



MASTER AGROSCIENCES
Hydrogéologie, Sol et Environnement
2^e année



Développement d'une méthodologie interdisciplinaire de
caractérisation des échanges entre nappes et rivières à
l'échelle de la région Bourgogne-Franche-Comté

GRANDVOINNET, James

Encadrement :

Mme RECCHIA Elodie & M. PAILLOU Alain

Stage réalisé à la DREAL Bourgogne Franche-Comté



Année universitaire 2019-2020

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail a nécessité la collaboration, l'aide et le soutien de nombreuses personnes pour lesquelles il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma gratitude et mes remerciements.

Je remercie en premier lieu mes deux encadrants **Mme. RECCHIA Elodie** (*Hydrogéologue - DREAL*) et **M. PAILLOU Alain** (*Chef de pôle - DREAL*) qui m'ont accordé leur confiance pour la réalisation de ce mémoire. Merci à vous de m'avoir accompagné, écouté et soutenu tout au long de ce stage.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe PQE (Pôle Qualité des Eaux), **Mathieu, Régis, Laurent, Philippe, Nathalie** pour la bonne humeur, les bons moments autour d'un café, les gateaux, les chocolats (même ceux périmés) et surtout leurs encouragements quotidiens.

Un grand merci à **Mme BOIS Marie Christine** (*DREAL*), **M. PARAN Frédéric** (*Ecole des Mines Paritech*), **M. MARMONIER Pierre** (*Ecole des Mines Paritech*), **M. CADILHAC Laurent** (*Agence de l'eau RMC*), **Mme BORNETTE Gudrun** (*Université de Franche-Comté*) et **MARC Vincent** (*Université d'Avignon*) qui m'ont accordé un peu de leur temps afin de répondre à mes nombreuses questions sur la thématique des échanges nappe/rivière. Leurs conseils précieux sont pour beaucoup dans le résultat final de ce travail.

Pour la mise à disposition des données, je tiens à remercier (une seconde fois pour certaines personnes) :

M. PAILLOU Alain (*DREAL*), pour les données physico-chimiques,

Mme. RECCHIA Elodie (*DREAL*), pour les données traçages,

M. LE BARBU Erwan (*DREAL*), pour la présentation et la mise à disposition des données hydrométriques sur la région Bourgogne Franche-Comté,

Mme. RETHORE Virginie (*BRGM*), pour les cartes piézométriques de la région Franche-Comté,

Mme BORNETTE Gudrun, (*Université de Franche-Comté*), pour les données macrophytes,

M. CAILHOL Didier (*Ingénieur d'étude et spéléologue*), pour la mise à disposition de son rapport d'études concernant la faune souterraine en Franche-Comté,

M. MALARD Florian (*Ecole des Mines Paritech*), pour les données relatives aux invertébrés souterrains,

M. BOUVIER Romain (*Equipe GéoSUD*), pour les images satellites infrarouges thermiques,

Dans un registre plus informel, je tiens également à remercier tout particulièrement **Steve** qui a pris le temps de relire une grande partie de ce mémoire, et qui s'est arraché les cheveux pour essayer de comprendre le sens souvent tortueux de mes phrases.

Je remercie aussi **Sarah**, qui m'encourage et me supporte toujours malgré mes sempiternelles lamentations.

Enfin, ces remerciements ne seraient pas complets sans mentionner ma famille pour leur soutien sans faille, et particulièrement mes parents **Anne-Marie** et **Johnny**, qui m'ont donné le goût pour les études et m'ont permis de suivre la voie que j'ai choisie. Je vous suis très reconnaissant.

AVANT-PROPOS

Ce stage de six mois a été réalisé à la **Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL)** de Besançon, dont 4 mois à mon domicile sous forme de télétravail, pendant la période de confinement.

Compte-tenu des raisons de civisme sanitaire que nous connaissons tous, le télétravail est devenu viral. Avec l'arrivée du confinement, tous les agents de la DREAL et moi-même étions contraint de s'adapter à ces nouvelles conditions de travail.

Pour ce faire, nous avons recréer un peu artificiellement les rites de bureau, comme par exemple, la pause café en visioconférence. Cela a permis de remplir la fonction de la machine à café, c'est-à-dire qu'on ne parlait pas du boulot, mais d'autre chose. On faisait une pause et on gardait tous le lien.

Même si les interactions avec mes collègues étaient plus compliquées, mon travail à domicile s'est relativement bien passé. Mes échanges réguliers et bienveillants avec ma hiérarchie m'ont permis de rester motivé et efficace.

Ainsi, j'ai pu rapidement me concentrer sur ma thématique de stage relative aux échanges nappe/rivière en région **Bourgogne-Franche-Comté (BFC)**. Cette thématique s'inscrit dans une démarche de réflexion et d'expertise scientifique avec pour ambition l'élaboration d'une méthodologie capable d'analyser et de quantifier les flux d'eau transitant entre les eaux surfaciques et les eaux souterraines, et ce à plusieurs échelles spatiales.

La méthodologie développée dans ce rapport fait intervenir plusieurs méthodes d'analyse, fondées sur plusieurs disciplines :

- Géologie,
- Métrologie,
- Hydrogéologie,
- Chimie de l'eau et isotopes radioactifs,
- Biologie végétale et animale,
- Télédétection.

Derrière le caractère pluridisciplinaire de ce travail, j'ai eu la possibilité de faire plusieurs rencontres interprofessionnelles qui m'ont aidé à intégrer de nouvelles notions et un vocabulaire scientifique plus étendu. J'ai aussi pu recevoir quelques bases techniques me permettant de créer ma propre donnée.

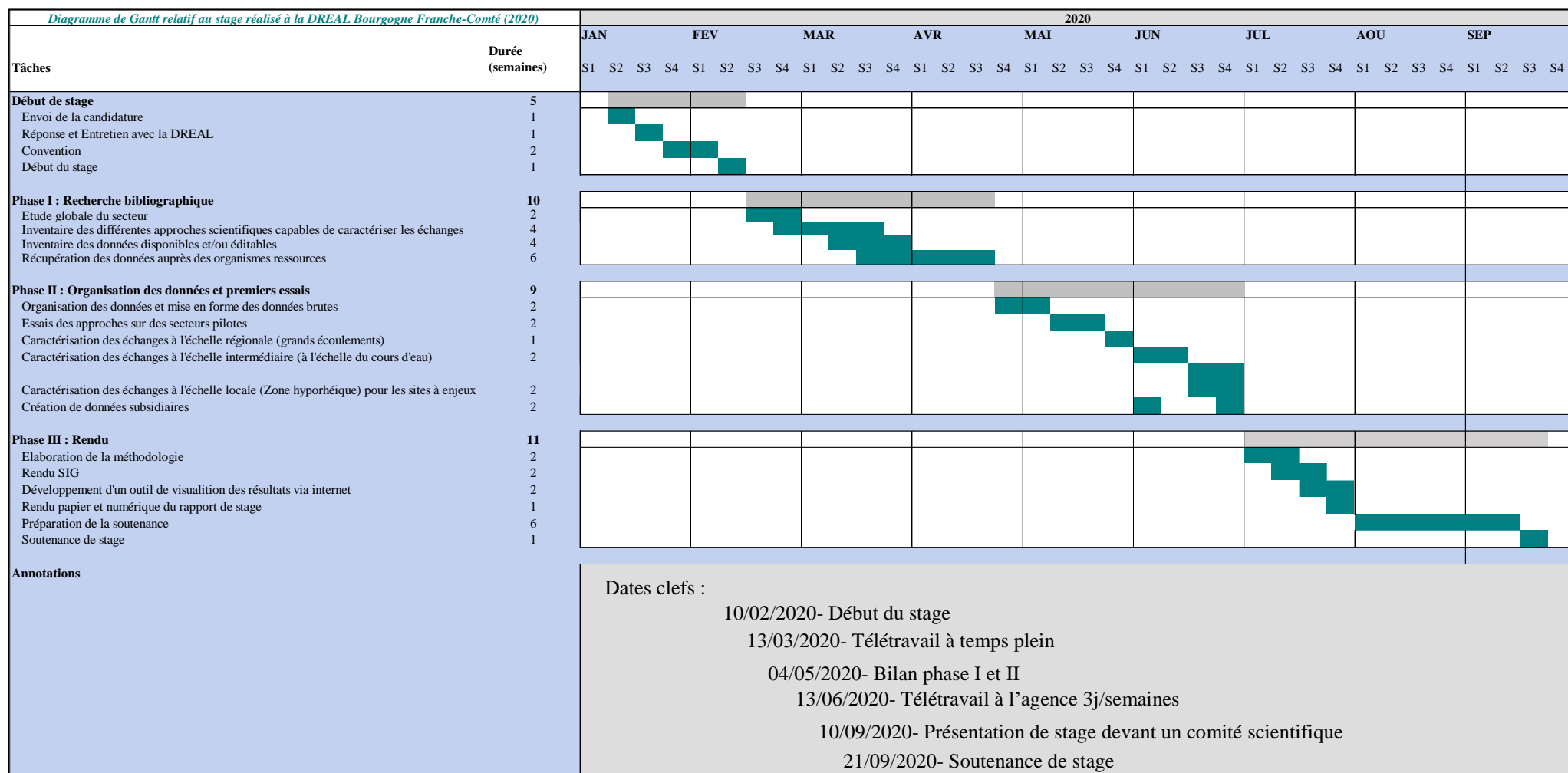
C'est le cas notamment pour les données aéroportées infrarouges thermiques (IRT), où suite à l'acquisition d'un drone personnel équipé d'une caméra thermique, j'ai pu établir des cartographies de la température de surface de quelques cours d'eau franc-comtois.

Toutes ces occasions m'ont permis d'en apprendre davantage sur la question des échanges nappe/rivière, mais aussi et surtout, de recueillir et d'analyser les points de vue de chaque spécialiste sur le sujet afin d'y dégager des axes pertinents de réflexion. Cela m'a permis de mettre en place ma propre méthodologie.

Il s'est avéré que le croisement des différentes méthodes d'analyse et des regards de spécialistes, parfois divergents, ont constitué une des tâches les plus chronophages et ardues de ce travail. La confrontation de résultats de temps à autre contradictoires mis en exergue dans ce rapport, témoigneront de la complexité à s'orienter vers une méthodologie interdisciplinaire.

Enfin, je conclus cet avant-propos par un petit bémol concernant les campagnes terrain programmées qui n'ont, hélas, pas eu lieu à cause du confinement. Cette déconvenue n'a pas porté de grand préjudice à ce travail mais a toutefois freiner significativement sa progression.

Le diagramme de Gantt ci-dessous renseigne sur la liste des tâches effectuées au cours de ce stage :



RESUME

Le travail présenté dans ce rapport est motivé par la problématique suivante :

L'adoption en octobre 2000 de la Directive cadre sur l'eau (DCE) par le Parlement européen a fait ressortir le besoin évident d'améliorer la protection de l'environnement et de pérenniser la ressource en eau. L'objectif prioritaire fixé par cette directive est l'atteinte du bon état des eaux européennes en 2015, avec un report possible en 2021, voire 2027 (dérogations avec justification). Même si à ce jour, l'objectif semble encore hors de portée, l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) affirme que la qualité des eaux européennes s'est améliorée au cours des deux dernières décennies. Ces améliorations sont en partie dues à une meilleure connaissance du fonctionnement de nos hydrosystèmes. Masse d'eau souterraine et masses d'eau de surface ne font plus l'objet d'études séparées mais sont étudiées comme un seul continuum hydrique dans lequel des échanges ont lieu. Cette vision systémique de l'hydrosystème prend tout son sens dans l'évaluation de la qualité des masses d'eau, car une eau ne peut être de bonne qualité si cette dernière interagit avec une autre qui s'avère polluée. A partir de là, une caractérisation des échanges nappe/rivière devient fondamentale pour considérer la ressource en eau dans son intégralité.

Le présent travail dont le cadre géographique est la région Bourgogne-Franche-Comté (BFC) a donc pour question centrale de déterminer comment les eaux surfaciques et souterraines interagissent. Pour ce faire, il pointe un triple objectif : (1) mieux appréhender le fonctionnement et la diversité des hydrosystèmes de la région BFC (Karst, socle, domaine alluvial et sédimentaire), (2) de caractériser les échanges nappe/rivière tant qualitativement que quantitativement en proposant une méthodologie fondée sur plusieurs méthodes d'analyse telles que : l'analyse de la géologie, l'hydro(géo)logie, la biologie, le suivi de paramètres physico-chimiques, le suivi des débits en rivières, et le traitement d'images infrarouges thermiques et (3) de créer un outil numérique de visualisation de ces échanges accessible via un lien internet.

Mots clefs : DCE, hydrosystème, interactions hydrauliques, eaux surfaciques, eaux souterraines, géologie, hydrologie, hydrogéologie, géochimie, biologie, radioactivité, images infrarouges thermiques, Bourgogne Franche Comté, méthodologie, outil numérique

ABSTRACT

The work presented in this report is motivated by the problem follow :

The adoption in October 2000 of the Water Framework Directive (WFD) by the European Parliament highlighted the obvious need to improve environmental protection and to make water resources sustainable. The priority objective set by this directive is to achieve the good status of European waters by 2015, with a possible postponement to 2021, or even 2027 (exemptions with justification). Even though to date the target still seems out of reach, the European Environment Agency (EEA) says the quality of European waters has improved over the past two decades. These improvements are partly due to a better knowledge of the functioning of our hydrosystems. Groundwater body and surface water bodies are no longer the subject of separate studies but are studied as a single water continuum in which exchanges take place. This systemic view of the hydrosystem takes on its full meaning in assessing the quality of water bodies, because water cannot be of good quality if the latter interacts with another which turns out to be polluted. From there, a characterization of the water table / river exchanges becomes fundamental to consider the water resource in its entirety.

The central question of this work, whose geographical framework is the Bourgogne-Franche-Comté (BFC) region, is therefore to determine how surface and groundwater interact. To do this, he points to a threefold objective: (1) to better understand the functioning and diversity of the hydrosystems of the BFC region (Karst, basement, alluvial and sedimentary domain), (2) to characterize the water table / river exchanges both qualitatively and quantitatively by proposing a methodology based on several methods of analysis such as: analysis of geology, hydro (geo) logy, biology, monitoring of physicochemical parameters, monitoring of river flows, and processing of thermal infrared images and (3) creating a digital visualization tool for these exchanges accessible via an internet link.

Keywords: DCE, hydrosystem, hydraulic interactions, surface water, groundwater, geology, hydrology, hydrogeology, geochemistry, biology, radioactivity, thermal infrared images, Bourgogne Franche Comté, methodology, digital tool

SOMMAIRE

INTRODUCTION

i.	Contexte général.....	1
ii.	But du stage.....	2
iii.	Objectifs du stage.....	2
iv.	Structure du rapport.....	3
1.	PRESENTATION DE LA DREAL BFC.....	4
1.1	Généralités.....	4
1.2	Organisation.....	4
1.3	Le pôle d'accueil.....	4
2.	GENERALITES SUR LES ECHANGES NAPPE/RIVIERE.....	5
2.1	Définition proposée.....	5
2.2	Conceptualisation et échelles d'analyses.....	5
2.3	Echanges et cinétiques.....	5
2.4	Typologies des échanges nappe/rivière.....	6
2.5	Variabilité spatio-temporelle des échanges.....	8
2.5.1	Variation spatiale.....	8
2.5.2	Variation temporelle.....	9
2.6	Facteurs anthropiques influençant les échanges.....	9
2.6.1	Pompages.....	9
2.6.2	Les aménagements hydrauliques.....	10
2.6.3	La recharge artificielle des nappes.....	10
3.	PRESENTATION DU SITE.....	11
3.1	Situation géographique.....	11
3.2	Typologies paysagères.....	11
3.3	Contextes environnementaux.....	12
3.3.1	Géologie.....	13
3.3.2	Topographie.....	14
3.3.3	Hydrogéologie.....	15
3.3.4	Hydrographie.....	16
4.	RECENSION DES ECRITS.....	17
4.1	Etat de l'art des méthodologies.....	17
4.1.1	Méthodologie n°1 – Braaten et Gates (2002).....	17
4.1.2	Méthodologie n°2 – Ransley et al., (2007).....	18
4.2	Etat de l'art des méthodes d'analyse.....	19
5.	METHODOLOGIE.....	20

5.1	Stratégie d'étude.....	20
5.2	Présentation des données brutes	20
5.2.1	Géologie	20
5.2.2	Piézométrie.....	20
5.2.3	Les cartes piézométriques	21
5.2.4	Réseau hydrographique BD Carthage®	21
5.2.5	Entité BD LISA	21
5.2.6	Modèles Numériques de Terrain (MNT).....	22
5.2.7	Géomorphologie	22
5.2.8	Données traçages	22
5.2.9	Epaisseur de la ZNS	23
5.2.10	Données de débits et hauteur d'eau	24
5.2.11	Données macrophytes.....	24
5.2.12	Données invertébrés souterrains.....	24
5.2.13	Téledétection - IRT	24
5.2.14	Données physico-chimiques.....	25
5.3	Démarche méthodologique.....	25
5.3.1	Etape 1 – Indicateur de connectivité	26
5.3.2	Etape 2 – Comparaison des cotes altimétriques nappe/rivière	31
5.3.3	Etape 3 : Méthodes d'analyse.....	34
5.3.4	Etape 4 : Interprétation des résultats, incertitudes et poids inter-méthodes	38
5.3.5	Etape 5 : Vérification & Extrapolation.....	39
6.	RESULTATS.....	40
7.	DISCUSSION & CRITIQUE	41
8.	CONCLUSION & PERSPECTIVES.....	43
9.	BIBLIOGRAPHIE.....	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Schématisation multi-échelle des échanges nappe/rivière pour un cours d'eau donné. Les flèches violettes et bleu ciel correspondent à des échanges de type hyporhéique (écoulements rapides) et les flèches vertes à des échanges de type intermédiaire/régionaux (écoulement plus lents) (Stonedahl et al., 2010).....	6
Figure 2	Principaux cas de relation hydrodynamiques entre la nappe et la rivière. (1)-Rivière vers nappe / (2)-Nappe vers rivière / (3)-Pas d'échanges, cours d'eau déconnecté et colmaté (4)-Cours d'eau déconnecté, avec ré-infiltration induit. D'après Winter et al. 1998	7
Figure 3	relations hydrodynamiques entre nappe et rivière sur la rivière de la Boutonne. D'après J-F Vernoux et al., (2010).....	8

Figure 4 Variabilité temporelle des échanges nappe/rivière. D'après Bravard et Clémens, 2008 d'après agence de l'eau RMC.....	9
Figure 5 Influence du pompage sur le flux entre la nappe et la rivière (Daum et al., 1997 dans Vernoux et al.,2010)	10
Figure 6 Coupe transversale d'un cours d'eau avec déversoir. (Source :ONUAA)	10
Figure 7 Localisation de la région BFC; Source : James Grandvoinet.....	11
Figure 8 Photos représentatives des différents massifs observables en BFC, avec de gauche à droite : le Massif du jura, le Morvan et le massif des Vosges du Sud. Crédits : Bourgogne Tourisme.	12
Figure 9 Photos représentatives des différentes, cascades, sources, reculées observables en BFC. Da gauche à droite, on retrouve la cascade du hérisson, le saut du Doubs, la reculées de Beaume les Messieurs, et la source de la Loue. Crédits : Tripadvisor.fr.....	12
Figure 10 Photos représentatives (à gauche) de la forêt de Chaux avec le pont des scouts et (à droite) la forêt Chatillonnaise. Crédits : cristaldesaintmarc.com	12
Figure 11 Géologie simplifiée de la région BFC. Source : DREAL Bourgogne-Franche-Comté	13
Figure 12 Topographie de la région BFC d'après le MNT au pas de 25m. Source : Grandvoinet James / Logiciel surfer 18 / d'après un MNT 25m (Copernicus).	15
Figure 13 Zone potentiellement karstiques de Bourgogne-Franche-Comté. Source DREAL BFC.....	15
Figure 14 Réseau hydrographique du site d'étude. Source : J. Grandvoinet / Réseau BD Carthage 2016.....	16
Figure 15 Cote piézométrique (m NGF) du piézomètre en fonction du temps (en haut) versus profondeur relative en fonction du temps. Source : ADES	20
Figure 16 Couverture des cartes piézométriques sur la bassin RMC – Source : BRGM	21
Figure 17 Couverture du MNT 1m en région Bourgogne Franche-Comté – Source Orisk Dreal BFC.....	22
Figure 18 "Screen-shot" représentant la couverture spatiale des traçages hydrogéologiques réalisée en Franche Comté depuis 2005. Source : DREAL.....	23
Figure 19 Carte des épaisseurs de la ZNS sur le territoire français. Source : BRGM	23
Figure 20 Structure de la méthodologie de caractérisation des échanges nappe/rivière. Source : J. Grandvoinet.....	25
Figure 21 Schéma représentant le principe de triangulation utilisé	31
Figure 22 Schéma (profil en long) représentant le principe de calcul de l'altitude moyenne d'un tronçon.	33
Figure 23 Application d'une triangulation sur un cours d'eau de l'Yonne	33
Figure 24 Application d'une triangulation sur un tronçon de cours d'eau dans l'Yonne.	33
Figure 25 Méthodologie relative à l'étape 3.....	34
Figure 26 Cartographie thermique d'un tronçon d'un cours d'eau (La Saône) à large échelle.. Source : J.Grandvoinet.....	35
Figure 27 Cartographie thermique d'un tronçon d'un cours d'eau (La Saône) à large échelle.. Source : J.Grandvoinet.....	35
Figure 28 Cartographie thermique d'un tronçon de cours d'eau (La Saône) à une échelle plus fine. Source : J. Grandvoinet.Les deux images IRT ont été prises en période estivale :.....	36
Figure 29 Cartographie thermique d'un tronçon de cours d'eau (La Saône) à une échelle plus fine. Source : J. Grandvoinet.	36

Tableau 5 Incertitudes par méthode sur le diagnostic des échanges nappe/rivière (d'après Paran et al., 2015) Figure 30 Cartographie thermique d'un tronçon de cours d'eau (La Saône) à une échelle plus fine. Source : J. Grandvoininet..... 36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Classification des critères utilisée pour l'étape 1 de la méthodologie.....	27
Tableau 2 Exemple de calcul du score pour la méthode « indicator average »	28
Tableau 3 Correspondance entre score et degré potentiel d'interaction nappe/rivière.....	29
Tableau 4 Exemple de calcul de score pour la méthode all-or-none	29
Tableau 5 Incertitudes par méthode sur le diagnostic des échanges nappe/rivière (d'après Paran et al., 2015)	38
Tableau 6 Contribution et complémentarité inter-méthodes.....	39

ABREVIATIONS, SIGES ET ACRONYMES

ADES : portail d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines

BE : Basses Eaux

BD ALTI® : Base de données topographique de la France.

BD Carthage® : Base de Données sur la CARTographie THématique des AGences de l'eau et du ministère chargé de l'environnement

BD LISA : Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères

BFC : Bourgogne Franche-Comté

BSS Eau : Banque de données du Sous-Sol sur l'Eau

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CATDD : Commission de l'Aménagement du Territoire et du Développement Durable

CE : Conductivité électrique

CGDD : Commissariat Général au Développement Durable

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

DREAL : Direction Régional de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EMA : Eau et Millieu Aquatique

HE : Hautes Eaux

HYDROREEL : Serveur de données hydrométriques en temps réel

IRT : Infrarouge thermique

LANDSAT ERTS-1 : Satellite de la NASA connu sous l'acronyme ERST-1 (Earth Resources Technology Satellite)

Ma : Million d'années

ME : Moyennes Eaux

MESO : Masse d'Eau Souterraine

MESU : Masse d'Eau Superficielle

MCT : Ministère de la Cohésion des Territoires

MIR : Infrarouge moyen

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MTES : Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économiques

OFB : Office Français de la Biodiversité

ONUAA : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

PASCALIS : Protocols for the ASsessment and Conservation of Aquatic LIfe in the Subsurface -Projet visant à inventorier la faune souterraine à l'échelle de l'Europe.

PQE : Pôle Qualité Eau

pH : Potentiel hydrogène

PIR : Proche infrarouge

RGE ALTI® : Base de données topographique de la France offrant des MNT très haute résolution

RMC : Rhône Méditerranée Corse

RVB : Rouge Vert Bleu

SIG : Système d'Information Géographique

SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre

STEP : STation d'EPuration des eaux usées.

SYRAH-CE : Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau

UD : Unité Départementale

ZH : Zone Hyporhéique

ZNS : Zone Non Saturée

ZS : Zone Saturée

INTRODUCTION

i. Contexte général

Adoptée en 2000 par le Conseil et le Parlement européen, la Directive cadre sur l'eau (DCE) a engagé les pays de l'Union Européenne dans un objectif de reconquête de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques. Son ambition est le bon état de toutes les masses d'eau (cours d'eau, plan d'eau, lacs, eaux littorales et intermédiaires) d'ici 2015, avec possibilité de proroger deux fois cette date butoir (échéances 2021, 2027) si des raisons d'ordre technique et/ou économique justifient un retard.

Cinq ans après la première échéance, la DCE au regard de ses objectifs, est pour le moment un échec. La situation au dernier bilan officiel des mesures rapportées à l'Europe par le Commissariat Général au Développement Durable (Cf. graphique Annexe 1) montre qu'en 2013, seulement 43,5% des masses d'eau sont en bon ou très bon état écologique, et 48% en très bon état chimique (CGDD, 2013).

Nonobstant ces résultats insuffisants, les agences de l'eau ont indiqué dans un rapport d'information au nom de la Commission de l'Aménagement du Territoire et du Développement Durable (CATDD) que des efforts importants ont été fait et que la question de l'atteinte du bon état des eaux françaises était biaisée par une évolution constantes des critères retenues (Pointerau, 2016). En effet, depuis 20 ans, des critères supplémentaires sont ajoutés tous les ans, ce qui donne l'impression que les résultats se dégradent alors que ce n'est pas le cas : ils sont seulement appréciés à l'aune de critères ou de seuils plus restrictifs que l'objectif initial.

Une autre raison, non moins significative, de l'insuffisance des résultats provient d'un déficit de connaissances de nos hydrosystèmes, notamment sur la question des échanges nappe/rivière.

En Bourgogne-Franche-Comté, les connaissances relatives aux échanges nappe/rivière sont fragmentées et réparties de manière éparse sur toute la région. Certaines zones (*ie* : les secteurs alluviaux et les secteurs à fort enjeux) sont assez bien documentées et présentent un nombre de données important et varié, alors que d'autres zones (*ie* : le karst) sont plus pauvres et les rares données disponibles sont parfois obsolètes. Cette hétérogénéité spatiale des connaissances s'explique en partie par la grande superficie de la région (47 784 km²) mais aussi et surtout, par la prédominance des zones karstiques au fonctionnement, bien souvent, méconnu.

Le manque de vision globale sur certaines zones devient donc grandement dommageable quand il s'agit d'exploiter durablement les différents usages en lien avec la ressource en eau. Cela est d'autant plus important que les prélèvements en BFC concernent tous les types de compartiments, que se soit les aquifères karstiques, alluviaux, sédimentaires ou les eaux superficielles (DREAL, 2020). De ce fait, l'étude des échanges nappe/rivière de tous les types de compartiments présents sur la région apparaît alors comme indispensable pour gérer convenablement et intégralement cette ressource qui, rappelons le, voit sa pérennité de plus en plus affectée par le changement climatique.

Pour répondre à ce manque de connaissances, une méthodologie de caractérisation des échanges est développée dans ce rapport. Elle se base notamment sur plusieurs écrits aux méthodes d'analyse variées relevant de plusieurs disciplines :

- La métrologie, par le jaugeage des débits en rivière et en source ainsi que les mesures de précipitation,
- La géochimie de l'eau, *via* le suivi des ions majeurs et de certains isotopes comme le radon 222,
- La télédétection, par le traitement d'images infrarouges thermiques. Cette méthode permet d'obtenir une cartographie aérienne de la température,
- La reconnaissance des circulations souterraines par l'intermédiaire de traceurs artificiels,
- Le suivi multiparamètre le long des cours d'eau de la conductivité électrique, du potentiel hydrogène (pH), de la température et du potentiel d'oxydo-réduction,

- La géologie, qui donne des informations relatives à la stratification, la tectonique, les accidents géologiques et la karstification,
- L'hydrogéologie, avec l'analyse des relevés piézométriques et les propriétés physiques des aquifères rencontrés (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emménagement, colmatage, etc...),
- La biologie végétale, avec le recensement de la population locale telles que les macrophytes,
- La biologie animale, par le recensement de la faune intersiticielle locale vivant au niveau de la zone hyporhéique,

Un grand nombre des méthodes d'analyse citées ci-dessus sont représentatives d'un site local, et ne permettent pas, à elles seules, d'étudier les interactions nappe/rivière sur toute la région BFC. C'est pourquoi, une approche multi-méthodes et multi-échelles a été choisie. L'intérêt de ce genre d'approche a permis notamment, (1) de conjuguer plusieurs méthodes plus ou moins novatrices, (2) de mettre en avant les complémentarités et les dissemblances de chaque méthode, afin (3) d'y apporter une réponse dans la caractérisation des échanges nappe/rivière la plus robuste et complète possible.

ii. Objectif du stage

L'objectif de ce stage est de **proposer une méthodologie intégrant différentes méthodes d'analyse fondées sur la géologie, l'hydrogéologie, la géochimie, la biologie animale et végétale et la télédétection infrarouge (IRT) afin de caractériser à plusieurs échelles, les échanges nappe/rivière sur toute la région Bourgogne-Franche-Comté**. A terme, un outil numérique de visualisation de ces échanges sera développé et disponible via un outil internet.

iii. Étapes du stage

Pour atteindre cet objectif, le stage s'est divisé en plusieurs étapes faisant chacune l'objet d'activités différentes :

- Recherches bibliographiques : Recenser et analyser un maximum de documents s'intéressant à la question des échanges nappe/rivière, et faire l'état de l'art des méthodologies préexistantes susceptibles d'alimenter la réflexion.
- Prendre contact avec les personnes dites « ressources » : Echanger avec différents spécialistes du monde des géosciences et de l'environnement en vue de recueillir leurs avis et idées pour ensuite les confronter.
- Inventorier le matériel et les données : Faire un inventaire des données disponibles, récupérables et/ou éditables. Faire la liste des outils/logiciels numériques potentiellement utiles à ce travail (modèle Marthe, Modflow, Surfer, Karsys, Qgis, Magnet4, etc...)
- Créer des données complémentaires : Possibilité de créer de la donnée dans des secteurs pauvres en informations et à fort enjeux.
- Développer une méthodologie : Etablir une base méthodologique propre fondée sur la base de méthodes d'analyse interdisciplinaires. Identifier les complémentarités et/ou les divergences entre les résultats obtenus pour chaque méthode.
- Validation : Discuter et critiquer cette méthodologie auprès d'un comité scientifique composé d'experts provenant d'horizons disciplinaires variés (géologue, hydrogéologue, hydrologue, biologiste, géomorphologue, hydrobiologiste, géomaticien).

- Rendu : Rédaction d'un rapport de stage et mise en place d'un outil numérique de visualisation des échanges avec une base de données associée.
- Suivi : Entretien du site internet et ajout de nouvelles données.

iv. Structure du rapport

Ce rapport est structuré en sept chapitres dont un premier, assez bref, consacré à la présentation de la DREAL. Les six autres ont pour rôle de guider le lecteur dans le processus et les activités ayant menés au développement de la présente méthodologie.

Le chapitre deux aborde des généralités sur les relations nappe/rivière. Il introduit les bases théoriques nécessaires à la bonne compréhension de la méthodologie proposée.

Le chapitre trois décrit la zone d'étude. Il offre une présentation générale de la région BFC et positionnent les divers contextes environnementaux auxquels il est essentiel de s'adapter. En effet, la présence d'une grande diversité de typologies paysagères, fait que la région la BFC est un secteur complexe à étudier.

Le quatrième chapitre est dédié à une phase de recherche et de recension des écrits sur la thématique des échanges nappe/rivière. Cette phase a pour but d'une part, d'apporter une vision transversale des méthodes et outils qui ont déjà été proposés et d'autre part, de préciser les pistes d'études potentiellement viables à l'élaboration d'une méthodologie adaptée au site. Autrement dit, il s'agit d'avoir un regard critique sur ce qui a déjà été fait, ce qu'il faut éviter et ce qui pourrait fonctionner.

Le cinquième chapitre se consacre à la présentation de la méthodologie applicable à la région BFC. On y retrouve la stratégie d'étude mise en œuvre ainsi que toutes les étapes (détaillées de manière exhaustives) conduisant à l'élaboration de cette méthodologie. Toutes les méthodes d'analyse appliquées à la zone d'étude sont également décrites dans ce chapitre.

Le sixième chapitre présente les résultats obtenus grâce à l'application des méthodes vues dans le chapitre précédent. Les difficultés d'acquisition et la qualité des données y sont aussi discutées.

Le septième et dernier chapitre correspond à une phase d'interprétation et de discussion des résultats. Il introduit l'outil numérique de visualisation des échanges, et rapporte les premiers retours sur la pertinence de la méthodologie.

1. PRESENTATION DE LA DREAL BFC

1.1 Généralités

La Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Bourgogne-Franche-Comté est un service régional de l'État.

Elle met en œuvre, sous l'autorité du préfet de région et des préfets de département, les politiques du ministère de la transition écologique et solidaire (MTES) et du ministère de la cohésion des territoires (MCT). Elle agit en articulation avec les unités départementales (UD) interministérielles en matière de :

- développement et aménagement durable,
- transition écologique,
- lutte contre le changement climatique,
- prévention des pollutions des risques et des nuisances,
- logement, construction et rénovation urbaine,
- transports et infrastructures
- préservation de la qualité des milieux (eau, air, sol) de la biodiversité et des paysages,

La DREAL contribue également à l'information, l'éducation des citoyens sur les enjeux du développement durable, à leur sensibilisation aux risques, et elle participe à l'émergence d'une économie verte et équitable.

Elle élabore aussi (ou co-élabore) des documents cadre, elle exerce directement diverses polices spéciales, elle émet des avis dans le cadre de procédures réglementaires, elle produit ou publie des données ou informations.

1.2 Organisation

La DREAL BFC est composée d'une direction, de 6 services régionaux métiers, d'un service régional de gestion et de 6 unités départementales (Cf. Organigramme Annexe 2).

Chacun de ces services est décomposé en plusieurs sous-unités appelées « départements » eux-mêmes décomposés en pôles.

1.3 Le pôle d'accueil

Le stage s'est déroulé dans le pôle Qualité des Eaux (PQE) qui est inclus dans le département EMA (Eau et Milieux Aquatiques) lui-même inclus dans le service BEP (Biodiversité Eau Patrimoine).

Ce pôle de compétences, composé de 8 agents, assure la connaissance et l'expertise des masses d'eau superficielles (MESU) et souterraines (MESO).

Il a pour mission d'évaluer l'état, au sens de la DCE, des masses d'eaux superficielles et souterraines de la région.

Pour ce faire, il est impératif de déterminer indépendamment les états **chimique** et **écologique** : **l'état d'une masse d'eau étant l'agrégation des deux**

L'état chimique d'une masse d'eau de surface est évalué à partir d'une liste de substances dites « prioritaires », définies pour le risque qu'elles présentent vis-à-vis du milieu aquatique. La liste qui fait référence aujourd'hui recense **33 familles de substances**.

L'état écologique résulte de l'appréciation de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques associés à cette masse d'eau. Il est obtenu en agrégeant les états **biologiques** (espèces végétales et animales), **physico-chimiques** et **hydromorphologiques**.

2. GENERALITES SUR LES ECHANGES NAPPE/RIVIERE

2.1 Définition proposée

La relation nappe-rivière se définit comme un échange d'eau dans un sens ou dans l'autre entre une nappe d'eau souterraine et un cours d'eau. Suivant le niveau de la ligne d'eau, et les saisons, la nappe alimente le cours d'eau ou est alimentée par celui-ci (Vernoux, 2011). En milieu karstique ces relations sont importantes et localisées.

2.2 Conceptualisation et échelles d'analyses

L'intérêt porté pour l'étude des interactions nappe/rivière s'est amplifié au cours des deux dernières décennies (Fleckenstein et al., 2010). Les travaux menés sur le sujet ont permis de repenser le cycle de l'eau et subséquemment le concept d'hydrosystème en y intégrant des dimensions spatio-temporelles très variés des processus qui entrent en jeu (Flipo et al., 2016).

En effet, la vision simple de la rivière considérée comme un drain étanche collectant l'eau de pluie pour la mener directement à la mer à laisser place à une vision plus complexe et plus large de l'hydrosystème. Désormais, l'idée qu'une goutte de pluie peut, à de multiples reprises, sur des distances centimétriques à centokilométrique, pour des durées allant de quelques secondes à plusieurs années, transiter entre la rivière et sa nappe n'est plus illusoire (Darty et al., 2008).

Les interfaces nappe/rivière peuvent dès lors, être considérées comme des objets multi-échelle dont les processus et les moyens d'étude varient selon l'échelle spatiale et temporelle d'observation (Cousquer, 2017).

