

Caractérisation physique et thermique des habitats aquatiques de l'Ain

Rapport final

Février 2016

Coord. : H. Piégay, UMR 5600 EVS

Chercheurs et équipes impliquées :

- **Irstea HH** : G. Naudet, J. Le Coz, B. Camenen, A. Paquier (2.2.3., 3.2.)
- **Irstea Dynam** : H. Capra, H. Pella, N. Lamouroux (3.2.)
- **UMR 5600 ENS et Lyon 2** : F. Arnaud, L. Bultingaire, J. Lejot, K. Michel, H. Piégay, M. Spitoni, L. Vaudor V. Wawrzyniak (2.1., 2.2.1., 2.2.2., 3.1., 3.3., 3.4.)
- **UMR 5600 EMSE** : D. Graillot, S. Gaur (3.4.)
- **LGLTPE** : P. Allemand, P. Grandjean (3.3., 3.4.)

Sommaire

1	Introduction.....	3
2	Thème 1 – Dynamiques morphologiques	5
2.1	L’amont de Vouglans - éléments de diagnostic hydro-morphologique	5
2.1.1	Matériel et méthodes	5
2.1.2	Résultats	6
2.1.3	Conclusions et perspectives	9
2.2	La basse vallée.....	9
2.2.1	Etude granulométrique	9
2.2.2	Suivi des particules par RFID	13
2.2.3	Modélisation hydraulique	18
3	Thème 2 – Habitats aquatiques.....	24
3.1	Etude diachronique des habitats par imagerie.....	24
3.1.1	Matériel et méthodes	25
3.1.2	Résultats	25
3.1.3	Conclusions.....	28
3.2	Modélisation de l’habitat hydraulique des organismes aquatiques	29
3.2.1	Introduction.....	29
3.2.2	Matériel et méthodes	30
3.2.3	Résultats	33
3.2.4	Conclusions et principales recommandations	42
3.3	Approche spatio-temporelle des anomalies thermiques	45
3.3.1	Matériel et méthodes	45
3.3.2	Résultats	45
3.3.3	Conclusions et principales recommandations	49
3.4	Effet de la nappe et du couvert végétal sur la température de l’Ain en basses eaux estivales 50	
3.4.1	Matériel et méthodes	50
3.4.2	Résultats	52
3.4.3	Conclusions et recommandations.....	53
4	Conclusions générales	54
5	Bibliographie	56
6	Table des figures.....	59

1 Introduction

EDF a monté en juillet 2009 en association avec la ZABR, un séminaire d'échanges pour stimuler des recherches pluridisciplinaires sur le bassin versant de l'Ain dans son ensemble. Quatre pistes de recherche ont ainsi été identifiées pour mieux comprendre le fonctionnement de l'Ain : la restauration physique, la dynamique piscicole, les pollutions et notamment la contamination par les micropolluants, les perceptions sociales de la rivière.

Suite à ce travail de concertation, la présente étude a été lancée en 2012. La proposition était programmée sur trois ans et demi (mars 2012 - octobre 2015). Elle se focalise sur deux champs de questionnement prioritaires :

- la réponse morphologique aux actions de recharge sédimentaire d'une part,
- et la question de la caractérisation de l'habitat piscicole comme préalable aux travaux de caractérisation des dynamiques écologiques lancées en 2014 d'autre part.

Le premier volet apporte des connaissances pour la restauration des flux sédimentaires de la basse vallée et le maintien durable des écosystèmes aquatiques et riverains inféodés à une rivière dynamique. Il s'agit d'évaluer dans ce cadre les effets des recharges engagées dans le programme LIFE Nature. Des suivis morpho-sédimentaires des sites d'injection de sédiments visent notamment à mesurer les effets de ces opérations et planifier les futures recharges. Au-delà des besoins d'études, de nombreux acteurs locaux expriment une volonté de poursuivre les expérimentations et les actions concrètes, et ces suivis sont donc assez stratégiques pour ajuster ces politiques.

Le second volet, centré sur la caractérisation des habitats aquatiques a pour objectif de mieux comprendre les facteurs physiques et thermiques affectant les populations piscicoles afin de préserver les espèces emblématiques (ombre commun notamment). Ces approches doivent permettre de mieux comprendre les évolutions du régime thermique en lien avec le réchauffement global et l'assèchement des sources, l'hétérogénéité spatiale et temporelle de la thermie et les variations de ce facteur limitant sur les biocénoses, le rôle des zones refuges qui sont des zones d'échange entre les eaux de nappe et les eaux superficielles pour la survie de ces espèces piscicoles, et enfin les changements de référence hydromorphologique à long terme.

Afin de répondre à ces deux objectifs, plusieurs approches complémentaires ont été conduites, à savoir, une caractérisation granulométrique des fonds, un suivi de la mobilité des particules par traceurs, une modélisation hydraulique 2D, une caractérisation des méso-habitats actuels et passés par imagerie, une caractérisation de la thermie de la masse d'eau, et enfin une analyse des relations nappe – rivière.

Ce travail a également été conduit sur des linéaires variables en fonction des besoins de connaissance et des données disponibles. Le tronçon de Blye à Pont-de-Poitte à l'amont de Vouglans a fait l'objet d'un travail exploratoire afin d'établir un premier diagnostic géomorphologique. C'est sur le tronçon Varambon – Chazey pour lequel on dispose de données physiques importantes et qui est contrasté en termes de transport solide et d'habitats piscicoles qu'il a été véritablement possible de conduire une modélisation 2D. Un focus a également été effectué sur le secteur expérimental de recharge Varambon – Priay, en essayant généralement de le comparer au secteur encore à forte mobilité de Villette – Gévrioux.

2 Thème 1 – Dynamiques morphologiques

Plusieurs questions clés sont posées : Quel est le fonctionnement hydromorphologique de la rivière en amont de Vouglans? Comment ce secteur a-t-il évolué au cours de la période contemporaine ? Cette évolution est-elle différente de l'évolution de la basse vallée de l'Ain ? Observe-t-on une structuration différente du patron granulométrique dans les secteurs rechargés / non rechargés de la basse vallée ? Quelle est la répartition spatiale des vitesses et forces tractrices permettant d'expliquer la mobilité des sédiments ? Peut-on prédire le transport solide et l'évolution des sites rechargés ?

