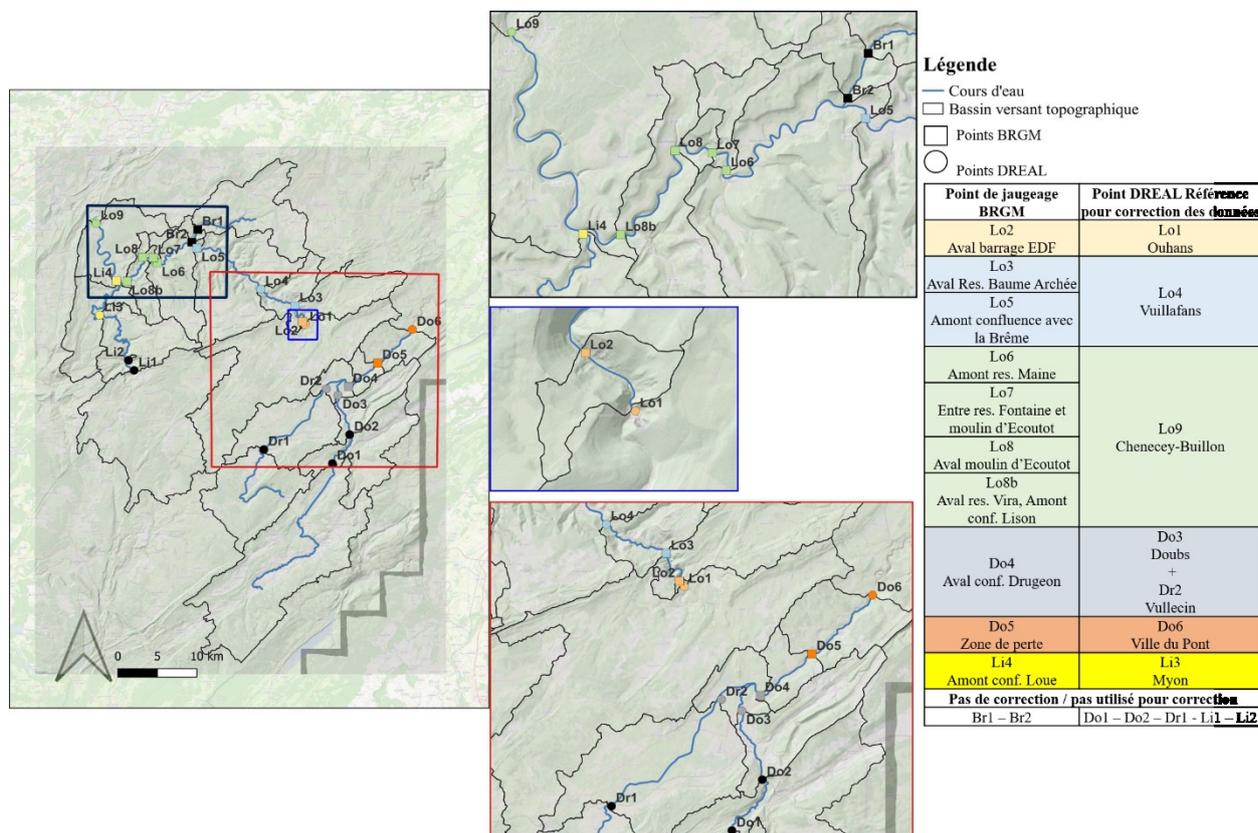
**Annexe 7** : Données de calcul du taux de variation entre les surfaces des bassins versant topographiques et les surfaces d'alimentation estimées

**Annexe 8** : Altitudes et géologie des bassins délimités

**Annexe 9** : Matrice de corrélation de l'ACP portant sur les interactions eau - roche

# Annexe 1 Correction des débits, campagnes BRGM

Les données des deux campagnes ont été corrigées pour compenser les variations de débits sur les périodes de mesures. Chaque point de jaugeage a été affilié à la station DREAL la plus proche pour la correction (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).