A l'échelle locale [0 -100m], l'interface nappe/rivière est appelée zone hyporhéique (ZH). Elle est définie comme l'ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côté d'une rivière, contenant une certaine proportion d'eau de surface (White, 1993). Cette zone de quelques centimètres à une centaine de mètres (Ellis et al. 2007) autour du cours d'eau est caractérisée par un mélange d'eau de surface et d'eau souterraine (Darty et al., 2008).

A l'échelle intermédiaire [100m - 10km], l'interface nappe/rivière se concentre sur le cours d'eau. (Cousquer, 2017).

A l'échelle régionale [10km – 100km], l'interface nappe/rivière concerne le bassin versant.(Cousquer, 2017).

2.3 Echanges et cinétiques

La cinétique des échanges va également varier selon l'échelle d'observation :

- A l'échelle locale, les échanges au niveau de la ZH sont rapides et vont principalement dépendre de la présence d'obstacle à l'écoulement (tronc d'arbre, mouille).
- A l'échelle régionale, les vitesses des échanges nappe/rivière sont beaucoup plus lentes et sont régies par le gradient hydraulique (*i.e* la différence de charge hydraulique entre la nappe et la rivière) et les propriétés hydrodynamiques du milieu (Sophocleous, 2002). A cette échelle, les échanges hyporhéiques entre la sub-surface et la rivière prennent un caractère infinitésimal et n'ont donc pas grand intérêt à être pris en considération (Mouhri et al., 2012).
- A l'échelle du cours d'eau (échelle intermédiaire), les cinétiques des échanges hydrauliques englobent les phénomènes locaux comme régionaux. C'est-à-dire que des échanges rapides et plus lents se produisent au niveau de la rivière (Cousquer, 2017).

Stonedahl et al. (2010) ont proposé une perception de ces processus à l'échelle d'un cours d'eau (Figure 1).

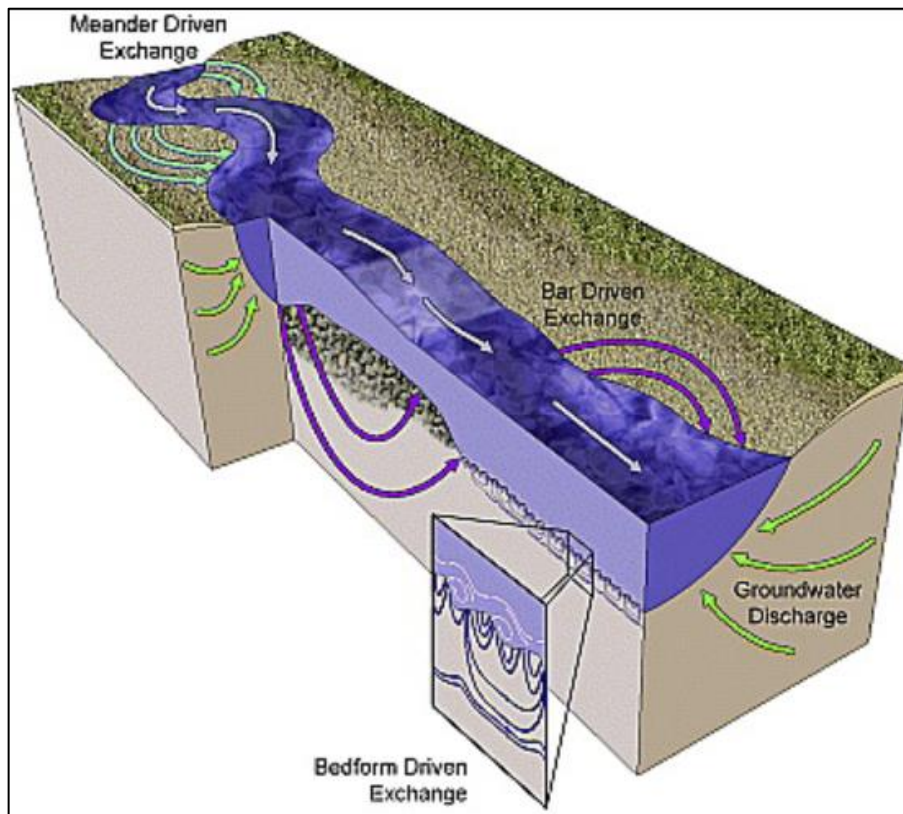


Figure 1 Schématisation multi-échelle des échanges nappe/rivière pour un cours d'eau donné. Les flèches violettes et bleu ciel correspondent à des échanges de type hyporhéique (écoulements rapides) et les flèches vertes à des échanges de type intermédiaire/régionaux (écoulement plus lents) (Stonedahl et al., 2010)

2.4 Typologies des échanges nappe/rivière

Le fondement de cette méthodologie a conduit à retenir trois principaux cas de relation hydrodynamiques entre la nappe et la rivière :

- Rivière vers nappe : Les transferts d'eau se font de la rivière (ou des eaux superficielles) vers la nappe. Le niveau du lit de la rivière est inférieur au niveau piézométrique. Les échanges peuvent se faire par le fond et/ou par les berges (latérales)
- Nappe vers rivière : Les transferts d'eau se font de la nappe vers la rivière (ou vers les eaux superficielles). Le niveau du lit de la rivière est supérieur au niveau piézométrique. Les échanges peuvent se faire par le fond et/ou par les berges (latérales)
- Absence d'échange ou réinfiltration induite : Pas de transferts d'eau observables entre la rivière et la nappe. Cela peut se produire lorsque le lit du cours d'eau est imperméable, colmaté où que la rivière et la nappe ont des fonctionnements hydrauliques indépendants (ex : cours d'eau perché).

Pour illustrer ces types d'échanges, des blocs diagrammes extraits des travaux de (Winter et al., 1998) sont présentés ci-après (Cf. Figure 2).

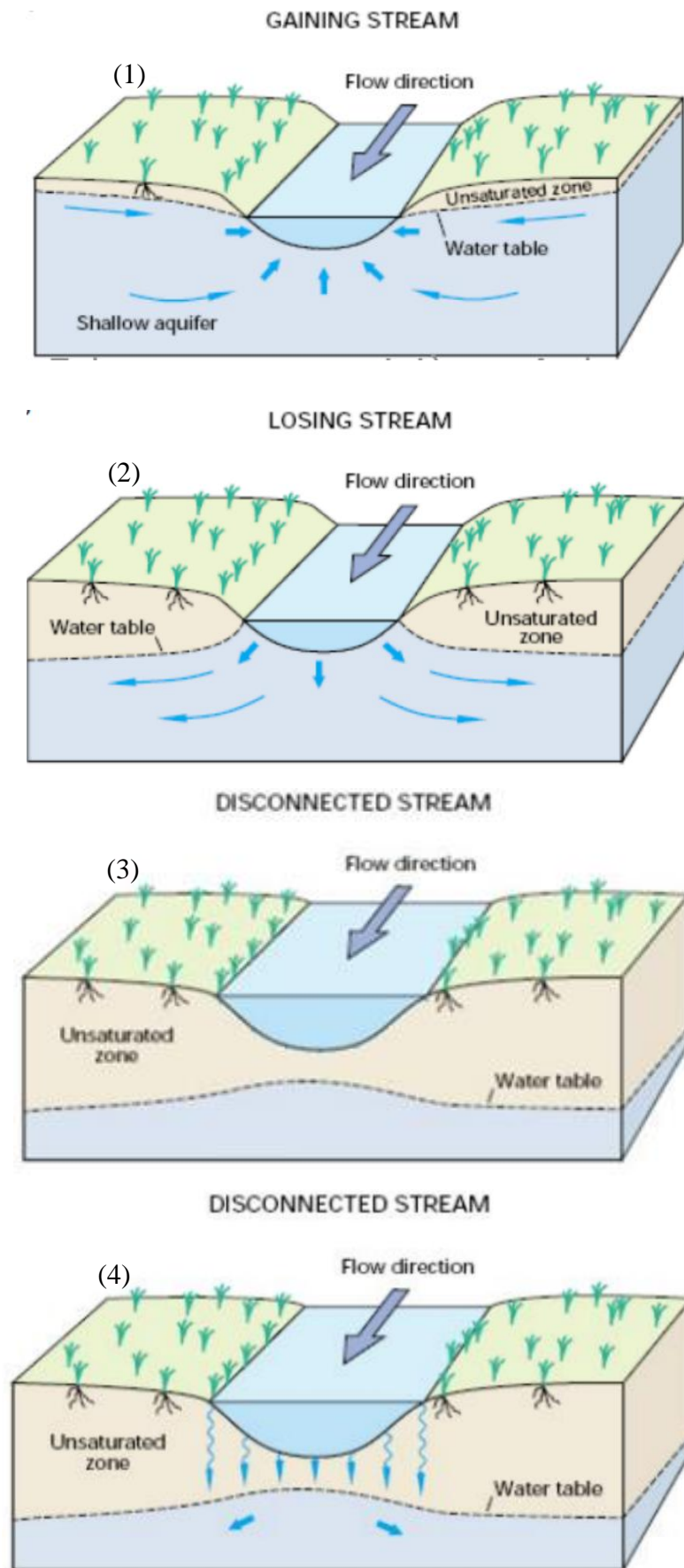


Figure 2 Principaux cas de relation hydrodynamiques entre la nappe et la rivière. (1)-Rivière vers nappe / (2)-Nappe vers rivière / (3)-Pas d'échanges, cours d'eau déconnecté et colmaté (4)-Cours d'eau déconnecté, avec ré-infiltration induit. D'après Winter et al. 1998

2.5 Variabilité spatio-temporelle des échanges

Les trois relations hydrodynamiques entre les rivières et les nappes présentées à la section 2.4 peuvent varier dans l'espace et le temps.

2.5.1 Variation spatiale

La direction, le sens et l'intensité des échanges peuvent évoluer d'amont en aval d'un même cours d'eau. C'est le cas, par exemple, de la rivière la Boutonne en Charente-Maritime (Cf. Figure 3).

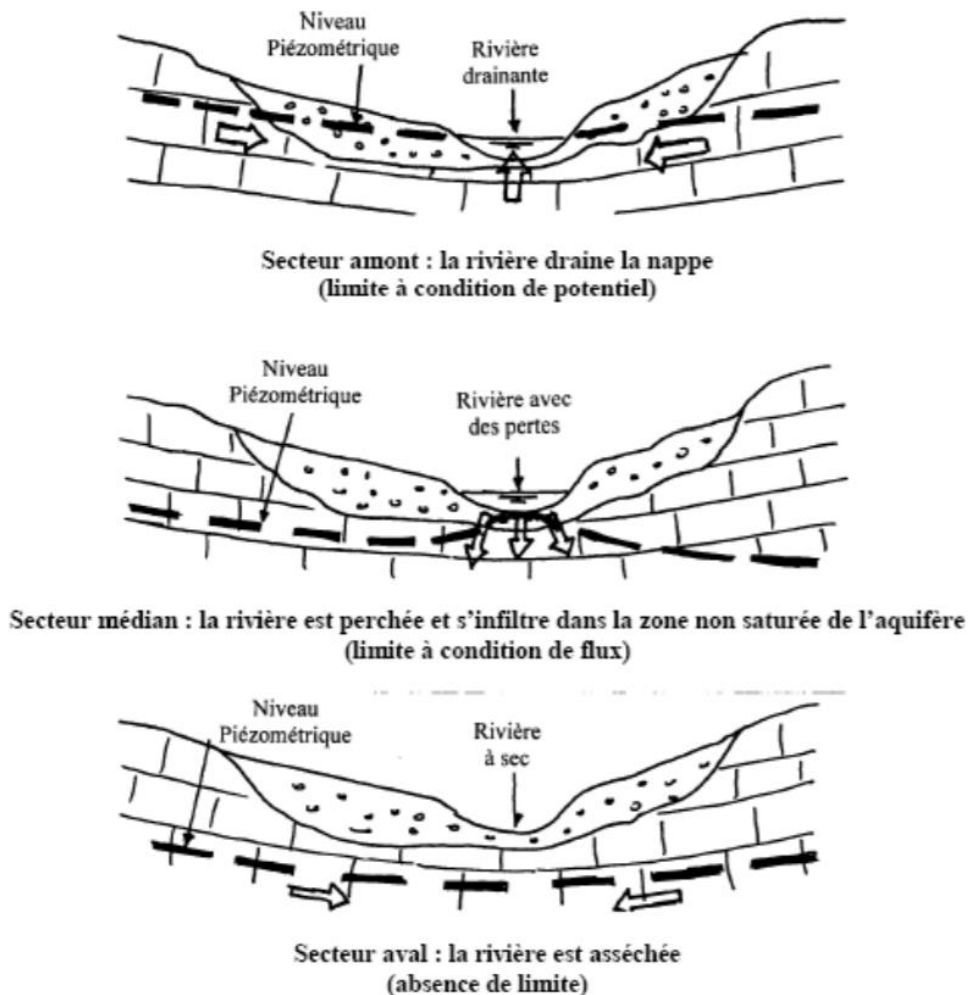


Figure 3 relations hydrodynamiques entre nappe et rivière sur la rivière de la Boutonne. D'après J-F Vernoux et al., (2010)

Ces inversions de flux hydriques sont fonction des conditions géomorphologiques du cours d'eau. Elles peuvent s'observer dans plusieurs situations :

- Lorsque que la perméabilité des berges ou du fond du lit varie suffisamment pour faire augmenter le niveau de la nappe,
- La présence de « goulets d'étranglement » et/ou de ruptures de pente peuvent localement modifier le sens des échanges,
- Le méandrage : En sortie de méandre, le cours d'eau a tendance à drainer la nappe alors qu'entrée, il aurait plutôt tendance à s'y infiltrer,
- Les ruptures de pentes : Une variation brutale de la ligne d'eau du cours d'eau peut inverser le sens de l'échange,

- Le cours d'eau peut, par endroit être « perché », et se déconnecter partiellement ou complètement de la nappe souterraine, comme c'est le cas pour la rivière Boutonne.

2.5.2 Variation temporelle

Suivant la saison hydrologique (Basses Eaux – Moyennes Eaux – Hautes Eaux), il est possible d'observer des inversions de la direction des échanges : En période de hautes eaux, la rivière alimente la nappe et en période de basses eaux elle la draine (Bravard et Clémens, 2008) (Cf. Figure 4).

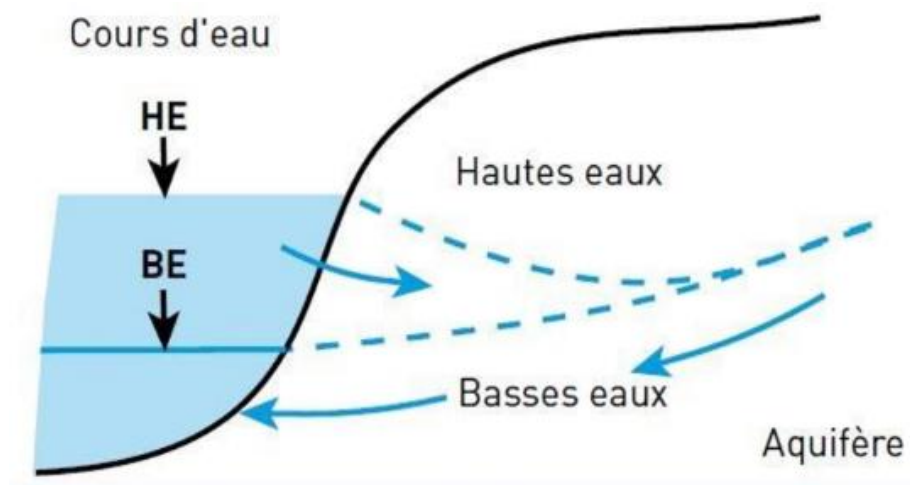


Figure 4 Variabilité temporelle des échanges nappes/rivière. D'après Bravard et Clémens, 2008 d'après agence de l'eau RMC

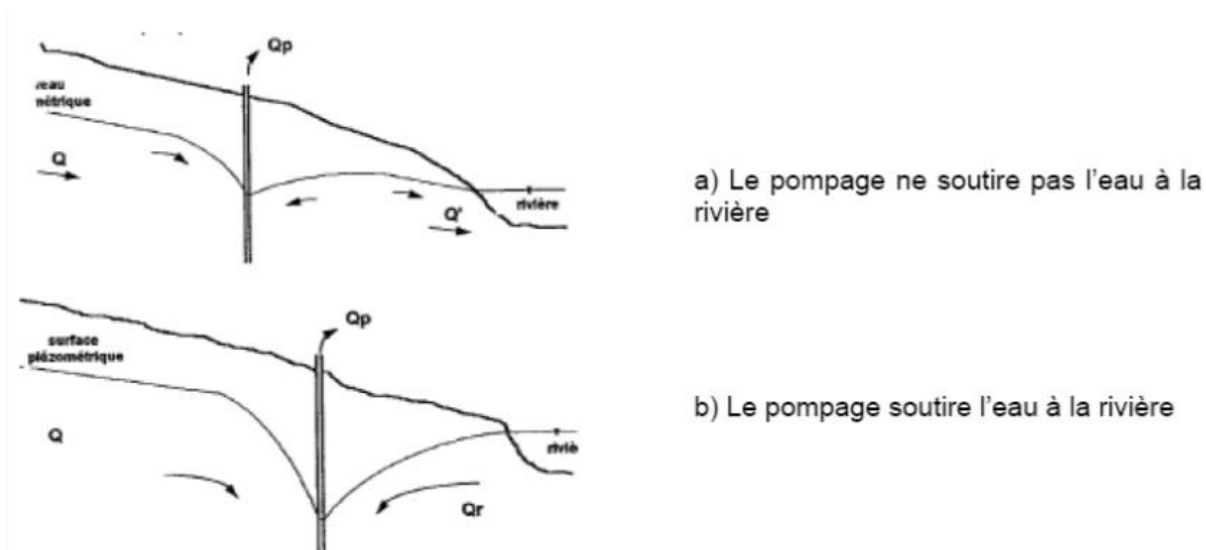
2.6 Facteurs anthropiques influençant les échanges

2.6.1 Pompages

Bien souvent, les cours d'eau sont perturbés par des aménagements anthropiques tels que les pompages en nappe (Cf. Figure 5) :

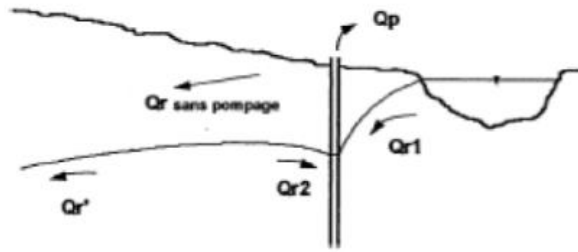
- dans le cas où la nappe est drainée par la rivière, le flux d'eau de la nappe à la rivière peut être réduit (a), voire supprimé (et conduire localement à un assèchement de la rivière) ou inversé et c'est alors la rivière qui alimente en partie le pompage (b) ce qui induit une diminution du débit de la rivière pouvant aller jusqu'à son assèchement (Vernoux et al., 2010).

- dans le cas où la rivière alimente la nappe, le flux d'eau de la rivière à la nappe peut être augmenté alors que le débit qui alimentait la nappe avant le pompage est diminué (c) (Vernoux et al., 2010).



a) Le pompage ne soutire pas l'eau à la rivière

b) Le pompage soutire l'eau à la rivière



c) Le pompage augmente le débit provenant de la rivière

Figure 5 Influence du pompage sur le flux entre la nappe et la rivière (Daum et al., 1997 dans Vernoux et al., 2010)

2.6.2 Les aménagements hydrauliques

Certains types d'ouvrages (seuils en rivière, digues, barrages, écluses, anciens moulins désaffectés, ...) ayant été implanté par l'homme au travers ou aux abords des cours d'eau pour y exercer une fonction particulière, constituent des obstacles à l'écoulement naturel des eaux et des sédiments. En amont de ces ROE (référentiels d'obstacle à l'écoulement), la vitesse d'écoulement diminue et la hauteur d'eau dans le cours d'eau augmente. (Cf. Figure 6).

De ce fait, dans le cas où la rivière est alimentée par la nappe (*i.e* : le niveau piézométrique supérieure à la côte de la surface de la rivière), une augmentation significative du niveau de la surface de la rivière en amont d'un seuil peut potentiellement inverser localement le sens de l'échange. En l'absence de colmatage (ce qui est assez rare à proximité de ces ouvrages) la rivière alimenterait donc la nappe.

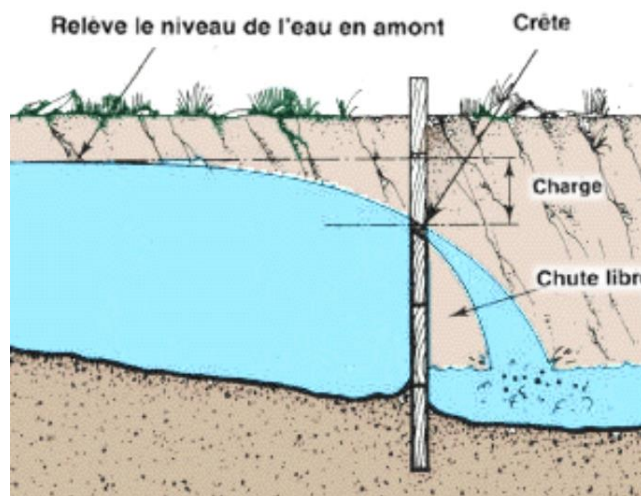


Figure 6 Coupe transversale d'un cours d'eau avec déversoir. (Source :ONUAA)

2.6.3 La recharge artificielle des nappes

Selon Flint et al., (2002), Bouwer, (2002), et Casanova, (2012), la recharge artificielle des nappes peut être définie comme la pratique consistant à augmenter artificiellement la quantité d'eau qui pénètre dans un réservoir d'eau souterraine.

Les finalités pour lesquelles la recharge artificielle est pratiquée sont multiples. Bouwer (2002) en énumère quelques-unes tirées du livre de Watson intitulé « Groundwater Ressource Evaluation, 1970 » :

- Limiter ou stopper la baisse du niveau de la nappe lors d'une surexploitation de la ressource,
- Amélioration de la qualité de l'eau de la nappe en contrôlant l'intrusion d'eau salée : L'injection d'eau douce dans les nappes vulnérables à l'eau saline génère une barrière hydraulique limitant ainsi les apports salins.

- Stockage d’eau hors saison, pour la réutiliser en période de sécheresse : Le stockage souterrain est moins onéreux comparativement à un stockage de surface qui requiert plus d’infrastructures (bassins).
- Epurer l’eau de manière naturelle à travers la ZNS,

Dans toutes ces situations, la recharge artificielle a pour effet d’augmenter les volumes d’eau contenus dans la nappe et subséquemment, le niveau piézométrique. Dans le cas où l’élévation du niveau de la nappe dépasse celui de la rivière, il est possible qu’une inversion d’échange ait lieu si une connexion existe entre la rivière et la nappe associée.

3. PRESENTATION DU SITE

3.1 Situation géographique

Située dans le quart Nord-Est de la France, le secteur d’étude n’est autre que la région Bourgogne-Franche-Comté. Cette région née de la réunification des régions Bourgogne et Franche-Comté s’étend du Jura Suisse aux plaines de l’Ile-de-France, du Ballon d’Alsace au Morvan. Elle a une superficie de 47 784km², la classant au sixième rang sur les 18 autres régions. Elle comprend huit départements (Doubs, Jura, Côte d’Or, Yonne, Nièvre, Haute-Saône, Saône-et-Loire, Territoire de Belfort) (Cf : Figure 7).

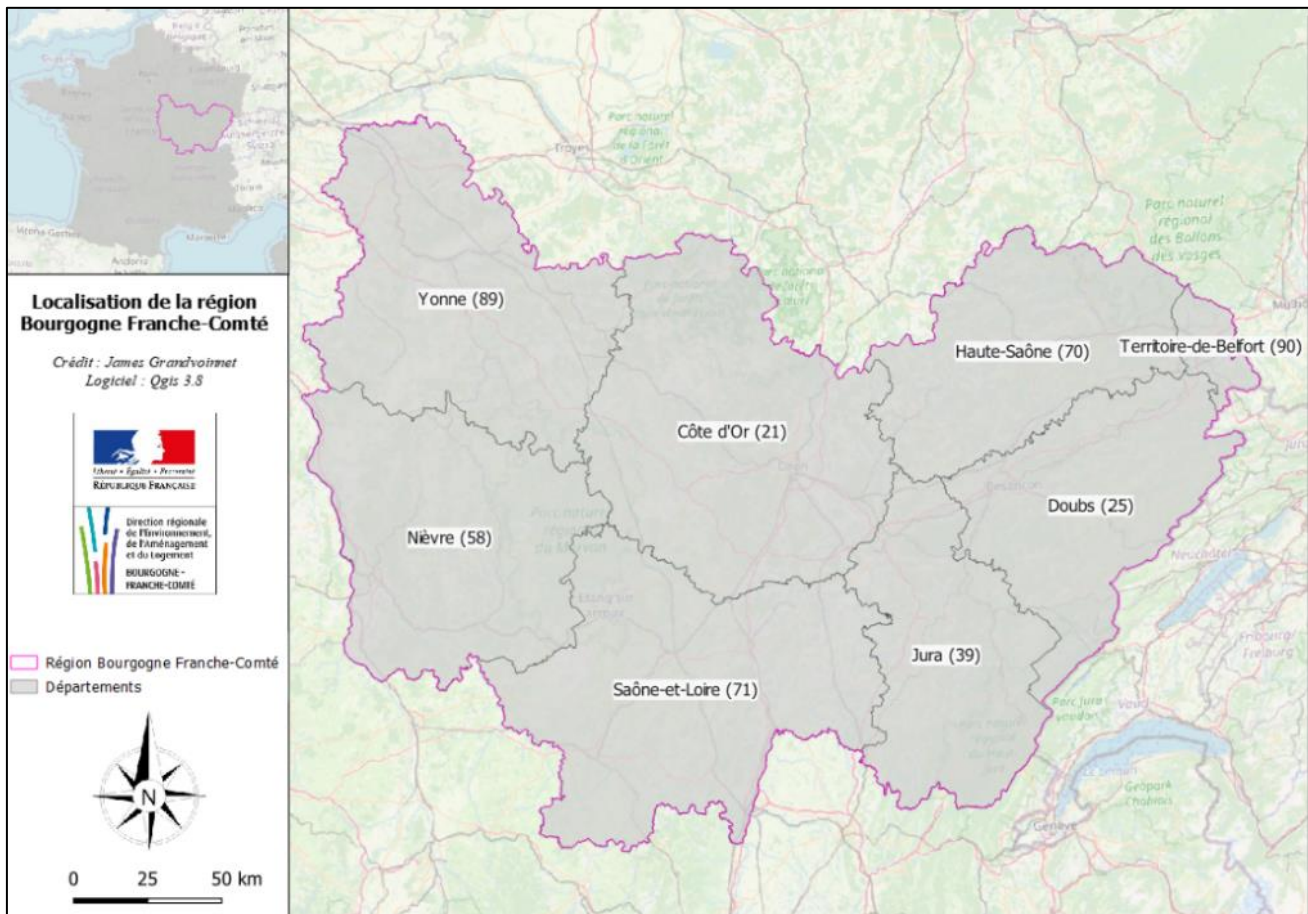


Figure 7 Localisation de la région BFC; Source : James Grandvoinet

3.2 Typologies paysagères

La région BFC présente une forte diversité de paysages qui reposent sur ses particularismes physiques et géologiques. Certaines zones individualisées, mais remarquables, ressortent du lot, donnant à la région une

identité unique. Les principales typologies paysagères caractéristiques de la région BFC sont listées (et parfois accompagnées de quelques photos) ci-après :

- les reliefs différenciés comme les massifs du Jura, du Morvan, des Vosges du sud (Cf : Figure 8),



Figure 8 Photos représentatives des différents massifs observables en BFC, avec de gauche à droite : le Massif du Jura, le Morvan et le massif des Vosges du Sud. Crédits : Bourgogne Tourisme.

- les reculées, les cascades, les sources, etc..., telles que la reculées de Beaume-les-Messieurs, le saut du Doubs ou encore la source de la Loue (Cf : Figure 9),



Figure 9 Photos représentatives des différentes cascades, sources, reculées observables en BFC. De gauche à droite, on retrouve la cascade du hérisson, le saut du Doubs, la reculées de Beaume les Messieurs, et la source de la Loue. Crédits : Tripadvisor.fr

- les paysages collinaires,
- les grandes vallées et plaines alluviales comme la Loire, l'Yonne, le Doubs, la Saône ainsi que les nombreux canaux de la région,
- les paysages de bocage,
- les massifs boisés : la forêt de Chaux ou la forêt Châtillonnaise (Cf : Figure 9).

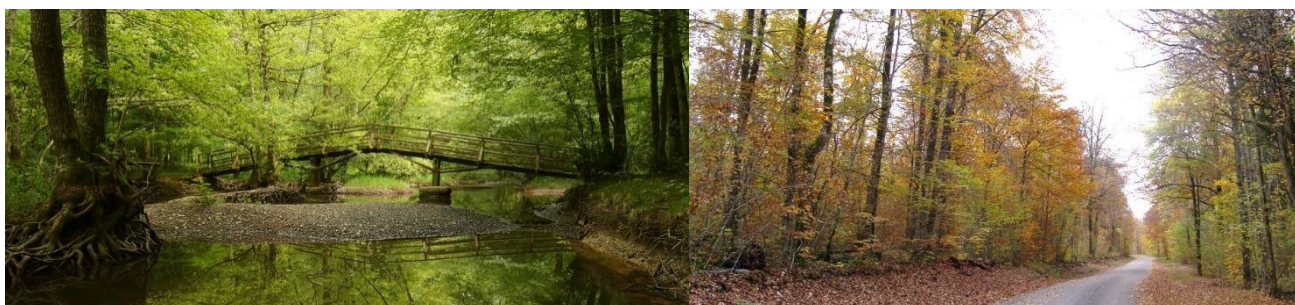
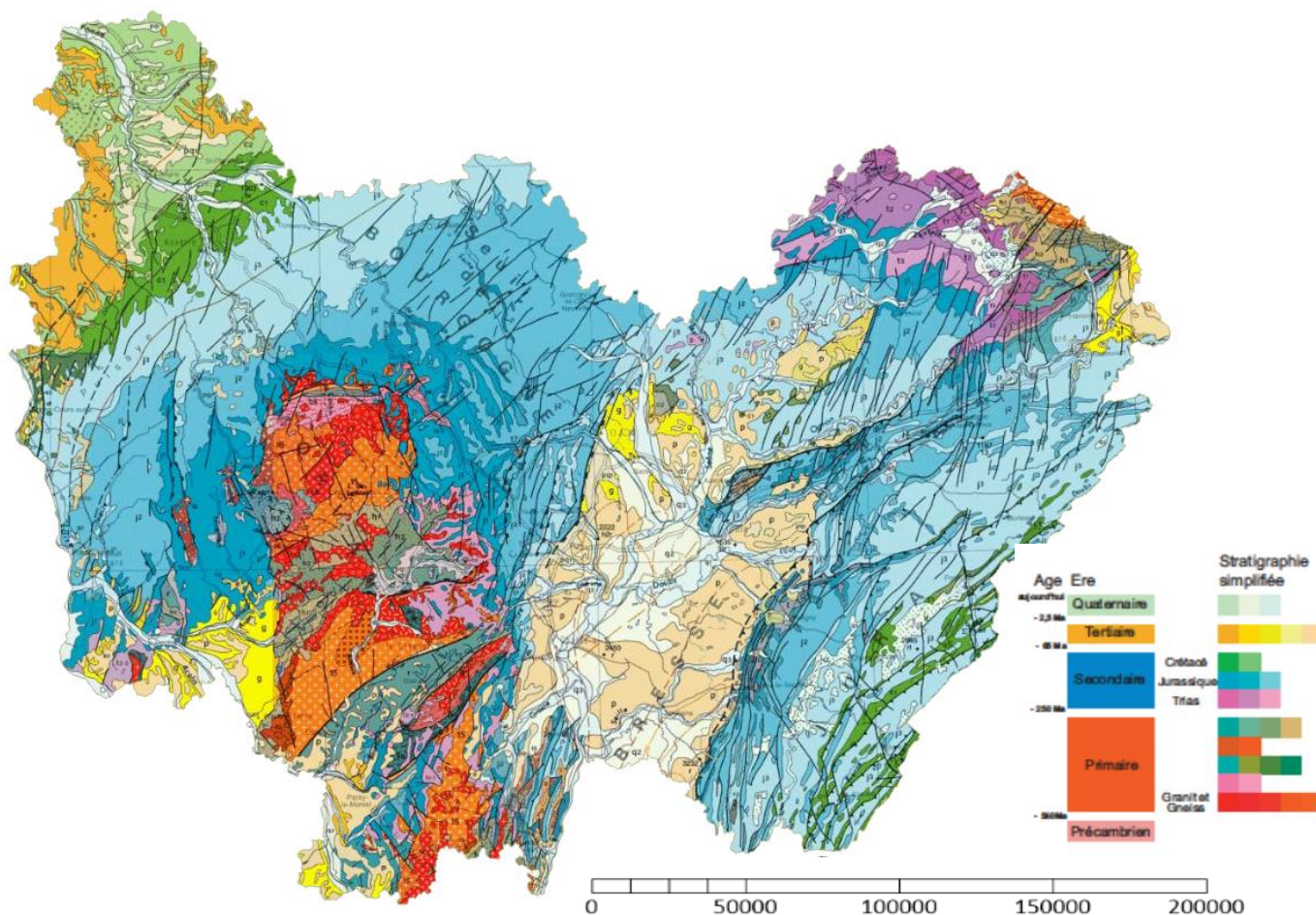


Figure 10 Photos représentatives (à gauche) de la forêt de Chaux avec le pont des scouts et (à droite) la forêt Châtillonnaise. Crédits : cristaldesaintmarc.com

3.3.1 Géologie

La géologie de la région BFC n'est autre que le reflet de la mosaïque de paysages vue à la section précédente. Autrement dit, la région BFC regroupe des régions géographiques et géologiques très différentes. On observe une grande variété de roches d'âge particulièrement étendue, puisqu'on peut y trouver des roches cristallines et métamorphiques de l'ère primaire (~ -250Ma) du Morvan (**rouge**), des roches sédimentaires lagunaires, littorales et marines secondaires (-250Ma à 65Ma) (**bleu foncé**, **vert**) des alluvions et des colluvions de la fin du Cénozoïque (~ -65Ma à -2Ma) (**jaune**, **jaune orangé**) et du Quaternaire (~ -2Ma) du fossé d'effondrement de la Bresse (**vert pâle**). (Cf. Figure 11)



3.3.1.1 Histoire de la région

L'agencement des formations géologiques qui constituent le sous-sol de la région s'est fait suite à une succession d'évènements géologiques anciens qui sont brièvement rappelés dans cette section :

- A l'ère primaire, le massif hercynien (socle de la région BFC), constitué principalement de roches ignées s'est édifiée sur toute la France dont on observe les restes dans le Morvan, le Sud des Vosges et le massif de la Serre. Avec le temps, cette chaîne de montagne s'est érodée et s'est aplani laissant place à des mers peu profondes.
- Durant toute l'ère secondaire, les mers peu profondes ont engendré des dépôts de calcaire, marnes et craie essentiellement (Plateau de Bourgogne, de Haute-Saône, massif du Jura, Auxois, etc...).

A l'ère tertiaire, une régression marine laisse les couches sédimentaires hors de l'eau et une phase d'érosion s'entame. Le socle hercynien se fissure et engendre plusieurs grandes failles. Des fossés d'effondrements (fossé de la Saône, de la Loire, le fossé bressan) se creusent et se comblent petit à petit, alimentés par divers éléments charriés par les cours d'eau qui descendent des zones émergées.

Cette période donne naissance au lac Bressan qui occupe la quasi-totalité de la vallée de la Saône et la Bresse (DRAAF,2016).

- Au Miocène, les Alpes montent et plissent la chaîne jurassienne, ce qui va subséquemment soulever le Morvan et le Charolais, entraînant un épisode d'érosion sur les reliefs. (Pinson, S. Stollsteiner, P. (2016)
- A l'ère quaternaire, les périodes glaciaires et interglaciaires vont modeler le paysage. Lors des périodes plus froides, le massif des Vosges et le Jura sont recouvert de glaciers tandis que la Bourgogne subit un climat périglaciaire avec des sols gelés en permanence. Des moraines dans le Jura et des lacs d'origines glaciaire en Haute-Saône témoignent de ces évènements.

3.3.1.2 Les grandes formations géologiques

Les formations les plus anciennes (d'origine hercynienne) forment donc le socle de l'ensemble de la région. Elles sont constituées de roches cristallines et métamorphiques (granites, gneiss, schistes). Elles affleurent principalement dans le massif cristallin du Morvan, au centre de la région, dans le massif des Vosges, au nord, et dans le massif de la Serre.

Le socle quand il n'affleure pas, est recouvert par l'ensemble des formations secondaires qui sont de plus en plus récentes en approchant du centre du Bassin parisien.

Se succèdent :

- les argiles, marnes et calcaires marneux du Lias,
- les formations des calcaires du Jurassique,
- les formations d'argiles et de sables du Crétacé inférieur,
- les formations crayeuses du Crétacé supérieur,
- l'aquifère sableux du Crétacé - sables verts de l'Albien.

Les formations tertiaires sont marquées par la plaine de la Bresse. Il s'agit d'un fossé d'effondrement d'âge Oligocène, mis en place par distension lors de la formation des Alpes. Apportés par la Saône, ce fossé s'est rempli d'alluvions et de colluvions à la fin du Cénozoïque et au Quaternaire.