2.1 L'amont de Vouglans - éléments de diagnostic hydro-morphologique

Il existe peu de données en amont de Vouglans, permettant de mieux comprendre le fonctionnement hydro-morphologique de la rivière dans ce secteur. Cette première étude a pour objectif de combler ce manque. Le tronçon étudié s'étend de l'amont du barrage de Blye jusqu'à l'entrée du réservoir de Vouglans, soit un linéaire de 10 km. Une base de données SIG a été constituée afin de caractériser l'évolution de la bande active, du chenal et des bancs sur le tronçon. Ces données planimétriques ont été complétées par des échantillons granulométriques du lit. Cette étude permet d'apporter des premiers éléments de diagnostic sur l'hydro-morphologie de la rivière, et de formuler des recommandations pour des études complémentaires.

2.1.1 Matériel et méthodes

La période retenue pour l'analyse diachronique est 1939-2010. Elle inclut la mise en service du barrage de Blye (1955) et du réservoir de Vouglans (1968). Sept séries d'images aériennes ont été acquises auprès de l'IGN, chacune espacée d'environ dix ans. Elles ont été géoréférencées sur la BDOrtho de 2010. Les débits à la date des prises de vue sont compris entre 2 et 29 m³/s (station hydrométrique de Cernon).

La digitalisation des unités physiologiques a été réalisée manuellement par photo-interprétation au 1:1500^{ème}. Le travail a porté sur cinq types d'unités : le chenal en eau, les bancs de graviers, les affleurements rocheux, les infrastructures anthropiques et la végétation riveraine. Les patrons longitudinaux d'évolution ont été analysés en découpant le linéaire en segments de 250 m de long. Les superficies et les largeurs d'unités physiologiques ont été calculées pour chacun des

segments et pour chaque date. L'analyse inter-dates a permis d'extraire les surfaces érodées et végétalisées au cours de la période.

Nous avons effectué une mission de terrain les 18 et 19 mars 2014, afin de valider *in situ* les cartographies SIG et collecter des échantillons granulométriques sur les bancs. Pour ce faire, nous avons sélectionné 11 placettes soumises à des conditions hydrauliques relativement similaires, des têtes de bancs, et nous avons collecté 11 échantillons selon le protocole de Wolman (collecte de particules aléatoires, $n > 50$).

2.1.2 Résultats

L'Ain en amont de Vouglans présente les caractéristiques géomorphologiques d'un secteur de gorge : c'est **un lit rocheux sur lequel transite du gravier**. Les affleurements rocheux, visibles en plusieurs points du linéaire, constituent des lieux d'intérêt touristique (ex.: les Marmites de Géant à Pont-de-Poitte, le Saut de la Saisse à l'entrée du réservoir de Vouglans). Le D_{50} des bancs de graviers échantillonnés est compris entre 21 et 44 mm.

L'analyse diachronique révèle une largeur de chenal en eau stable depuis 1953, d'une valeur médiane de 46 m sur le linéaire (Figure 1A). Une rupture est observée entre 1953 et 1978, avec une augmentation des valeurs maximales correspondant à la mise en eau des retenues de Blye et de Vouglans. L'évolution la plus notable concerne les superficies de bancs : **la superficie totale des bancs a été divisée par 15 entre 1953 et 2010** (Figure 1B). Les superficies de bancs sont sensibles aux variations de débits : lorsque le débit augmente, toutes choses étant égales par ailleurs, la surface des bancs diminue. Ainsi, la superficie totale de bancs en 1989 est logiquement supérieure à celle de 1978, car ces deux dates correspondent aux débits minimum et maximum, respectivement, de notre jeu d'images aériennes. Hormis ce cas particulier, la tendance générale est à une diminution drastique des superficies de bancs depuis 1953, qui n'est pas liée au débit mais bien à un tarissement sédimentaire.

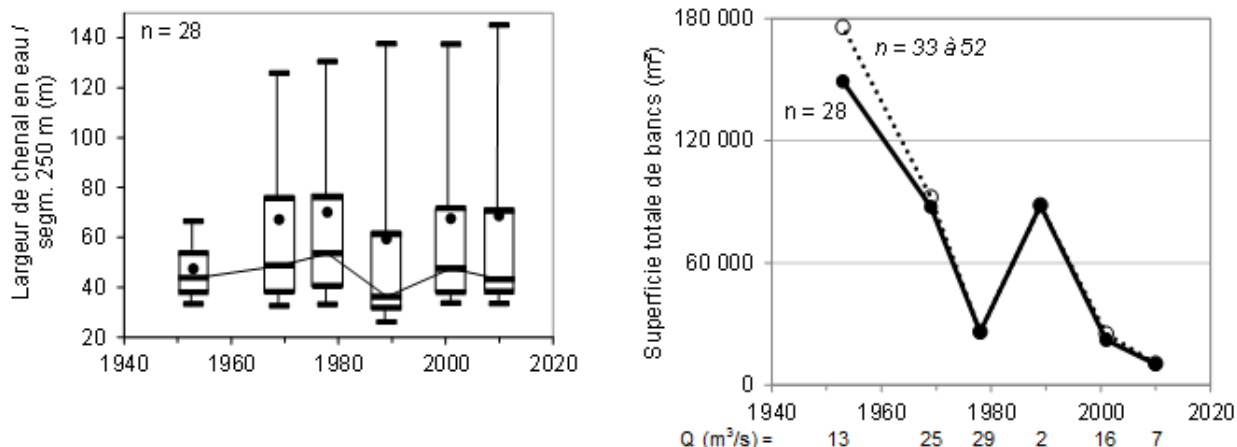


Figure 1A : Evolution des largeurs de chenal en eau (n = 28 segments de 250 m de long communs aux différentes séries d'images aériennes). 1B : Evolution de la superficie totale des bancs.