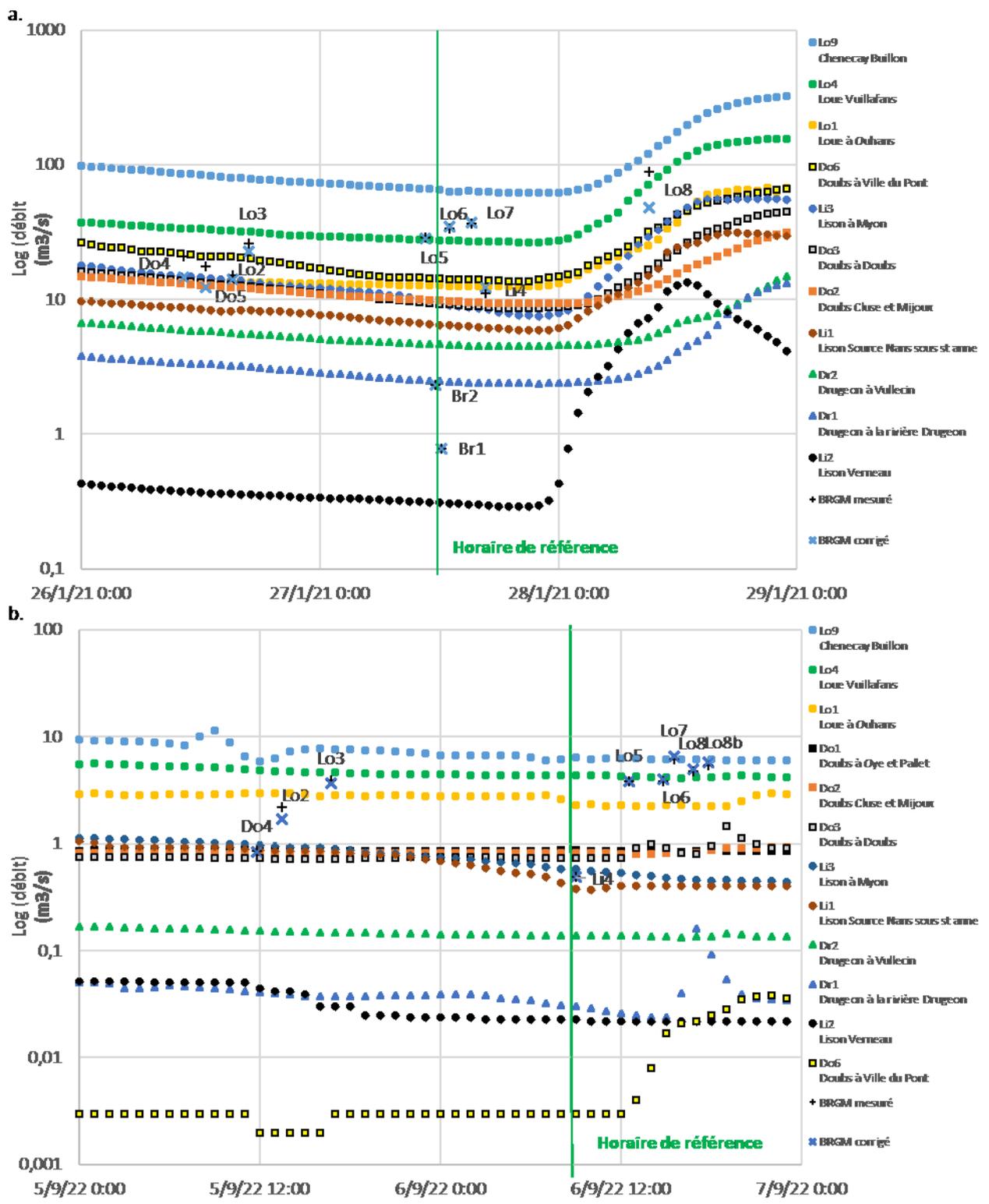
Un horaire de référence a été choisi pour la sélection des valeurs de débits des stations DREAL et pour la correction des débits mesurés. Les deux horaires de référence (le 27/01/2021 à 12h00 en hautes eaux et le 06/09/2022 à 09h00 en basses eaux) ont été définis sur une période lors de laquelle les débits sont relativement stables sur les stations hydrométriques de la DREAL (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La correction des données a été réalisée suivant la formule :

$$\text{Débit corrigé} = \frac{\text{Débit mesuré} * Q_{\text{href DREAL}}}{Q_{\text{DREAL}}}$$

Avec :

$Q_{\text{href DREAL}}$  : le débit à la station DREAL de référence à l'heure de référence

$Q_{\text{DREAL}}$  : le débit à la station DREAL à l'heure de mesure



Débits mesurés, corrigés et variation des débits aux stations DREAL lors des campagnes de hautes eaux (a) et basses eaux (b)

## Annexe 2 Synthèse des débits mesurés et corrigés des campagnes BRGM

Source de la donnée	Point	Cours d'eau	Libellé	Débit mesuré basses eaux (m3/s)	Débit corrigé basses eaux (m3/s)	Débit mesuré hautes eaux (m3/s)	Débit corrigé hautes eaux (m3/s)
Jaugeage BRGM	Br1	Brême	Amont du puit de la Brême	0	0	0,786	0,786
Jaugeage BRGM	Br2	Brême	Aval du puit, amont de la confluence avec la Loue	0	0	2,334	2,334
Station DREAL	Do1	Doubs	Oye-et-Pallet	-	0,863	-	-
Station DREAL	Do2	Doubs	La Cluse-et-Mijoux	-	0,81	-	9,8
Station DREAL	Do3	Doubs	Doubs	-	0,735	-	9,25
Jaugeage BRGM	Do4	Doubs	Aval de la confluence avec le Drugeon	0,854	0,867	20,95	14,704
Jaugeage BRGM	Do5	Doubs	Linéaire de perte	0	0	17,71	12,234
Station DREAL	Do6	Doubs	Ville-du-Pont	-	0,003	-	14,3
Station DREAL	Dr1	Drugeon	La Rivière-Drugeon	-	0,03	-	2,48
Station DREAL	Dr2	Drugeon	Vullecin	-	0,138	-	4,64
Station DREAL	Li1	Lison	Aval de la grotte Sarrazine	-	0,38	-	6,49
Station DREAL	Li2	Affluent du Lison	Source du Verneau en amont de la confluence avec le Lison	-	0,023	-	0,311
Station DREAL	Li3	Lison	Myon	-	0,577	-	9,36
Jaugeage BRGM	Li4	Lison	Amont de la confluence avec la Loue	0,494	0,494	11,03	12,275
Jaugeage BRGM	Lo2	Loue	Aval du barrage EDF	2,192	1,705	15,152	14,149
Jaugeage BRGM	Lo3	Loue	Aval de la résurgence de la Baume Archée	3,93	3,658	26,19	22,72
Station DREAL	Lo4	Loue	Vuillafans	-	4,31	-	27,5
Jaugeage BRGM	Lo5	Loue	Amont de la confluence avec la Brême	3,787	3,849	28,69	28,482
Jaugeage BRGM	Lo6	Loue	Amont de la source du Maine	3,796	4,007	33,39	34,607
Jaugeage BRGM	Lo7	Loue	Amont de la source de l'Ecoutot	6,192	6,548	36,42	37,391
Jaugeage BRGM	Lo8	Loue	Aval de la source de l'Ecoutot	4,705	4,975	88,97	48,087
Jaugeage BRGM	Lo8b	Loue	Amont de la confluence avec la Lison	5,42	5,732	-	-
Station DREAL	Lo9	Loue	Chenecey-Buillon	-	6,43	-	65,4