L'ère quaternaire, très courte au regard des trois premières est une période marquée par l'alternance de période glaciaire et interglaciaire. Cette période a façonné le paysage laissant place à de grandes formations alluviales sableuses ou graveleuses dans lesquelles les grands cours d'eau s'écoulent – Yonne, Loire, Saône, Doubs, Allan. (DREAL, 2020).

3.3.2 Topographie

Trois principaux massifs montagneux marquent le paysage. Le massif des Vosges est situé au nord-est, le point culminant dans la région est le ballon d'Alsace (1 247 mètres). Le Jura s'étend sur toute la limite orientale et culmine dans le département homonyme au Crêt Pela (1 495 mètres), ce dernier est également le plus haut sommet de la région. Les Vosges et le Jura se rejoignent dans la Trouée de Belfort. Le Morvan occupe une place centrale dans la partie ouest, son point culminant est le Haut-Folin (901 mètres).

D'autres massifs plus modestes existent. Au nord-est du Morvan se trouve la côte d'Or, un escarpement créé par la formation d'un rift, qui culmine à 641 mètres d'altitude. Le Massif central atteint la partie sud de la région par le Mâconnais qui est dominé par la Mont Saint-Cyr (771 mètres).

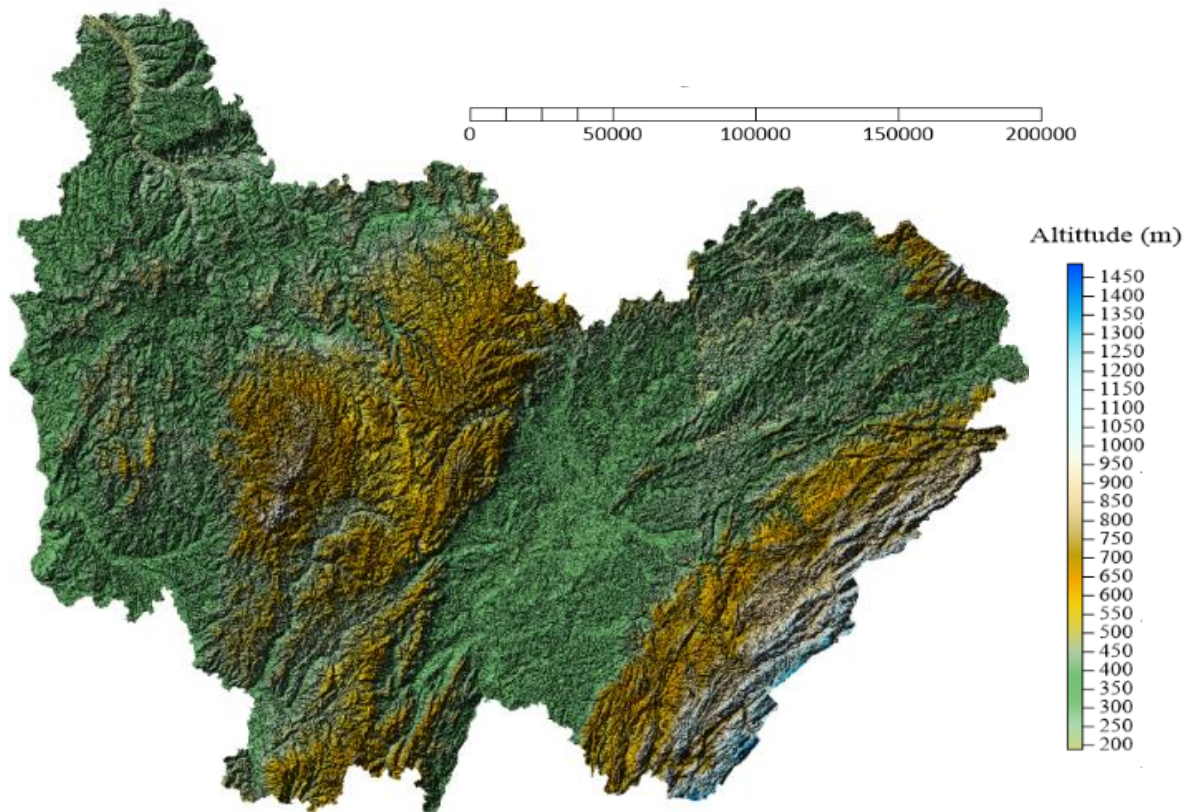


Figure 12 Topographie de la région BFC d'après le MNT au pas de 25m. Source : Grandvoinet James / Logiciel surfer 18 / d'après un MNT 25m (Copernicus).

3.3.3 Hydrogéologie

La variété des terrains rencontrés va entraîner une hétérogénéité des aquifères. Mais, avec près de 18 000 km² d'affleurement pour les formations des calcaires du Jurassique, soit plus du 1/3 de sa surface totale, la région Bourgogne-Franche-Comté compte parmi les plus karstifiées de France.

Cette karstification n'est évidemment pas uniforme à l'échelle de la région mais chaque département qui la compose est plus ou moins impacté par le karst et ses morphologies (pertes, dolines, gouffres...) (Cf. Figure 13).

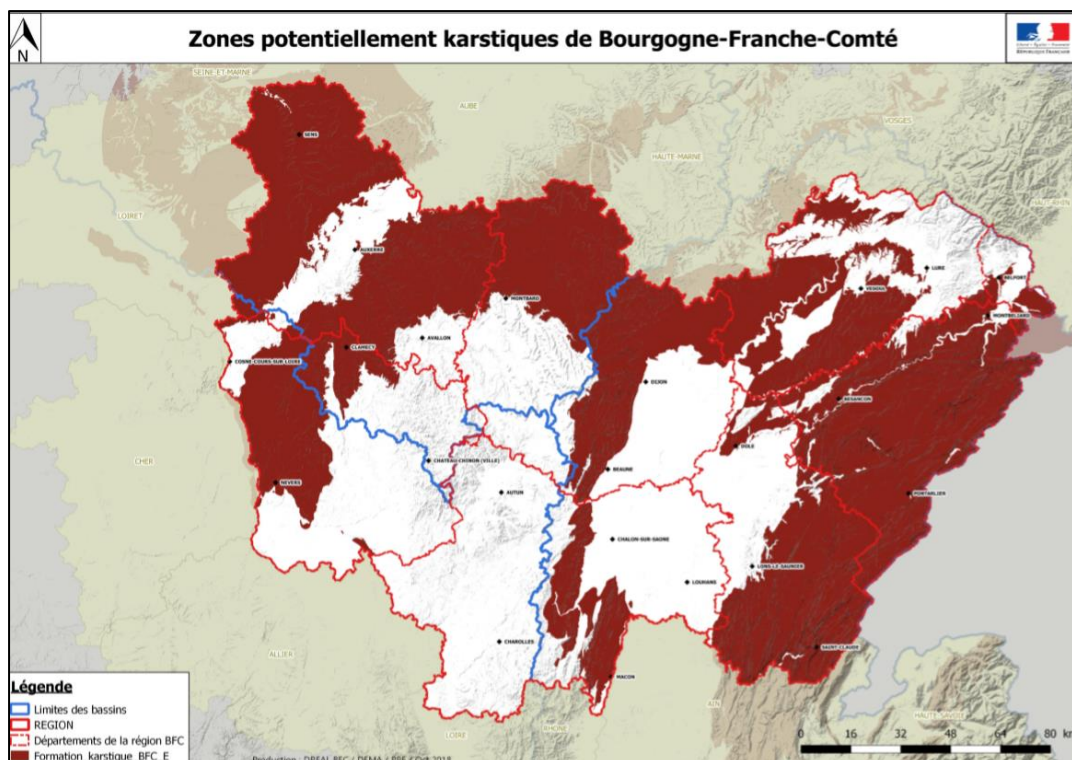


Figure 13 Zone potentiellement karstiques de Bourgogne-Franche-Comté. Source DREAL BFC.

On distingue quatre ensembles plus ou moins bien karstifiés : le massif du Jura, les plateaux de Haute-Saône, le seuil de Bourgogne (systèmes de côtes dijonnaise, chalonnaise et mâconnaise) et Les plateaux de l'ouest du bassin parisien.

- Le massif du Jura : Massif emblématique du paysage karstique français, le Jura domine les dépressions des plaines de la Saône et de la Bresse.
- Les plateaux de Haute-Saône : Marquant la transition entre le Bassin Parisien et le massif du Jura, les plateaux de Haute-Saône sont représentatifs des phénomènes karstiques puisque l'on y dénombre plusieurs centaines de cavités et une dizaine de réseaux à développement important.
- Le seuil de Bourgogne (coteaux du Chalonnais, du Dijonnais et du Mâconnais) : Territoire caractérisé par un épikarst compartimenté et perché, s'enfonçant sous les dépressions des plaines de la Saône et de la Bresse.
- Les plateaux situés à l'ouest du seuil de Bourgogne : Ils se distinguent par des formations tabulaires dans lesquelles les eaux qui sourdent des reliefs.

3.3.4 Hydrographie

Le réseau hydrographique de la région est dense. Il se partage entre trois des six grands bassins hydrographiques, à savoir Loire-Bretagne, Seine-Normandie et Rhône-Méditerranée. Chacun de ces bassins couvre respectivement, 20,9%, 27,4% et 51,7% de la superficie régionale (DRAAF, 2016). La région est abritée par de nombreux cours d'eau dont deux fleuves : la Loire et la Seine. Cette dernière prend sa source à Source-Seine en Côte d'or (21). Le canal de Bourgogne permet de relier l'Yonne à la Saône. Le canal du Centre connecte les vallées de la Loire et de la Saône. Au total, ce sont environ 17 500km de cours d'eau qui jalonnent la région (Cf. Figure 14).

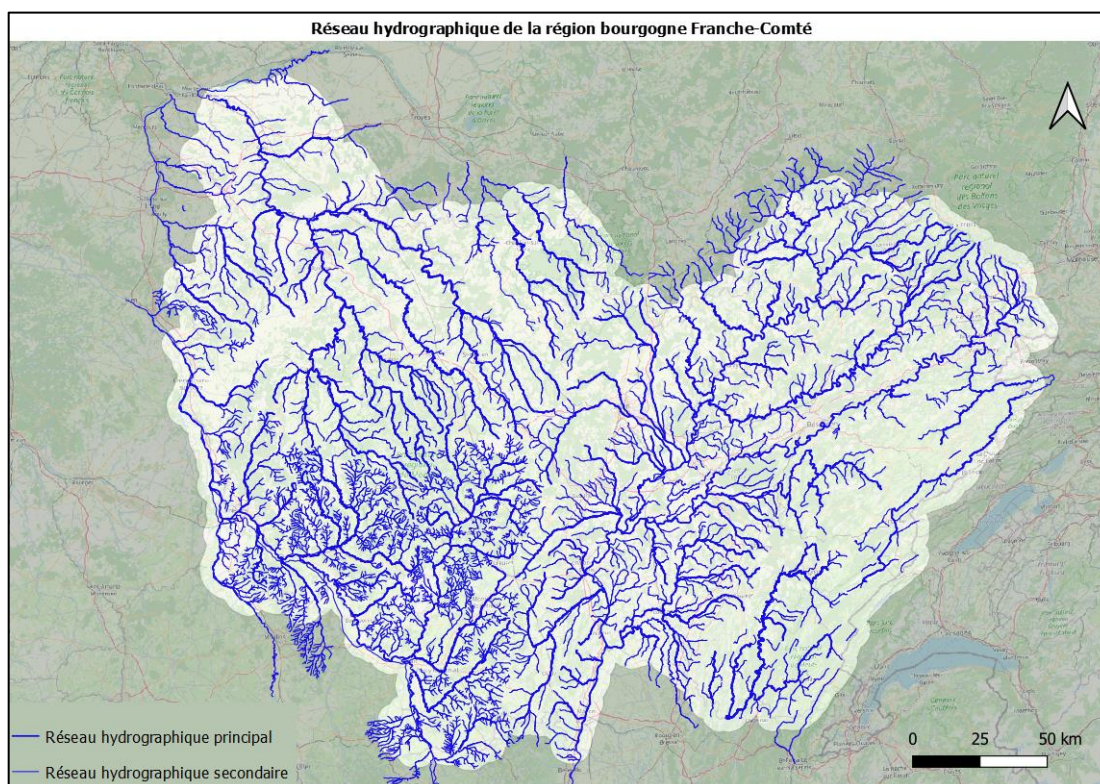


Figure 14 Réseau hydrographique du site d'étude. Source : J. Grandvoinet / Réseau BD Carthage 2016

4. RECENSION DES ECRITS

Ce chapitre fait état de l'art des approches scientifiques (*i.e* les méthodologies) et des méthodes d'analyse susceptibles de caractériser les échanges nappe/rivière.

Parmi les principaux écrits étudiés, on retrouve le programme de recherche présidé par F. Paran intitulé de façon abrégée "échanges nappes/Rhône" (Paran et al., 2015), la thèse de Lalot (Lalot E, 2014) et une étude du BRGM (Brugeron A et al., 2012) tous trois orientés « cartographie piézométrique ».

Pour ce qui est des environnements karstiques, on peut citer les thèses de Chapuis (Chapuis, H. 2017) et de Wawrzyniak (Wawrzyniak, V. 2012) proposant chacune des méthodes fondées sur la télédétection infrarouge thermique (IRT).

Vient aussi, deux guides méthodologiques (un de l'Agence de l'Eau RMC datant de 2015 et un autre de l'AFB de 2017) expliquant quelques méthodes techniques de caractérisation des échanges nappe/rivière en milieux alluviaux principalement (Paran et al., 2015).

Enfin, au-delà de nos frontières, on peut aussi citer les travaux de Braaten et Gates (2002), Ransley et al., (2007) et d'Ivkovic (2008) qui se basent sur « des modèles à indice de connectivité » où on estime le degré d'interaction entre eaux souterraine/eaux de surface en tenant compte de plusieurs composantes comme la géologie, la géomorphologie, la profondeur du niveau de la nappe ou encore le type de sédiments rencontrés.

4.1 Etat de l'art des méthodologies

La variété de méthodologies dont la littérature fait état montre qu'il n'existe pas de « gold standard » en matière de caractérisation des échanges nappe/rivière. Chaque méthodologie est unique avec ses forces et ses faiblesses.

La présente section met en avant brièvement deux méthodologies qui ont fait l'objet d'une publication scientifique. Elles suivent toutes deux des approches différentes mais complémentaires. Elles ont également inspirées de près ou de loin la méthodologie proposée plus loin.

4.1.1 Méthodologie n°1 – Braaten et Gates (2002)

Braaten et Gates (2002) ont développé une méthodologie de caractérisation des échanges nappe/rivière dans la région Est de l'Australie (New South Wales).

Leur méthodologie repose exclusivement sur l'étude des hauteurs d'eau en nappe et en rivière pour distinguer par simple comparaison :

- Les systèmes/secteurs dit connectés : Le système est supposé connecté lorsque (1) l'écart entre le niveau de la nappe et celui de la rivière est inférieur à 10 m et (2) que le piézomètre dans lequel la mesure est effectuée se situe à moins d'un kilomètre de la rivière.
- Les tronçons drainants : Le niveau de la nappe est supérieur au niveau de la rivière.
- Les tronçons drainés : Le niveau de la rivière est supérieur au niveau de la nappe.
- Les tronçons présentant des variations saisonnières : En fonction des périodes (Hautes Eaux ou Basses Eaux) le niveau de la rivière sera inférieur ou supérieur à la nappe.

In fine, cette méthodologie se limite aux notions de distance à la rivière et de profondeur de la nappe.

4.1.2 Méthodologie n°2 – Ransley et al., (2007)

Toujours sur le continent Australien, Ransley et al (2007) ont quant à eux, proposé une méthodologie de caractérisation des échanges nappe/rivière orientée sur l'estimation de la perméabilité des formations géologiques et du substratum des cours d'eau pour en dériver un indicateur de connectivité.

Cette estimation est basée sur 4 critères :

- profondeur de la nappe,
- géologie,
- géomorphologie,
- caractéristiques des sédiments du cours d'eau,

Chacun de ces critères est ensuite classifié en 3 ou 4 classes. Pour chaque classe, un score est appliqué en fonction de l'incidence sur la connectivité eau souterraine/eau superficielle (peut être positif ou négatif). Plus le score est important plus la probabilité qu'une relation nappe rivière existe est forte.

Data Input	Range	Rating
Depth to water table (m)	<10m	5
	10-20m	3
	>20m	0.5
Stream bed sediments	sand/gravel	5
	sandy loam/silt loam	3
	silt/clay loam	-1
	clay	-4
Geomorphology	Erosional environments	5
	Depositional environments (floodplain)	1
	Hill tops	0
Geology	gravel/sand	5
	clay/sand	3
	clay	-4

L'indicateur est ensuite déterminé par l'équation suivante qui relie et pondère les 4 critères.

Weighting	
Connectivity index model	= Potential for stream-aquifer connectivity = (3 x depth to water table) + (5 x stream bed sediments) + (5 x geology) + (2 x geomorphology)

4.2 Etat de l'art des méthodes d'analyse

Au même titre que les méthodologies, les méthodes d'analyses sont nombreuses et vont varier selon l'échelle d'étude et les objectifs à atteindre.

Cette section propose un tour d'horizon des méthodes de caractérisation et de quantification des échanges nappe/rivière. La liste (non exhaustive) des méthodes présentée ci-après s'appuie sur les travaux de Vernoux et al., (2010) ; Mourhi et al., (2012), (Chapuis, 2018) ainsi que les deux guides méthodologiques de l'Agence de l'Eau et de l'OFB proposant entre autres des méthodes novatrices Paran et al., (2015, 2017).

Méthodes	Echelle spatiale			Echelle temporelle			Coût	Avantages	Inconvénients
	Locale	Médiane	Régionale	Ponctuelle	Annuelle	Pluri-annuelle			
	Ponctuelle	Plaine alluviale	Bassin versant						
Compteur d'exfiltration (Seepage meter)	■	■		■			---	Mesure directe de flux Dispositif simple. Méthode Semi-quantitative	Fortes incertitudes. Mesure ponctuelle Inapplicable sur substrat dur
Jaugeage différentiel	■	■		■	■		---	Mesure simple et rapide. Bilans de fuite en rivière	Mesure ponctuelle Echanges non localisés dépend des points de jaugeage
Hydrologiques									
Basé sur la loi de Darcy	■	■		■	■	■	- à +	Connaissances des niveaux d'eau en rivière et aquifère. Identification des processus et du sens d'écoulement	Difficultés d'estimation des flux à partir de la conductivité hydraulique et de la perméabilité. Mesures ponctuelles difficile à interpoler spatialement
Gradient hydraulique	■	■		■	■				
Conductivité hydraulique	■	■		■	■				
Analyse de l'Hydrogramme	■		■	■	■	■	- à +	Estimation des contributions de la nappe et de la rivière et de la variabilité des échanges temporellement	Intègre l'ensemble des processus amont . Nécessite des traçages et datations de masse d'eau
Hydro-Chimiques									
les éléments majeurs		■	■	■	■	■	- à +	Calcul des vitesses et des temps de résidence, des prospérités du milieu (transmissivité). Compréhension du mélange des eaux	Traceur peut être influencé par les processus de dégradation, d'adsorption etc. Mesure ponctuelle et instantanée.
les isotopes		■	■	■	■	■			
les traceurs naturels		■	■	■	■	■			
les traceurs artificiels		■	■	■	■	■			
Méthodes biologiques									
Macrophytes	■	■		■			- à +	Variations saisonnières du flux. Localisation de point d'échanges et du sens du flux	Ponctuelle spatialement. Uniquement qualitatif. Dépendant de l'observateur. Compétence en systémique. Traitement en laboratoire long.
Invertébrés souterrains	■	■		■					
Géophysiques									
Thermique	■			■	■	■	- à +	Quantification de flux à haute résolution et avec précision. Cartographie des échanges le long de la rivière Rapides et à large échelle	Calibration assez lourde Inversion des températures en flux Mesure ponctuelles en 1D
Géophysique	■	■	■	■				Définition de la structure spatiale et de la connectivité cours d'eau/substrat	Méthodes indirectes Calibration par d'autre méthode (carottage, géochimie, etc) approche statistique et qualitative
Modélisation									
		■	■		■	■	- à +	Estimation de la variabilité spatiale et temporelle des flux Visualisation 3D des flux possible Test de scénarii	Nécessite une connaissance préalable des processus. Mise en œuvre et validation assez lourdes
Télétection IRT		■	■	■	■	■	- à +	Rapide et à large échelle. Obtention d'une cartographie des températures	Traitements pouvant être lourd, nécessite des images d'assez bonne qualité. Identifie seulement les apports phréatiques. Nécessité d'avoir un contraste de température assez élevé

La plupart des méthodes d'analyse des échanges nappe/rivière présentées ci-dessus ont une représentativité spatiale et temporelle différentes et ne permettent pas, à elles seules, de caractériser intégralement les échanges le long des cours d'eau. C'est pourquoi, il est préconisé de suivre une approche pluridisciplinaire Mourhi et al., (2013) ; Woessner, (2000) et Winter, (1995) et multi échelle (Scalon et al., 2002). Ce genre d'approche combine différents types de données et a pour effet de limiter les erreurs d'estimations (Hunt, 2006 ; Flipo, 2016).

5. METHODOLOGIE

5.1 Stratégie d'étude

Tout comme les autres méthodologies vues dans le chapitre précédent, la méthodologie développée dans ce chapitre n'a pas la prétention d'être exhaustive ou parfaite. Elle s'attarde simplement à combiner les éléments d'autres méthodologies qui ont eu des retours positifs ou encourageants, faisant d'elle une méthodologie hybride. Il est évident que la démarche méthodologique proposée ici est une démarche parmi tant d'autre qui sera critiquée et discutée dans les chapitres suivants.

Après une présentation générale des données brutes utilisées, ce chapitre détaille les étapes qui ont été suivies pour caractériser les échanges nappe/rivière en BFC. Les méthodes d'analyses incluses dans cette méthodologie seront également présentées.

5.2 Présentation des données brutes

5.2.1 Géologie

La description des formations géologiques et de la lithologie du secteur d'étude est fondée d'une part, sur l'examen des cartes et notices géologiques du BRGM au 1/50 000 ème et sur les différents puits logués réparties de manière assez homogène sur la région BFC d'autre part.

Toutes ces données sont disponibles sous forme scannées, vectorisées ou harmonisées via le site InfoTerre : <https://infoterre.brgm.fr/page/cartes-geologiques>.

5.2.2 Piézométrie

Les données piézométriques utilisées sont issues du portail d'accès aux données sur les eaux souterraines (ADES). Une extraction brute a été réalisée le 18/03/2020 sur l'ensemble de la région Bourgogne-Franche-Comté.

La banque de donnée ADES permet également d'obtenir une chronique piézométrique : c'est-à-dire un relevé, en fonction du temps, des niveaux de l'eau, contenue dans un système aquifère, mesuré dans un piézomètre. La chronique peut être continue ou discontinue.

L'exemple suivant montre la chronique piézométrique du piézomètre de Sorans-les-breurey en Haute-Saône. Cet ouvrage est à 266 m NGF d'altitude, la hauteur du repère (haut du tubage ou margelle du puits) est à 0,5 m au-dessus du sol. La cote des chroniques du piézomètre est définie, soit en cote NGF, soit en profondeur relative (Cf. Figure 15).

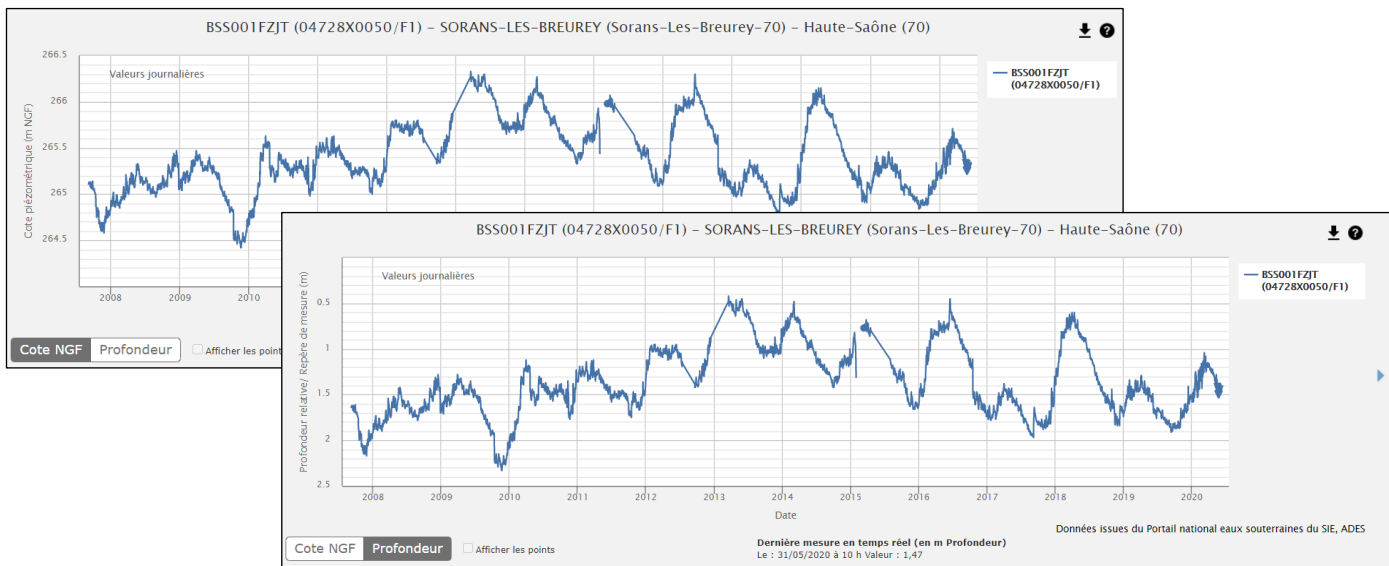


Figure 15 Cote piézométrique (m NGF) du piézomètre en fonction du temps (en haut) versus profondeur relative en fonction du temps. Source : ADES

L'analyse de ces chroniques donne des informations sur l'état de la nappe de manière plus ou moins continue sur de longues périodes. Cela permet d'effectuer des calculs statistiques sur les fluctuations de cette nappe.

5.2.3 Les cartes piézométriques

Les cartes piézométriques représentent la surface piézométrique d'une nappe par des lignes équipotentielles (construites elles-mêmes par une interpolation de mesures ponctuelles).

Les cartes utilisées pour cette étude ont été recueillies auprès du BRGM. Elles se présentent sous la forme d'une couche SIG unique. Sa couverture concerne l'ensemble du bassin Rhône Méditerranée Corse (RMC) (Cf. Figure 16).

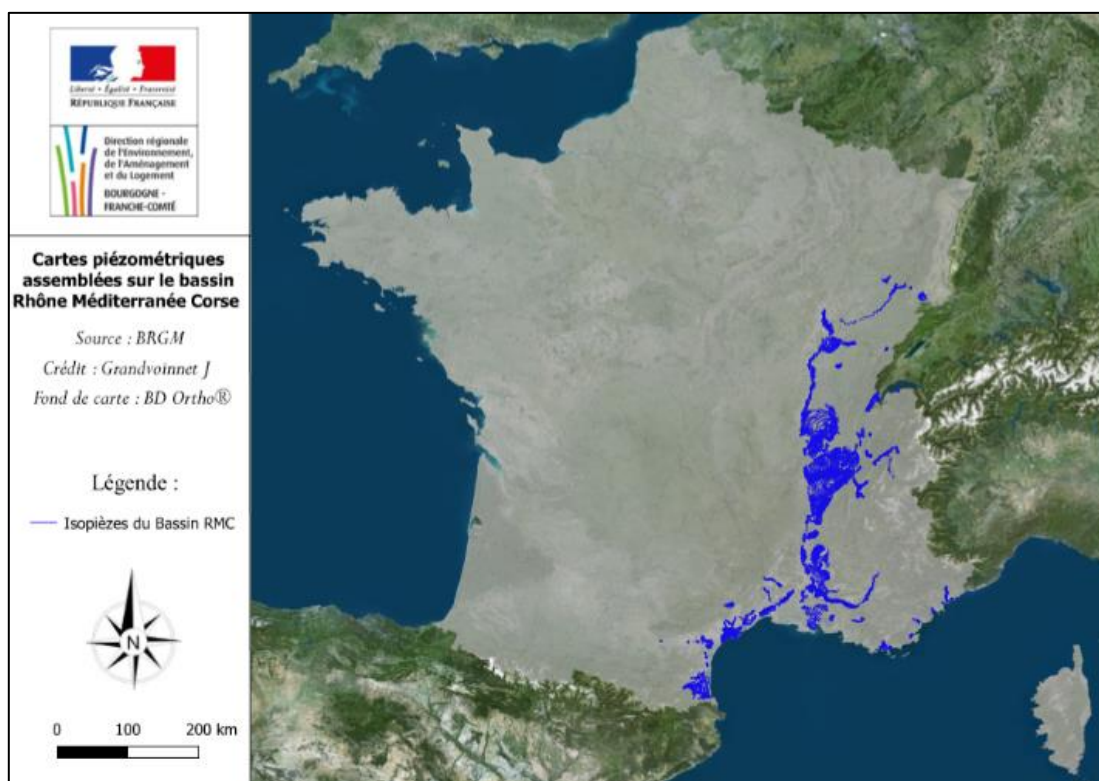


Figure 16 Couverture des cartes piézométriques sur le bassin RMC – Source : BRGM

5.2.4 Réseau hydrographique BD Carthage®

La BD Carthage est une base de données d'information géographique constituant le référentiel géographique national du réseau hydrographique français.

Le réseau hydrographique utilisé pour l'étude correspond au réseau hydrographique de la BD Carthage® de 2016.

5.2.5 Entité BD LISA

La Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères (BD LISA) met à disposition, sur l'ensemble du territoire une cartographie des entités hydrogéologiques. Ces entités représentent un espace géologique caractérisé par des propriétés hydrogéologiques communes. La méthode de délimitation dépend du domaine géologique dans lequel elles se situent.

Les entités BD LISA sont caractérisées par quatre principaux attributs : le thème, l'état, la nature et le type de milieu (porosité), qui renseignent respectivement sur le type de formation (alluvial, sédimentaire, socle, volcanisme, etc...), le type de nappe (libre, captive, semi-captive), le niveau de perméabilité (aquifère, semi-perméable, imperméable) et sur le type de porosité (poreux, fissuré, karstique, etc...) (Pinson, S ; Stollsteiner, P 2016).

Dans le cadre de cette étude, une extraction des entités hydrogéologiques a été réalisée en mars 2020. Les données sont représentées sous la forme d'une couche SIG.

5.2.6 Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Les modèles numériques de terrain sont des représentations 2,5D de la topographie. Ils décrivent la forme et l'altitude de la surface du sol selon différentes résolutions.

Dans le cadre de ce travail, deux MNT ont été utilisées :

- Le premier est issu de la BD ALTI®. Il recouvre l'ensemble du territoire français et présente une résolution au pas de 25m.
- Le second MNT est issu de la RGE ALTI®. Ce MNT présente un maillage au pas de 1m avec une précision altimétrique de +/- 20 cm. Il n'est pas téléchargeable publiquement. Seuls les organismes chargés de missions de service public peuvent y accéder. La DREAL BFC a donc accès ce MNT. Sa couverture spatiale en 2019 est représentée sur la figure ci-après (Cf. Illustration 17).

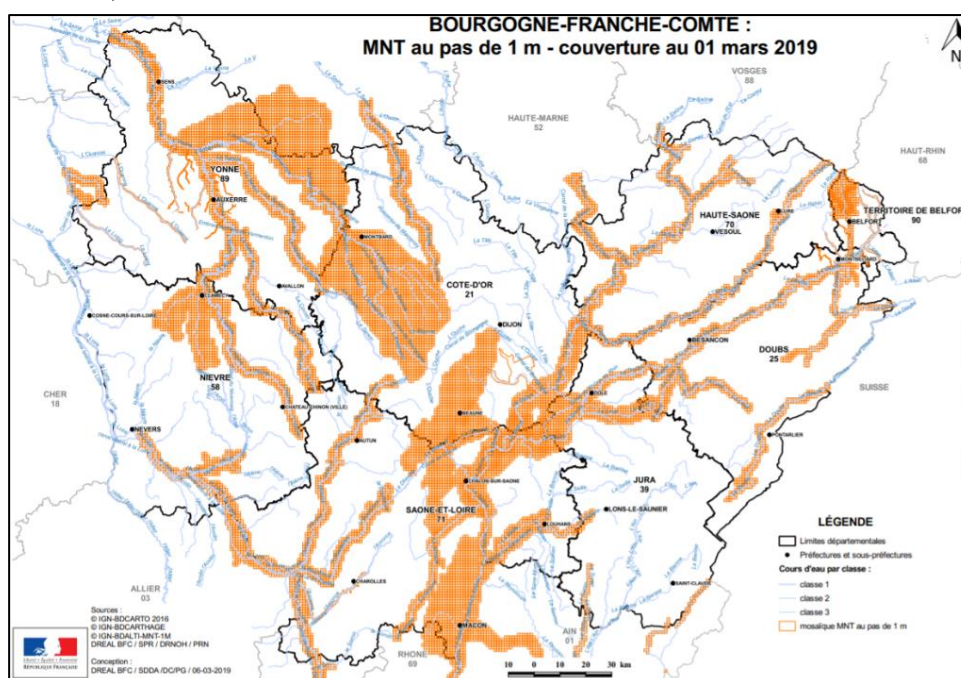


Figure 17 Couverture du MNT 1m en région Bourgogne Franche-Comté – Source Orisk Dreal BFC

5.2.7 Géomorphologie

Les données géomorphologiques sont issues du Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau (SYRAH-CE). Cet outil recueille de nombreuses informations autour des tronçons des cours d'eau tels que par exemple : le taux de tracé rectiligne, le taux de surlargeur, la densité de seuils, de ponts, de digues dans le lit mineur et majeur, l'altitude, la pente ou encore la typologie des sédiments.

Les données géomorphologiques ont été récupérées en mars 2020 et se présentent sous la forme d'une couche SIG qui recouvre l'ensemble de la zone d'étude.

5.2.8 Données traçages

Les données de traçages sont issues. Depuis 1987 la DREAL a enregistré, inventorié et partagé plus de 2000 opérations de traçages hydrogéologiques réalisées sur son territoire. Les données traçages sont accessibles via le lien suivant : <https://cartes.ternum-bfc.fr/?config=apps/dreal-bourgogne-franche-comte/carte-eau.xml>

Le « screen-shot » ci-après (Cf. figure 18) donne un aperçu grossier de la répartition spatiale des traçages enregistrés en mars 2020. L'extraction brute s'est réalisée à cette même date.

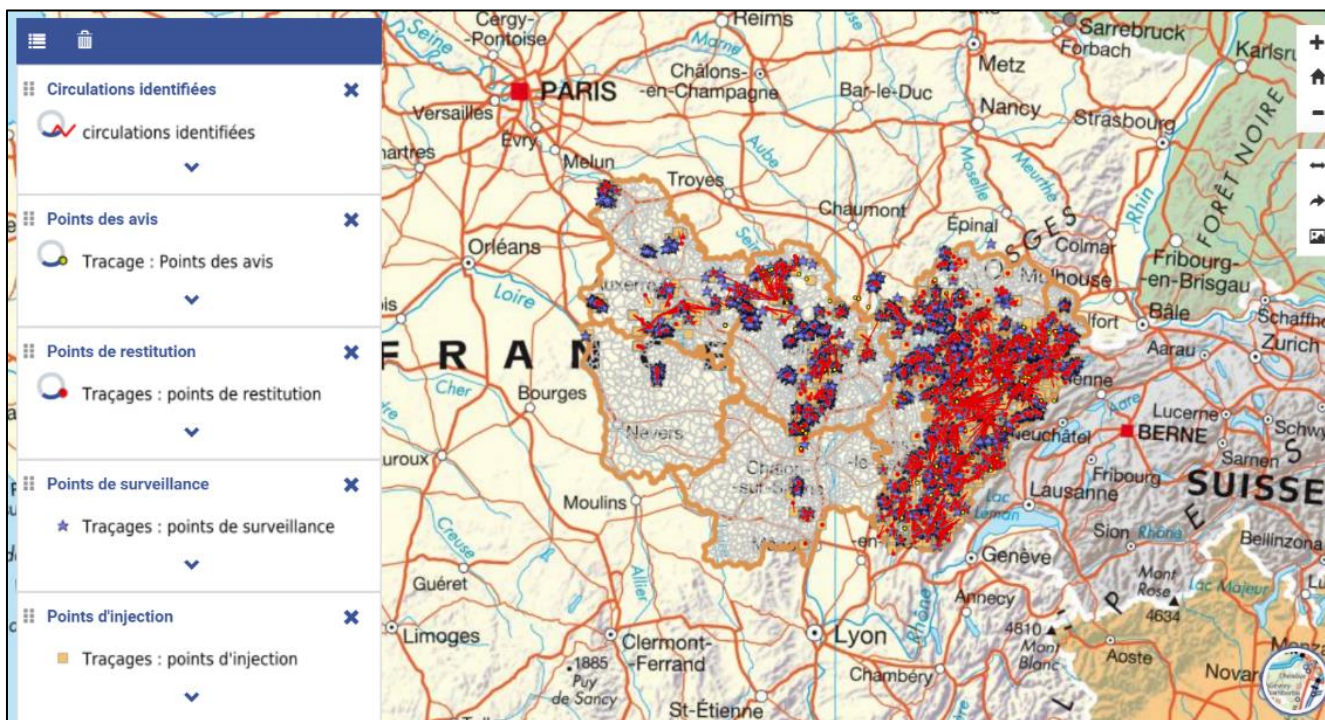


Figure 18 "Screen-shot" représentant la couverture spatiale des traçages hydrogéologiques réalisée en Franche Comté depuis 2005. Source : DREAL

5.2.9 Epaisseur de la ZNS

Les données relatives à l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS) ont été tirées de l'étude d'Allier et al. (2011) intitulée « Evaluation préliminaire du risque d'inondations par remontées de nappes ». Dans cette étude, les auteurs ont estimé l'épaisseur de la ZNS sur le territoire français en se basant sur des cartes piézométriques, des points d'eau de la BSS et des cours d'eau de la BD Carthage®.