L'analyse longitudinale indique un gradient amont-aval dans la diminution des superficies de bancs (Figure 2). La disparition des bancs, qui se propage vers l'aval, est un phénomène caractéristique d'une **vidange sédimentaire causée en aval de barrages**, tel qu'observé dans la basse vallée de l'Ain en aval d'Allement (Rollet, 2007). Dans la haute vallée, le barrage de Blye pourrait être à l'origine de ce phénomène.

On met également en évidence une **végétalisation des formes fluviales** (Figure 3) : 40 % du linéaire entre Blye et Vouglans a été végétalisé entre 1953 et 2010, i.e., les secteurs qui étaient bande active en 1953 sont végétalisés en 2010 ; 39 % du linéaire est stable ; 21 % du linéaire a été érodé, i.e., les secteurs qui étaient végétalisés en 1953 sont devenus bande active en 2010. Les secteurs fixés par la végétation sont principalement l'ancienne gravière (km 7.9) et le bras secondaire à la confluence avec le Drouvenant (km 9.1). L'assèchement du bras secondaire conduira certainement à l'abandon progressif de ce bras, à l'image du méandre du Sauget à l'amont (voir Figure 3). Bichet et Campy (2009) estiment que ce méandre aurait cessé de fonctionner il y a moins d'un ou deux siècles. Parallèlement au processus de végétalisation, les surfaces érodées témoignent d'une **relative mobilité en plan** : les deux principaux secteurs d'érosion visibles sur le linéaire (voir Figure 3) indiquent un recul de la berge d'environ 35 m en 57 ans, i.e., une vitesse de 0,5 m/an. Cette vitesse est relativement élevée et confirme que ce tronçon présente des propriétés assez semblables à celles de la basse vallée. Une étude de l'espace de mobilité des rivières de Franche-Comté (DIREN, 2009) classe l'Ain sur ce linéaire comme un « cours d'eau mobile ou potentiellement mobile ». Cette étude base son calcul théorique sur la puissance fluviale, le rang de Strahler et la largeur du fond de vallée. Ainsi, il semble que l'analyse diachronique réalisée dans le présent projet confirme ce diagnostic.

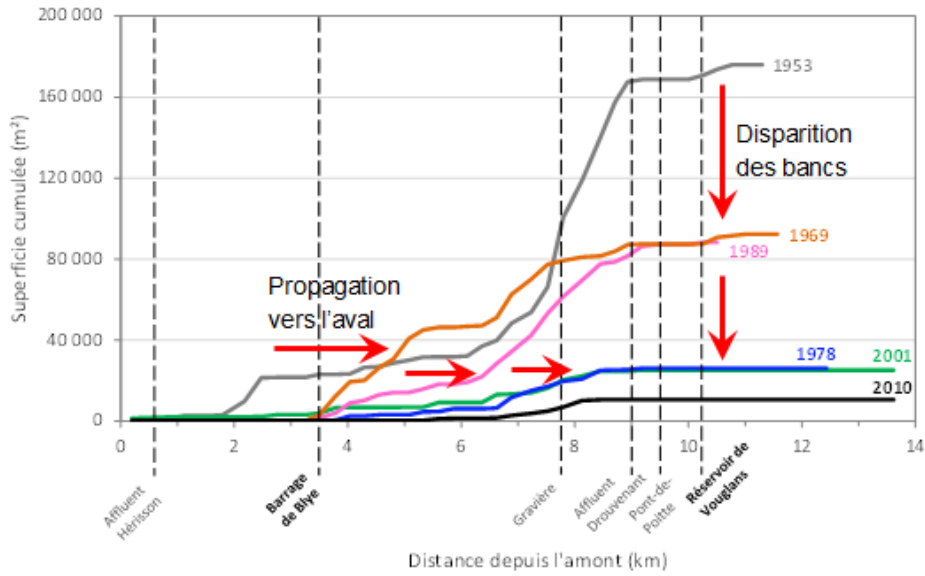


Figure 2 : Cumul des superficies de bancs de l'amont vers l'aval.

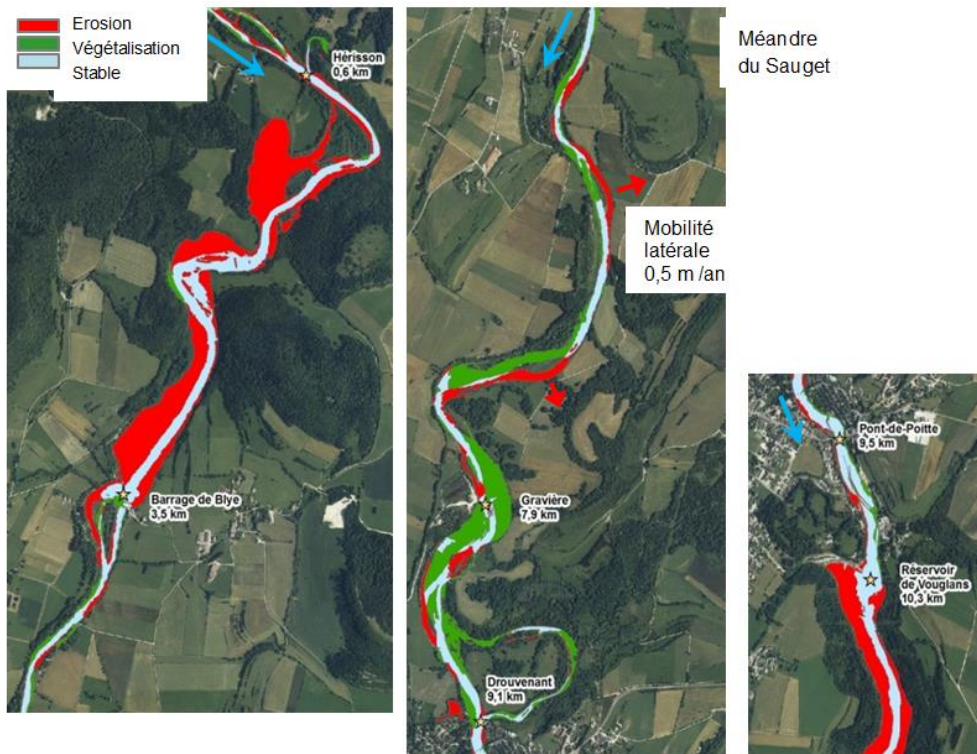


Figure 3 : Surfaces érodées, végétalisées et stables entre 1953 et 2010.