## Annexe 3 Synthèse des débits de la campagne DREAL

Source de la donnée	Code	Cours d'eau	Libellé	Débit (m3/s)
Station DREAL	Do1	Doubs	Oye-et-Pallet	2,81
Station DREAL	Do2	Doubs	Cluse-et-Mijoux	3,56
Station DREAL	Do3	Doubs	Doubs	3,16
Station DREAL	Do4	Doubs	Ville du Pont	1,59
Station DREAL	Dr1	Drugeon	Rivière Drugeon	0,203
Station DREAL	Dr2	Drugeon	Vullecin	0,502
Station DREAL	Li1	Lison	Lison [source]	0,668
Station DREAL	Li2	Affluent du Lison	Lison [source du Verneau]	0,048
Station DREAL	Li3	Lison	Myon	0,929
Station DREAL	Lo1	Loue	Ouhans	4,65
Jaugeage DREAL	Lo2	Loue	Mouthiers	7,4
Jaugeage DREAL	Lo3	Loue	Lods	7,76
Jaugeage DREAL	Lo4	Loue	Vuillafans	7,82
Jaugeage DREAL	Lo5	Loue	Ornans	8,04
Jaugeage DREAL	Lo6	Loue	Scey Maisière	8,54
Jaugeage DREAL	Lo7	Loue	Forges de Chatillon	12,07
Jaugeage DREAL	Lo8	Loue	Chenecey-Buillon	12,95

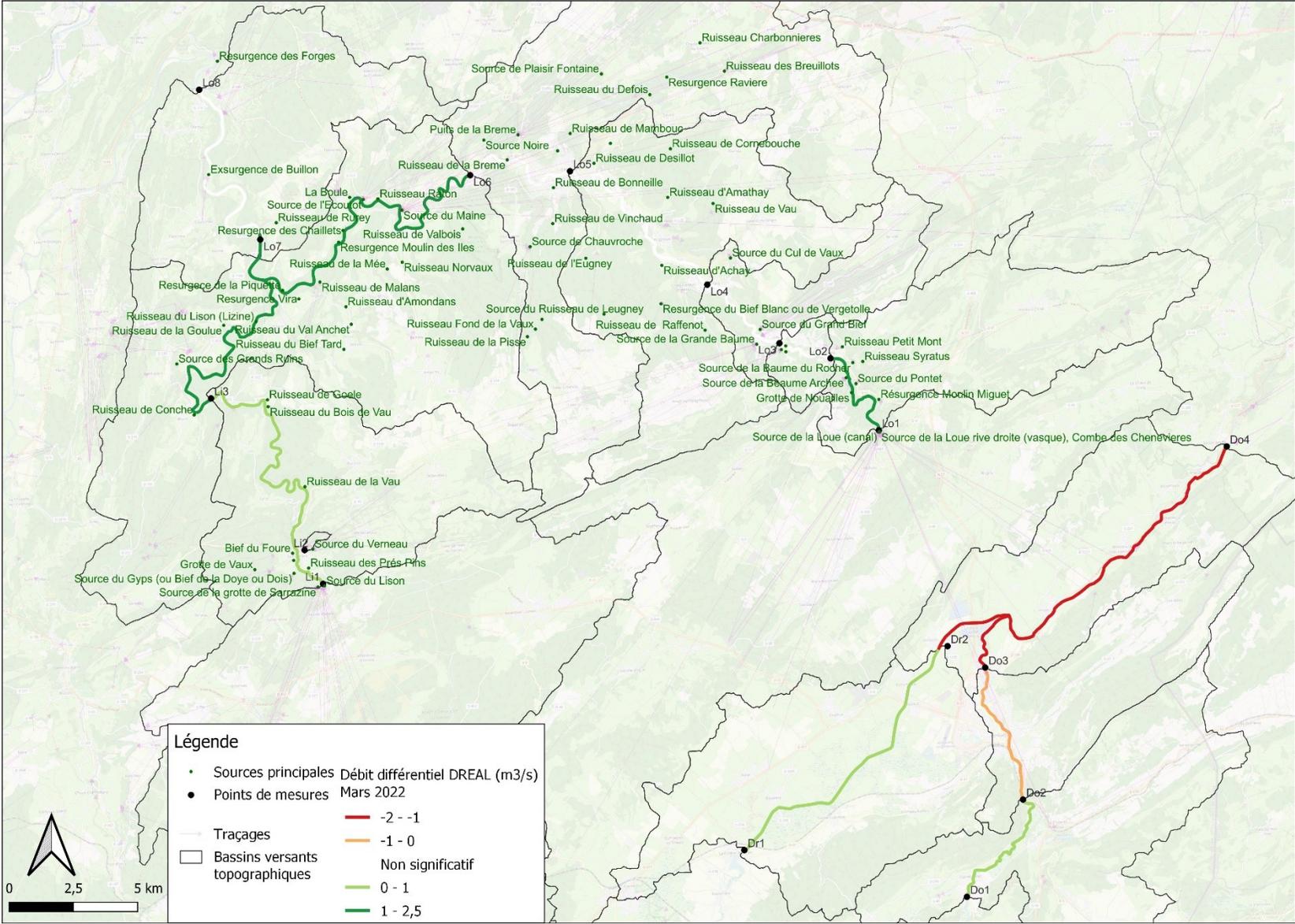
## Annexe 4 Synthèse des données physico-chimiques de l'eau des sources