La figure 19 ci-dessous met en avant la carte finalisée des épaisseurs de la ZNS sur le territoire français (Allier et Al., 2011).

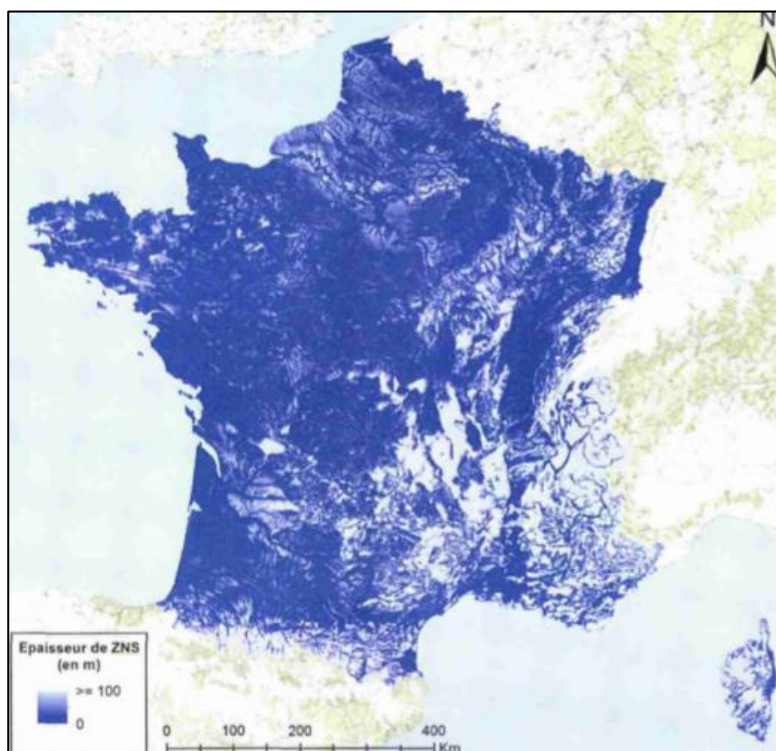


Figure 19 Carte des épaisseurs de la ZNS sur le territoire français. Source : BRGM

5.2.10 Données de débits et hauteur d'eau

La Banque HYDRO est une base de données principalement gérée par les services de l'Etat. Elle rassemble des informations descriptives de nombreuses stations hydrométriques (position, particularité, qualité) ainsi que des chroniques de hauteurs d'eau et de débits mesurés à l'échelle journalière (une donnée par jour), horaire voire plus courte.

L'extraction brute des données de débits et de hauteur d'eau concerne 191 stations. Elle a été réalisée en mars 2020.

5.2.11 Données macrophytes

Les données macrophytes sont issues d'une campagne de reconnaissance réalisée en mai 2019 par l'Université de Besançon. La campagne prévue durant ce stage a été annulée en raison du confinement.

Pour ce qui est de la systématique des végétaux aquatiques, elle a été étudiée au travers de plusieurs ouvrages : (Paran et al., 2015) ; (Ferreira, 2018) ; (Montégut, 1993)

5.2.12 Données invertébrés souterrains

Les données relatives aux invertébrés souterrains proviennent de plusieurs sources :

- Les études biospéléologiques (nombreuses en Franche-Comté),
- L'école des Mines ParisTech, qui publie beaucoup sur ce sujet,
- La base de données PASCALIS, qui est une collection de milliers d'occurrence d'espèces souterraines en Europe. Les travaux concernant le projet PASCALIS ont en grande partie été publiés dans une issue spéciale de la revue *Freshwater Biology*.
- Divers articles scientifiques traitant de la répartition spatiale de la faune stygobies (invertébrés souterrains) (Dole-Olivier et al., 2009) ; (Ferreira, 2007) ; (Malard et al., 2014) ; (Magniez, G et Henry, J-P, 1983) ; (Descloux, 2014)

Une campagne d'échantillonnage était également prévue pendant la période de stage mais a finalement été annulée en raison de la période de confinement.

5.2.13 Télédétection - IRT

Une grande partie des images infrarouges thermiques récupérées sont des images satellitaires provenant de différents satellites :

- Le satellite Landsat-ERTS-1 8 de la NASA qui a été lancé en février 2013. Il couvre la Terre tous les 16 jours avec des images de 185 km x 185 km, en 16 bits, comptant 11 bandes spectrales : 9 dans le visible (8 multi spectrales de résolution 30 m ; 1 panchromatique à 15m) et 2 bandes thermique (60 m).
- Les satellites sentinel-2A et 2B de l'agence spatiale européenne. Ils acquièrent des images dans 13 bandes spectrales dont trois se situe dans l'infrarouge moyen (MIR).
- Les satellites spot 6 et 7 (propriété d'Airbus Defence and Space) offrent quant à eux, des images hautes résolutions composés de 5 bandes spectrales : 3 dans le visible (bandes RVB) ; 1 panchromatique et 1 proche infrarouge (PIR).

Quelques images aéroportées issues d'un drone équipé d'une caméra thermique (drone personnel) ont permis de compléter notre recueil de données. Les informations sont (pour l'instant) très locales et concernent quelques petits tronçons de cours d'eau franc-comtois. (Cf. Annexe 3 pour voir le matériel utilisé)

5.2.14 Données physico-chimiques

Plusieurs jeux de données fournies par la DREAL BFC ont été analysés. Les données sont nombreuses (T°C, conductivité, nitrate, nitrite, nh_4^+ , mg, ca, p, o_2 dissous, so_4^{2-} , carbone organique, etc ...) mais très souvent ponctuelles rendant difficile leur analyse dans certain cas en vue de réaliser des profils en long.

De ce fait, elles ont parfois été complétées avec d'autres données issues des bureaux d'études locaux

5.3 Démarche méthodologique

Cette section présente de manière détaillée les grandes étapes qui ont jalonné le développement de la présente méthodologie.

La figure 20 résume la démarche suivie pour réaliser une caractérisation des échanges nappe/rivière.

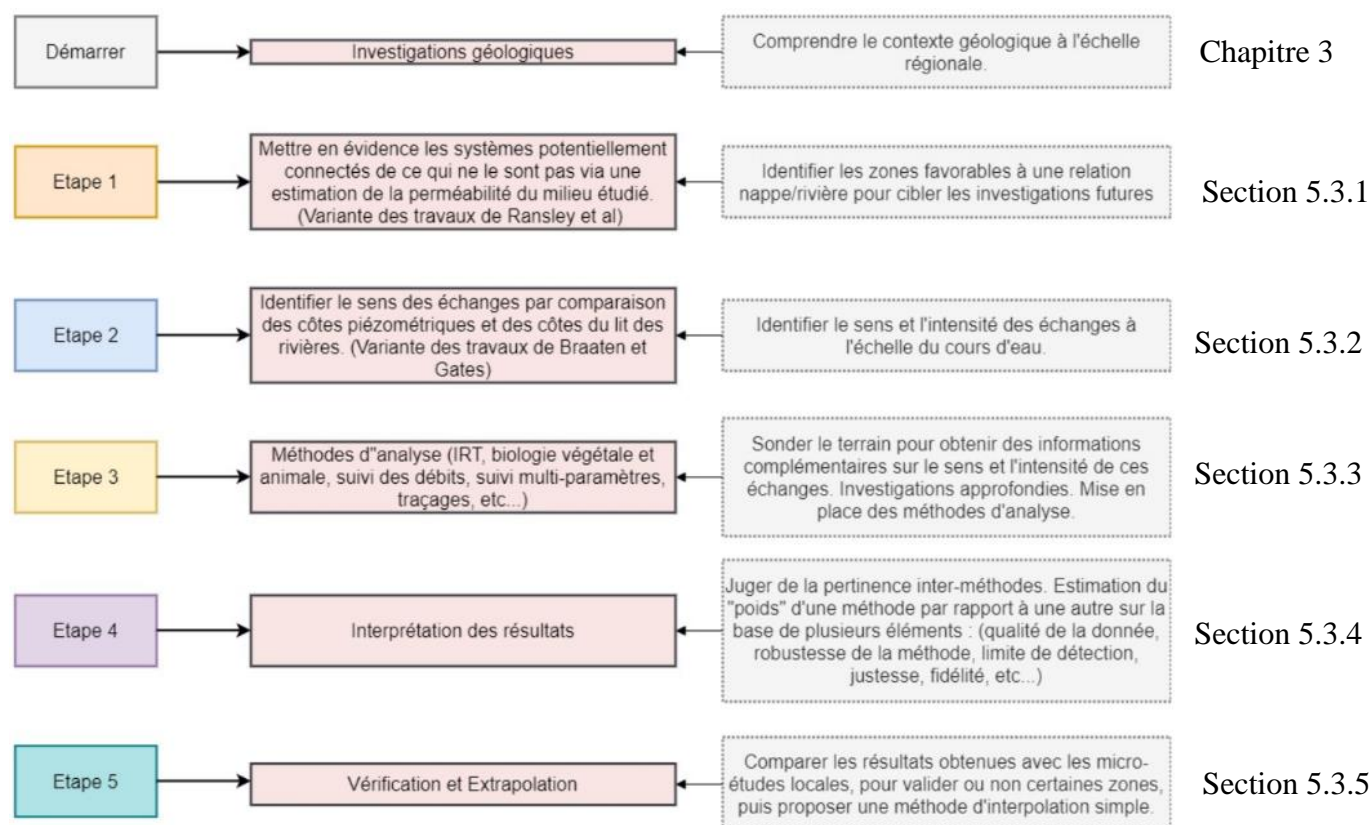


Figure 20 Structure de la méthodologie de caractérisation des échanges nappe/rivière. Source : J. Grandvoinet

Dans cette méthodologie, il est proposé de « démarrer » par une phase d'investigation géologique pour comprendre le fonctionnement global des systèmes rencontrés et de se familiariser avec les différentes zones.

L'étape 1 a pour objectif de différencier les zones propices à une relation nappe/rivière des zones qui le sont moins, voire pas du tout. L'approche utilisée (une variante des travaux Ransley et al., (2007)) se base sur l'estimation de plusieurs facteurs gouvernant les interactions nappe/rivière (*ie* : la perméabilité des formations géologiques, la composition du lit de la rivière, la hauteur piézométrique, l'épaisseur de la ZNS et la géomorphologie du cours d'eau) pour en dériver un indice dont la valeur renseigne sur le degré de connectivité entre la nappe et le tronçon de cours d'eau étudié. Le choix des facteurs et la construction de l'indice sont explicités dans la section prévue à cet effet (*Cf.* Section 5.3.1).

L'étape 2 basée sur les travaux de Braaten et Gates (2002) et d'Ivkovic (2008) vient approfondir l'étape 1. Cette étape repose uniquement sur l'étude de la différence d'élévation entre le lit de la rivière d'une part,

et le niveau de la nappe d'eau souterraine d'autre part. Cette seconde approche permet d'estimer, lorsqu'une connexion est avérée, un sens d'échange et un gradient hydraulique (Cf. 5.3.2).

La troisième étape, la plus chronophage, porte sur les différentes méthodes d'analyse retenues, et dans certain cas leur mise en application sur site. L'objectif scientifique de cette étape est de tester un maximum de méthodes d'analyse dans les secteurs où de la donnée est disponible et la méthode applicable. La comparaison des résultats obtenus permet de questionner la méthodologie et d'identifier les éventuelles complémentarités ou disparités entre les différentes méthodes. (Cf. 5.3.3).

Au stade de l'étape 4, un travail d'interprétation spécifique à chaque site est mis en place. Il s'agit ici de juger de la pertinence inter-méthodes et d'attribuer ou non, un « poids » pour chaque méthode d'analyses employées. (Cf. 5.3.4).

L'étape 5 s'attarde à corroborer les résultats de cette méthodologie avec les micro-études locales réalisées par divers bureaux d'études et/ou associations de pêche. Cette action permet dans certain cas de valider ou non des secteurs où la caractérisation des échanges est difficile à définir. Concernant les zones sans information, un travail d'extrapolation entre en jeu (Cf.5.3.5).

5.3.1 Etape 1 – Indicateur de connectivité

5.3.1.1 Description et objectif

La première approche est une variante des travaux de Ransley et al., (2007). Elle a pour objectif de fournir une localisation globale des systèmes potentiellement connectés de ceux qui ne le sont pas. Elle permet de cibler les secteurs qui feront l'objet d'investigations futures plus précises. Autrement dit, il s'agit de déterminer les secteurs dans lesquelles les méthodes d'analyse vues précédemment pourront être appliquées.

Basée sur l'estimation de la perméabilité d'un secteur donné, cette approche vise à déterminer un degré d'interaction entre les eaux souterraines et les eaux superficielles le long des rivières, en combinant plusieurs facteurs gouvernant ces interactions.

5.3.1.2 Choix des facteurs

Le choix des facteurs retenus est fonction de la donnée disponible d'une part, et des propositions faites par Ransley et al., (2007) dans leur travaux d'autre part.

Ces derniers, rappelons-le, proposaient 4 facteurs (ou critères) susceptibles de commander les échanges nappe/rivière :

- La profondeur du niveau de la nappe,
- Les caractéristiques du lit de la rivière,
- La géologie,
- La géomorphologie,

Chacun de ces critères est scoré (positivement ou négativement) puis relié par une équation qui leur attribut à chacun un « poids » plus ou moins important (ici les critères « geology » et « stream bed sediments » ont plus de poids que les autres critères).

Weighting	
Connectivity index model	= Potential for stream-aquifer connectivity = (3 x depth to water table) + (5 x stream bed sediments) + (5 x geology) + (2 x geomorphology)

Les quatre critères choisis par Ransley et al., semblent pertinents, et sont, en partie, repris dans la présente approche. Cependant, le critère « stream bed sediments » reste un critère relativement difficile à

appréhender à l'échelle de la zone d'étude. C'est pourquoi il est substitué par deux autres critères dont la donnée est disponible, à savoir : Les entités hydrogéologiques de la BDLISA et l'épaisseur de la ZNS.

Au final, 5 critères sont retenus :

- La hauteur du niveau de la nappe,
- La géologie,
- L'épaisseur de la ZNS,
- Les entités de la BD LISA à l'affleurement,
- La géomorphologie.

5.3.1.3 Pondération

Concernant la pondération, Ransley et al., 2007 n'explicitent pas le choix de leur pondération. L'attribution d'un poids plus important pour la géologie et les caractéristiques du lit du cours d'eau n'engage qu'eux.

C'est alors que la question de l'importance de la pondération se pose. Doit-on nécessairement pondérer les critères, et comment ? Cette question fondamentale divise les spécialistes sur le sujet. Certains auteurs pensent que la pondération est importante car elle permet de tenir compte de la contribution réelle de chaque critère. A contrario, d'autres estiment que la pondération peut conduire à une surreprésentation de l'importance de certains critères ou, à l'inverse, à une sous-représentation (Tangian, 2007). Ce point de vue est encore plus valable lorsque la pondération est déterminée de manière subjective comme c'est le cas pour l'approche de (Ransley et al., 2007).

La présente approche s'efforce donc à être la moins subjective possible en proposant une évaluation de manière dichotomique (valeur de 0 ou de 1) où « 1 » équivaut à une situation « favorable » à une relation nappe/rivière et « 0 » à une relation « défavorable ».

5.3.1.4 Classification

Pour chacun de ces facteurs, une classification en 4 ou 5 classes est établie, sur la base de plusieurs écrits scientifiques (Ivkovic, 2008), (Ransley et al. 2007), (Braaten et Gates 2002).

Pour chaque classe, une valeur est appliquée en fonction de l'incidence sur la connectivité eau superficielle/eau souterraine (soit « 0 » ou « 1 »). Une valeur de « 1 » signifie que la situation rencontrée est propice à une relation nappe/rivière. A contrario, un score de « 0 » signifie que la probabilité d'une relation nappe/rivière est compromise. La lettre « D » pour « Déclassant » signifie que le critère prend une ampleur significative pour, à lui seul, défavoriser grandement la présence d'une relation nappe/rivière.

Le tableau 1 illustre les propos précités en mettant en avant la classification retenue ainsi que la valeur associée :

Tableau 1 Classification des critères utilisée pour l'étape 1 de la méthodologie

Facteurs	Classification	Valeur
Géologie	Sable/gravier	1
	Sable/argile (significativement plus de sable que d'argile)	1
	Sable/argile (significativement moins de sable que d'argile)	0
	Principalement des argiles	D
Hauteur du niveau de la nappe (m)	< à 10m	1
	Entre 10 et 20m	1
	Entre 21 et 30m	1
	Entre 31 et 50m	0
	> à 51m	D

Epaisseur de la ZNS	< à 10m	1
	Entre 10 et 20m	1
	Entre 21 et 30m	0
	Entre 31 et 50m	0
	> à 51m	D
Entité BD LISA	Entité identifiée comme fortement perméable	1
	Entité qualifiée de perméabilité moyenne	1
	Entité de faible perméabilité	0
	Complètement imperméable	D
Géomorphologie	Cours d'eau présentant un environnement majoritairement érosif	1
	Cours d'eau présentant un environnement mixte	1
	Cours d'eau présentant un environnement mixte à dominante sédimentaire	0
	Cours d'eau présentant un environnement majoritairement sédimentaire	0
	Cours d'eau colmaté	D

5.3.1.5 Calcul du score

Le calcul du score pour un tronçon donné a été déterminé selon deux méthodes d'agrégations différentes, à savoir : la méthode « Indicator Average » et la méthode « all-or-none ». Ces méthodes sont tirées d'un guide réalisé par l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) dans lequel est expliquée la construction d'un indice.

5.3.1.5.1 La méthode indicator average

Le calcul du score pour cette méthode est le ratio du nombre de critères favorables (score « 1 ») par rapport au nombre de critères utilisés (Cf. Tableau 2).

Tableau 2 Exemple de calcul du score pour la méthode « indicator average »

	Géologie	Hauteur du niveau de la nappe	Epaisseur ZNS	Entité BD lisa	Géomorphologie	Score
Tronçon 1	1	0	1	1	1	0,8
Tronçon 2	1	1	1	1	1	1
Tronçon 3	0	1	0	0	1	0,4
Tronçon 4	1	1	1	-	1	1
Tronçon 5	0	D	1	0	-	0,33 + Déclassement
...						

Une valeur de « 1 » témoigne d'une situation favorable pour le critère étudié, un « 0 » témoigne d'une situation défavorable et la lettre « D » signifie que le critère est déclassant.

Par exemple, pour le tronçon 1, le score S se calcule de la manière suivante :

$$(S)_{(\text{Tronçon } 1)} = \frac{\text{Nombre de critères favorables à une relation nappe/rivière}}{\text{Nombre total de critères utilisés}}$$

$$(S)_{(\text{Tronçon } 1)} = \frac{4}{5} = 0,8$$

Plus le score s'approche de 1, plus la probabilité qu'une relation nappe/rivière existe est importante. A l'inverse une valeur faible signifie que la probabilité qu'une relation nappe/rivière existe est moindre.

La correspondance entre le score et le degré d'interaction est indiqués dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 Correspondance entre score et degré potentiel d'interaction nappe/rivière

Score « S »	Probabilité d'une connexion hydraulique
$S \geq 0,81$	Probabilité d'une relation nappe/rivière : Excellent
$0,61 \leq S \leq 0,80$	Probabilité d'une relation nappe/rivière : Bon
$0,41 \leq S \leq 0,60$	Probabilité d'une relation nappe/rivière : Moyen
$0,21 \leq S \leq 0,40$	Probabilité d'une relation nappe/rivière : Médiocre
$0 \leq S \leq 0,20$	Probabilité d'une relation nappe/rivière : Mauvais
$S < 0$	Probabilité d'une relation nappe/rivière : Très mauvais

Dans le cas où un critère est déclassant ou que le nombre de critère utilisé est inférieur à 3, la probabilité de la présence qu'une connexion hydraulique existe diminue (déclassement d'un rang).

5.3.1.5.2 La méthode all-or-none

La méthode tout ou rien (en français) est plus restrictive que la méthode précédente. Le score d'un tronçon est de 1 si, pour tous les critères, la situation d'une relation nappe/rivière est favorable ; il est de 0 si au moins un des critères n'est pas rempli (C.f Tableau 4).

Tableau 4 Exemple de calcul de score pour la méthode all-or-none

	Géologie	Hauteur du niveau de la nappe	Epaisseur ZNS	Entité BD lisa	Géomorphologie	Score
Tronçon 1	1	1	1	1	1	1
Tronçon 2	0	1	1	1	1	0
Tronçon 3	0	1	0	0	1	0
Tronçon 4	1	1	1	-	1	1
Tronçon 5	0	-	1	0	-	0
...						

Une valeur de « 1 » témoigne d'une situation favorable pour le critère étudié, alors qu'un « 0 » témoigne d'une situation défavorable

Dans ce cas de figure, la notion de probabilité prend un caractère dichotomique. Une valeur de « 1 » signifie que la probabilité qu'une relation nappe/rivière existe est forte (pour le critère considéré) alors qu'un « 0 » signifie que la probabilité est faible. Le gros point fort de cette méthode d'agrégation est que l'estimation des zones propices à un échange nappe/rivière est plus « certaine » car elle prend en compte tous les critères.

5.3.1.5.3 Comparaison des méthodes d'agrégations

Afin de comparer ces méthodes d'agrégations et de voir leur degré de concordance, un test statistique simple est réalisé. Il s'agit du test kappa de Cohen.

En statistique le test du kappa mesure l'accord entre deux éléments.

Le calcul se fait de la manière suivante :

$$k = \frac{\text{Pr}(a) - \text{Pr}(e)}{1 - \text{Pr}(e)}$$

Où $\text{Pr}(a)$ est l'accord relatif entre codeurs et $\text{Pr}(e)$ la probabilité d'un accord aléatoire. Si les deux méthodes sont totalement en accord, $\kappa = 1$. Si en revanche le désaccord est total (ou en accord dû uniquement au hasard), $\kappa \leq 0$.

Le test réalisé concerne 50 tronçons de cours d'eau sélectionnées aléatoirement sur l'ensemble de zone d'étude. Pour chaque tronçon de cours d'eau les deux méthodes d'agrégation sont utilisées. Pour la méthode « all-or-none », un score de 1 signifie que la relation nappe rivière est avérée, pour la méthode « indicator average » le score doit être supérieur à 0,5.

Le tableau ci-dessous relate les résultats :

		Méthode indicator average	
		Favorable	Non favorable
Méthode all-or-none	Favorable	(25)	(2)
	Non favorable	(3)	(20)

L'observation des accords inter-méthodes est :

$$P_{accord} = \frac{a + d}{a + b + c + d} = \frac{25 + 20}{50} = 0,9$$

Pour calculer la probabilité d'accord au hasard, il faut retenir que :

La méthode « all or none » a renseigné comme « favorable » à une relation nappe rivière, 27 cours d'eau, soit 54% des cas,

Et la méthode « indicator average » a renseigné « favorable » 28 tronçons de cours d'eau, soit 56% des cas.

Ainsi la probabilité attendue que les deux méthodes renseignent « favorable » est :

$$P_{oui} = \frac{a + b}{a + b + c + d} \times \frac{a + c}{a + b + c + d} = 0,54 \times 0,56 = 0,302$$

A l'opposé, la probabilité que les deux méthodes renseignent « non favorable » est :

$$P_{non} = \frac{c + d}{a + b + c + d} \times \frac{b + d}{a + b + c + d} = 0,46 \times 0,44 = 0,202$$

La probabilité globale que les deux méthodes soient en accord est donc :

$$P_{hasard} = P_{oui} + P_{non} = 0,302 + 0,202 = 0,505$$

Enfin, la formule de kappa peut s'appliquer comme suit :

$$k = \frac{P_{accord} - P_{hasard}}{1 - P_{hasard}} = \frac{0,9 - 0,505}{0,505} = 0,798$$

D'après la littérature, une valeur de k supérieur à 0,7 signifie que la concordance entre les deux éléments comparés est forte. Autrement dit, les méthodes « all or none » et « indicator average » offrent des résultats cohérents. Dans le cadre de ce travail, la méthode « indicator average » a été priorisée.

5.3.2 Etape 2 – Comparaison des cotes altimétriques nappe/rivière

Cette deuxième étape est motivée par les travaux de Braaten et Gates (2002) et d'Ivkovic (2008). Ils ont chacun proposé une méthodologie orientée principalement sur la comparaison des cotes des niveaux piézométriques et des lits des rivières.

Les principes de base qui ressortent de ces études sont les suivants :

- (1) - Une connexion hydraulique entre le cours d'eau et l'aquifère est supposée quand (i) l'écart entre le niveau piézométrique et le tronçon de rivière est inférieur à 10m, et que (ii) le piézomètre se situe à moins d'un kilomètre du tronçon étudié.
- (2) - Un échange de la nappe souterraine vers la rivière ne peut se faire que si la cote piézométrique est supérieure à la cote de la surface de l'eau de la rivière.
- (3) - Un échange de la rivière vers la nappe souterraine ne peut se faire que si la cote de la surface de la rivière est supérieure à la cote piézométrique.
- (4) - Des variables temporelles naturelles (ex : saisons sèches/saisons humides) ou non (ex : pompage/réalimentation artificielle) peuvent modifier le sens des échanges.

En partant de ces principes, il est possible, d'une part, par simple localisation des piézomètres de faible profondeur et proche du cours d'eau (moins d'un km) de mettre en évidence des zones propices aux échanges que l'étape 1 n'aurait pu identifier, et d'autre part, de calculer, un gradient hydraulique entre un piézomètre et le cours d'eau dont la valeur (positive ou négative) renseigne sur le sens de l'échange.

5.3.2.1 Triangulation

En formant un triangle entre un segment de cours d'eau et un piézomètre de faible profondeur et situé à proximité (moins d'un km) de la rivière (Braaten et Gates, 2002), il est possible de calculer la différence d'altitude (ΔZ) entre la ligne d'eau et le niveau de la nappe. Il est ainsi facile de distinguer, les secteurs où la nappe alimente la rivière de ceux où la rivière recharge la nappe (Figure 21).

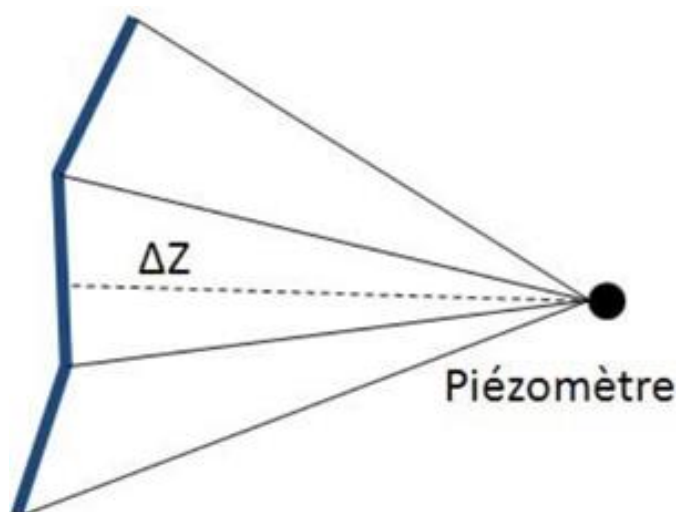


Figure 21 Schéma représentant le principe de triangulation utilisé

5.3.2.2 Gradient hydraulique (ΔZ)

L'intensité des échanges peut également être déterminée car elle est proportionnelle à la différence d'altitude.

La formule utilisée pour le calcul du gradient est la suivante :

$$\text{Gradient hydraulique} = 100 \times \frac{\Delta Z_{(\text{Cote}_{\text{piézométrique}} - \text{Cote}_{\text{cours d'eau}})}}{\text{Distance}_{\text{entre cours d'eau et piézomètre}}}$$

Une valeur négative correspond à un échange de la rivière vers la nappe alors qu'une valeur positive correspond à un échange de la nappe vers la rivière.

5.3.2.3 Protocole

5.3.2.3.1 Traitement des données piézométriques

Hormis l'identification par code BSS, chaque piézomètre est caractérisé par un certain nombre d'attributs et d'informations complémentaires permettant de réaliser une première sélection des points d'eau véritablement utilisables. Des critères éliminatoires ont été définis dans ce but :

- Le point d'eau ne doit être ni rebouché ni obstrué ;
- Le mode de gisement de la nappe doit être non captif et non artésien ;
- La durée de la chronique piézométrique doit être supérieure à 2 ans ;
- La fréquence de mesure annuelle doit être d'au moins 50 mesures/an.

Après traitement via un script R, 133 piézomètres sont retenus.

Les chroniques de ces 133 piézomètres sont analysées afin d'en estimer :

- La cote piézométrique moyenne en période de hautes-eaux (février → mars) ;
- La cote piézométrique moyenne en période de basses-eaux (août → septembre) ;
- La cote piézométrique moyenne annuelle.

Les moyennes calculées sont des moyennes géométriques et non arithmétiques. La moyenne géométrique s'avère être moins sensible que la moyenne arithmétique aux valeurs les plus élevées d'une série de données.

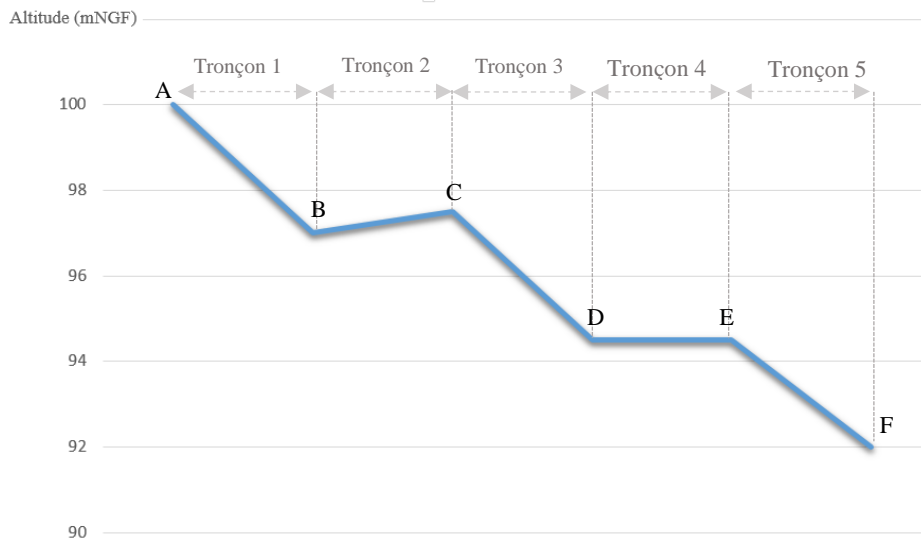
5.3.2.3.2 Traitement des données de hauteur d'eau

Les hauteurs des cours d'eau sont estimées en priorité, par l'analyse des chroniques des différentes stations limnimétriques réparties sur l'ensemble de la zone d'étude et des quelques relevés de géomètre répartis sporadiquement sur la région. Comme pour la piézométrie, ces stations sont analysées afin d'en estimer des cotes de surface moyennes en basses eaux, hautes eaux et annuelles.

En l'absence de données limnimétriques suffisantes, les hauteurs sont estimées à l'aide des MNT au pas de 1m et dans une moindre mesure ceux au pas de 25m.

La détermination des altitudes moyennes via les MNT nécessite un découpage des cours d'eau en plusieurs segments (algorithme « v.split » ou « exploser des lignes » sous Qgis). Ce découpage va générer des segments de tailles similaires.

Chacun de ces segments ou tronçons se voit ensuite attribuer une altitude moyenne qui n'est autre que la moyenne arithmétique entre le point amont et aval d'un tronçon. La figure 22 illustre le principe de calcul pour un tronçon.



$$Altitude\ moyenne_{(Tronçon\ 1)} = \frac{A+B}{2} = \frac{(100 + 97.5)}{2} = 98,75m$$

Figure 22 Schéma (profil en long) représentant le principe de calcul de l'altitude moyenne d'un tronçon.

Les extrémités et le centre de chaque segment sont reliés par un autre algorithme permettant ainsi de réaliser la triangulation. La figure 24 ci-dessous montre un exemple d'application réalisé sur un cours d'eau dans l'Yonne. La valeur de gradient mesurée (en bas de la figure) ne concerne que le premier tronçon.

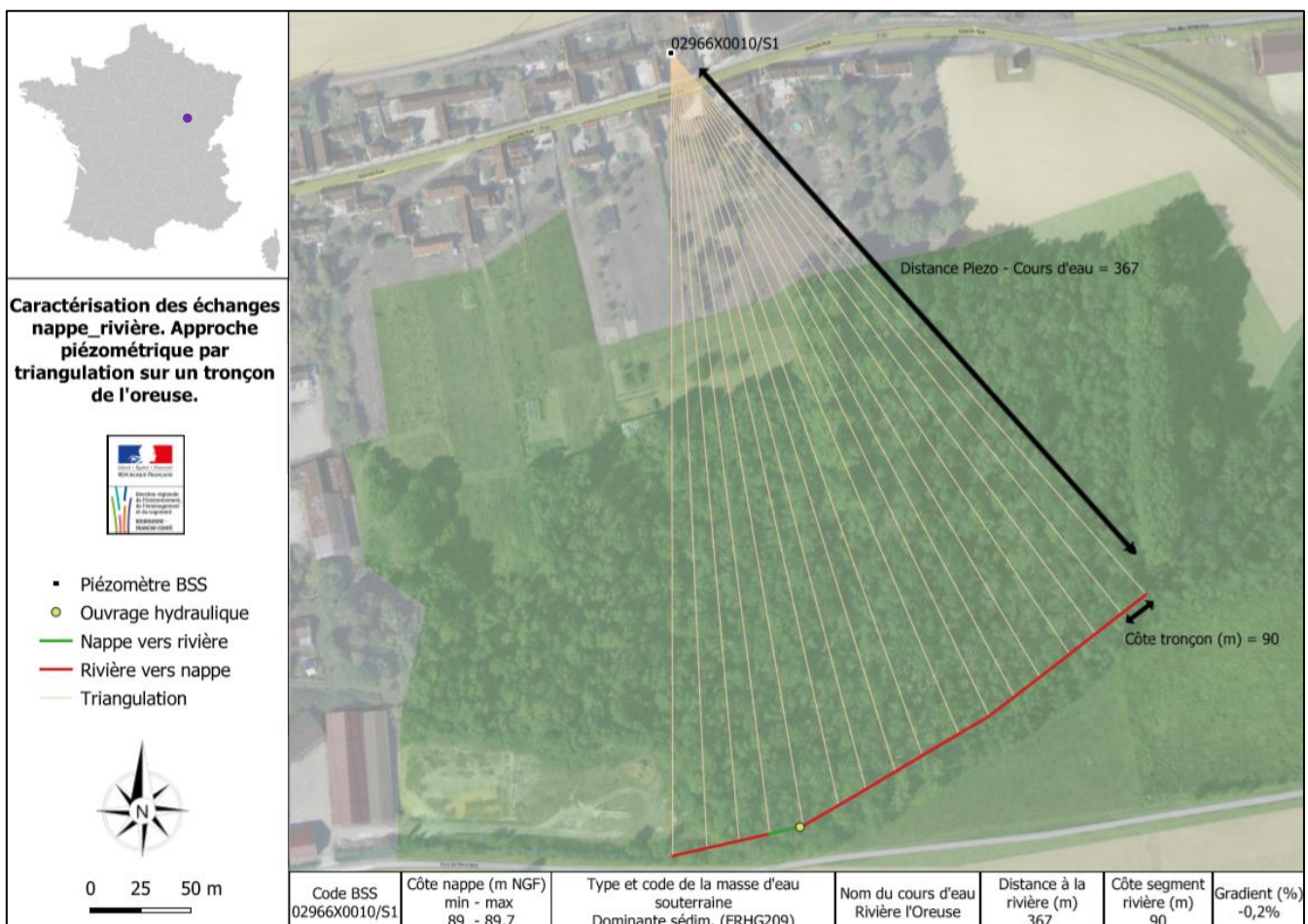


Figure 24 Application d'une triangulation sur un tronçon de cours d'eau dans l'Yonne.

5.3.3 Etape 3 : Méthodes d'analyse

Cette étape s'attarde à expliquer et à décrire la démarche à suivre pour appliquer une partie des différentes méthodes d'analyse mentionnées dans le chapitre précédent. Même si chaque méthode a fait l'objet d'une étude approfondie, et qu'il serait judicieux de toutes les appliquer, celles présentant des données très limitées voire inexistantes n'ont évidemment pas été explorées dans ce travail et leur principe d'application n'est donc pas présenté dans la suite de ce document.