2.1.3 Conclusions et perspectives

L'analyse planimétrique entre Blye et Vouglans a révélé un système fluvial en cours d'ajustement depuis les années 1950, vraisemblablement en situation de déficit sédimentaire. **Cette étude confirme ainsi l'effet de la chaîne de barrages (Blye, Vouglans, Allement) sur la dynamique morphologique de la rivière.** Le secteur présente une relative mobilité en plan (érosion de 35 m en 60 ans) qu'il conviendra de préserver, dans un contexte de faibles enjeux fonciers (berges non aménagées, parcelles agricoles).

Ces premiers éléments de connaissance pourraient être encore affinés avec l'analyse de données permettant de mettre en évidence un éventuel phénomène d'incision du lit (profils en travers historiques, lignes d'eau, piézomètres).

2.2 La basse vallée

2.2.1 Etude granulométrique

Les données granulométriques disponibles sur la basse vallée consistent principalement en des échantillonnages des têtes de bancs. Ces données avaient permis de caractériser le front de pavage en aval du barrage d'Allement (Rollet et al., 2013). La présente étude a pour objectifs (i) d'affiner notre compréhension de la structuration granulométrique du lit de l'Ain, en particulier d'évaluer les effets des recharges sédimentaires sur le fond du lit, (ii) d'alimenter les modèles hydro-sédimentaires et d'habitat permettant de simuler les évolutions morpho-écologiques. Pour cela, il importe de caractériser la granulométrie du chenal en eau. **Cette question est nouvelle et stratégique en matière de connaissance car jusqu'à aujourd'hui les changements morphologiques observés reposaient sur des différences granulométriques en conditions émergées et non dans la masse d'eau.** Une méthode exploratoire a donc été mise au point, permettant d'imager le fond du lit. Dans ce chapitre, la robustesse de la méthode d'échantillonnage sous l'eau est évaluée, puis des éléments d'analyse de la structuration granulométrique du lit sont présentés.

Matériel et méthodes

L'UMR 5600 a mis au point en 2013 un dispositif d'échantillonnage du fond du lit par imagerie. Il se compose d'un appareil photo Reflex logé dans un caisson étanche (Figure 4). Le caisson est manipulé par un opérateur qui parcourt le chenal généralement à pied et maintient le caisson à la verticale de la placette à échantillonner. L'opérateur mesure la hauteur de prise de vue grâce à une mire positionnée au droit du caisson. Un second opérateur gère l'acquisition des images *via* une tablette reliée par USB. Les métriques granulométriques doivent ensuite être extraites des

images. Pour cela, un logiciel de traitement a été développé au sein de l'unité (mémoire d'ingénieur de T. Pégot-Augier, 2012). Le traitement comporte plusieurs étapes (Figure 5).

Nous avons déployé le dispositif d'acquisition sur l'Ain en mars et avril 2014. **Environ 300 images ont été collectées entre Varambon et Mollon**, classées selon quatre critères de qualité, de « bon » à « très mauvais » en fonction de la présence de biofilm, de limon, de buée sur l'objectif, etc. Nous disposons principalement d'images de bonne et moyenne qualité en conditions émergées (n = 34 photos prises sur le banc de Mollon ; 24 et 50 % de qualité bonne et moyenne). En conditions immergées, **la présence de biofilm apparait être le critère le plus limitant pour la détection automatique du contour des galets** (n = 247 photos immergées ; 47 et 47 % de qualité mauvaise et très mauvaise).



Figure 4 : Dispositif d'acquisitions photographiques sous l'eau.

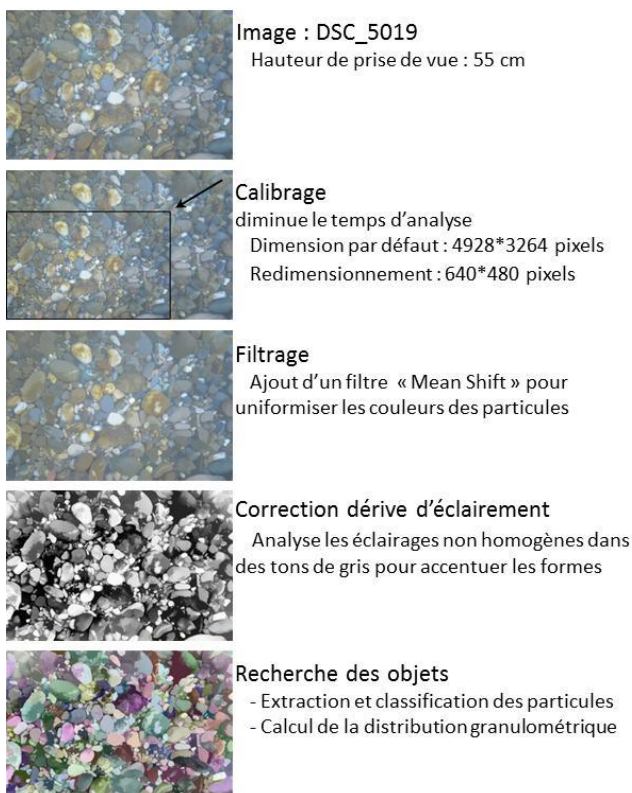


Figure 5 : Procédure de traitement du logiciel Analyz.