	pH	O2diss	Cond (µS/cm)	T (°C)	NH4 (mg/L)	Azote Kjeldahl	Bicarbon ates	B <sub>r</sub> (µg/l)	Ca (mg/L)	COT (mg/L)	Cl (mg/L)	Mg (mg/L)	NO3 (mg/L)	PO4 (mg/L)	P tot (mg/L)	K (mg/L)	SiO2 (mg/L)	Na (mg/L)	Sr (µg/l)	SO4 (mg/L)	87Sr/86Sr	d18O	d2H
	<b>Hautes eaux</b>																						
Grand Bief	7,49	9,40	616,16	10,38	0,26	0,60	319,00	5,00	84,40	1,82	4,40	4,07	12,00	0,15	0,08	0,95	3,01	2,14	100,00	6,20	0,7076	-8,7011	-58,2789
Source du Pontet	8,16	9,18	562,41	9,24	0,01	0,25	298,00	5,00	87,20	2,09	3,60	1,96	8,60	0,10	0,04	1,30	3,56	1,87	83,50	5,80	0,7076	-8,7317	-57,9267
Baume Archée	7,18	6,60	568,03	10,45	0,01	0,25	295,00	5,00	69,40	1,72	4,30	4,24	9,20	0,07	0,03	0,85	3,12	2,03	114,00	5,70	0,7074	-8,9177	-59,7026
Dessoubre	8,43	12,03	466,00	9,10	0,01	0,25	280,00	5,00	96,70	1,76	4,60	2,73	9,70	0,04	0,03	1,63	2,12	2,87	85,10	6,80	0,7076	-8,9788	-60,0531
Bleue Malbuisson	7,38	8,85	546,70	7,70	0,01	0,25	292,00	5,00	71,60	1,49	3,00	2,58	6,10	0,01	0,01	0,58	2,08	1,43	70,50	4,10	0,7074	-9,4267	-63,7674
Verneau	8,67	11,38	466,00	9,70	0,01	0,25	277,00	5,00	92,90	1,51	4,10	5,08	13,00	0,09	0,05	1,80	3,47	2,32	104,00	11,00	0,7081	-8,6925	-57,4925
Grande Baume et bief																							
Poutot	7,29	9,92	550,03	10,07	0,01	0,25	278,00	5,00	66,80	1,99	3,50	2,42	12,00	0,09	0,04	1,14	3,13	1,57	79,90	7,80	0,7079	-8,7271	-58,1214
Ain	7,39	6,45	515,37	8,52	0,01	0,25	278,00	5,00	70,80	1,99	3,20	6,49	5,20	0,03	0,02	0,67	2,17	1,69	135,00	4,90	0,7073	-9,2225	-61,3770
Doubs	7,59	9,12	399,71	6,34	0,01	0,25	219,00	5,00	50,60	2,48	1,30	1,89	3,30	0,01	0,01	0,21	1,14	0,59	30,60	1,60	0,7074	-9,7655	-64,8515
Reverotte	8,48	11,28	433,00	7,90	0,01	0,25	242,00	5,00	83,90	1,43	4,70	2,88	11,00	0,01	0,02	1,58	2,38	2,98	67,60	8,10	0,7077	-8,4367	-56,5135
Lison et grotte Sarrazine	7,80	10,31	472,00	9,40	0,01	0,65	291,00	5,00	98,30	2,15	2,65	2,24	8,35	0,01	0,03	0,94	3,27	1,48	119,50	6,15	0,7076	-8,8022	-58,1898
Brême Maine Ecoutot	7,84	10,47	546,12	9,03	0,01	0,37	270,33	5,00	74,23	1,71	4,80	2,70	10,90	0,04	0,03	1,20	2,46	2,79	80,20	6,33	0,7076	-8,4256	-56,2302
Loue (vasque + canal)	7,52	9,08	#N/A	9,90	0,01	0,25	263,50	8,05	63,30	1,87	8,00	3,52	5,55	0,05	0,04	0,96	2,10	4,45	100,55	5,20	0,7074	-8,9665	-60,8584
	<b>Basses eaux</b>																						
Grand Bief	7,90	10,01	562,00	11,10	0,12	0,50	297,00	10,00	101,00	1,76	14,00	5,30	26,00	0,13	0,06	2,22	3,50	7,75	134,00	11,00	0,7075	-8,5334	-56,2406
Source du Pontet	8,19	10,72	526,00	9,50	0,01	0,50	279,00	10,00	98,30	2,45	13,00	2,90	24,00	0,20	0,08	2,97	3,49	6,98	128,00	9,10	0,7075	-8,6973	-57,1934
Baume Archée	7,40	5,54	498,00	10,60	0,01	0,50	283,00	10,00	89,50	1,63	6,60	5,44	16,00	0,08	0,03	1,63	3,24	3,36	170,00	7,60	0,7074	-8,5641	-56,7510
Dessoubre	7,39	8,90	553,00	9,90	0,01	0,80	269,00	12,40	97,20	4,08	15,00	4,23	34,00	0,45	0,17	3,68	3,35	8,45	130,00	14,00	0,7075	-8,2617	-55,0491
Bleue Malbuisson	7,69	10,09	465,00	7,70	0,01	0,50	278,00	10,00	87,10	1,60	4,90	3,76	9,20	0,02	0,01	1,02	2,40	2,47	115,00	4,70	0,7074	-9,4238	-62,7115
Verneau	8,30	10,53	447,00	11,40	0,03	0,90	196,00	15,50	75,70	5,10	10,00	4,08	44,00	0,38	0,20	4,23	3,70	5,10	90,90	15,00	0,7081	-7,4518	-46,8866
Grande Baume et bief																							
Poutot	7,59	10,11	512,00	10,70	0,01	0,50	271,00	10,00	96,00	2,27	9,30	4,56	25,00	0,19	0,08	2,54	3,80	5,24	140,00	11,00	0,7077	-8,5498	-56,2959
Ain	7,74	8,70	546,00	9,90	0,01	0,50	322,00	10,00	89,90	1,26	6,10	13,70	8,30	0,02	0,01	1,07	3,83	3,00	961,00	14,00	0,7072	-9,2654	-61,8882
Doubs	7,88	10,51	333,00	6,50	0,01	0,50	200,00	10,00	63,50	2,13	2,30	2,69	7,10	0,02	0,01	0,29	1,35	1,16	46,70	2,40	0,7073	-9,2346	-60,7638
Reverotte	8,44	9,40	398,00	14,00	0,01	0,50	213,00	10,00	70,30	1,43	9,90	2,77	11,00	0,02	0,01	1,57	2,14	4,80	63,20	9,80	0,7077	-8,0493	-53,3041
Moulin Miguët	8,22	9,86	475,00	13,30	0,01	0,50	259,00	10,00	86,90	2,45	10,00	3,19	20,00	0,21	0,09	2,05	3,15	5,56	167,00	8,20	0,7074	-8,5727	-56,3457
Lison et grotte Sarrazine	8,87	8,69	456,50	9,65	0,01	0,25	267,00	5,00	87,85	2,61	4,65	2,80	9,10	0,05	0,03	1,18	2,91	2,54	136,50	8,25	0,7075	-8,2953	-53,2920
Brême Maine Ecoutot	7,65	8,09	513,50	12,90	0,01	0,55	280,00	6,60	91,30	1,52	14,50	4,26	12,00	0,09	0,04	2,21	3,56	8,79	125,00	10,35	0,7075	-8,5498	-57,1414
Loue (vasque + canal)	7,82	8,63	452,00	11,77	0,00	0,00	238,67	10,83	76,77	1,54	17,00	4,94	7,80	0,07	0,03	1,77	2,49	9,89	169,33	8,37	0,7074	-8,5945	-58,4870