Les méthodes retenues sont les suivantes :

- Traçages artificiels
- Suivi de (quelques) paramètres physico-chimiques
- IRT
- Suivis des débits
- Macrophytes
- Invertébrés souterrains
- Radon 222

5.3.3.1 Mise en application

La mise en application des méthodes d'analyse ne s'exécute pas de manière aléatoire mais suit une chronologie bien précise. Le diagramme ci-après met en exergue la méthodologie proposée pour cette étape. (Cf. Figure 25).

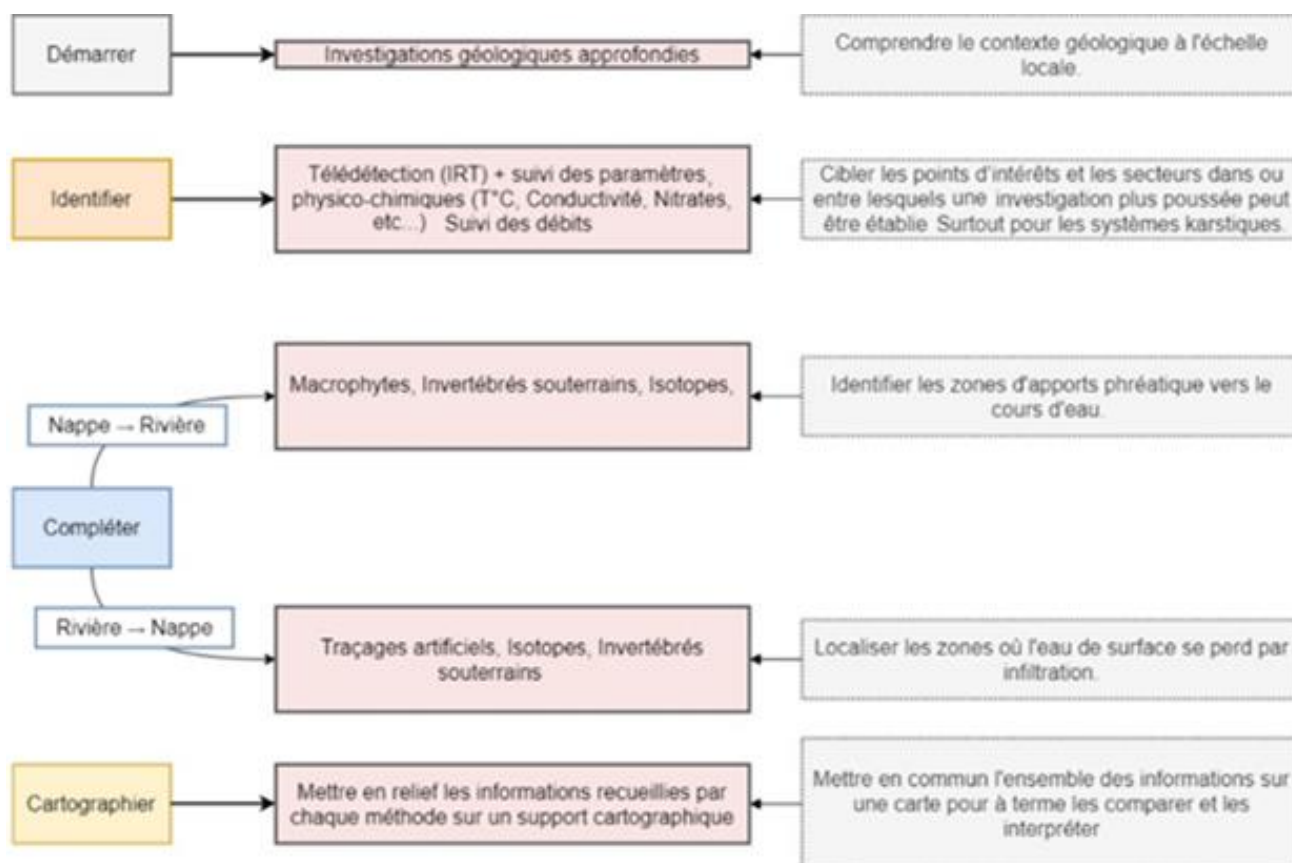


Figure 25 Méthodologie relative à l'étape 3

Dans cette « sous » méthodologie, il est, à nouveau, proposé de « démarrer » par des investigations géologiques, mais plus poussées, du secteur à étudier afin de mieux comprendre le fonctionnement du système à l'échelle locale. Cela peut se faire notamment au travers de l'examen de cartes géologiques à l'échelle 1/50 000ème. Elles permettent de discerner convenablement les différentes couches géologiques et/ou accidents (failles) qui jalonnent la zone d'étude.

La phase suivante fait intervenir trois méthodes d'analyse (« IRT », « suivi des paramètres physico-chimiques » et « suivi des débits ») adaptées à des échelles d'investigation assez larges. Elles permettent d'« identifier » simplement et rapidement les types d'échanges qui sont observés. Cette phase cible également les points d'intérêts et les secteurs dans ou entre lesquelles d'autres méthodes (plus locales) offriront des éléments complémentaires sur la nature de ces échanges.

La phase suivante vient donc « compléter » la phase d'identification en utilisant des méthodes d'analyse plus locales et applicables dans des contextes géologiques différents. Certaines méthodes apportent des réponses complètes sur le sens des échanges, c'est-à-dire qu'elles permettent de définir les échanges de la nappe vers la rivière et de la rivière vers la nappe, alors que d'autres ne peuvent définir des échanges que dans une seule direction (nappe → rivière ou rivière → nappe). Certaines méthodes n'apportent pas à proprement parler d'informations sur le sens des échanges mais plutôt des informations subsidiaires telles que le temps de séjours des eaux, le taux de mélange, l'âge des eaux ou encore les limites des bassins versants.

Après complétion des différentes méthodes d'analyses, il suffit de réunir l'ensemble des résultats et de les « cartographier » en vue de les comparer et de les synthétiser.

5.3.3.2 « Identifier » via l'IRT

La télédétection par imagerie infrarouge (IRT) est une méthode d'analyse rapide qui permet d'établir une cartographie de la température de la surface des cours d'eau (Torgersen et al., 2001 ; Wawrzyniak, 2012) à différentes échelles spatiales (Hancock et al., 2006) selon les images utilisées (satellites, avions, drones, au sol).

À large échelle, elle peut, par exemple, identifier, par contraste de température, des anomalies thermiques causées par un affluent, les rejets de STEP, l'influence d'une centrale nucléaire ou encore d'un barrage sur un cours d'eau. (Wawrzyniak, 2012)

À une échelle plus petite, il est possible de discerner des apports phréatiques liés aux résurgences et aux bras morts (Dugdale et al. 2013). En effet, été comme hiver, la température des eaux souterraines reste généralement stable (~10-12°C), alors que celle des rivières varie de manière significative au cours de l'année (entre 5 et 25°C). De fait, en été, la présence d'un apport phréatique sera identifiée par une remontée d'eau froide par rapport à la température de la rivière, alors qu'en hiver, les arrivées d'eaux provenant de la nappe seront plus chaudes par rapport à celle du cours d'eau.

Cette méthode multi-échelle a donc le potentiel de spatialiser rapidement et à large échelle l'information thermique donnant un aperçu global des secteurs où la nappe alimente la rivière.

5.3.3.2.1 Traitements d'images

Le traitement des images infrarouges nécessite, suivant le système de traitement et le type d'images, de réaliser plusieurs étapes. Un tutoriel présenté annexe 4 détaille ces étapes. (Cf. tutoriel annexe 4). Les figures 26 et 27 ci-après illustrent des exemples de traitement d'images IRT à différentes résolutions.



Figure 26 Cartographie thermique d'un tronçon d'un cours d'eau (La Saône) à large échelle.. Source : J.Grandvoinet

Les deux images IRT ont été prises en période estivale :

La figure 24 (de faible résolution) ne permet pas de mettre en avant de réels échanges entre la rivière et sa nappe. Cependant il est possible de relever de légers contrastes thermiques entre affluents et cours d'eau principal.

Pour ce qui est de la figure 25 (plus haute résolution), un contraste thermique plus important est observé, laissant entrevoir un apport phréatique.

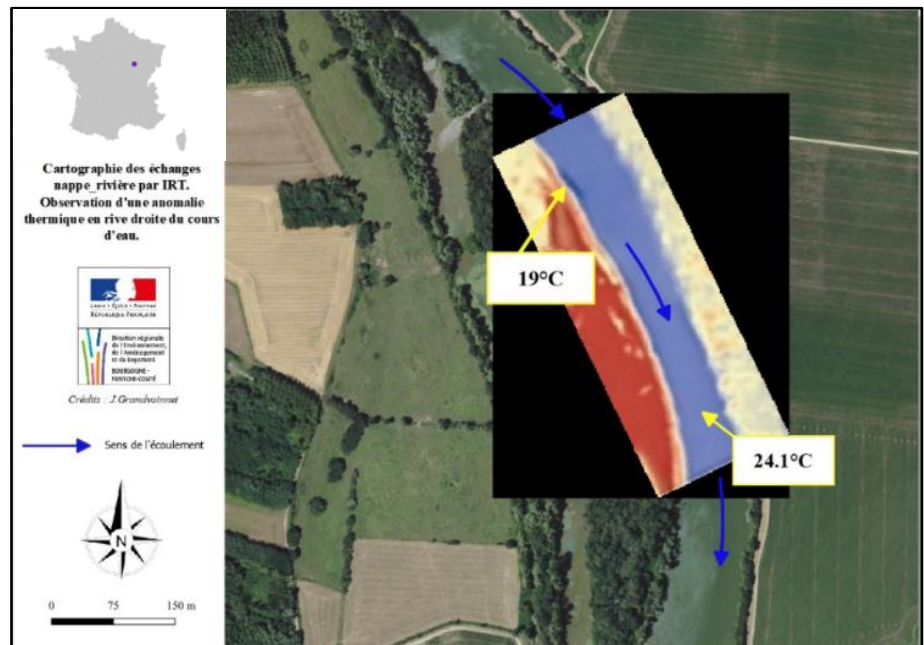


Figure 29 Cartographie thermique d'un tronçon de cours d'eau (La Saône) à une échelle plus fine. Source : J. Grandvoinet.

5.3.3.3 « Identifier » via le suivi des paramètres physico-chimiques le long des cours d'eau et le suivi des débits.

Le suivi des paramètres physico-chimiques est une méthode qui se combine relativement bien avec l'IRT car au-delà d'être facile d'exécution, elle est, selon les paramètres suivis, un bon moyen d'obtenir de précieux renseignements sur les sources et les interactions eau/roche. Les sections suivantes expliquent le principe de quelques paramètres ayant servis pour cette troisième étape de la méthodologie.

5.3.3.3.1 Conductivité électrique (CE)

Sur le même principe que l'analyse des températures, l'analyse des variations de CE permet d'identifier des remontées de nappe. En effet, la CE est très dépendante des couches géologiques traversées par les eaux, et du temps de parcours entre les aires de recharge et les zones de décharge. Une eau souterraine, lorsqu'elle est en contact (plus ou moins long) avec la roche encaissante se charge en ions comparativement aux eaux de surface qui elles, restent généralement moins chargées. L'identification de gradients de CE sur un tronçon permet de mettre en relief des arrivées d'eau de nappe vers la rivière.

5.3.3.3.2 Les ions chlorure (Cl⁻)

Les ions (Cl⁻) interviennent relativement peu dans les réactions chimiques (en l'absence d'évaporites), et sont souvent considéré comme conservatifs dans les études hydrologiques (Lefebvre, 2016). Principalement d'origine atmosphérique ou liés à des rejets anthropiques, les chlorures vont se retrouver en quantité plus importantes dans les eaux superficielles par rapport aux eaux souterraines. De fait, il est à nouveau possible par comparaison des teneurs en ions Cl⁻ entre les deux compartiments, de détecter des zones d'échange.

5.3.3.3.3 Le rapport Ca/Mg dans les eaux de surface

Le rapport $\frac{Ca}{Mg}$ ne donne pas directement d'information sur le sens des échanges mais renseigne sur le temps de résidences des eaux souterraines dans le cas où un échange a déjà été identifié. En effet, les minéraux calciques se dissolvent plus rapidement que les minéraux magnésiens (Mudry, 1987). Une eau transitant rapidement dans le sous-sol a pour conséquence de se mettre en équilibre plus rapidement avec la calcite qu'avec les minéraux magnésiens, donnant ainsi un rapport $\frac{Ca}{Mg}$ assez élevé. A contrario, lors d'un

temps de séjour plus long dans le milieu souterrain, l'eau va dissoudre la calcite jusqu'à entrer en saturation, puis ensuite dissoudre les minéraux magnésiens. Le rapport $\frac{Ca}{Mg}$ sera donc plus faible.

5.3.3.3.4 Le suivi des débits

Suivre le débit amont/aval entre deux stations est une méthode d'analyse simple et rapide à mettre en place. Elle permet de localiser les zones de pertes et de les quantifier grossièrement.

Afin de mieux cibler ces secteurs de pertes, le suivi des débits peut également être corrélé avec la topographie et la géomorphologie, renseignant respectivement sur les pentes et la linéarité des cours d'eau. En effet, un cours d'eau rectiligne présentant de fortes pentes est plus susceptible d'être drainé par la nappe qu'un cours d'eau ne présentant pas les caractéristiques précitées.

5.3.3.4 « Compléter » avec la biologie / les isotopes (²²²Rn) et les traçages artificiels

Cette phase complète les investigations avec des méthodes d'analyses encore plus locales.

5.3.3.4.1 Radon 222

Le ²²²Rn est un gaz rare qui agit comme un traceur. Il se concentre tant qu'il est confiné en milieu souterrain et qui dégaze très rapidement lorsqu'il arrive à la surface (Lefebvre, 2016). Les différences de teneur en radon 222 entre les eaux souterraines et surfaciques sont de l'ordre du facteur 10 voire 100 (Stellato et al., 2008). Ces forts écarts permettent donc de discerner les apports phréatiques de manière plus tranchée.

5.3.3.4.2 Biologie

Les bio-indicateurs (végétales ou animales) sont des méthodes d'analyse qui, depuis quelques années suscitent un engouement croissant dans la caractérisation des échanges nappe/rivière (Marmornier et al., 2012) Des études menées par plusieurs scientifiques (Graillot et al., 2014) montrent aussi que ces méthodes se corrélaient plutôt bien avec d'autres méthodes plus conventionnelles, comme l'analyse des niveaux piézométriques par exemple (Graillot et al., 2014).

Du côté des indicateurs faunistiques, on retrouve des méthodes basées sur le recensement des invertébrés souterrains qui nichent dans la zone hyporhéique. Chacune des espèces vivantes présente dans cette couche de sédiment évoluent dans un endroit particulier. Elles ne se trouvent pas là par hasard mais se localisent dans des zones propices à leur cycle de vie. En effet, une partie de ces invertébrés interstitiels préfèrent vivre dans des habitats riches en oxygène et matière organique et seront donc plus abondants dans les zones d'infiltration d'eau de surface vers la nappe. A contrario, d'autres priorisent les habitats très stables et alimentés en eau souterraine. Ils seront donc plus abondants dans des zones d'exfiltration d'eau interstitielle vers la surface (Marmornier et al., 2012). En fonction de l'abondance de certaines espèces des zones d'infiltration et d'exfiltration peuvent être mis en exergue. (Cf. annexe 5 pour plus de détails sur cette méthode d'analyse).

Côté flore, le recensement d'espèces concerne les macrophytes (végétaux aquatique visibles à l'œil nu). Au même titre que les invertébrés, les macrophytes sélectionnent les sites où ils peuvent prospérer. En effet, un apport de nappe vers une rivière modifie les conditions de température, d'oxydation du sédiment et de richesse en éléments nutritifs favorisant ainsi certaines espèces végétales aquatiques par rapport à d'autres. L'abondance de certains végétaux va permettre via le calcul d'un « indice trophique », de localiser des zones où la nappe alimente la rivière (Cf : Annexe 6 pour plus de détails).

5.3.3.4.3 Traçages artificiels

Les traçages artificiels permettent de recenser des zones de pertes et de déterminer des liens hydrauliques avec les émergences. Ils consistent à prouver ou réfuter des relations hydrauliques entre un point d'injection du traceur (cours d'eau, avens, dolines, etc ...) et un ou plusieurs points de restitution (source(s), piézomètre(s), etc ...). Ils apportent également des informations précieuses relatives au temps de transfert des eaux souterraines.

5.3.3.5 « Cartographe » les résultats

Les résultats de chaque méthode d'analyse sont mis en commun sur un seul support cartographique pour ensuite être interprétés. La superposition spatiale de chaque méthode d'analyse va permettre d'établir une interprétation générale des échanges.

5.3.4 Etape 4 : Interprétation des résultats, incertitudes et poids inter-méthodes

Cette étape s'attarde à l'évaluation des incertitudes des différentes méthodes, l'attribution ou non d'un poids inter-méthodes ainsi qu'à l'interprétation des résultats.

5.3.4.1 Incertitudes

Au stade de l'étape 4, il n'est pas rare de disposer de plusieurs résultats sur un même secteur, obtenus au cours des précédentes étapes méthodologiques. Quand les résultats de plusieurs méthodes convergent, la question relative aux incertitudes est assez évidente et il est plutôt simple de proposer un diagnostic. Mais lorsque plusieurs résultats se contredisent, il est évident que la réponse à la question précédente est plus complexe. Doit-on prioriser une méthode ? Doit-on attribuer une pondération ? Comment trancher ? Des éléments de réponses à ces questions ont déjà été proposés par (Paran et al., 2015) et sont en partie, repris dans le tableau ci-après (Cf : Tableau 6).

Ce tableau croise donc les méthodes d'analyse utilisées tous au long de cette méthodologie et propose un système d'évaluation simple pour chacune d'entre elles.

Tableau 6 Incertitudes par méthode sur le diagnostic des échanges nappe/rivière (d'après Paran et al., 2015)

N° de l'étape	Méthodes d'analyse	Evaluation		
		Bonne	Incertaine	Mauvaise
1	Indice de connectivité	Estimation des critères bien tranché Nombres de critères favorable important	Critères difficiles à appréhender	Peu de critères utilisés
2	Comparaison des hauteurs des cours d'eau et des niveaux piézométriques	Nombreuses mesures de niveaux de nappes Carte piézométrique interpolée à l'aide d'outils géostatistiques Mesures de la ligne d'eau de la rivière synchrone de la piézométrie Profil bathymétrique	Peu de mesures du niveau de la nappe Cartes piézométrique interpolé manuellement	Piézométrie non datée et non nivelée Trop de peu de mesures de niveaux de nappe
3	Infrarouge thermique (IRT)	Bon contraste thermique entre eau souterraine et eau superficielle Cours d'eau sans stratification thermique Acquisition d'images dans le visible Présence de thermomètre de contrôle dans le cours d'eau	Réflexion des radiations environnantes (par ex. nuages, arbres) Variation de la rugosité de l'eau	Très faible contraste thermique entre eaux souterraines et superficielles Stratification thermique du cours d'eau Pas d'image de contrôle dans le visible Pas de thermomètre de contrôle
	Végétation aquatique	Forte densité de site (1 tous les 500m)	Proportion importante d'espèces ubiquistes	Hyper-eutrophisation et pollution anthropique Recouvrement végétal très faible
	Invertébrés souterrains	Faune diversifiée Absence de colmatage	Faune peu diversifiée Espèces ubiquistes Présence de genres à écologie mal connue	Absence régionale de faune stygobie Instabilité hydrologique récente (après une crue)
	Radon 222 + Suivi multi paramètre	Fort contraste entre les masses d'eau Suivis continus ou fréquents	Suivi insuffisant (peu de mesures et de prélèvements) Faible contraste entre les masses d'eau souterraines et superficielles	Perturbations liées à l'activité humaine
	Traçages artificiels	Nombreux traçages Bonne resituation du colorant (visible à l'œil nu)	Peu de traçages Taux de restitution faible	Faible nombre de traçages Taux de restitution douteux
	Suivi des débits	Nombre élevée de stations Suivis continus ou fréquents Différence significative de débits entre les stations	Peu de stations Différence de débit faible	Peu de stations Très faible variation des débits amont aval

Par exemple, pour la méthode « IRT », si l'image infrarouge traitée ne présente pas de réel de contraste thermique (si tenté qu'il en existe un), ou que des phénomènes de réflexion sont présents sur l'image. Alors l'évaluation est qualifié d'**incertaine**.

5.3.4.2 Attribution d'un poids inter-méthodes et interprétation, comment trancher ?

La méthodologie ne propose pas de pondération inter-méthodes à proprement parler, mais conseille de trancher en fonction des évaluations obtenues (Bonne, Incertaine ou Mauvaise) du tableau 6.

L'interprétation des résultats repose donc sur les principes suivants :

Il est toujours conseillé de ne garder que les évaluations de bonne qualité et d'écartier celles évaluées comme incertaines ou mauvaises.

En cas de doute, il est possible de trancher à l'aide de l'évaluation de meilleure qualité. Il est recommandé (dans la mesure du possible) de compléter le diagnostic à l'aide d'une nouvelle méthode d'analyse.

Dans le cas où deux méthodes présentant une évaluation qualifiée de « bonne qualité » se contredisent, il est préconisé d'appliquer à nouveau ces méthodes. Si les évaluations restent inchangées (toujours de bonne qualité), des analyses complémentaires sont à entreprendre.

5.3.4.3 Utilité et complémentarité des méthodes d'analyse

Les résultats obtenus à l'aide des différentes approches explorées ont tous contribué à apporter des informations sur les échanges nappe/rivière. Même si beaucoup d'entre elles, ne sont pas en mesure, à elles seules, d'apporter de réponse complète dans la caractérisation des échanges, il n'en demeure pas moins que leur association permet de remplir l'objectif.

Les complémentarités relevées entre chaque méthode sont synthétisées dans le tableau 6.

Tableau 9 Contribution et complémentarité inter-méthodes

Méthodes/Approches	Contribution dans la caractérisation des échanges nappe/rivière	Complémentarité
Géologie	Renseigne sur le fonctionnement global de l'hydrosystème. Détermination des limites imperméables, des secteurs potentiellement connectés hydrauliquement.	L'analyse géologique se complète plutôt bien <i>via</i> les traçages artificiels.
Traçages artificiels	Localise les écoulements souterrains. Relation entre aires d'alimentations et pertes.	A recouper avec la disposition des formations géologiques.
Suivi multi paramètres	Les profils longitudinaux des différents paramètres mesurés le long des cours d'eau permettent d'observer des contrastes thermiques ou physico-chimiques renseignant sur le sens des échanges, l'âge des eaux et les temps de séjour.	Offre des informations semblables à l'IRT et au Radon222.
IRT	Cartographie la température de surface des eaux permettant d'identifier des contrastes thermiques provenant d'affluents ou de la nappe.	Bonne corrélation avec le suivi de plusieurs paramètres physico-chimiques tels que la conductivité et la température.
Biologie	Renseigne sur le sens des échanges et estime qualitativement leurs intensités selon plusieurs classes (nulle, faible, moyen, fort).	Bonne combinaison avec la comparaison des hauteurs d'eau en nappe et en rivière. Compatibilité forte avec le suivi des débits pour localiser plus précisément les zones de gains et de pertes.
Radon 222	Utilisation d'isotopes radioactifs pour identifier les apports provenant de la nappe.	A corroborer avec les profils en long de conductivité. Offre une meilleure sensibilité des apports que la conductivité. (contraste isotopiques eaux souterraines/eaux superficielles généralement important)
Suivi des débits	Identifie les zones d'apports et de pertes des eaux par différence de débit entre deux stations	Forte corrélation avec les méthodes biologiques qui identifient les zones d'infiltration et d'exfiltration des eaux

5.3.5 Etape 5 : Vérification & Extrapolation

Cette dernière étape de la méthodologie se divise en deux phases : une première (phase de vérification) qui s'attarde à comparer les résultats obtenus avec des études locales menées par des bureaux d'études, des associations de pêche ou encore des revues de presse portant sur des thématiques similaires à celle présentée dans ce rapport. Cette action permet dans certains cas de valider des secteurs où la caractérisation des échanges est difficile à définir.

La seconde phase prend une dimension d'extrapolation. Le secteur d'étude présente des résultats répartis de manière hétérogène dans l'espace. Dans certaines zones la dynamique des échanges est globalement comprise, alors que dans d'autres, le manque d'information ne permet pas de tirer de conclusions pertinentes. La proposition faite pour pallier ce manque d'informations dans certaines zones est d'extrapoler les résultats en considérant que le comportement hydrodynamique d'un système peu connu, peut être similaire à un autre système dont sa dynamique est comprise, si et seulement si, les deux systèmes sont proches géographiquement et qu'ils présentent des caractéristiques géologiques, géomorphologiques et hydrologiques identiques. Il est évident ce genre d'extrapolation est très discutable et ne constitue pas une étape indispensable à cette méthodologie.


6. RESULTATS


Les résultats sont présentés sous la forme d'une carte numérique interactive disponible en ligne (et en libre accès) *via* le lien suivant :

<http://umap.openstreetmap.fr/fr/map/anonymou-edit/495843:ExDUptpe7zqJwnD7OVEX2j6Mlag>


Cette carte a été pensée et construite de manière simple sans être simpliste. C'est-à-dire qu'elle s'efforce de limiter au maximum le nombre d'éléments affichables à l'écran pour les concentrer dans une table attributaire. Ceci permet d'assurer une bonne lisibilité et un certain confort de navigation dans l'outil de visualisation (déplacements plus rapides dans l'interface) sans pour autant perdre de l'information.

La carte adopte donc une représentation simple centrée sur les cours d'eau. Chaque cours d'eau ou tronçon de cours d'eau se voit attribuer un code couleur tributaire de sa relation avec la nappe associée :

 Le cours d'eau ou le tronçon est majoritairement drainant, le sens dominant de l'échange est plutôt de la nappe vers la rivière.

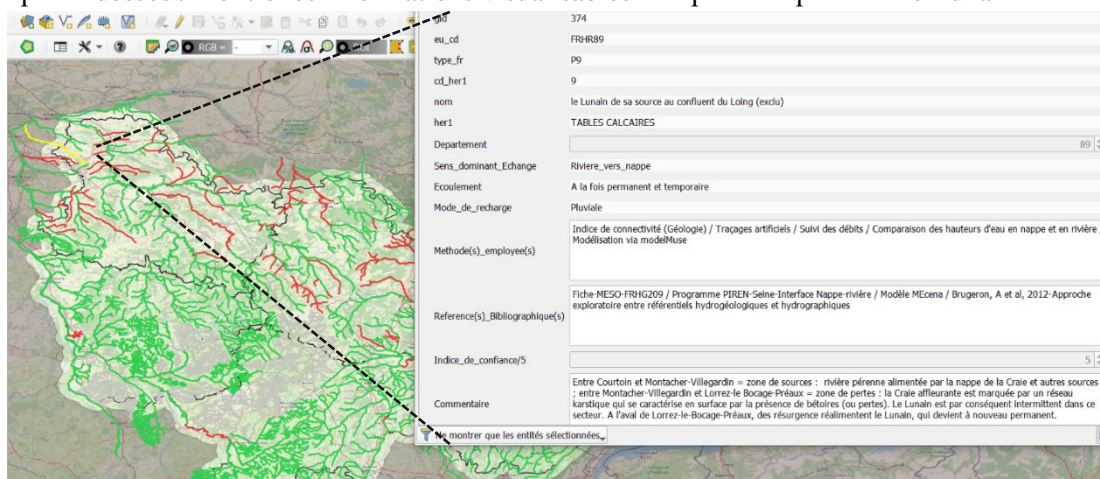
 Le cours d'eau ou le tronçon est majoritairement perdant, le sens dominant de l'échange est plutôt de la rivière vers la nappe.

 Le cours d'eau est globalement en équilibre avec sa nappe associée.

 Pas d'identification / Pas d'information

Chaque clic sur un cours d'eau (depuis le menu édition) renvoie l'utilisateur sur une table attributaire qui renseigne plusieurs informations sur le cours d'eau en question, à savoir : le code de la masse d'eau souterraine en lien avec le cours d'eau, le code cours d'eau, le nom du cours d'eau, le département dans lequel le cours s'écoule, le sens dominant de l'échange (drainant ou perdant), le type d'écoulement (temporaire ou permanent), le(s) mode(s) de recharge du cours d'eau (tourbière, pluie), la ou les méthode(s) d'analyse employée(s) qui ont permis de justifier les informations précédentes, les références bibliographiques qui sont venues compléter les méthodes d'analyses, un indice de confiance compris entre 1 et 5 (avec 1 pour faible et 5 pour fort) dépendant du nombre de méthodes et de références combinées pour un même tronçon et enfin un commentaire personnalisé à chaque cours d'eau qui apporte des informations complémentaires telles que la localisation parfois précise des zones d'échange par exemple.

L'exemple ci-dessous montre les informations visualisables lorsqu'on clique sur « le Lunain »



eu_cd	FRHR89
type_fr	P9
cd_her1	9
nom	Le Lunain de sa source au confluent du Loing (exclu)
her1	TABLES CALCAIRES
Departement	89
Sens_dominant_Echange	Riviere_vers_nappe
Ecoulement	A la fois permanent et temporaire
Mode_de_recharge	Pluviale
Methode(s)_employee(s)	Indice de connectivité (Géologie) / Trappes artificiels / Suivi des débits / Comparaison des hauteurs d'eau en nappe et en rivière / Modélisation via modelMuse
Reference(s)_Bibliographique(s)	Fiche MISO-FR1GZ09 / Programme PIREN-Selne-Interface Nappe-rivière / Modèle Mécena / Brugeron, A et al, 2012-Approche exploratoire entre référentiels hydrogéologiques et hydrographiques
Indice_de_confiance/5	5
Commentaire	Entre Courtoin et Montacher-Villegardin = zone de sources : rivière pérenne alimentée par la nappe de la Craie et autres sources entre Montacher-Villegardin et Lorrez-le-Bocage-Préaux = zone de pertes : la Craie affleurante est marquée par un réseau karstique qui se caractérise en surface par la présence de bétoires (ou pertes). Le Lunain est par conséquent intermittent dans ce secteur. A l'aval de Lorrez-le-Bocage-Préaux, des résurgences réalimentent le Lunain, qui devient à nouveau permanent.

7. DISCUSSION & CRITIQUE

Au total, sur les **951** cours d'eau répertoriés en BFC par la BD Carthage® (2016), environ **70%** d'entre eux ont pu être étudiés *via* au moins une méthode d'analyse, **50%** par deux méthodes d'analyse et **30%** par trois ou plus.

Chaque cours d'eau a également fait l'objet d'une ~~brève~~ recherche bibliographique venant affirmer ou infirmer les résultats obtenus par chaque méthode. Dans **95%** des cas, les références bibliographiques concordent avec les résultats des méthodes obtenus.

Pour ce qui est des cours d'eau sans informations (que ce soit *via* la littérature ou par le biais des méthodes d'analyse), le pourcentage avoisine environ les **20%**.

Autrement dit, **25%** des cours d'eau étudiées restent inqualifiables ou présentes des informations contradictoires.

Quant aux méthodes d'analyse, leur fréquence d'application s'est faite de manière déséquilibrée. C'est-à-dire qu'il existe une hétérogénéité d'usage inter-méthode qui est liée, bien évident, à la disponibilité de la donnée mais aussi à la rapidité d'exécution d'une méthode par rapport à une autre et/ou à sa capacité à s'automatiser. Les méthodes lourdes, chronophages ou dépendantes de la création de nouvelle donnée sont donc, à l'évidence, moins utilisées que les méthodes rapides et/ou automatisables.

Le tableau ci-dessous donne un aperçu de la fréquence d'utilisation de chaque méthode expérimentée ainsi que leur vitesse moyenne d'exécution.

Méthodes	Fréquence d'utilisation de la méthode (%)	Temps de mis en œuvre
Elaboration d'un indice de connectivité	19,6%	3 à 4 semaines pour créer l'indice + 1 semaine de cartographie
Comparaison des hauteurs d'eau en nappe et en rivière	21,9%	Environ 4 semaines d'analyses + 1 semaine de cartographie
Infrarouge thermique (IRT)	9,4%	20 à 30min de traitement par images de 10km ² . Nb Total d'images traitées : environ une centaine.
Suivi multi paramètres	6,3%	Campagne annulée - Temps d'échantillonnage prévu : environ une demi-journée pour un tronçon de 200-300m. Traitement des données + Cartographie ~ 2/ 3h
Indicateur biologique (faune stygobie)	0,6%	Campagne annulée- Temps d'échantillonnage prévu : 10 échant./j – Tri : 1 échant./j – Identification des espèces caractéristiques : 1 échant./2j pour un expert. Avec des données préexistantes le calcul des indices prend environ 1 à 2h.
Indicateur biologique (macrophytes)	1,6%	Campagne annulée – Temps d'échantillonnage prévu : environ 5km/j, analyse des données 10km/j. Avec des données préexistantes le calcul des indices prend environ 1 à 2h.
Radon222	0,6%	Campagne annulée pour créer de la donnée. Quelques données récupérées auprès de bureaux d'études

Traçages artificiels	19,6%	Données préexistantes : Analyses ~ 2/3 semaines
Suivi des débits	20,4%	Données préexistantes : Analyses ~ 2/3 semaines

La faible fréquence d'usage de certaines méthodes n'affecte pas significativement les résultats obtenus à l'échelle de la région BFC puisqu'à l'exception de la méthode IRT, l'ensemble des méthodes peu utilisées est représentatif d'une échelle locale voire très locale.

In fine, la méthodologie présentée repose majoritairement sur des méthodes plutôt «classiques» en matière de caractérisation des échanges nappe/rivière (traçages, comparaison des hauteurs d'eau en nappe et en rivière, suivi des débits, indice de connectivité, suivi multi paramètres) qui ont été complétées par de l'imagerie infrarouge thermique.

Il convient également de préciser que toutes ces méthodes peuvent être discutées, notamment au niveau du choix de la donnée, de l'application de la méthode ou même de son fondement. C'est le cas par exemple, pour la méthode proposant le développement d'un indicateur. Les résultats auraient-ils été significativement proches si le nombre et/ou le choix des critères utilisés étaient différents ? Si une pondération y était appliquée ? Même si ces deux questions restent pour l'instant en suspens, il faut retenir qu'un indicateur n'est pas la réalité mais seulement une représentation de celle-ci. Peu importe, son chemin de construction, ou son nombre de critères tant que l'indicateur reste simple, pertinent, reproductible et fait preuve d'un certain consensus auprès du public, alors il peut s'agir d'un bon indicateur.

Pour ce qui est de la méthode comparant des hauteurs en nappe et en rivière, celle-ci laisse également entrevoir des limites, notamment au niveau de la détermination des hauteurs d'eau en rivière où il est relativement compliqué de définir avec précision une côte moyenne d'un cours d'eau à partir d'un MNT (même au pas de 1m). Les erreurs liées aux imprécisions du MNT peuvent même aller jusqu'à proposer une interprétation erronée si les écarts de niveau entre piézomètre et rivière sont relativement faibles.

Les méthodes « suivi des débits », « traçages » et « suivi multi paramètres » semblent être les moins perfectibles à condition de bien connaître le milieu étudié, notamment la localisation des rejets de station d'épuration, les éventuels secteurs de réalimentation (artificielle ou non) et bien évidemment la géologie du site. Les incertitudes liées à ces méthodes sont certes présentes mais restent plus faciles à appréhender quand il s'agit d'interpréter les résultats.

Pour ce qui est de la méthode « IRT », les sources potentielles d'erreurs relatives à cette méthode sont nombreuses. Outre la résolution de l'image de départ, on peut ajouter l'angle de vue par rapport au sol, la rugosité de la surface étudiée, la turbidité du cours d'eau, la température atmosphérique ainsi que la gamme de longueur d'onde infrarouge étudiée (une longueur d'onde trop faible peut engendrer des réflexions solaires venant dégrader la qualité de l'image).

Enfin, les sources d'erreurs liées aux méthodes biologiques sont principalement liées à l'identification des espèces qui relève bien souvent, d'une affaire de spécialiste. C'est d'autant plus pour la méthode relative aux invertébrés souterrains puisqu'il n'existe pas vraiment de clef de détermination officielle de la faune souterraine aquatique à ce jour.

8. CONCLUSION & PERSPECTIVES

A l'issue de ces six mois de stage au sein de la DREAL Bourgogne Franche-Comté, il a été possible de mettre en place une méthodologie interdisciplinaire reposant sur l'application de plusieurs méthodes d'analyse (élaboration d'un indice de connectivité, comparaison des hauteurs d'eau en nappe et en rivière, IRT, suivi multi paramètres, indicateur biologique, traçage artificiels, suivis des débits, etc...)

Le développement de cette méthodologie, appliqué à la région BFC a permis d'aboutir à l'élaboration d'un outil de visualisation des échanges nappe/rivière résumant sous la forme d'une carte, les résultats des différentes méthodes d'analyse.

Bien que ces premiers résultats semblent relativement encourageants, il n'en demeure pas moins que ces derniers restent parfois approximatifs et que les incertitudes liées à toutes les méthodes employées viennent amplifier ces approximations.