La mauvaise qualité des images, ainsi que la faible hauteur de prise de vue, ont compliqué l'utilisation du logiciel de traitement, même dans le cas d'une procédure supervisée (ex. : digitalisation manuelle du contour des particules non détectées ou sur-segmentées et implémentation dans le logiciel). De plus les particules en bordure d'images n'étaient pas prises en compte par le logiciel. Dans l'attente d'une version consolidée du logiciel, **une procédure entièrement manuelle a donc été mise en place, consistant à digitaliser l'axe b des dix plus grosses particules et à mesurer les longueurs d'axes ($D_{50} 10+$)** (Figure 6).

La méthode supervisée (digitalisation du contour des particules et implémentation dans le logiciel) et la méthode entièrement manuelle (digitalisation et mesure des axes b) donnent des résultats différents : la méthode supervisée fournit des valeurs de $D_{50} 10+$ globalement plus faibles que la méthode manuelle. Ceci est expliqué principalement par les grosses particules en bordure d'images qui ne sont pas prises en compte par le logiciel. Or, 37, 33 et 25 % des plus grosses particules se trouvent en bordure d'images sur les tronçons investigués de Varambon-Gévrioux, Varambon-Priay et Priay-Mollon, respectivement. La méthode entièrement manuelle apparaît être la plus efficace dans la sélection des dix plus grosses particules, permettant de mieux rendre compte de la structuration granulométrique des images. **Cette méthode a donc été retenue pour étudier le patron granulométrique de la basse vallée.**

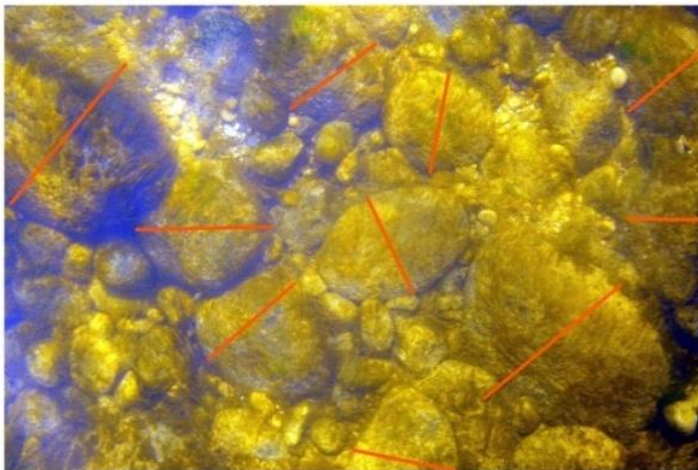


Figure 6 : Tracé des axes b des dix plus grosses particules et mesure des longueurs d'axes.

Résultats

La Figure 7 présente la répartition spatiale du $D_{50} 10+$ de 186 images du fond du chenal acquises entre Varambon et Mollon. Les informations ont été agrégées en fonction du contexte hydraulique. Une moyenne mobile a été calculée sur les 55 points agrégés (courbe noire). Les données ont également été agrégées à l'échelle des secteurs de recharge sédimentaire (S2 = secteur des Carronnières ; S4 = secteur de Bellegarde ; carrés oranges). La moyenne mobile calculée par Rollet (2007) sur les échantillons des têtes de bancs a été ajoutée pour comparaison (courbe bleue). Ces échantillons avaient permis de mettre en évidence une rupture granulométrique localisée entre le pont de Priay et le pont de Gévrioux, délimitant le tronçon déficitaire du tronçon encore actif.

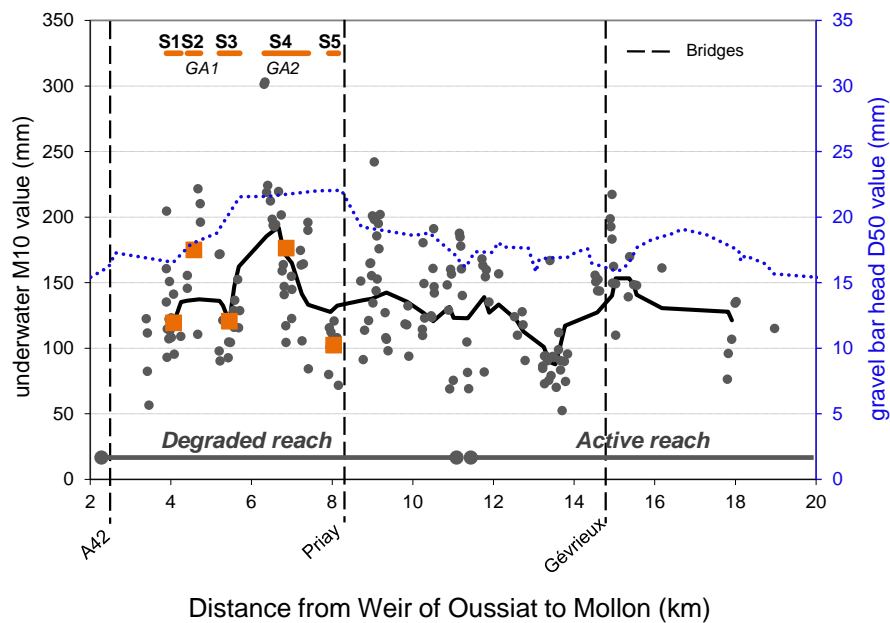


Figure 7 : Evolution granulométrique longitudinale du fonds du lit de l'Ain entre Pont d'Ain et Mollon.

La différence granulométrique constatée sur les bancs entre le tronçon déficitaire et le tronçon actif est moins nette dans le chenal. En effet nous étudions ici toute la gamme granulométrique et pas seulement les taches les plus grossières comme dans le cas des bancs, et les recharges sédimentaires complexifient sans doute aujourd'hui le patron granulométrique du chenal. **Néanmoins les maxima semblent conformes à ceux observés par A.J. Rollet sur les bancs, et un affinement granulométrique longitudinal semble se dessiner.** Cet affinement semble perturbé par la variabilité hydraulique locale. En effet, les points d'échantillonnage présentent une bonne représentativité spatiale, mais comme toutes les conditions hydrauliques sont rencontrées la variabilité granulométrique est très forte. La méthode d'analyse granulométrique au moyen d'images est donc robuste mais doit être couplée à une analyse hydraulique 2D pour pouvoir comparer granulométriquement les mêmes situations hydrauliques.