## Annexe 5 Données d'analyse des débits des campagnes BRGM et DREAL

Tronçon	Basses eaux (septembre 2022)			Hautes eaux (janvier 2021)			Mars 2022		
	Débit différentiel ou débit aux points amonts (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Contribution au débit de la Loue à Chenecey (%) ou pertes par rapport au débit amont	Débit différentiel par linéaire (m <sup>3</sup> /s/km)	Débit différentiel ou débit aux points amonts (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Contribution au débit de la Loue à Chenecey (%) ou pertes par rapport au débit amont	Débit différentiel par linéaire (m <sup>3</sup> /s/km)	Tronçons	Débit différentiel ou débit aux points amonts (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Contribution au débit de la Loue à Chenecey (%) ou pertes par rapport au débit amont
Br1	0	0	-	0,786	1% (34% débit de la Brême)	-	-	-	-
Br1 - Br2	0	0%	0	1,39	2%	0,75	-	-	-
Do1	0,863	-	-	-	-	-	Do1	2,81	-
Do1 - Do2	Non significatif	-	Non significatif	9,8 (débit Do2)	-	-	Do1 - Do2	0,4315	-
Do2 - Do3	Non significatif	-	Non significatif	Non significatif	-	Non significatif	Do2 - Do3	-0,064	-10%
Do3 - Do4	Non significatif	-	Non significatif	Non significatif	-	Non significatif	Do3 - Do4	-1,809	-56%
Do4 - Do5	-0,82	-100%	-0,16	-1,12	-7,6%	-0,22			
Do5 - Do6	0,003	-	0,0004	0,74	-	0,11			
Dr1	0,03	-	-	2,48	-	-	Dr1	0,203	-
Dr1 - Dr2	0,1	-	0,01	1,80	-	0,15	Dr1 - Dr2	0,26375	-
Li1	0,38	6% (77% débit Lison av. conf. Loue)	-	6,49	10% (53% débit Lison av. conf. Loue)	-	Li1	0,668	5% (72% débit Lison Myon)
Li2	0,023	<1% (4,6% débit Lison av. conf. Lison)	-	0,311	<1% (2,5% débit Lison av. conf. Lison)	-	Li2	0,048	<1%
Li1 - Li3	0,13	1,9%	0,01	1,75	2,7%	0,12	Li1 - Li3	0,13075	1% (14% débit Lison Myon)
Li3 - Li4	-0,03	-5%	-0,002	1,83	2,8%	0,17	-	-	-
Lo2	1,706	27%	-	14,15	22%	-	Lo1	4,65	36%
Lo2 - Lo3	1,68	26%	0,49	6,72	10%	1,95	Lo1 - Lo2	2,148	17%
Lo3 - Lo4	0,25	4%	0,04	2,27	3%	0,40	Lo2 - Lo3	Non significatif	-
Lo4 - Lo5	-0,05	-1%	-0,004	Non significatif	-	Non significatif	Lo3 - Lo4	Non significatif	-
Lo5 - Lo6	Non significatif	-	Non significatif	0,52	<1%	0,06	Lo4 - Lo5	Non significatif	-
Lo6 - Lo7	2,01	31%	1,11	Non significatif	-	Non significatif	Lo5 - Lo6	Non significatif	-
Lo7 - Lo8	-0,9	-15%	-0,68	6,42	10%	4,39	Lo6 - Lo7	1,524	12%
Lo8 - Lo8b	0,22	3%	0,04	Non significatif	-	Non significatif	Lo7 - Lo8	Non significatif	-
Lo8b - Lo9	Non significatif	-	Non significatif		-				