Il faut donc garder à l'esprit qu'il ne s'agit pas d'un travail représentant la réalité, mais d'un travail qui propose une représentation de celle-ci, en se basant sur différentes approches scientifiques.

En réalisant ou en croisant encore plus de méthodes d'analyse (à des périodes de temps différents par exemple), il sera alors possible de réduire ces approximations et d'affiner les résultats même s'il s'agit là, d'un travail réclamant un effort continu de recherche.

Enfin, une part non négligeable de ce travail a été consacrée à essayer de coupler toutes les méthodes utilisées par de la modélisation. Pour ce faire, plusieurs logiciels de modélisation ont été explorés tel que les modèles GARDENIA et MARTHE du BRGM ou encore le modèle hydrogéologique KARSYS développée par l'ISKKA (Suisse) pour ne citer qu'eux. Hélas, le côté chronophage, ardu et « gourmand en donnée » de la mise en place de ce genre d'outil (parfois payant) n'a pas permis d'explorer (pour l'instant) cette piste plus avant. Seuls quelques essais encore peu concluants *via* ModelMuse ont été entrepris sur des petits secteurs dans l'Yonne.

Quoi qu'il en soit, il faut retenir que la méthodologie proposée n'a pas la prétention d'être parfaite ou exhaustive, mais elle a le mérite d'apporter une première idée des relations eaux superficielles/souterraines en région Bourgogne-Franche-Comté et d'offrir des pistes de réflexion aux lecteurs souhaitant reprendre une ou plusieurs étapes méthodologiques.

Pour ce qui est de l'outil de visualisation des échanges nappe /rivière, il est bien entendu, souhaité de le faire « vivre ». C'est-à-dire de l'alimenter assidûment, que ce soit par des méthodes d'analyse, de la littérature ou des avis d'experts pour encore améliorer sa robustesse. Il est également envisagé d'optimiser son interface et son contenu, notamment en y intégrant des liens cliquables renvoyant l'internaute sur des fiches présentant les résultats brutes (par exemple : une fiche comprenant les images aériennes thermiques avec ou sans traitement ou encore les tableaux de calcul des indices biologiques). Cela lui permettrait de se forger son propre avis, car rappelons les incertitudes liées aux méthodes d'analyse sont relativement importantes.

Enfin, dans un autre registre, je tenais à ajouter que ce stage m'a permis d'élargir et d'approfondir mes connaissances sur la question des relations nappe/rivière et m'a rendu plus ambitieux et motivé pour continuer dans ce genre de travail de recherche, qui au risque (faible) d'être démenti, constituera un enjeu majeur du XXI^e siècle.

9. BIBLIOGRAPHIE

Allier, D., Tormo, F., Brugeron, A. (2011). Evaluation préliminaire du risque d'inondations par remontées de nappes. Rapport public BRGM/RP-59890-FR.

Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater : hydrogeology and engineering. *Hydrogeol. J.* 10 :121-142.

Braaten, R et Gates G. (2002). Groudwater-surface water interaction in inland New South Wales : a scoping study. *Water Science and Technology.* 48(7) : 215-224.

Casanova, J., Cagnimel, M., Devau, N., Pettenati, M., Stollsteiner P. (2012). Recharge artificielle des eaux souterraines : état de l'art et perspectives. Rapport final. BRGM/RP-61821 –FR.99 p., 16 ill., 18 ann.

Chapuis, H. (2017). Caractérisation, Evaluation, Modélisation des échanges entre aquifères karstiques et rivières: application à la Cèze (Gard, France). Autre. Université de Lyon, 2017. Français.

Commissariat Général au Développement durable, 2013 – Etat des eaux superficielles et souterraines. Disponible sur : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>

Cousquer, Y (2017). Modélisation des échanges nappe-rivière à l'échelle intermédiaire : conceptualisation, calibration, simulation. Hydrologie. Université Bordeaux Montaigne, 2017. Français. fftel01567824f. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01567824/document>

Datry, T., M. Dole-Olivier, P. Marmonier, C. Claret, J. Perrin, M. Lafont, and P. Breil (2008). La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Ingénieries - E A T* 54, 3–18.

DCE, 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Journal officiel n° L 327* du 22/12/2000 p. 0001 - 0073 ; <http://eurlex.europa.eu/legalcontent/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32000L0060&from=FR>.

Descloux, S. (2014). Le colmatage minéral du lit des cours d'eau : méthode d'estimation et effets sur la composition et la structure des communautés d'invertébrés benthiques et hyporhéiques. *Sciences agricoles.* Université Claude Bernard - Lyon I, 2011. Français. ffNNT : 2011LYO10190ff. fftel-01002506f.

Dole-Olivier, M.J., Marmonier, P., 1992. Patch distribution of interstitial communities: prevailing factors. *Freshwater Biology* 27, 177-191.

Dole-Olivier, M.J., Malard, F., Martin, D. Lefébure, T et Gibert, J. (2009). Relationships between environmental variables and groundwater biodiversity at the regional scale. *Fresh Water Biology*, 54, 797-813

DRAAF Bourgogne Franche-Comté (2016). Atlas AGRESTE Bourgogne Franche Comté. Disponible sur : http://draaf.bourgogne-franche-comte.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/1territoire_Entier_cle82f4b4.pdf

DREAL Bourgogne Franche-Comté, 2018. Les schémas départementaux des carrières Rapport, R223. Disponible en ligne : <http://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/rapport-r223.html>

DREAL Bourgogne Franche-Comté, 2020. Qualité des eaux de distribution. Rapport en ligne sur : <http://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/qualite-des-eaux-de-distribution-r1096.html>

Dugdale, S-J., Bergeron N-E., St-Hilaire A. (2013). Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river. *Remote Sensing of Environment*, 136, p. 358-373.

Ellis, P-A., Mackay, R., and Rivett, M. O. (2007). Quantifying urban river– aquifer fluid exchange processes : a multi-scale problem. *Journal of contaminant hydrology*, 91(1) : 58–80.

Ferreira, D., Malard, F., Dole-Olivier, M.J., Gilbert, J. (2007). Obligate groundwater fauna of France: diversity patterns and conservation implications. *Biodiversity and Conservation*, 16, 567-596.

Ferreira, L., Rambaud, M., Fernez, T. (2018). Programme d’inventaire des macrophytes et des végétations associées du bassin de la Seine : Protocole d’échantillonnage. [Rapport de recherche] CBNBP-MNHN, Délégation Île-de-France, 61 rue Buffon CP 53, 75005 Paris cedex 05 - France. 2018, 48p. + annexes. fffhal-01915483f

Fleckenstein, J. H., Krause, S., Hannah, D. M., et Boano, F. (2010). Groundwater-surface water interactions : New methods and models to improve understanding of processes and dynamics. *Advances in Water Resources*, 33(11) :1291–1295.

Flint, A-L., Flint L-E., Edward, E-M., Fabryka-Martin J-T., Bodvarsson G-S. (2002). Estimating recharge at Yucca Mountain, Nevada, USA : comparison of methods. *Hydrogeol. J.* 10 :180-204.

Flipo, N., Labarthe, B., Mouhri, A., Rivière, A., Saleh, F., Weill, P. (2016). Caractérisation et Modélisation des interfaces nappe-rivière. Dans "Interfaces Nappe-Rivière", PIREN Seine, Rapport de synthèse 2011-2015.

Ginet, R. (1996). Bilan Systématique du genre *Niphargus* en France, Société Linnéenne de Lyon, 242p.

Graillet, D., Paran, F., Bornette, G., Marmonier, P., Piscart, C., et Cadilhac, L. (2014). Coupling groundwater modeling and biological indicators for identifying river/aquifer exchanges. *SpringerPlus* 2014, 3 : 68.

Handcock, R-N., Gillespie, A-R., Cherkauer K.A., Kay J.E., Burges S.J., Kampf S.K. (2006). Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. *Remote Sensing of Environment*, 100, p. 427-440.

Henry, J-P., Magniez, G. (1983). Crustacés Isopodes (Principalement Asellotes). *Association Française de Limnologie*, 39p.

Hunt, R. J., Feinstein, D. T., Pint, C. D., and Anderson, M. P. (2006). The importance of diverse data types to calibrate a watershed model of the trout lake basin, northern wisconsin, usa. *Journal of Hydrology*, 321(1) :286–296.

Ivkovic, K-M. (2008). A top-down approach to characterize aquifer-river interaction processes, integrated Catchment Assessment and management (iCAM) Centre, The Fenner School for Environment and Society, The Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia. *Journal of Hydrogeology* 365 (200ç) 145-155.

Kalbus, E., Reinstof, F., Schirner, M. (2006). Measuring methods for groundwater - surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 873–887.

Lalot, E. (2014). Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l’évaluation quantitative et la caractérisation des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières - Application au Rhône. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Disponible sur demande auprès de l’Ecole des Mines de St-Etienne.

Lefebvre, K. (2016). Diagnostic et quantification des flux nappe/rivière : Modélisations hydrodynamique et géochimique du bassin versant de l’yvette amont (France). Université du quebec à montréal.

Magniez, G. et Henry, J-P (1983). Introduction pratique à la systématique des organismes des eaux continentales françaises – 4. Crustacées Isopodes. Société Linnéenne de Lyon. 52-10 ; 319-357.

Malard, F. Henry, J-P., J. Douady, C (2014). The scientific contribution of Guy Magniez (1935-2014).

Marmonier, P., G. Archambaud, N. Belaidi, N. Bougon, P. Breil, E. Chauvet, C. Claret, J. Cornut, T. Datry, M. Dole-Olivier, B. Dumont, N. Flipo, A. Foulquier, M. Gérino, A. Guilpart, F. Julien, C. Maazouzi, D. Martin, F. Mermillod-Blondin, B. Montuelle, P. Namour, S. Navel, D. Ombredane, T. Pelte, C. Piscart, M. Pusch, S. Stroffek, A. Robertson, J. Sanchez-Pérez, S. Sauvage, A. Taleb, M. Wantzen, and P. Vervier (2012). The role of organisms in hyporheic processes : gaps in current knowledge, needs for future research and applications. *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.* 48(3), 253–266.

Meisch, C. (2000). Freshwater ostracoda of western and central Europe. Spektrum Akad. Verlag, Gustav Fischer, 522p.

Montégut, J., 1993. Le milieu aquatique : connaissance, entretien, désherbage. Association de Coordination Technique Agricole.

Mouhri, A., Flipo, N., et Saleh, F. (2012). État de l’art sur les méthodes de caractérisation et de quantification des échanges nappe-rivière Disponible en ligne sur : http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/1040. Technical report, PIREN Seine.

Mudry, J., 1981. Sur l’origine des gradients de teneurs isotopiques et géochimiques dans les eaux karstiques du Jura (France). *Journal of Hydrogeology* 50, 167-178.

Mudry, J., 1997. Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères. Université de Franche-Comté.

Paran F., Arthaud F., Baillet H., Bornette G., Creuzé des Châtelliers M., Déchomets R., Dole-Olivier M.J., Ferreira D., Germain A., Gibert J., Graillet D., Jezequel C., Lafont M., Lalot E., Marmonier P., Novel M., Piscart C., Puijalon S., Rodriguez C., Simon L., Travi Y., Winiarski T. (2007, 2008, 2010, 2012 et 2015). Évaluation des échanges nappe/rivière et de la part des apports souterrains dans l’alimentation des eaux de surface. Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapports finaux et fiches de synthèse phases 1, 2, 3, 4 et 5. Action recherche valorisation Zab/ AE-RMC.

Paran F., Arthaud F., Novel M., Graillet D., Bornette G., Piscart C., Marmonier P., Lavastre V., Travi Y., Cadilhac L. (2015). Caractérisation des échanges nappe/rivière en milieu alluvionnaire – Guide méthodologique. Agence de l’eau Rhône Méditerranée et Corse – Eau et connaissance, 178p.

Pinson, S., et Stollsteiner, L. (2016). Rapport BRGM – Typologie des bassins versants de la Bourgogne et modélisation hydrologique globale. Projet HYCCARE Bourgogne. Disponible sur : https://www.alterrebourgognefranche-comte.org/_depot_alterrebourgogne/_depot_arko/basesdoc/4/219007/rapport-du-brgm.pdf.

Pointerau, R. (2016). Rapport d’information – Gestion de l’eau : agir avec pragmatisme et discernement. Disponible sur : <https://www.senat.fr/rap/r15-807/r15-8079.html>.

Ransley T., Tottenham R., Baskaran, S and Brodie R. (2007). Development of method to map potential stream-aquifer connectivity: a case study in the Border Rivers Catchment. Bureau of Rural Sciences, Canberra.

Torgersen C.E., Faux R.N., McIntosh B.A., Poage N.J., Norton D.J. (2001) Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment*, 76(3), p. 386-398.

Stellato, L., Petrella, E., Terrasi, F., Belloni, P., Belli, M., Sansone, U. et Celico, F. (2008). Some limitations in using ^{222}Rn to assess river–groundwater interactions: the case of Castel di Sangro alluvial plain (central Italy). *Hydrogeology Journal*.

Scanlon, B., Healy, R., Cook, P. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10(1), 18–39.

Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water : the state of the science. *Hydrogeology journal*, 10(1) :52–67.

Vernoux, J-F., Lions, J., Petelet-Giraud, E., Seguin J-J., Stollsteiner, P., Lalot, E. (2010). Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE, rapport BRGM/RP-57044-FR, 207 pages, 91 Illustrations, 1 annexe.

Wawrzyniak, V. (2012). Etude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique : Exemples dans le bassin du Rhône. Disponible sur : https://www.researchgate.net/profile/Vincent_Wawrzyniak/publication/278300878_Etude_multi-echelle_de_la_temperature_de_surface_des_cours_d'eau_par_imagerie_infrarouge_thermique_Exemples_dans_le_bassin_du_Rhone/links/557e9d3c08aec87640dc70ee.pdf.

Wawrzyniak, V. Piégay, H. Allemand, P. Vaudor, L. Goma, R. Grandjean, P. (2016). Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold water patches assessed using thermal infrared (TIR) remote sensing. *Remote sensing of environment* 175, 337-348.

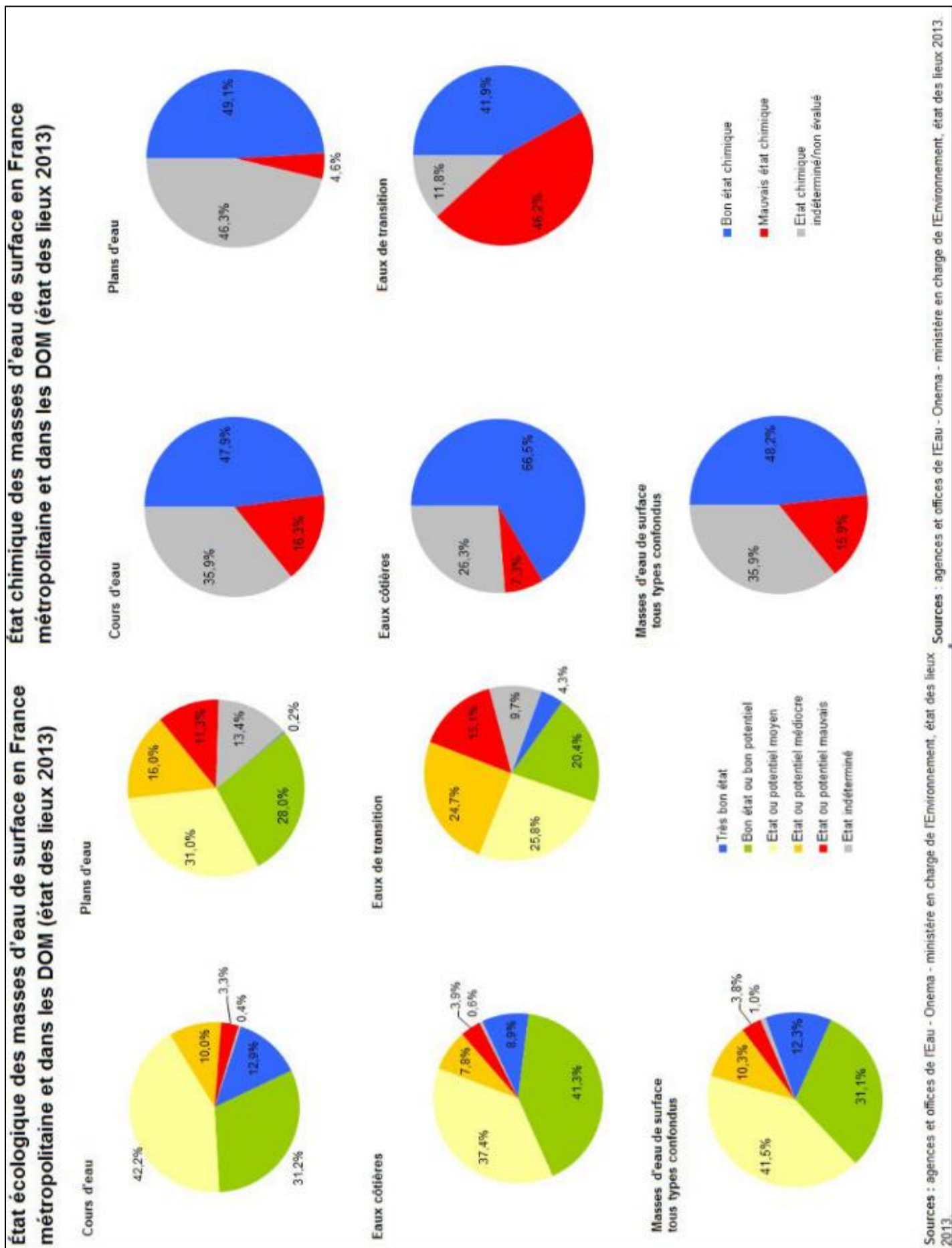
White, D.-S. (1993), Perspectives on defining and delineating hyporheic zones, *Journal of the North American Benthological Society*, n° 12(1), p. 61-69.

Winter, T. C. (1995). Recent advances in understanding the interaction of groundwater and surface water. *Reviews of Geophysics*, 33(S2) :985–994.

Winter, T-C., Harvey, J-W., Franke, O-L. (1998). Groundwater and surface water a single resource. U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, Colorado.

Woessner, W. W. (2000). Stream and fluvial plain ground water interactions : rescaling hydrogeologic thought. *Ground Water*, 38(3) :423–429.

Annexe 1 : Bilan officiel des mesures rapportées à l'Europe par le Commissariat Général au Développement Durable sur l'état des eaux de surface en France



Annexe 2 : Organigramme de la DREAL



LES MISSIONS & CABINET



LES SERVICES



LES UNITÉS DÉPARTEMENTALES



Annexe 3: Drone personnel



Matériel personnel : A = Drone / B = caméra thermique / C = Skycontroller / D = Batterie / E = alimentation

Annexe 4 : Traitement d'image satellite

Pour tirer avantage des images infrarouges thermiques (IRT), il faut être en mesure d'extraire l'information **utile** de l'image étudiée. C'est pourquoi, un tutoriel est présenté ci-après pour permettre à quiconque, de reproduire les traitements effectués tout au long de ce travail.

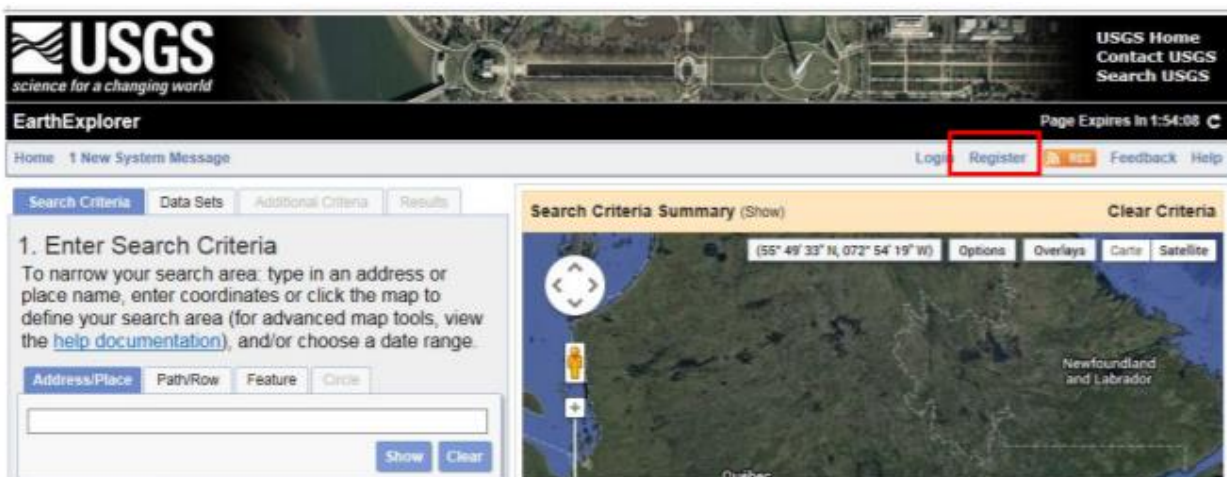
Les images utilisées dans ce tutoriel sont des images satellites provenant de LANDSAT-8. Elles sont gratuites et libres de droits et traitées *via* le logiciel QGIS (également gratuit). L'accès aux images très haute résolution et/ou aéroportées étant beaucoup plus difficile à obtenir pour le grand public, le traitement de genre d'images ne fera pas l'objet de ce tutoriel, même si, au final les principes de base de leur traitement restent assez similaires.

i. Création de compte

Le téléchargement des images se fait sur les serveurs d'images Earth Explorer de l'USGS à l'adresse suivante : <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Si vous ne disposez pas de compte, la section ci-après explique brièvement la démarche à entreprendre pour en créer un. En revanche, si vous disposez déjà d'un compte, ignorez tout simplement cette section et passez à la suivante.

Le téléchargement des images requiert un compte, sans quoi vous ne pourrez uniquement les visualiser. Pour créer un compte il suffit de cliquer sur le bouton « **Register** »



Inscrivez dans les cases prévues à cette fin un nom d'utilisateur, un mot de passe qui doit être confirmé dans la case en dessous ainsi que le texte visible dans l'image de la page. Le mot de passe doit comprendre entre 8 et 16 caractères et inclure au minimum une lettre et un chiffre. Cliquez ensuite sur « **Continue** »

The image shows the 'Login Information' registration form. At the top, it says 'Login Information' and provides a password requirement: 'Password must be between 8 and 16 characters long, and contain at least one alphabetic and numeric character.' Below this, there are four input fields: 'Username:' (with a red box around it), 'Password:', 'Confirm Password:', and a CAPTCHA challenge. The CAPTCHA challenge shows a road sign with the number '402' and a text input field with the placeholder 'Type the text' (also with a red box around it). To the right of the CAPTCHA, there are icons for 'CAPTCHA' and a 'Privacy & Terms' link. At the bottom, there are 'Cancel' and 'Continue' buttons. A note at the bottom left states: 'Note: All fields are required.'

L'étape suivante vous demande des informations relatives à votre affiliation (travail) et sur l'utilisation des données. Remplissez toutes les sections ayant un astérisque pour pouvoir continuer.

User Affiliation/Data Usage Information

In what sector do you work? *(Please select only one answer.)*

*Sector: Secteur d'emploi Select a sector

***Which of the following characterizes you as a user of remotely sensed data from USGS?**
(Please check all that apply.) Type d'utilisateur

Data provider (provide data for someone else to use) *Diffuseur/Producteur de données*

Product developer (create products derived from Landsat imagery, such as land cover maps) *Développeur*

Technical user (work on technical issues specifically related to the imagery, like calibration and validation) *Utilisateur technique*

End user (apply data or products derived from the data to accomplish my work, including scientific research and education) *Dernier utilisateur*

Manager (supervise technical and/or end users; also may make decisions based on work which uses the data)
 Other (please specify): *Gérant / Superviseur*

***Does your work use remotely sensed data from the USGS?**

Yes *Utilisation au travail*

No

What is the **primary** application for which you have used remotely sensed data from USGS in the past year? *(Please select only one answer.)* *Utilisation primaire*

*Primary Data Usage: Select a Primary Usage

In addition to the primary application, in what other areas have you used remotely sensed data from USGS in the past year? *(Please check all that apply.) *Autre(s) champ(s) d'applications (dernière année)*

<input type="checkbox"/> I have not used it in other areas	<input type="checkbox"/> Agricultural management/production/conservation
<input type="checkbox"/> Agriculture forecasting	<input type="checkbox"/> Assessments and taxation
<input type="checkbox"/> Alternative energy exploration/development	<input type="checkbox"/> Climate science/change
<input type="checkbox"/> Biodiversity conservation	<input type="checkbox"/> Cryospheric science
<input type="checkbox"/> Coastal science/monitoring/management	<input type="checkbox"/> Defense/national security
<input type="checkbox"/> Cultural resource management/anthropology/archaeology	<input type="checkbox"/> Education: K-12
<input type="checkbox"/> Ecological/ecosystem science/monitoring	<input type="checkbox"/> Emergency/disaster management
<input type="checkbox"/> Education: university/college	<input type="checkbox"/> Engineering/construction/surveying
<input type="checkbox"/> Energy /metals/minerals exploration/extraction/development	<input type="checkbox"/> Fish and wildlife science/management
<input type="checkbox"/> Environmental regulation	<input type="checkbox"/> Forest science/management
<input type="checkbox"/> Fire science/management	<input type="checkbox"/> Hazard insurance
<input type="checkbox"/> Geology	<input type="checkbox"/> Law enforcement
<input type="checkbox"/> Humanitarian aid	<input type="checkbox"/> Public health
<input type="checkbox"/> Land use/land cover change	<input type="checkbox"/> Real estate/property management
<input type="checkbox"/> Range/grassland science/management	<input type="checkbox"/> Rural planning and development
<input type="checkbox"/> Recreation science/management	<input type="checkbox"/> Telecommunications
<input type="checkbox"/> Software development	<input type="checkbox"/> Transportation
<input type="checkbox"/> Technical training	<input type="checkbox"/> Urbanization (e.g., growth, sprawl)
<input type="checkbox"/> Urban planning and development	<input type="checkbox"/> Water resources
<input type="checkbox"/> Utilities	

Other Application:

Over the next year, approximately how much of the remotely sensed data you acquire from USGS will you distribute to others to use as opposed to using it yourself? *(Please select only one answer.)*

*Distribution Amount: Select a Distribution Amount *Quantité distribuée à un tiers*

Over the next year, how important will free and open access to remotely sensed data from USGS be to conducting your work? *(Please select only one answer.)*

*Access Importance: Select Access Importance *Importance d'un accès libre et gratuit*

* = Required Field

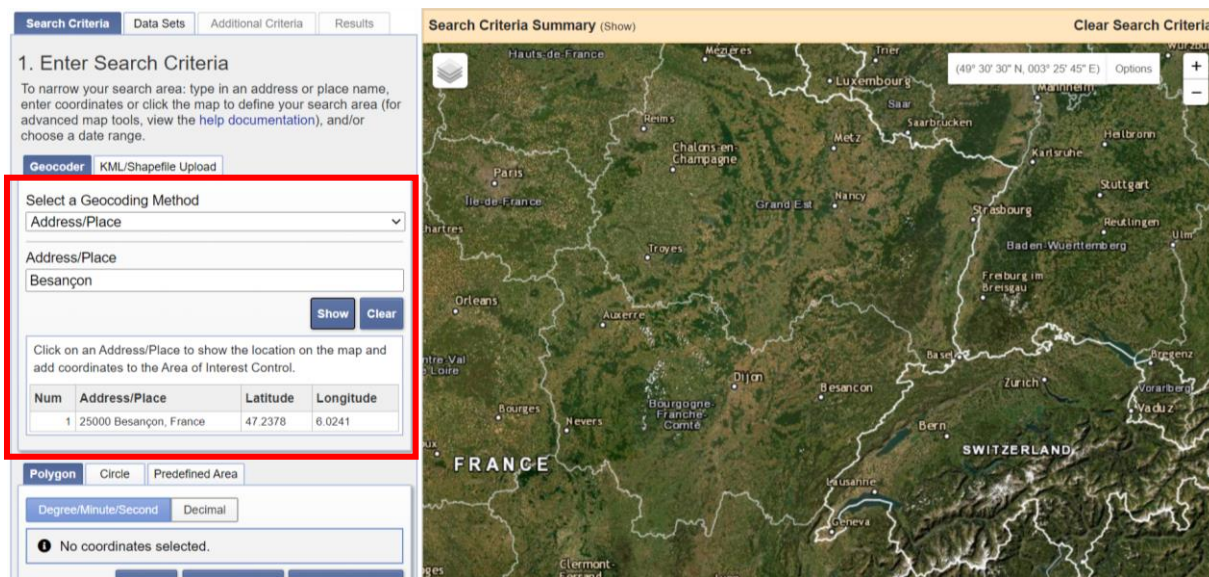
Une fois enregistré et connecté, la recherche d'image peut commencer.

ii. Recherche d'images

La recherche d'images peut s'effectuer en utilisant différentes méthodes. Il est possible de pointer directement l'emplacement sur la carte, de spécifier des coordonnées, un nom de ville ou d'inscrire le numéro de passage du satellite.

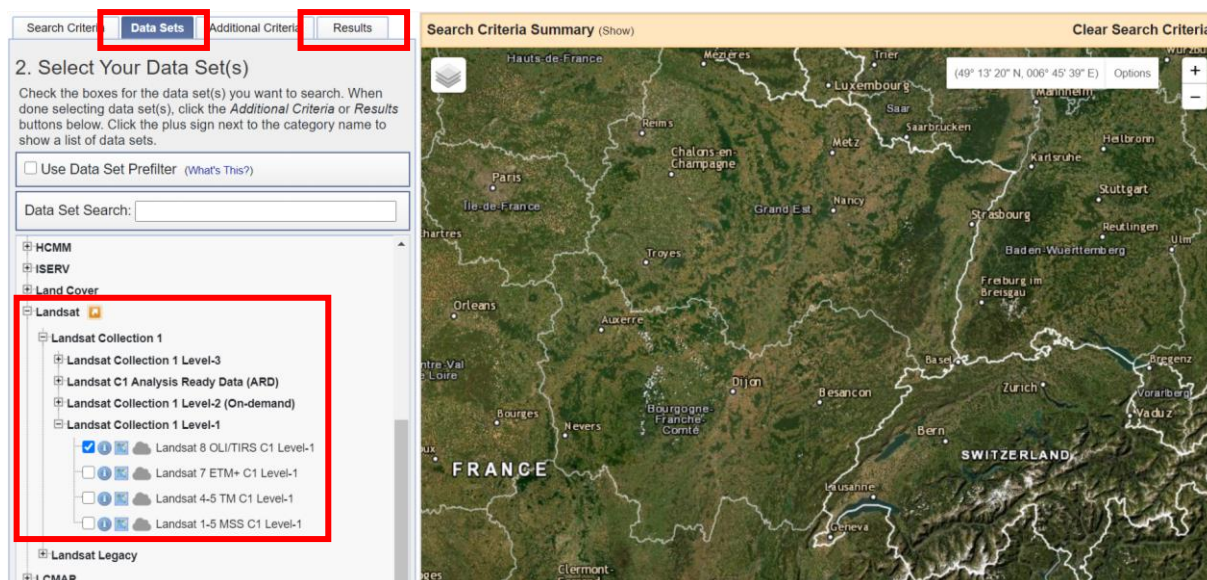
Dans l'exemple ci-dessous, la recherche d'images débute par l'ajout d'un nom de ville (ici Besançon).

Quel que soit la méthode utilisée, il est important que la recherche soit effectuée pour continuer les étapes de téléchargement.



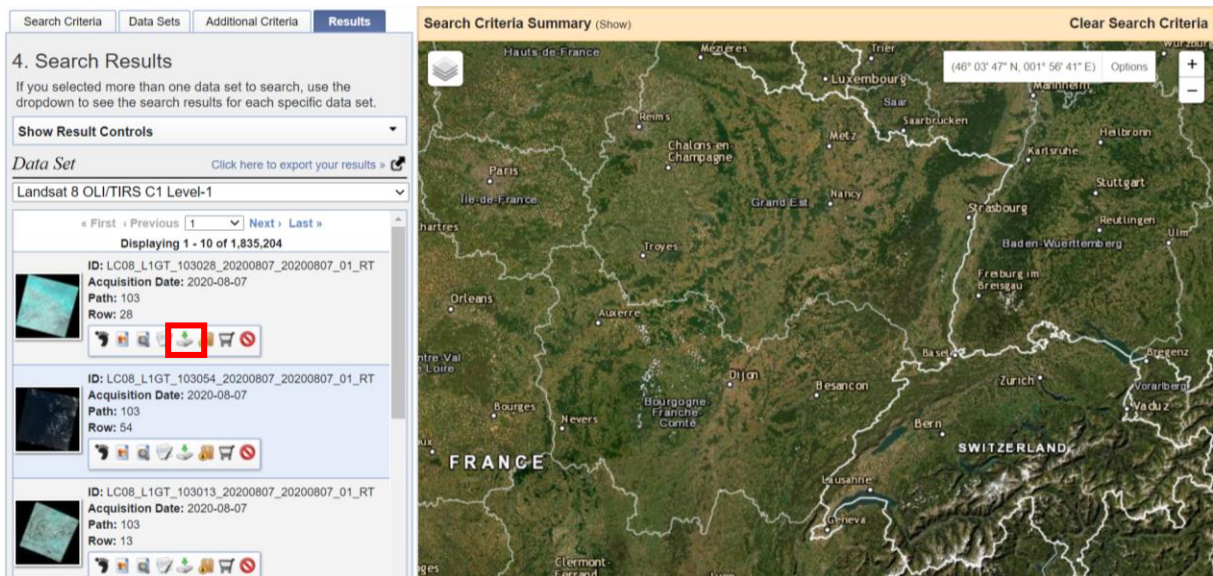
iii. Téléchargement d'images

Lorsque la localisation est déterminée, il suffit de cliquer sur l'onglet « **Data Sets** » pour obtenir la liste de tous les satellites disponibles. Il est possible d'affiner la recherche en spécifiant une plage de dates.

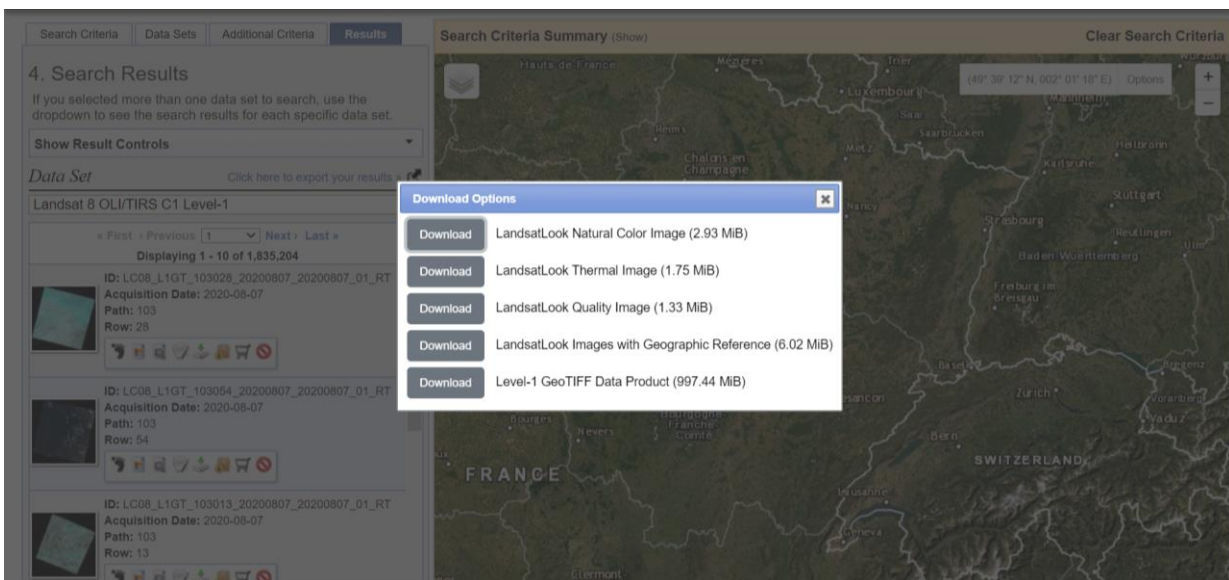


Dans la section « **Landsat Collection 1** » cliquez sur l'option « **Landsat Collection 1** » puis « **Landsat 8 OLI/TIRS** » et activer la commande « **Results** ».

L'onglet « **Results** » contient toutes les images de la recherche. Dans la présentation des images disponibles pour le téléchargement, la première image de la liste correspond à la plus récente.






Choisissez une image avec une couverture nuageuse moindre et téléchargez là en cliquant sur le bouton « **Download/options** ». La fenêtre des options de téléchargement apparaît et propose plusieurs types de téléchargement. Sélectionnez « **Level 1 Geo Tiff Data Product** » pour obtenir les 12 bandes spectrales fournies par le satellite. Il suffit ensuite d'enregistrer les bandes en spécifiant un dossier.