Une réduction de la taille du substrat est attendue sur les secteurs rechargés. Or, les deux secteurs concernés par les recharges (S2 et S4) présentent une granulométrie plus grossière que les secteurs voisins, qui présentent des taches de sédiments plus fins (S3 et S5). Plusieurs éléments d'interprétation peuvent être avancés :

- Les secteurs localisés en aval immédiat des recharges peuvent avoir enregistré les changements granulométriques, expliquant la succession amont-aval de gradients observée sur la Figure 7 et pour partie la grande variabilité inter-stationnelle. Cette hypothèse semble validée au regard des distances de déplacement des particules tracées, de plusieurs centaines de mètres par an (voir partie suivante RFID).

- Les taches de sédiments plus fins observées sur S1 pourraient témoigner d'un petit flux de sédiments provenant de l'amont. En particulier, ces taches pourraient exprimer une diffusion de la recharge qui est opérée au droit du seuil d'Oussiat.

Conclusions et perspectives

Les images de mauvaise qualité collectées au printemps 2014 soulignent la difficulté de choisir la fenêtre temporelle adéquate pour planifier les acquisitions sans couverture algale. Ceci est une forte contrainte pour appliquer ensuite une procédure de caractérisation automatique de la granulométrie. Les difficultés rencontrées lors de l'utilisation du logiciel de traitement ont été contournées en mettant au point une méthode entièrement manuelle, qui pourra être déployée ailleurs.

Un nouveau prototype d'acquisition d'images en conditions immergées est en développement. Il devrait être équipé de lasers pour améliorer la précision de la mesure de la hauteur de prise de vue, et pour pouvoir prospecter des secteurs plus profonds. Dans la perspective de prochaines études par imagerie, un nouveau logiciel est en cours d'élaboration, qui devrait permettre de disposer d'un outil de caractérisation automatique de la granulométrie en conditions émergées et immergées. La question reste entière de définir avant intervention la bonne fenêtre temporelle pour ces acquisitions.

L'analyse a souligné que les maximas granulométriques sont bien observés dans le tronçon amont de la basse vallée, et qu'il existe sans doute un flux de matériaux plus petits par-dessus le lit pavé résultant des recharges. Il convient encore de débruiter cette information en intégrant les données hydrauliques locales. De toute évidence, la technique manuelle est robuste et permettrait d'apporter les informations granulométriques attendues pour envisager une modélisation hydro-sédimentaire ou des préférendums d'habitats.

2.2.2 Suivi des particules par RFID

La technique d'identification par radio-fréquence (RFID) utilisant des transpondeurs passifs intégrés (PIT tags) insérés dans les galets a été développée dans les années 2000 pour l'étude du transport sédimentaire. Les PIT tags ont été mis en œuvre pour la première fois en France par l'UMR 5600, sur la basse vallée de l'Ain (Rollet et al., 2008). **Trois sites ont été équipés en PIT tags entre 2005 et 2008**, permettant d'acquérir un savoir-faire méthodologique robuste pour ajuster les protocoles de suivi. **Un quatrième site a été équipé dans le cadre du présent projet. Il permet, pour la première fois, de mesurer les distances de mobilité dans le chenal, sur un secteur rechargé, sur un long tronçon et avec un grand nombre de traceurs.** Ce chapitre synthétise les informations acquises localement entre 2005 et 2013, puis présente les résultats du nouveau site entre 2013 et 2015.

Suivi RFID 2005-2013 : sites de Gévrioux et Varambon

Les sites de Gévrioux (PK 25) et Varambon (PK 15.5) sont localisés respectivement sur le tronçon encore actif, et celui impacté par le déficit sédimentaire. Ces deux sites ont été choisis pour fournir des informations locales sur la mobilité sédimentaire en contexte impacté et non impacté.

400 traceurs ($D_{50} = 79 \text{ mm}$) ont été déployés sur le banc de Gévrioux en 2005 (thèse d'A.J. Rollet). En 2008, la berge concave a été équipée avec 428 traceurs ($D_{50} = 60 \text{ mm}$) (thèse d'Adrien Alber). Les deux sites ont été suivis en 2006 et 2008, puis en 2012 et 2013 dans le cadre du présent projet (Figure 8). Entre 146 et 44 traceurs ont été retrouvés à l'issue de ces suivis, soit un taux de retour entre 37 et 10 %. Ces taux de retour relativement faibles sont expliqués par les larges dimensions de la rivière en comparaison de la performance du système RFID. En effet, l'Ain dans sa basse vallée est large d'environ 100 m, les hauteurs d'eau peuvent atteindre 3 m, et la couche sédimentaire remaniée peut être épaisse ($> 1 \text{ m}$). Or, la portée des antennes de détection est $< 0,7 \text{ m}$, les traceurs enfouis trop profondément durant le transport ne sont donc pas détectés. De plus, même si les suivis sont effectués la plupart du temps en basses eaux pour pouvoir prospector la quasi-totalité du chenal, la longueur du linéaire ne permet pas d'effectuer des recherches exhaustives au regard de la petite dimension des antennes (0,5 à 2 m de long ; voir Arnaud et al., 2015a pour la description du matériel RFID).