# Annexe 6 Synthèse des débits différentiels, campagne de mars 2022, DREAL



## Annexe 7 Données de calcul du taux de variation entre les surfaces des bassins versant topographiques et les surfaces d'alimentation estimées

Point	Station DREAL	Surface sous - bassin topographique (km2)	Module 2000-2019 (m3/s)	Module différentiel (m3/s)	Module différentiel spécifique (m3/s/km2)	Surface d'alimentation calculée (km2)	Taux de variation (%)
Do1	Oye-et-Pallet	241,858	6,305	5,990	0,025	206,553	-14,597
Do2	Cluse-et-Mijoux	79,807	7,417	0,426	0,005	14,684	-81,600
Do3	Doubs	43,624	7,829	Non significatif	Non significatif	Non significatif	Non significatif
Do4	Ville-du-Pont	70,475	11,578	Non significatif	Non significatif	Non significatif	Non significatif
Dr1	Rivière-Drugeon	98,362	1,632	1,550	0,016	53,452	-45,658
Dr2	Vullecin	87,280	3,170	1,298	0,015	44,774	-48,700
Li1	Lison source	230,643	4,897	4,653	0,020	160,433	-30,441
Li2	Source du Verneau	0,372	0,412	0,391	1,052	13,483	3529,085
Li3	Myon	73,557	7,195	1,26	0,017	43,464	-40,91
Lo1	Ouhans	211,078	9,207	8,747	0,041	301,621	42,896
Lo2	Vuillafans	87,560	20,385	9,698	0,111	334,418	281,928
Lo3	Chenecey	468,864	46,797	15,499	0,033	534,439	13,986