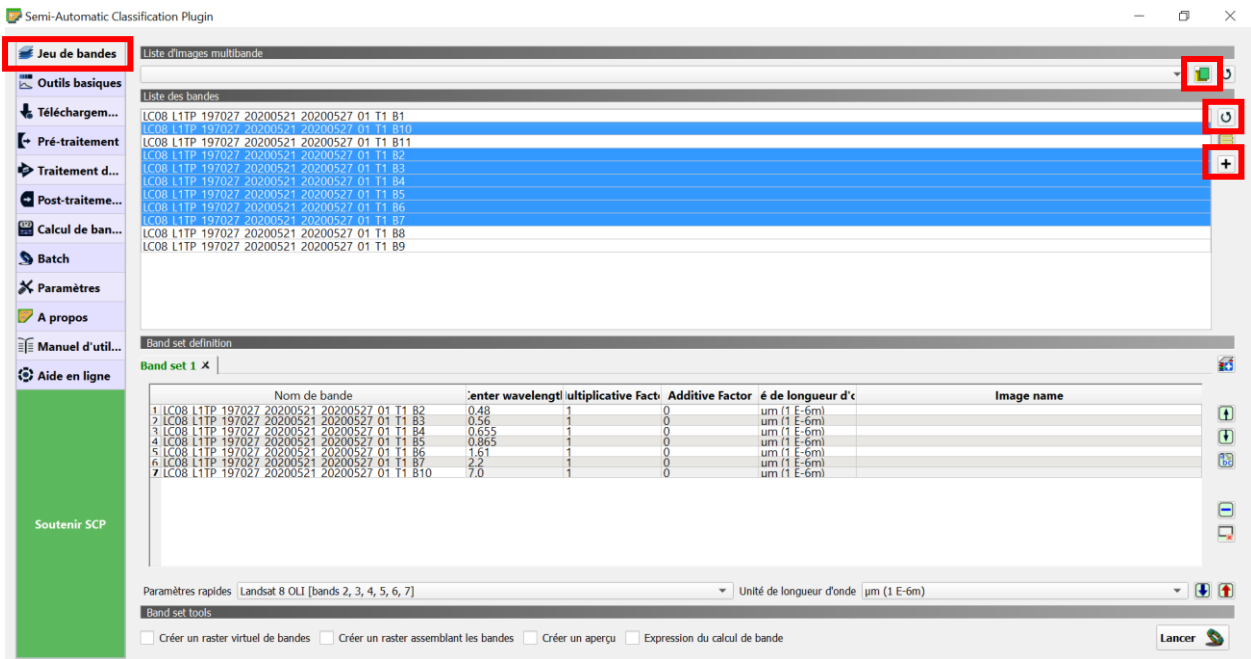


iii. Prétraitement sous Qgis

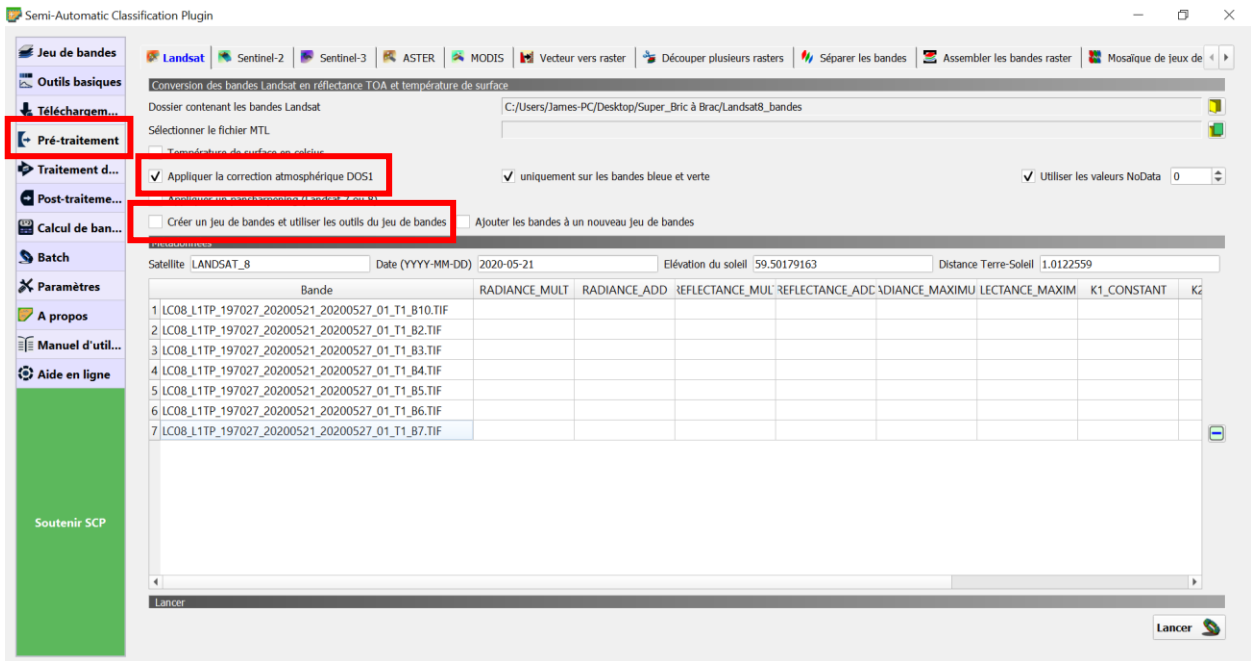
Commencez un nouveau projet Qgis et démarrez le plug-in **SCP** (Semi-Automatic Classification) disponible dans les extensions Qgis.

Une fois le plug-in lancé, dans l'onglet « jeu de bandes » cliquez sur l'icône « **Ouvrir un fichier** »  pour y ajouter les bandes téléchargées. Actualiser la liste pour faire apparaître les 12 bandes. 

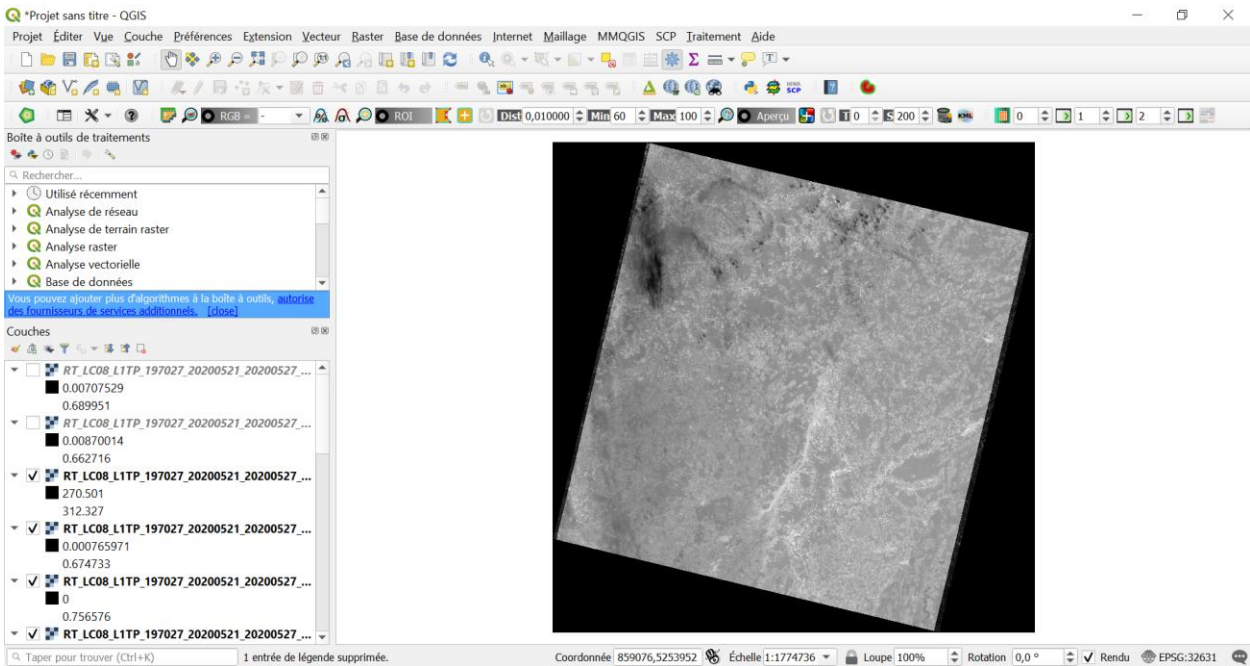
Ne sélectionnez que les bandes qui seront utiles au traitement à savoir les bandes 2,3,4,5,6,7,10 et cliquez sur le bouton  pour les ajouter au jeu de bandes. Les bandes 2 à 7 vont servir dans la classification du terrain et la bande 10 (la bande infrarouge thermique) va intervenir dans l'estimation de la température de surface.



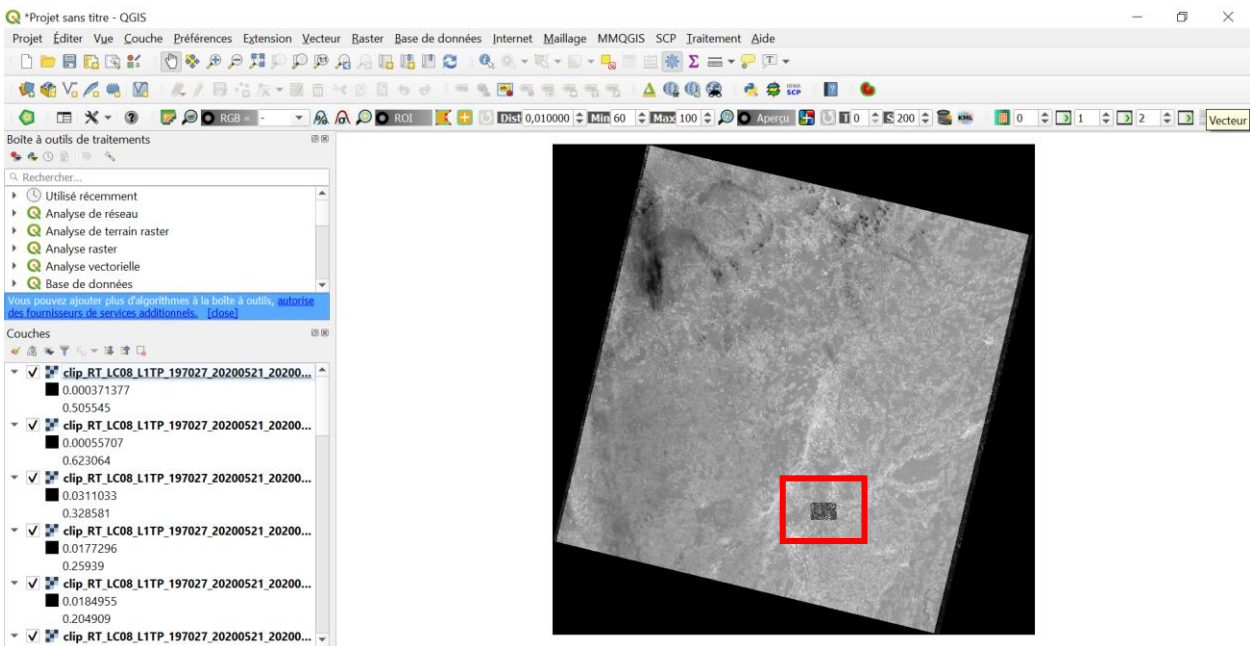
Dans l'onglet **Pré-traitement**, cochez la case « **correction atmosphérique DOS1** » et décochez la case « **Créer un jeu de bandes et utiliser les outils du jeu de bandes** ». L'ensemble de bande pourra être créé après découpe de la zone d'intérêt.



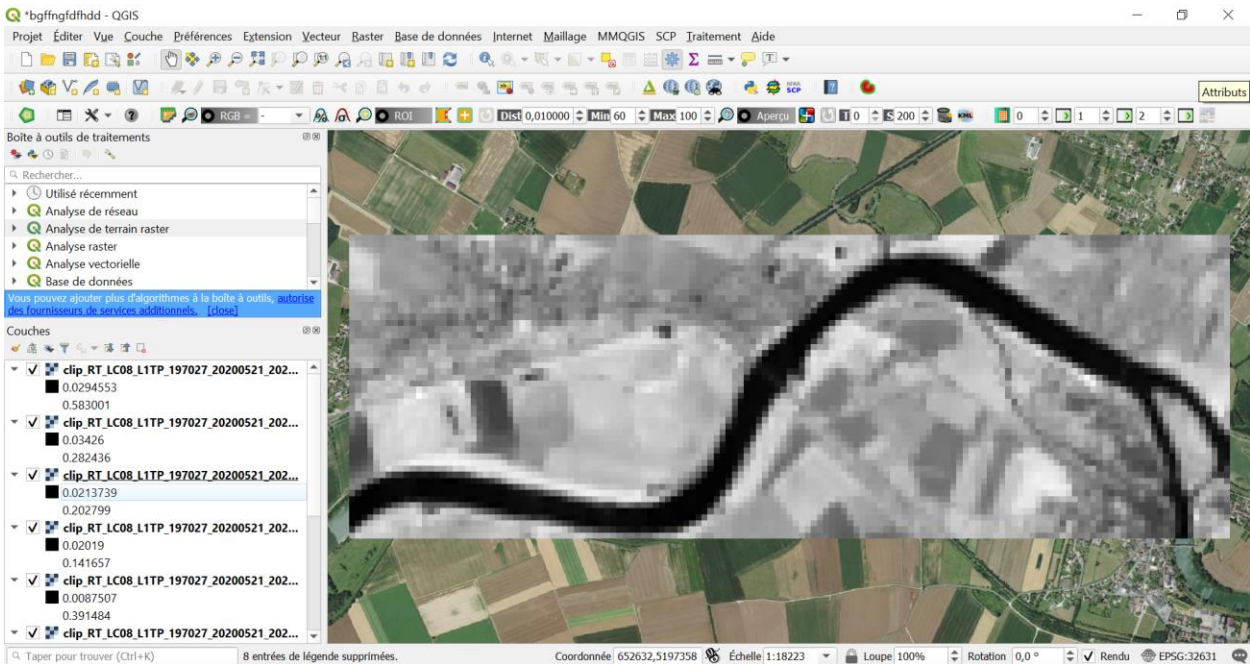
Pour lancer le processus de téléchargement, cliquez sur l'onglet « **téléchargement** », puis « **Lancer** ». Les bandes vont être converties, chargées et affichées dans le projet Qgis avec le préfixe RT.



Les images (rasters) peuvent ensuite être découpées via l'onglet « Découper plusieurs rasters dans l'onglet « Pré-traitement » du menu SCP.



Les bandes comprenant le préfixe RT peuvent ensuite être supprimées et remplacées par un fond ortho par exemple.

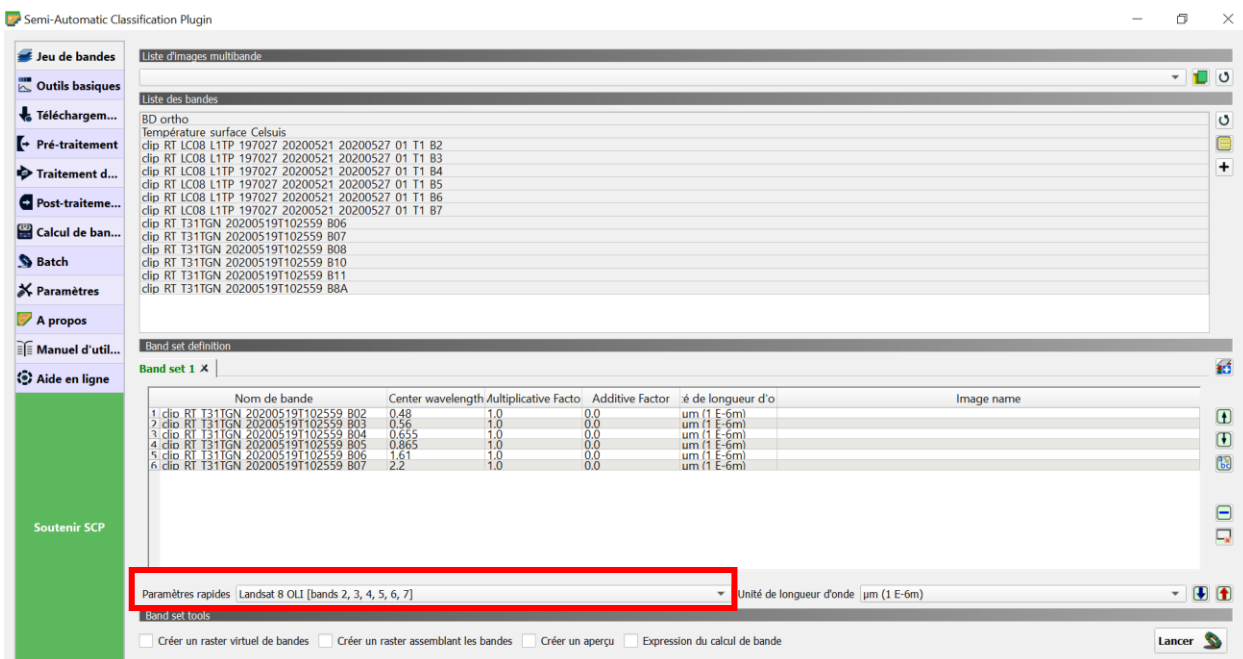


iii. Classification

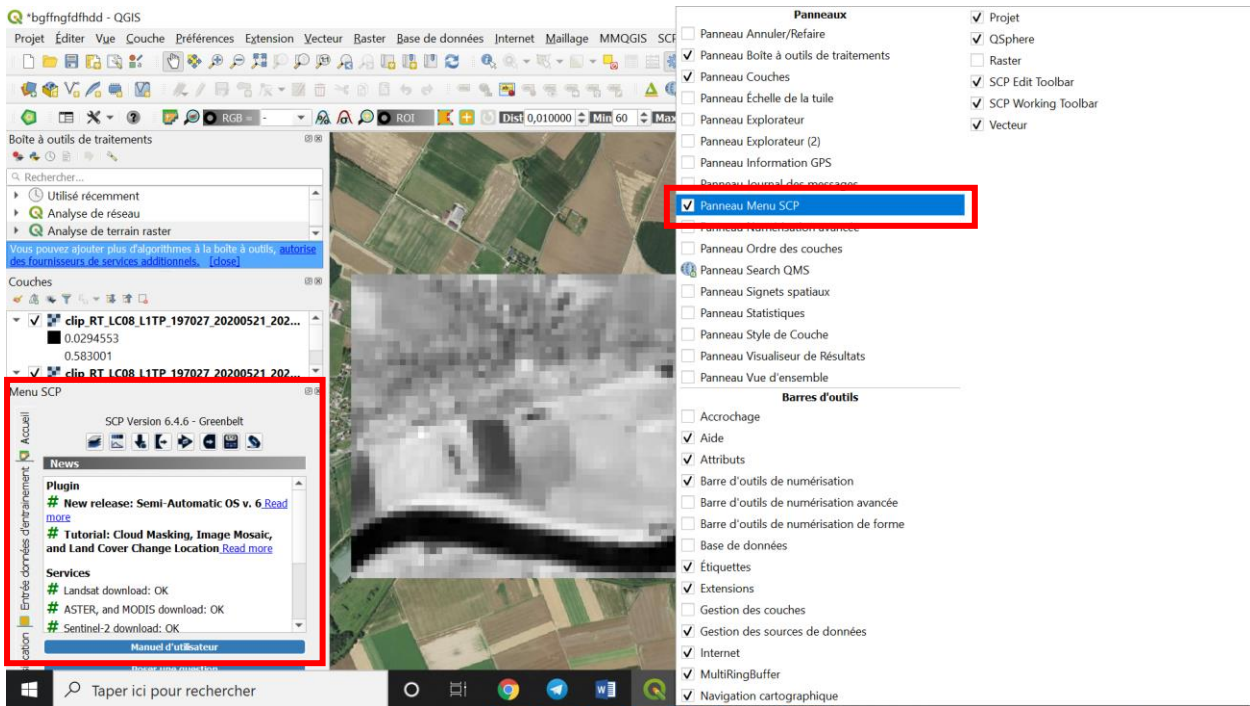
L'étape suivante a pour rôle de classer la couverture terrestre afin de différencier les forêts, du bâti, de l'eau et des cultures. Pour ce faire nous déterminons les classes suivantes :

Classe	Identifiant classe
Eau	1
Bâti	2
Végétation	3
Culture	4

Ouvrir l'onglet « **jeu de bandes** » dans le menu SCP et sélectionner (après avoir réactualisé les bandes) dans les paramètres rapides le **landsat 8 OLI**.

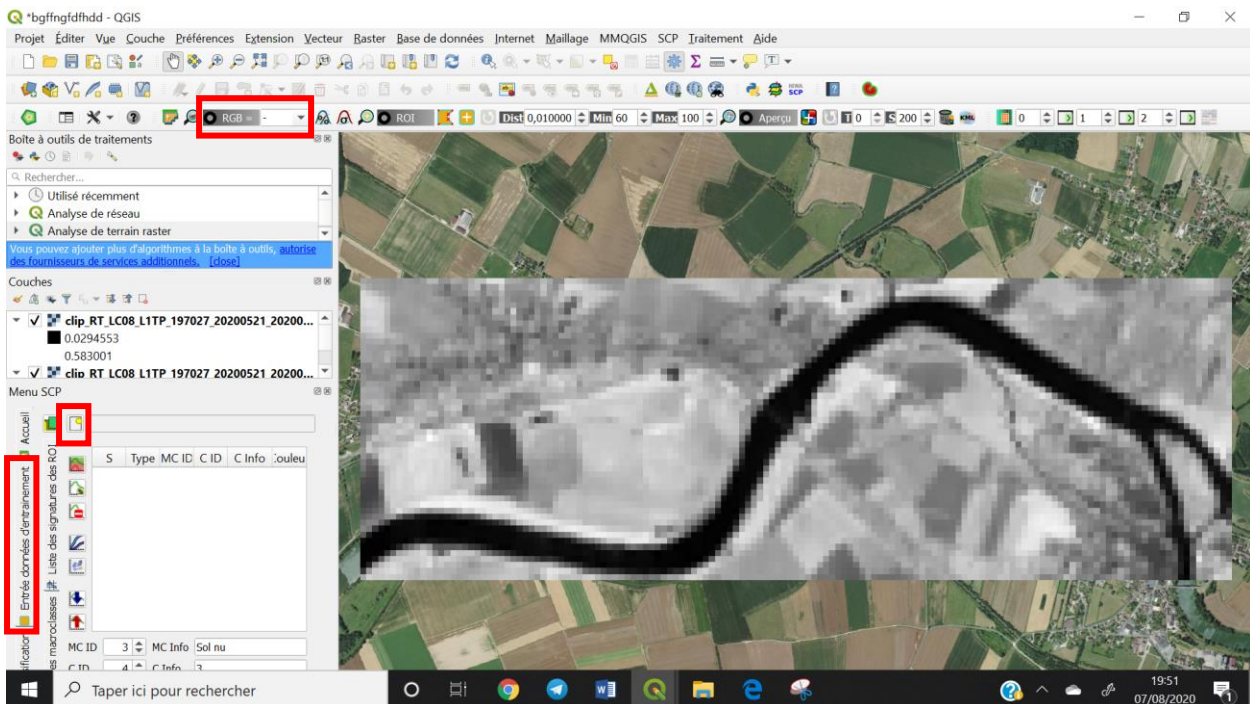



Revenir sur le projet et afficher le menu SCP via un clic droit sur la barre d'attributs.










Dans ce menu, sélectionner l'onglet « entrée données d'entraînement » et créer une nouvelle « donnée d'apprentissage » en cliquant sur l'icône suivante .

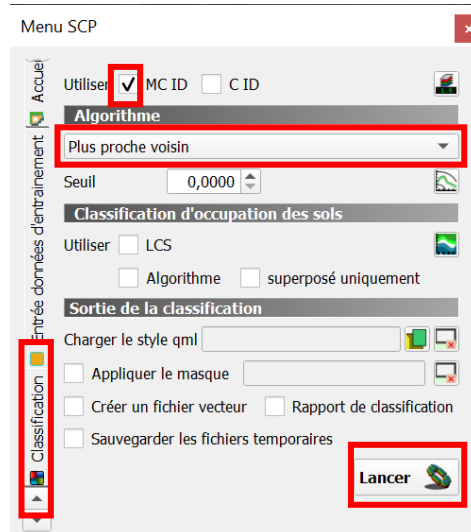
Dans la liste RGB de la barre de travail, sélectionnez 4-3-2, pour afficher un composite de fausses couleurs correspondant aux bandes PR, Rouge et vert afin de bien discerner les classes vues précédemment.



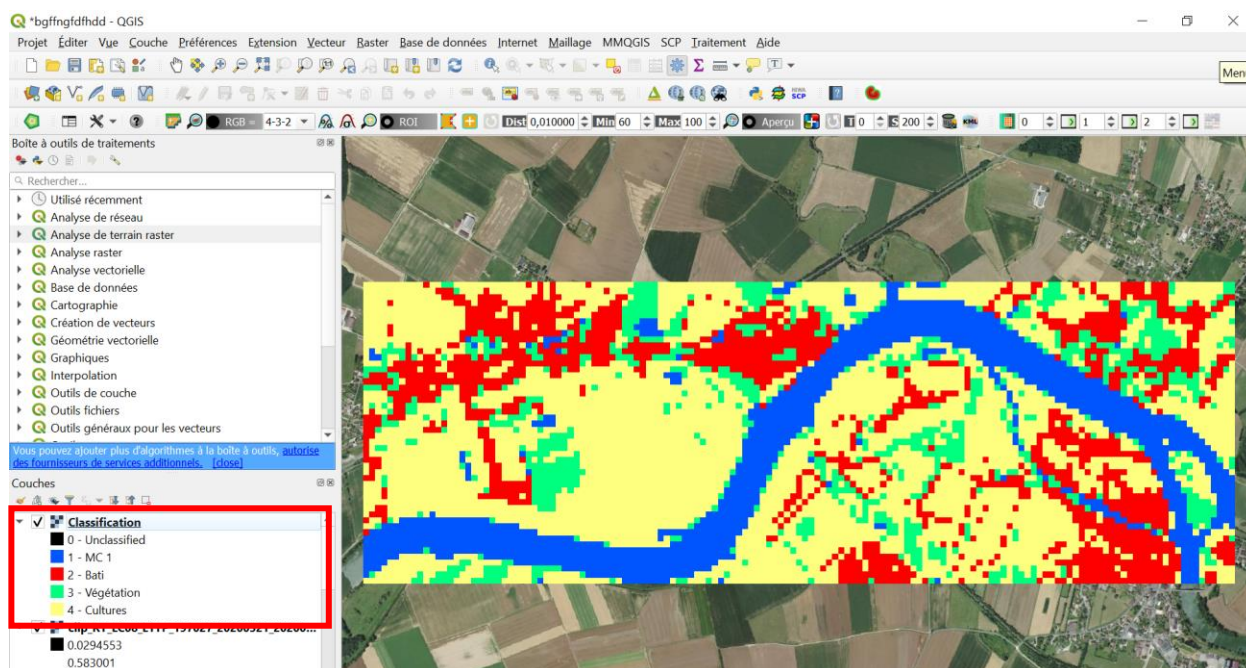
Ensuite, une classification de type ROI (region of interest) peut être entreprise. Il s'agit de sélectionner manuellement la valeur des pixels sur l'image en cliquant sur le bouton  de la barre de travail et d'indiquer à quel type d'occupation du sol cette valeur fait partie.

	S	Type	MC ID	C ID	C Info	Color
9	<input checked="" type="checkbox"/>	B	4	9	Uncultivated...	
10	<input checked="" type="checkbox"/>	B	4	10	Uncultivated...	
11	<input checked="" type="checkbox"/>	B	4	11	Uncultivated...	
12	<input checked="" type="checkbox"/>	B	1	12	Water3	
13	<input checked="" type="checkbox"/>	B	1	13	Water4	
14	<input checked="" type="checkbox"/>	B	4	14	Uncultivated...	
15	<input checked="" type="checkbox"/>	B	3	15	Crop3	

Après la création de plusieurs ROI pour chaque classe de couverture terrestre. Il suffit d'aller dans l'onglet « **classification** » cocher les cases « **MC ID** » et « **plus proche voisin** » puis lancer l'algorithme.



A l'issue du traitement de l'algorithme, l'image classe les différents types d'occupation du sol : Le bâti (en rouge), les cultures (en jaune), la végétation (en vert) et l'eau (en bleu).



iv. Re-classification à partir de l'émissivité

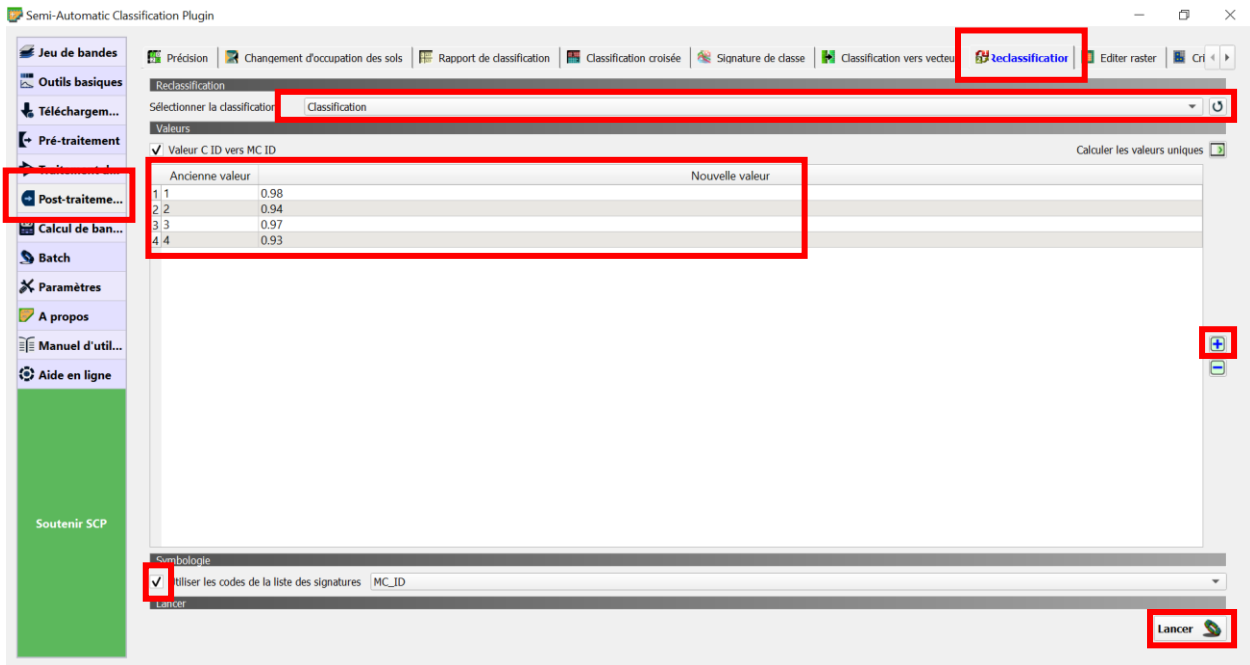
Dans cette étape, il s'agit de réaliser une seconde classification en utilisant les valeurs émissivité de la surface terrestre. Les valeurs d'émissivité e pour les classes de couverture terrestre utilisées dans ce travail sont indiquées dans le tableau ci-après.

Type de couverture terrestre	Valeur d'émissivité
Eau	0,98
Bâti	0,94
Végétation	0,97
Cultures	0,93

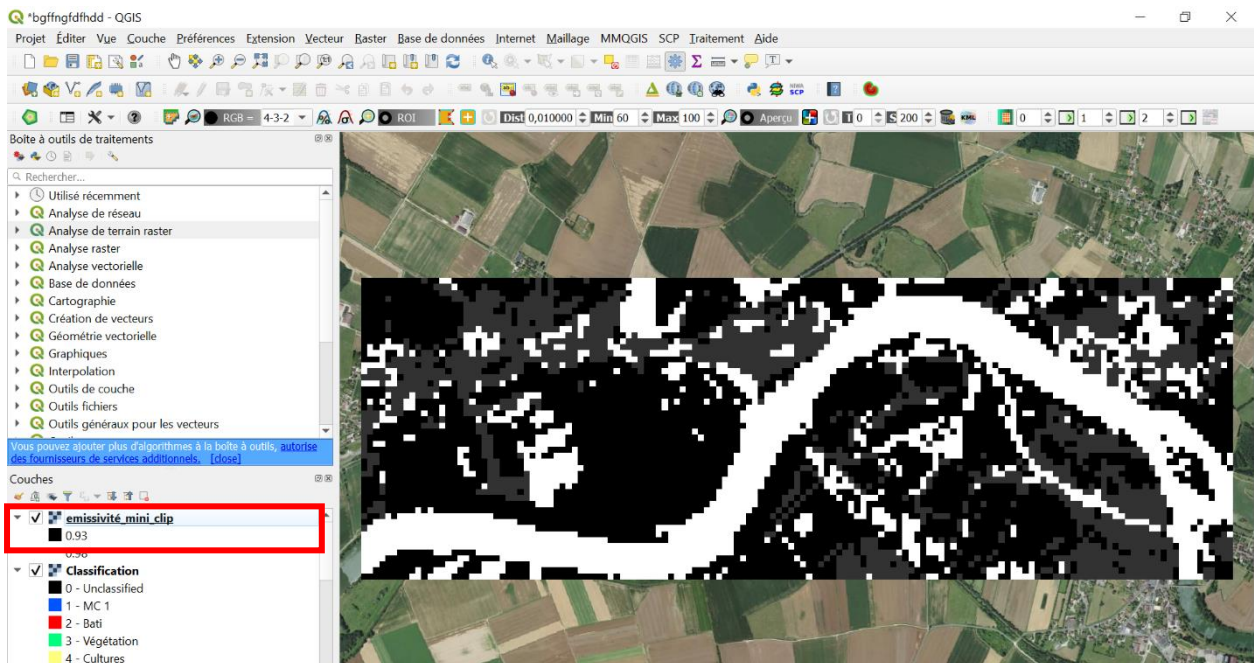
Les valeurs utilisées dans ce didacticiel ne sont qu'indicatives, car l'émissivité de chaque matériau doit être obtenue à partir d'une étude de terrain.

Dans la commande « **post-traitement** » du menu SCP, cliquez sur l'onglet « **Reclassification** » et cliquez sur le bouton recharger pour actualiser la liste des couches et afficher les rasters chargés.

Sélectionnez le raster de classification dans la liste, cliquez sur le bouton ajouter pour ajouter 4 lignes à la table **Valeurs**. Dans ce tableau, définissez l'ancienne valeur (l'identifiant de la classe de la classification) et la nouvelle valeur (l'émissivité e correspondante) pour chaque classe de couverture terrestre. Décochez la case « Utiliser le code de la liste des signatures », cliquez sur le bouton exécuter et définissez le nom du raster en sortie (par exemple, emissivité.tif).