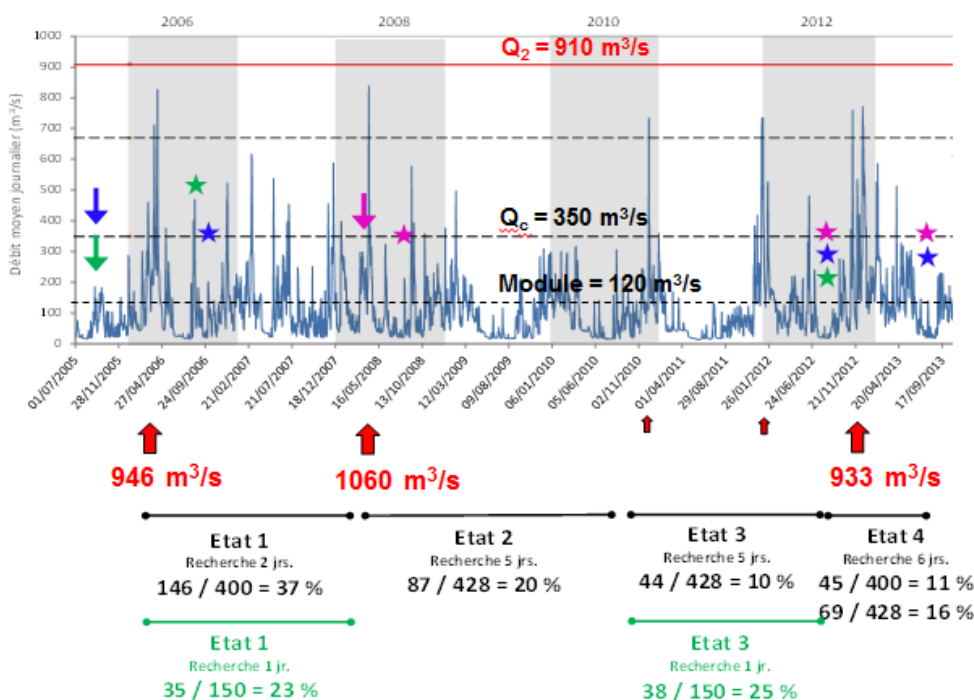


Figure 8 : Chronologie du suivi RFID de Gévrioux et Varambon (2005-2013) : dates de déploiement (flèches) et de recherche (étoiles) des PIT tags (station hydrométrique de Chazey-sur-Ain).

Les résultats, bien que partiels, permettent néanmoins d'évaluer le déplacement de la charge (Figure 9 A) : il apparaît que tous les traceurs retrouvés en aval du méandre de Gévrioux avaient été déployés sur la berge ; les traceurs déployés sur le banc sont restés sur le banc. Ceux-ci ont parcouru en moyenne 50 m entre 2005 et 2006. Puis, ce banc a été végétalisé. Le suivi du banc en

2013 a permis de retrouver 45 traceurs fixés dans la végétation. Sur le tronçon aval, les traceurs retrouvés le plus loin ont parcouru 2,7 km en six ans.

Le site de Varambon, localisé 10 km en amont de Gévrieux, correspond à une section rectiligne totalement immergée. 150 traceurs ont été déployés dans le chenal en 2005 ($D_{50} = 99$ mm). Les suivis de 2006 et 2012 ont permis de retrouver 35 et 38 traceurs, soit un taux de retour de 23 et 25 %, respectivement. La distance maximale de transport est d'environ 500 m en six ans (Figure 9 B).

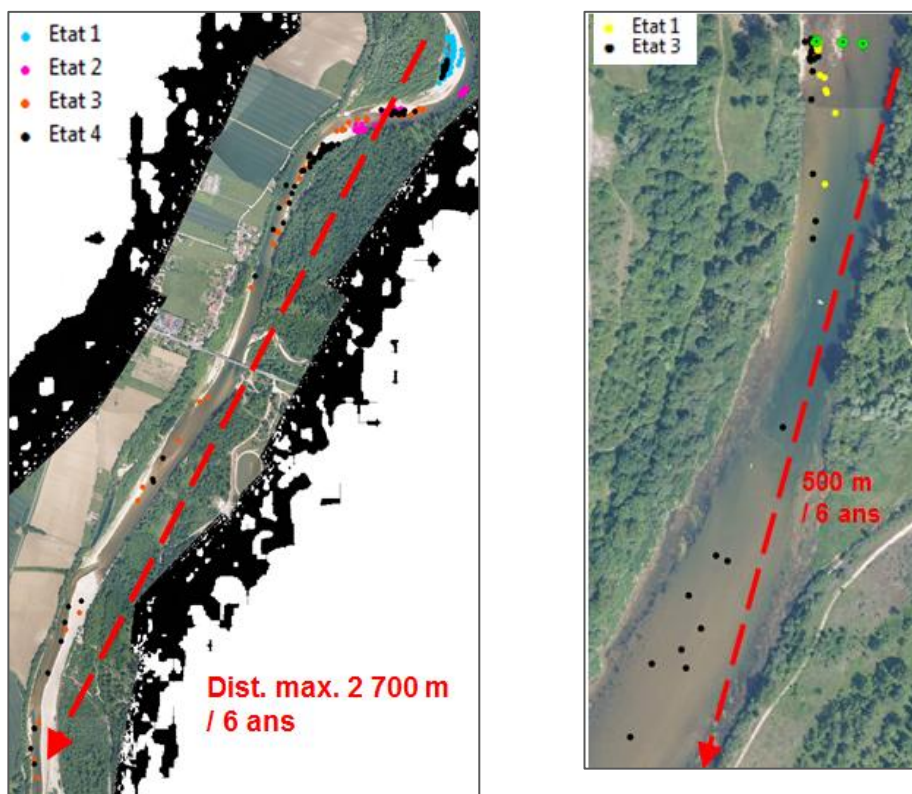


Figure 9 : Position des traceurs retrouvés (A) à Gévrieux ; (B) à Varambon.

Suivi RFID 2013-2015 : site de Terre Soldat

Le site de Terre Soldat (PK 18) est localisé entre les secteurs de recharge des Carronnières et de Bellegarde. La berge de Terre Soldat est rechargée annuellement par le SIVU (~ 1000 m³). Ce site a été choisi pour étudier la mobilité sédimentaire dans un contexte de recharge. Des PIT tags de meilleure portée ont été utilisés (32 mm de long contre 23 mm utilisés à Gévrieux et Varambon). Une plus grande quantité de traceurs a été déployée ($n = 1044$) afin d'augmenter la robustesse statistique des analyses. De plus une nouvelle technique de perçage a été employée, permettant d'équiper des particules plus petites et être ainsi davantage représentatif du matériau naturel en transit, en l'occurrence ici le matériau rechargé ($D_{50} = 41$ mm).