# Annexe 8 Altitudes et géologie des bassins délimités

	Exutoire	Surf tot						calc_cret_sup	mar_cret_inf	calc_cret_inf	calc_Malm_jur_s			mar_jur_sup_		calc_Dogger_jur_m	mar_jur_moy	mar_lias	calc_jur_i		autres
		alt_min	alt_q1	alt_med	alt_q3	alt_max	alt_moy				up	p	oxf	oy	mar_jur_sup_				mar_jur_sup_	nf	
UH (Charlier, 2014)	Grand Bief	42	360	698	724	744	883	714	0,12	8,4	1,4	37	41,1	2,4	7,1	0	0	0	0	0	
	Baume du Rocher	10,4	410	780	808	835	900	803	0	0	0	18,9	0	19,8	59,3	0	1,8	0	0	0,2	
	Moulin Miguet	39,5	482	798	838	935	1139	863	0	1,7	0,8	50,5	17,2	8,1	8,5	0	0	0	0	13,2	
	Source du Pontet	9,5	486	729	759	787	897	753	0	0	0,7	57,9	25	9,5	2,6	0	0	0	0	4,3	
	Brême Maine	275	303	544	591	658	974	607	0	0	0	48,5	14,7	21,3	14,3	0	0	0	0	1,2	
	Ecoutot	130	383	747	824	835	933	797	0	0,3	1,3	54,5	16,9	19,8	0,2	0	0	0	0	7,1	
	Baume Archée																				
	Dessoubre																				
	Bleue Malbuisson																				
	Tuffière	10,4	556	789	827	864	920	818	0	0,1	0,1	4,4	0	12,4	80,8	0	2	0	0	0,2	
	Lison et grotte	137,7	385	660	701	751	903	712	0	0	0	17	1	25,6	41,6	5,6	0	0	0	9,2	
	Sarrazine																				
Verneau	16,9	512	707	738	776	882	742	0	0	0	21,3	19	7,8	26,9	0	18,6	5,9	0	0,5		
Grande Baume et bief Poutot	43,6	357	660	688	753	908	703	0,2	1,3	1,7	28	4,2	2,9	14,5	0	7,1	0,8	0	0,5		
Ain																					
Doubs																					
Reverotte																					
Loue (vasque + canal)	196	520	806	853	883	1121	844	0	0	1,3	55,3	33,3	7	1,8	0	0	0	0	1,3		
BH min	Grand Bief	35,7	358	709	734	762	883	726	0,2	9,9	1,6	44,6	20,6	2,8	17,3	0	0,5	0	0	2,4	
	Baume du Rocher	7,1	437	775	807	837	900	803	0	0	0	13,7	0	15,4	69,8	0	1	0	0	0,2	
	Moulin Miguet	43,2	461	808	880	1000	1139	891	0	1,9	0,8	48,3	16,5	8,7	12	0	0	0	0	11,8	
	Source du Pontet	12,9	398	745	776	801	923	772	0	0	0,5	58,8	21,8	12,3	2,1	0	0	0	0	4,4	
	Brême Maine	289,5	303	551	598	676	974	614	0	0	0	45	18,2	20,6	15,2	0	0	0	0	1	
	Ecoutot	157	383	748	824	836	933	799	0	0,2	1	50,6	24	17,4	0,5	0	0	0	0	6,2	
	Baume Archée	59	585	771	816	887	1090	830	0	0,5	0,4	33,6	44,8	16,3	3,6	0	0	0	0	0,8	
	Dessoubre																				
	Bleue Malbuisson	18,8	874	1046	1268	1460	1141	0	0,5	1,1	94,5	0	0,1	0	0	0	0	0	0	3,8	
	Tuffière	11,3	550	798	831	866	920	823	0,2	0,2	0,3	3,3	0	6	84,8	0	5,2	0	0	0,1	
	Lison et grotte	140,7	383	662	704	753	903	714	0	0	0	19,8	2,2	23,2	40,5	5,3	0	0	0	8,9	
	Sarrazine																				
Verneau	15,3	374	713	743	781	881	747	0	0	0	22,8	13,8	8,3	29,3	0	19	6,4	0	0,3		
Grande Baume et bief Poutot	41	359	660	686	738	908	698	0	1,4	1,7	29,7	45,2	2,1	12	0	6,6	0,9	0	0,2		
Ain	85,1	692	879	940	1005	1230	957	0	0	1,3	53,8	0,5	0,6	0	0	0	0	0	43,8		
Doubs	54,4	937	1158	1217	1270	1414	1214	0	0	0	85,6	0	0	0	0	0	0	0	14,3		
Reverotte	58,9	586	709	724	744	890	736	0	0	0	42,1	45,4	11,7	0,2	0	0	0	0	0,5		
Loue (vasque + canal)	135	520	830	863	891	1093	855	0	0	1,9	54	31,9	9,7	1,3	0	0	0	0	1,2		
BH max	Grand Bief	42,3	358	706	731	756	900	725	0,2	8,3	1,4	37,7	32,7	2,4	14,9	0	0,4	0	0	2	
	Baume du Rocher	10,9	431	782	809	836	900	806	0	0	0	26,1	0,7	14,6	56,7	0	1,7	0	0	0,1	
	Moulin Miguet	48,3	471	803	874	998	1139	888	0	1,7	0,7	47,7	16	9,2	14	0	0	0	0	10,7	
	Source du Pontet	43,3	398	791	835	972	1139	876	0	1,8	0,9	47,1	14,6	12,1	11,7	0	0	0	0	11,8	
	Brême Maine	311	303	551	600	682	974	616	0	0	0	44,1	17,4	20,2	17,2	0	0	0	0	1	
	Ecoutot	180	383	747	824	838	933	799	0	0,2	0,9	51,2	22,5	15,6	2,9	0	0	0	0	6,7	
	Baume Archée	82	575	785	847	924	1090	856	0	0,5	0,3	39,8	38,9	17,4	2,6	0	0	0	0	0,5	
	Dessoubre																				
	Bleue Malbuisson	23,8	874	1047	1086	1255	1461	1146	0	0,4	1,1	94,3	0	0,3	0	0	0	0	0	3,9	
	Tuffière																				
	Lison et grotte	151,7	381	663	706	760	903	717	0	0	0	21,1	2,2	23	38,9	6,3	0	0	0	8,5	
	Sarrazine																				
Verneau	17,2	374	708	741	780	881	743	0	0	0	22,7	18,2	7,5	26,5	0	19,1	5,8	0	0,1		
Grande Baume et bief Poutot	43,8	358	660	687	749	908	702	0	1,3	1,7	29	43,6	2	14,8	0	6,4	0,8	0	0,2		
Ain	100,3	697	873	937	1010	1230	954	0	0	1,1	53,3	2	0,7	0	0	0	0	0	42,9		
Doubs	71,3	937	1161	1208	1262	1414	1211	0	0	0	85,7	0	0	0	0	0	0	0	14,3		
Reverotte	82	582	709	726	753	891	738	0	0	0	38,3	44,5	14,5	1,3	0	0	0	0	1,4		
Loue (vasque + canal)	210	520	825	861	909	1318	870	0	0,4	2,7	55,8	28,7	7,7	2,1	0	0	0	0	2,7		