Après complétion de l'algorithme, chaque pixel se voit attribuer une valeur d'émissivité qui est tributaire du type de couverture terrestre.



v. *Conversion du raster d'émissivité en raster de température*

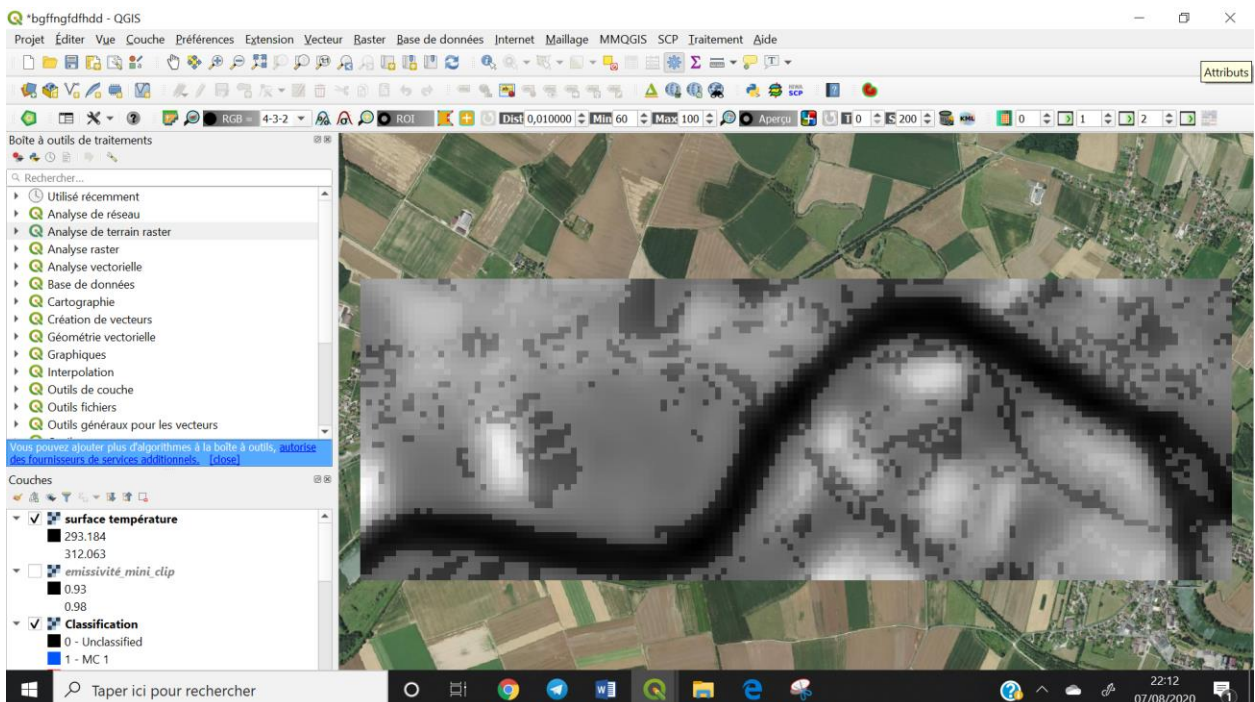
Pour convertir le raster d'émissivité en température, il est possible d'utiliser la formule de Boltzmann ci-après dans l'onglet « calcul de bandes » :

$$T = TB / [1 + (\lambda * TB / c2) * \ln(e)]$$

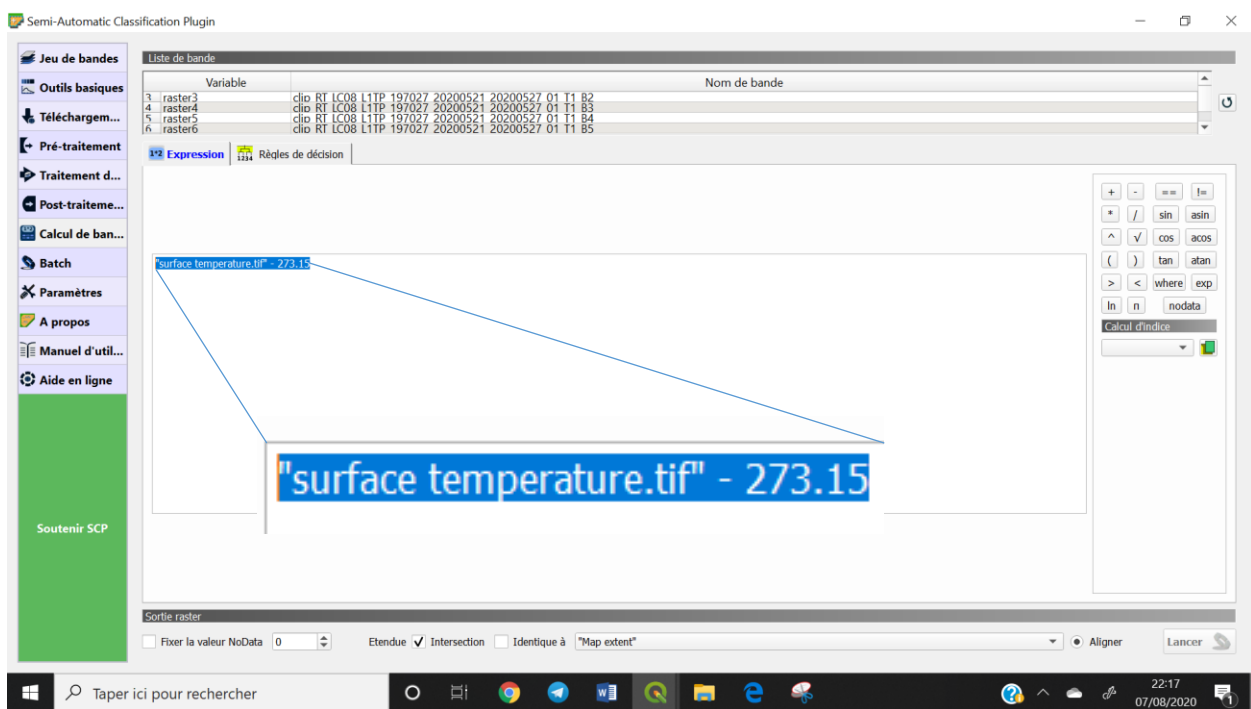
- Où λ = la longueur d'onde du rayonnement émis, soit 10,8 μm pour la bande 10
- $c2 = h * c / s = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m K} = 14388 \mu\text{m/K}$,
- h = constante de Planck = $6.626 \times 10^{-34} \text{ J/s}$,
- s = constante de Boltzmann = $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$,
- c = vitesse de la lumière = $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$.



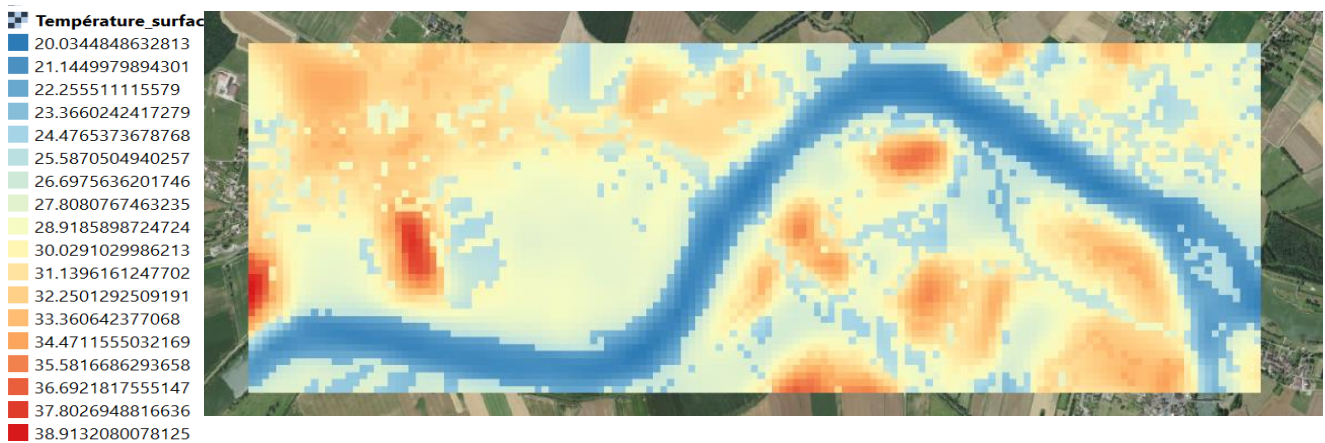
Une fois la formule introduite dans la table de calcul de bandes, il suffit d'exécuter l'algorithme pour obtenir une image représentant la température (en kelvin) de surface la zone étudiée.



Pour obtenir la température en Celsius, il suffit de retourner dans la table de calcul de bande et de soustraire 273,15 à la bande de température de surface précédemment obtenue.



Une fois la température de surface convertie en degrés Celsius, il suffit de changer les propriétés de la couche et d'y appliquer des classes de couleurs pour mieux observer d'éventuels contrastes de température.



On obtient donc une carte de température de surface qui peut ensuite être superposée à une image Ortho par exemple.

Annexe 5 Méthode invertébrés (d'après guide AFB)

Concernant la systématique des espèces, il n'existe pas, à ce jour, de clef de détermination simplifiée permettant d'identifier facilement les invertébrés souterrains. Néanmoins plusieurs ouvrages références proposés par l'AFB sont listés ci-dessous :

- Amphipodes : Ginet R (1996) Bilan Systématique du genre Niphargus en France, Société Linnéenne de Lyon, 242p.
- Isopodes : Henry JP, Magniez G (1983) Crustacés Isopodes (Principalement Asellotes). Association Française de Limnologie, 39p.
- Ostracodes : Meisch C (2000) Freshwater ostracoda of western and central Europe. Spektrum Akad. Verlag, Gustav Fischer, 522p.
- Copépodes et Mollusques : pas d'ouvrage disponible, contacter un spécialiste.

Des illustrations tirées du guide de l'AFB montre à quoi ressemble les invertébrés souterrains :



Illustration 18 (à gauche) : *Fabaeformiscandona breuili* (© P. Marmonier)

Illustration 19 (à droite) : *Niphargus rhenorhodanensis* (© P. Marmonier)

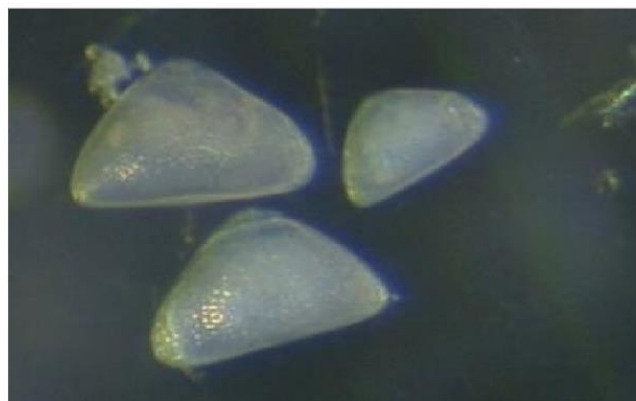


Illustration 20 (à gauche) : *Proasellus cavaticus* (© P. Marmonier)

Illustration 21 (à droite) : *Schelencandona triquetra* (© P. Marmonier)

i. Echantillonnage

Dans le milieu interstitiel ou hyporhéique :

L'échantillonnage d'invertébrés dans les sédiments des cours d'eau et des zones humides est réalisé à l'aide de la méthode Bou-Rouch (Bou & Rouch, 1967). Les points de prélèvement sur chaque station doivent être positionnés sur des zones à forte probabilité d'apport d'eau souterraine, c'est-à-dire en aval de banc de gravier (en rive droite et gauche, figure 18) ou de seuil ou encore directement sur des zones de sources visibles (sources artésiennes, patch de sédiment clair indiquant une arrivée d'eau souterraine, etc...).

L'équipement (Illustration 15) comporte une sonde en acier de 5cm de diamètre et d'une longueur de 1,5 à 1,8m, perforée à son extrémité (6 rangées d'orifices de 5mm de diamètre). La longueur de la sonde peut s'adapter en fonction de la hauteur d'eau dans le milieu échantillonné.

La sonde est enfoncée dans le sédiment à l'aide d'une masse jusqu'à une profondeur de 50cm pour pomper 10 litres d'un mélange eau/sédiment dans un seau gradué à l'aide d'une pompe à main de type Norton. Trois prélèvements différents sont réalisés sur chaque point d'échantillonnage pour tenir compte de la variation spatiale de la faune. Le mélange est filtré sur place à l'aide d'un tamis avec un vide de maille de 100µm, puis il est stocké dans une boîte étanche après fixation avec de l'alcool à 96°. Finalement, les invertébrés sont triés, comptés et identifiés au laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'un microscope.

Dans les puits :

L'échantillonnage d'invertébrés dans les puits est plus difficile. Dans tous les cas, les prélèvements sont impossibles dans les puits dont la crépine est équipée d'une chaussette car elle empêche la faune d'y pénétrer.

Dans les puits dont l'eau n'est pas utilisée pour l'alimentation, la première étape consiste à déposer des filets circulaires (ou balances) lestés de pierres et appâtés (morceaux de foie ou de saucisson sec) dans le fond du puits. Les filets seront retirés le lendemain. La seconde étape correspond à un pompage de 40 litres à l'aide d'une pompe à piston, identique à celle utilisée dans la méthode BouRouch ; la pompe est fixée sur un tuyau d'arrosage lesté d'environ 15m. Cette méthode permet l'échantillonnage de la faune non-carnivore qui n'est pas attirée par les appâts.

En revanche, le pompage manuel, à cause de la pression qui s'exerce sur le tuyau, n'est possible qu'à condition que le niveau piézométrique du puits ne dépasse pas 7 à 8m et que la profondeur totale de celui-ci ne soit pas supérieure à 17m. Dans le cas contraire, le pompage est remplacé par l'utilisation d'un filet à plancton vertical (ou filet Cvetkov, Illustration 16) qui permet de mettre en suspension et de collecter les invertébrés en faisant d'amples mouvements de haut en bas. Dans les puits utilisés comme source d'eau potable, l'utilisation de filets appâtés n'est pas possible et l'échantillonnage sera basé uniquement sur le pompage ou le filet à plancton.

Dans tous les cas, les échantillons seront filtrés sur place à l'aide d'un tamis avec un vide de maille de 100µm, puis stockés dans une boîte étanche après fixation avec de l'alcool à 96°. Finalement, les invertébrés sont triés, comptés et identifiés au laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'un microscope.

Dans les sources :

L'échantillonnage des invertébrés dans les sources peut être réalisé à l'aide de filets à dérive (à la tombée de la nuit pour éviter des réactions de fuite des organismes souterrains). Les filets (Illustration 17) seront retirés le lendemain puis un pompage de type Bou-Rouch est réalisé lorsque la texture du fond de la source permet d'y enfoncer la sonde. Lorsque la forme de la source ne permet pas d'utiliser un filet à dérive, des petits filets appâtés avec des morceaux de viandes saignants ou du saucisson sec peuvent aussi être utilisés.

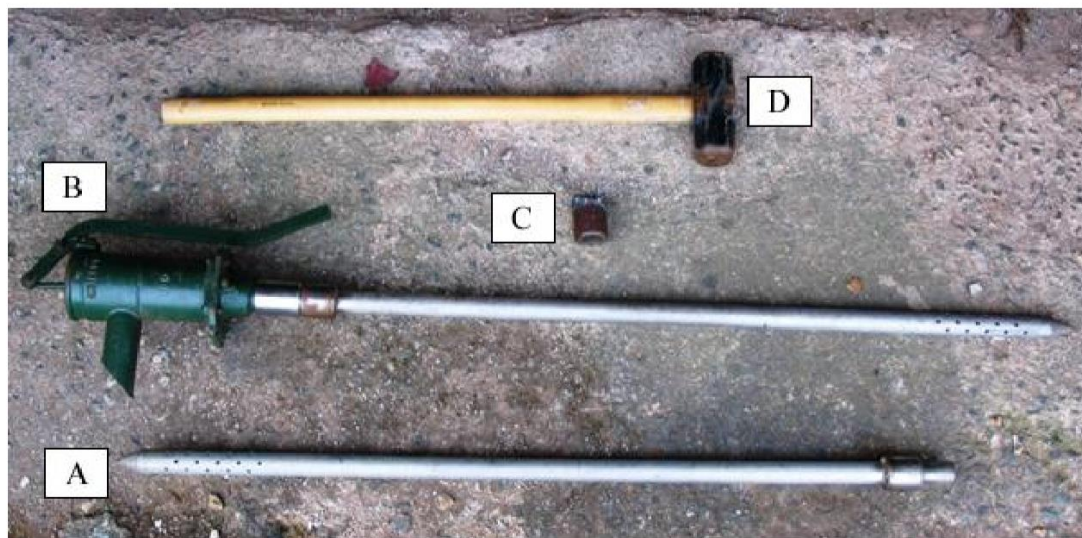


Illustration 15 : Equipement nécessaire pour un pompage à l'aide de la méthode Bou-Rouch : A) sonde en acier avec crépine ; B) tête de pompage à piston ; C) tête de frappe pour enfoncer la sonde en acier ; D) masse (© P. Marmonier)



Illustration 16 : Equipement nécessaire pour un pompage dans des puits dont la profondeur total (>17m) ou le niveau piézométrique (>8m) ne permettent pas l'utilisation d'une pompe manuelle (© P. Marmonier)



Illustration 17 : Filet à dérive utilisé dans les sources (© P. Marmonier)

ii. *Calcul de l'indice*

Le calcul de l'indice d'échange rivière/nappe est basé sur l'abondance des organismes stygobies en intégrant les traits écologiques des espèces. En effet, les organismes souterrains peuvent être répartis en quatre classes écologiques (Marmonier, 1988 ; Dole-Olivier et al. 1993) :

Classe 1 : organismes vivant à faible profondeur dans les sédiments et présents dans une grande diversité d'habitats souterrains (sources, rivières, karst), ils sont considérés comme ubiquistes (exemple : *Niphargopsis casparyi*) et leur abondance est notée N1.

Classe 2 : organismes présents uniquement dans le milieu hyporhéique du fleuve à faible profondeur (exemple : *Fabaeformiscandona wegelini*), dont l'abondance est notée N2.

Classe 3 : organismes stygobies ubiquistes présents à toutes les profondeurs dans le fleuve, la nappe riveraine et les karsts (exemples : *Niphargus rhenorhodanensis*, *Islamia* sp.), dont l'abondance notée N3.

Classe 4 : organismes phréatobies présents uniquement en profondeur dans la nappe (exemples : *Bathynella* sp., *Salentinella* sp., *Microcharon* sp.) ou d'espèces strictement karstiques (exemple : *Niphargus virei*), dont l'abondance est notée N4.

Le calcul de l'indice intègre une pondération des abondances des stygobies par rapport à leurs classes écologiques. L'indice d'échange (IE) se calcule donc de la façon suivante :

$$IE = N1 + 2.N2 + 5.N3 + 10.N4$$

L'interprétation de la signification de l'indice doit être faite en tenant compte de l'écologie des espèces présentes et de sa cohérence avec les caractéristiques physico-chimiques de l'eau interstitielle au point de prélèvement (en surface et à 50cm de profondeur) :

- IE fort et eaux interstitielles chargées en éléments minéraux, traduisant un contact long avec le substratum : apports importants d'eau profonde de la nappe ou des karsts latéraux ;
- IE intermédiaire : (1) stygobies de classe 3 et eau chargée en ions dissous correspondent à des apports faibles d'eau souterraine profonde ; (2) stygobies de classe 2 et eau peu chargée correspondent à du recyclage de l'eau de surface sur de faibles distances ;
- IE faible ou égal à 0 : (1) zone où l'abondance totale de la communauté est forte (nombreux individus vivant en surface) et eau peu chargée et bien oxygénée correspond à de fortes infiltration d'eau de surface vers les sédiments ; (2) zone où l'abondance totale est faible ou nulle et où l'eau est chargée en ions dissous et hypoxique correspond à un secteur aux sédiments colmatés.

Annexe 6 : Méthode « macrophytes »

Au même titre que la méthode « invertébré souterrain », l'application de cette méthode nécessite aussi en premier lieu de connaître la systématique des végétaux aquatiques à identifier. Pour ce faire une idée des espèces représentatives d'un apport phréatique, des illustrations tirées de la Fore de Montégut (1993) sont listées ci-après.

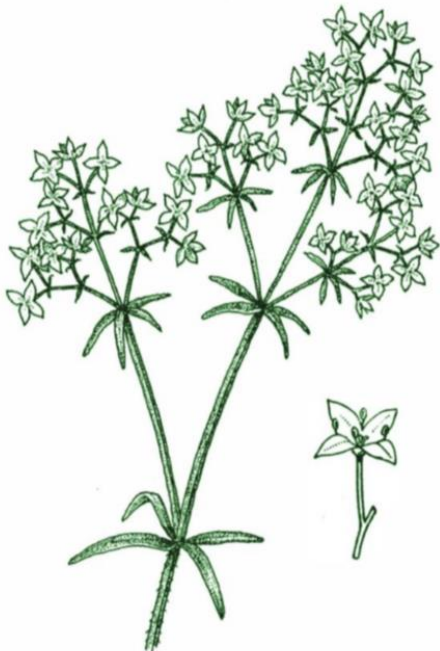
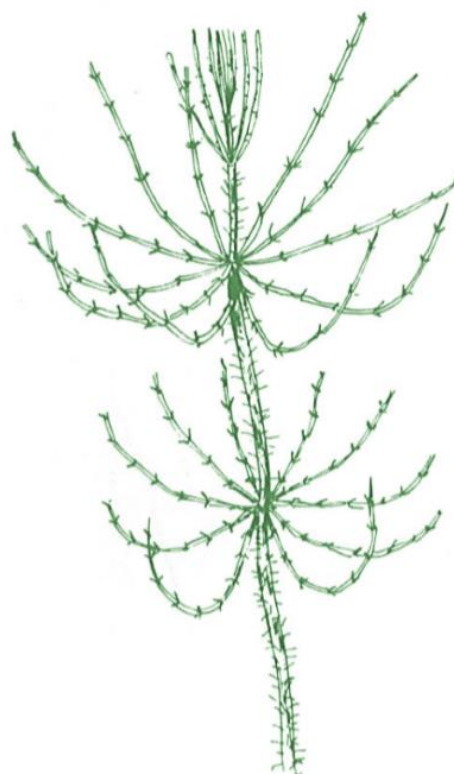


Illustration 3 (à gauche) : *Galium palustre* in Montégut (1993)
Illustration 4 (à droite) : *Groenlandia densa* in Montégut (1993)



Illustration 1 (à gauche) : *Berula erecta* in Montégut (1993)
Illustration 2 (à droite) : *Chara major* in Montégut (1993)



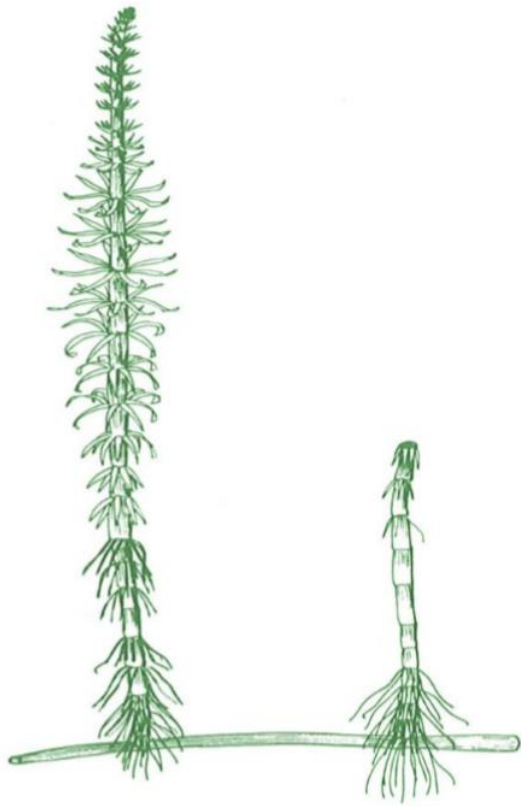


Illustration 5 (à gauche) : *Hippuris vulgaris* in Montégut (1993)
 Illustration 6 (à droite) : *Juncus articulatus* in Montégut (1993)



Illustration 7 (à gauche) : *Lysimachia vulgaris* in Montégut (1993)
 Illustration 8 (à droite) : *Mentha aquatica* in Montégut (1993)





Illustration 9 (à gauche) : *Myosotis scorpioides* in Montégut (1993)
 Illustration 10 (à droite) : *Potamogeton coloratus* in Montégut (1993)

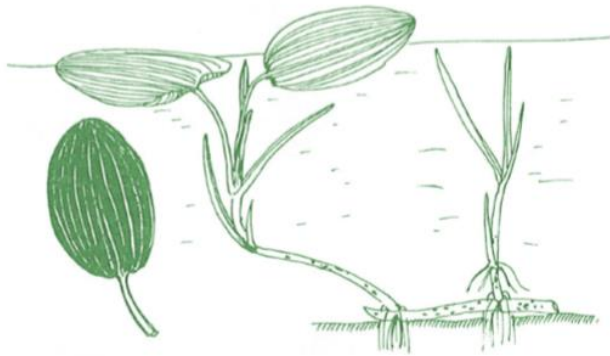


Illustration 11 (à gauche) : *Potamogeton natans* in Montégut (1993)
 Illustration 12 (à droite) : *Ranunculus trichophyllus* in Montégut (1993)

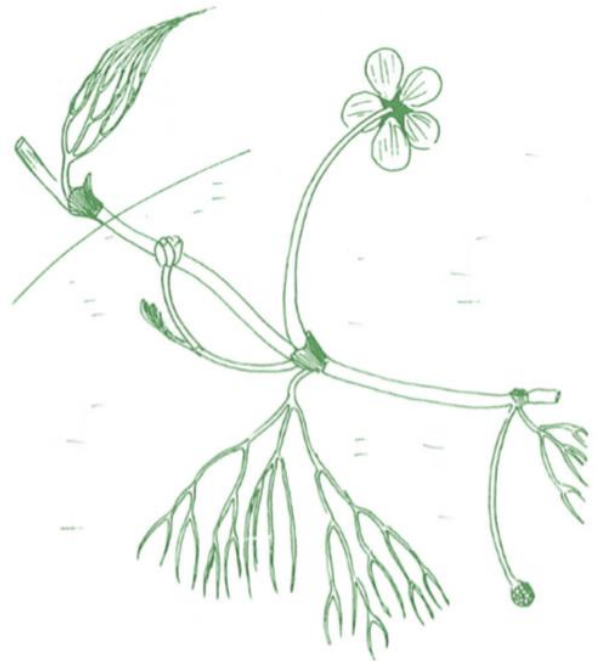




Illustration 13 (à gauche) : *Sparganium emersum* in Montégut (1993)

Illustration 14 (à droite) : *Veronica anagallis-aquatica* in Montégut (1993)

L'abondance des différentes espèces végétales sont identifiées sur le terrain *via* le double indice d'abondance de Braun-Blanquet (1932). Ces indices permettent d'avoir l'abondance relative de chaque espèce sur le transect étudié ainsi que leur mode de répartition.

Abondance relative	Mode de répartition des espèces
1 : recouvrement < 5% du transect	1 : individus isolés
2 : entre 5 et 25 %	2 : petites touffes très espacés
3 : entre 25 et 50 %	3 : touffes moyennes, espacées
4 : entre 50 et 75 %	4 : grandes plaques discontinues
5 : > 75 %	5 : peuplement continu

i. Calcul des indices (d'après guide de l'AFB)

D'après les notes pour chacune des espèces de végétaux aquatiques indicatrices (Tableau ci-après), il est possible de calculer plusieurs indices qui, après multiplication, renseigneront sur la localisation et l'intensité d'éventuels apports phréatiques.

Espèces	Niveau de trophie				Alimentation souterraine		Perturbations par les crues				
	O	M	E	HE	O	N	Nul.	Fbl.	Moy.	Fr.	All.
<i>Alisma plantago-aquatica</i>	0.5	3	2	0	0	0	1	3	2	1	2
<i>Azolla filiculoides</i>	0	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0
<i>Baldellia ranunculoides</i>	2	0	0	0	1	0	2	2	0	0	0
<i>Berula erecta</i>	3	3	0.5	0.5	2	0	2	3	3	3	2
<i>Bidens tripartita</i>	0	0	2	2	0	0	1	1	1	1	0
<i>Callitriche platycarpa</i>	0.5	2	2	2	1	0	0.5	2	3	2	0.5
<i>Carex acutiformis</i>	1	2	3	1	0	0	3	3	0.5	0.5	0
<i>Carex elata</i>	0	0	0	0	0	0	3	3	2	0.5	0.5
<i>Carex pseudocyperus</i>	0	2	3	3	0	0	3	2	0	0	0
<i>Carex sp.</i>	0	0	0	0	0	0	3	3	1	0	0
<i>Ceratophyllum demersum</i>	0.5	0.5	2	3	0	1	1	1	1	1	2
<i>Chara globularis</i>	0	0	2	0	1	0	0	2	0.5	0	0
<i>Chara hispida</i>	2	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0
<i>Chara major</i>	0.5	3	0.5	0	2	0	2	3	2	0.5	0
<i>Chara vulgaris</i>	1	3	2	0	1	0	0	3	3	2	0
<i>Chara sp</i>	1	1	1	0	2	0	1	2	1	1	0
<i>Cladium mariscus</i>	3	2	0	0	1	0	3	2	0	0	0
<i>Eleocharis acicularis</i>	2	3	0.5	0.5	1	0	0	2	3	2	0
<i>Elodea canadensis</i>	0.5	2	2	2	1	0	0.5	2	3	2	2
<i>Elodea nuttallii</i>	0	2	2	2	0	0	0	0	2	2	2
<i>Equisetum fluviatile</i>	2	2	0	0	0	0	2	2	2	0	2
<i>Fontinalis antipyretica</i>	0.5	2	2	0	1	0	0	0	0	2	0
<i>Galium palustre</i>	2	3	1	1	2	0	0	0	0	0	0
<i>Glyceria fluitans</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0
<i>Groenlandia densa</i>	2	3	0	0	2	0	0	2	3	3	2
<i>Hippuris vulgaris</i>	3	2	0.5	0	2	0	2	2	3	1	3
<i>Hottonia palustris</i>	0	0	0	0	1	0	2	2	3	2	2
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>	0	0	2	2	1	0	3	0	0	0	0
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Iris pseudacorus</i>	0	0	0	0	0	0	2	3	2	0.5	2
<i>Juncus articulatus</i>	3	3	2	0	2	0	2	3	2	1	0
<i>Juncus subnodulosus</i>	2	0	0	0	1	0	2	2	0	0	0
<i>Lemna gibba</i>	0	0	3	3	0	0	0	0	0	3	0
<i>Lemna minor</i>	0.5	0.5	2	3	0	1	0	0	0	0	0
<i>Lemna trisulca</i>	0	2	2	2	1	0	2	3	2	0	0
<i>Ludwigia palustris</i>	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
<i>Luronium natans</i>	2	2	0	0	1	0	0	2	2	0	0
<i>Lycopus europaeus</i>	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0
<i>Lysimachia nummularia</i>	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0
<i>Lysimachia vulgaris</i>	0	0	0	0	2	0	2	3	0.5	0	3
<i>Lythrum salicaria</i>	2	3	2	0.5	0	0	3	2	1	1	3
<i>Mentha aquatica</i>	3	3	2	0.5	2	0	2	3	2	0.5	3
<i>Menyanthes trifoliata</i>	2	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<i>Myosotis scorpioides</i>	3	3	2	0.5	2	0	0.5	3	2	2	2
<i>Myriophyllum spicatum</i>	0.5	2	3	3	0	0	1	2	2	3	3
<i>Myriophyllum verticillatum</i>	0	0	0	0	1	0	3	3	2	0	2
<i>Najas marina</i>	0	0.5	2	2	0	1	0	2	2	3	2
<i>Najas minor</i>	0	0.5	2	2	0	0	0	0	0	2	2
<i>Nasturtium officinale</i>	1	1	1	0	1	0	0	2	3	3	0
<i>Nuphar lutea</i>	0.5	2	2	3	0	0	3	2	2	0.5	3
<i>Nymphaea alba</i>	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0

<i>Nymphoides peltata</i>	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Oenanthe fistulosa</i>	2	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0
<i>Oenanthe fluviatilis</i>	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Peucedanum palustris</i>	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<i>Phalaris arundinacea</i>	0	0	0	0	0	0	0,5	2	2	3	3	3
<i>Phragmites australis</i>	1	2	2	3	0	0	3	2	1	1	1	2
<i>Polygonum amphibium</i>	0	0	2	1	0	0	2	2	0,5	0	0	0
<i>Polygonum hydropiper</i>	1	1	1	0,5	0	0	0,5	2	2	3	3	2
<i>Potamogeton coloratus</i>	3	2	2	0	2	0	2	2	0	0	0	0
<i>Potamogeton compressus</i>	0	0	2	0	1	0	2	3	0	0	0	0
<i>Potamogeton crispus</i>	0	0	2	1	0	0	1	1	1	1	1	0
<i>Potamogeton lucens</i>	0	1	1	1	1	0	3	3	0	0	0	2
<i>Potamogeton natans</i>	2	3	0,5	0,5	2	0	2	3	3	1	1	0,5
<i>Potamogeton nodosus</i>	0	0,5	2	3	0	1	0	2	2	3	3	3
<i>Potamogeton pectinatus</i>	0,5	2	3	3	0	1	0	0	0,5	3	3	3
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	0	0	2	2	1	0	0	0	0,5	0	0	2
<i>Potamogeton pusillus</i>	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3	3	2
<i>Ranunculus circinatus</i>	1	1	1	0	1	0	0	2	3	3	3	2
<i>Ranunculus fluitans</i>	0	2	2	2	0	0	0	0	0	3	3	0
<i>Ranunculus</i>	2	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0
<i>Ranunculus trichophyllus</i>	1	1	1	0	2	0	0	2	3	2	2	0
<i>Riccia fluitans</i>	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0
<i>Rorippa amphibia</i>	0	2	3	1	0	0	1	1	2	3	3	3
<i>Sagittaria sagittifolia</i>	0	2	2	0	0	0	0	3	2	0	0	2
<i>Samolus valerandi</i>	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
<i>Scirpus lacustris</i>	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Scutellaria galericulata</i>	0	0	0	0	0	0	2	3	1	1	1	0
<i>Sparganium emersum</i>	3	3	2	0,5	2	0	0	3	3	2	2	2
<i>Sparganium erectum</i>	0	1	1	1	0	0	3	3	0	0	0	2
<i>Sparganium minimum</i>	2	2	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0
<i>Spirodela polyrhiza</i>	0	0	2	2	0	0	1	1	1	1	1	0
<i>Stratiotes aloides</i>	0	0	2	2	0	0	2	2	2	0	0	0
<i>Thelypteris palustris</i>	2	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0
<i>Trapa natans</i>	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Typha latifolia</i>	0	2	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0
<i>Utricularia minor</i>	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
<i>Utricularia vulgaris</i>	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0
<i>Vallisneria spiralis</i>	0	0	2	1	0	0	0	0	0	3	3	0
<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	3	2	1	1	2	0	0	2	2	1	1	2
<i>Veronica beccabunga</i>	1	1	1	0	0	0	0	2	2	2	2	0
<i>Wolffia arrhiza</i>	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Zanichellia palustris</i>	0	2	2	0	1	0	0	0,5	0	0	0	0

ii. Calcul de l'indice trophique - Exemple : Donzère-Mondragon.

Site 16		Niveau de trophie				Niveau de trophie calculé			
Espèces	Abondance	O	M	E	HE	O	M	E	HE
<i>Ceratophyllum demersum</i>	1	0,5	0,5	2	3	0,5	0,5	2	3
<i>Elodea nuttallii</i>	3	0	2	2	2	0	6	6	6
<i>Lemna minor</i>	2	0,5	0,5	2	3	1	1	4	6
<i>Myriophyllum spicatum</i>	1	0,5	2	3	3	0,5	2	3	3
<i>Polygonum hydropiper</i>	1	1	1	1	0,5	1	1	1	0,5
<i>Potamogeton nodosus</i>	1	0	0,5	2	3	0	0,5	2	3
<i>Potamogeton pectinatus</i>	1	0,5	2	3	3	0,5	2	3	3
Total		3,5	13	21	24,5				
%		5,6	20,9	33,8	39,5				

Tableau 16 : Calcul de l'indice trophique à Donzère-Mondragon
La plus grande valeur concerne le niveau de trophie hyper-eutrophe (39,5) ce qui indique que cette station est plutôt hyper-eutrophe

- iii. *Calcul de l'indice de fréquence relative des espèces favorisées par les eaux phréatiques – Exemple : Donzère-Mondragon.*

Espèces	Site 16	Alimentation en eau souterraine	
	Abondance	Oui	Non
<i>Ceratophyllum demersum</i>	1	0	1
<i>Elodea nuttallii</i>	3	0	0
<i>Lemna minor</i>	2	0	1
<i>Myriophyllum spicatum</i>	1	0	0
<i>Polygonum hydopiper</i>	1	0	0
<i>Potamogeton nodosus</i>	1	0	1
<i>Potamogeton pectinatus</i>	1	0	1
Total		0	4
Calcul de l'indice	$0 - 4 = -4$ et $-4 < 0$ donc les apports phréatiques sont nuls		

Tableau 17 : Calcul de l'indice de fréquence relative à Donzère-Mondragon
La valeur de l'indice est -4, ce qui indique que les apports phréatiques sont nuls.

- iv. *Calcul de l'indice sur la probabilité d'apports issus de la nappe - Exemple : Donzère-Mondragon.*

Cet indice est calculé en mettant en rapport les informations sur le niveau d'eutrophisation et l'intensité des apports phréatiques, obtenues précédemment et à l'aide du tableau ci-dessous :

Trophie	Apport phréatique
hyper-eutrophe = 0	nul = 0
eutrophe = 1	faible = 1
mésotrophe = 2	moyen = 2
oligotrophe = 3	fort = 3

Tableau 18 : Codage des indices de trophie et d'apport phréatique.

Dans le cadre du site situé sur le secteur de Donzère-Mondragon (hyper eutrophe = 0 et apport phréatique nul = 0), on obtient une valeur de 0 en multipliant les deux indices, ce qui indique que la probabilité d'apports issus de la nappe de versant est nulle.

Les valeurs des deux indices sont alors multipliées pour chaque site. Suivant le résultat de cette multiplication, la probabilité d'apport issu de la nappe de versant est établie :

- nulle, lorsque le résultat est 0 ou 1,
- faible, lorsque le résultat est 2,
- moyenne, lorsque le résultat est 3,
- forte, lorsque le résultat est 4, 6 ou 9.

- v. *Calcul du niveau relatif de perturbations - Exemple : Donzère-Mondragon.*

Site 16		Perturbation par les crues					Perturbation par les crues						
Espèces	Abondance		A	F	M	F	All		A	F	M	F	All
<i>C. demersum</i>	1	X	1	1	1	1	2	=	1	1	1	1	2
<i>E. nuttallii</i>	3	X	0	0	2	2	2	=	0	0	6	6	6
<i>L. minor</i>	2	X	0	0	0	0	0	=	0	0	0	0	0
<i>M. spicatum</i>	1	X	1	2	2	3	3	=	1	2	2	3	3
<i>P. hydroper</i>	1	X	0,5	2	2	3	2	=	0,5	2	2	3	2
<i>P. nodosus</i>	1	X	0	2	2	3	3	=	0	2	2	3	3
<i>P. pectinatus</i>	1	X	0	0	0,5	3	3	=	0	0	0,5	3	3

Total	2,5	7	13,5	19	19
Total / Σ Abondance	0,25	0,7	1,35	1,9	1,9

Tableau 19 : Calcul du niveau relatif de perturbation à Donzère-Mondragon (A : Aucune ; F : Faible ; M : Moyenne ; All : Alluvionnement)

La plus grande valeur concerne le niveau de perturbation forte (1,9) ce qui indique que cette station est soumise à de forte perturbation par les crues.