## Annexe 9 Matrice de corrélation de l'ACP portant sur les interactions eau - roche

Variables	alt_med	Calc cret	calc_Mal mar_cret	m_jur_su p	mar jur sup + oxf	calc Dogger + mar jur moy	mar_li as	autres + calc jur inf	Cond_fin al	Bicarbonates	Ca	Cl	Mg	K	SiO2	Na	Sr_(µg/l)	SO4	87Sr/86Sr	d18O
alt_med	<b>1</b>	<b>0,649</b>	-0,121	0,092	<b>-0,684</b>	-0,485	-0,221	0,310	-0,248	-0,299	-0,530	-0,403	-0,065	<b>-0,693</b>	<b>-0,669</b>	-0,425	-0,404	<b>-0,708</b>	<b>-0,578</b>	<b>-0,930</b>
Calc cret		<b>1</b>	0,024	<b>-0,587</b>	-0,438	-0,216	-0,115	-0,088	0,190	0,187	-0,139	-0,184	-0,148	-0,329	-0,226	-0,225	-0,210	-0,280	-0,213	-0,412
mar_cret			<b>1</b>	-0,050	-0,089	0,134	-0,069	-0,170	0,562	0,527	0,113	0,047	0,127	-0,091	0,169	-0,052	0,075	0,015	0,023	0,136
calc_Mal m_jur_su p				<b>1</b>	-0,056	-0,432	-0,314	0,278	-0,191	-0,473	-0,514	-0,022	-0,001	-0,330	-0,365	-0,027	-0,262	-0,475	-0,419	-0,240
mar jur sup + oxf calc Dogger + mar jur moy					<b>1</b>	-0,029	-0,034	<b>-0,614</b>	0,022	0,025	0,356	<b>0,575</b>	-0,252	<b>0,706</b>	0,287	<b>0,625</b>	0,015	0,515	0,397	<b>0,687</b>
mar_lias autres + calc jur inf						<b>1</b>	0,423	-0,121	-0,041	0,301	<b>0,576</b>	-0,154	-0,027	0,255	0,544	-0,127	0,364	0,451	0,475	0,376
Cond_fin al							<b>1</b>	-0,073	-0,143	0,014	0,239	-0,015	0,325	0,497	0,432	-0,018	0,117	<b>0,723</b>	<b>0,815</b>	0,218
Bicarbonates								<b>1</b>	-0,136	-0,098	-0,219	-0,382	<b>0,633</b>	-0,432	-0,240	-0,375	0,407	-0,308	-0,424	-0,445
Ca									<b>1</b>	<b>0,832</b>	0,010	0,383	0,177	-0,068	0,500	0,095	0,393	0,037	-0,078	0,295
Cl										<b>1</b>	0,494	0,112	0,226	0,151	<b>0,682</b>	-0,005	<b>0,614</b>	0,246	0,069	0,314
Mg											<b>1</b>	0,059	0,024	<b>0,718</b>	<b>0,596</b>	0,164	0,397	<b>0,636</b>	0,492	<b>0,556</b>
K												<b>1</b>	0,195	0,418	0,085	<b>0,972</b>	0,282	0,320	0,104	0,470
SiO2													<b>1</b>	0,155	0,155	<b>0,700</b>	0,270	0,007	0,023	
Na														<b>1</b>	0,523	0,519	0,165	<b>0,892</b>	<b>0,794</b>	<b>0,764</b>
Sr_(µg/l)															<b>1</b>	0,521	0,521	<b>0,671</b>	<b>0,578</b>	<b>0,670</b>
SO4																<b>1</b>	0,226	0,364	0,148	0,500
87Sr/86Sr																	<b>1</b>	0,338	-0,007	0,299
d18O																		<b>1</b>	0,909	<b>0,764</b>
																			<b>1</b>	<b>0,637</b>

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha=0,05$

# Résumé

Situé dans le massif du Jura, la rivière de la Loue a connu une augmentation du nombre d'épisode de mortalité piscicole lié à une dégradation de la qualité de l'eau lors des dernières décennies. L'objectif du projet NUTRI-Karst est de mieux comprendre l'impact des activités anthropiques d'origine agricole ou domestique sur le devenir des nutriments dans les eaux, ce qui passe en partie par une étude approfondie pour améliorer les connaissances sur les caractéristiques hydrogéologiques des systèmes karstiques du secteur. Cette étude passe d'abord par une analyse poussée de données de débits issues de différentes campagnes pour préciser les relations entre les principaux cours d'eau et les réseaux souterrains et améliorer les connaissances sur le fonctionnement de certains systèmes. Ensuite, une méthodologie de délimitations de zones contributives au débit des principales sources karstiques a été déterminée. Elle permet d'être reproductible et d'utiliser la délimitation des bassins comme support pour de multiples analyses. Enfin, le début d'une approche statistiques montre des corrélations entre certains types d'occupations des sols comme les prairies et la teneur en nitrates de l'eau des sources. L'analyse des relations entre eau et roche ne permet pas de tirer des conclusions satisfaisantes.

**Mots clés :** aquifères karstiques, sources, échanges nappe-rivière, bassins d'alimentation, géochimie

# Abstract

Located in the Jura mountains, the Loue river has seen an increase in the number of fish mortality episodes linked to a deterioration in water quality over the last few decades. The aim of the NUTRI-Karst project is to gain a better understanding of the impact of anthropogenic activities of agricultural or domestic origin on the fate of nutrients in water, which will involve an in-depth study to improve our knowledge of the hydrogeological characteristics of the karstic systems in the area. This study will begin with an in-depth analysis of flow data from various campaigns to clarify the relationships between the main watercourses and the underground networks and improve our knowledge of how certain systems function. Secondly, a methodology for delimiting the zones that contribute to the flow of the main karstic springs was determined. It is reproducible and allows the delimitation of basins to be used as a basis for multiple analyses. Finally, the start of a statistical approach shows correlations between certain types of land use, such as grassland, and the nitrate content of spring water. The analysis of the relationship between water and rock does not allow any satisfactory conclusions to be drawn.

**Key words :** karst aquifers, springs, groundwater/river exchanges, recharge basins, geochemistry