Les traceurs ont été déployés en novembre 2013 sous la forme de dix tas d'environ 100 particules dans le chenal et sur la berge. Après les crues, nous avons prospecté les bancs et les secteurs peu profonds à pied. Nous avons également prospecté les secteurs profonds par bateau, en tractant l'antenne sur le fond du lit. Ce protocole a permis des recherches plus exhaustives. Un suivi partiel a été réalisé en septembre 2014, mobilisant deux opérateurs pendant 1.5 jours et permettant de retrouver **237 traceurs** (23%) (Figure 10A). Un second suivi a été réalisé en juillet 2015, mobilisant quatre opérateurs pendant 5.5 jours et permettant de retrouver **492 traceurs** (47 %) (Figure 10B). **Il est rare de disposer d'une telle quantité de traceurs pour les analyses : ce résultat est une première sur un grand système fluvial tel que l'Ain.**

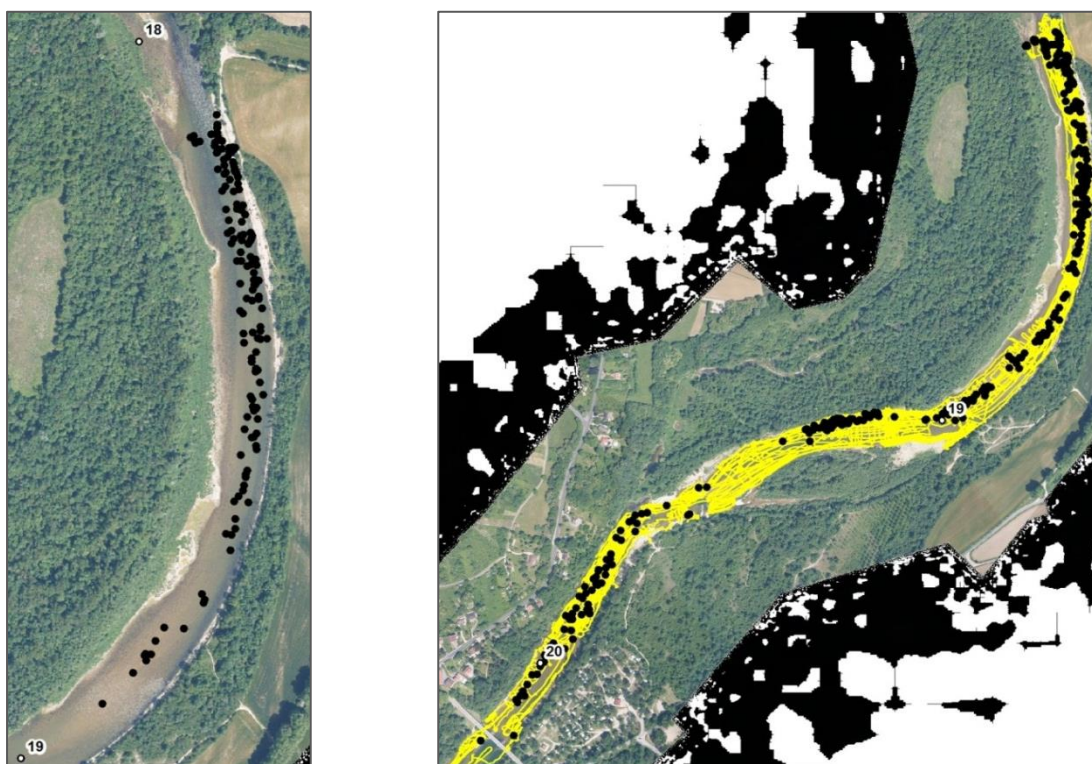


Figure 10 : Position des traceurs retrouvés à Terre Soldat : (A) en septembre 2014 ; (B) en juillet 2015 (en jaune : traces GPS de prospection).

L'analyse montre que les traceurs déployés dans la moitié droite du chenal (tas n°4, 5, 1) sont restés sur leur lieu d'injection, ou ont parcouru de faibles distances (< 35 m). Aucun de ces traceurs n'a été retrouvé sur le tronçon aval. C'est majoritairement la moitié gauche du chenal et la berge qui ont donc été mobilisées. Le nuage de traceurs indique des zones préférentielles de dépôt clairement visibles sur le tronçon aval (Figure 10B).

Les traceurs ont parcouru en moyenne 151 m au cours de l'année 1 (Tableau 1). Les 145 traceurs communs entre l'année 1 et 2 ont parcouru en moyenne 413 m. Les traceurs mobiles (déplacements > 5 m) ont parcouru en moyenne 205 m l'année 1, et 508 m l'année 2. L'hydrologie a été moyenne au cours de la période, avec une vingtaine de jours par an supérieurs au débit de mise en mouvement des particules. L'année 2 a enregistré une crue Q_2 en mars 2015. L'effet de

l'injection des traceurs est visible plus de 2 km en aval au terme de deux années de suivi (Figure 11).

	E ₁	E ₂
L _{moy} E ₀ -E _i (m)	151	552
Ecart-type (m)	190	620
n _{stat}	237	492
L _{moy} E ₀ -E _i n _{mobile} (m)	205	729
Ecart-type (m)	195	616
n _{mobile}	175	372
L _{max} E ₀ -E _i (m)	790	2098
L _{moy} E _i -E _{i-1} n _{commun} (m)		413
Ecart-type (m)		422
n _{commun}		145
L _{moy} E _i -E _{i-1} n _{c-m} (m)		508
Ecart-type (m)		413
n _{c-m}		118
L _{max} E _i -E _{i-1} (m)		1623
Position du barycentre n _{mobile} (m)	6349	6874
Ecart-type (m)	196	613
Différence E _i -E _{i-1} (m)	208	525
Position du barycentre n _{stat} (m)	6303	6696
Ecart-type (m)	185	618
Différence E _i -E _{i-1} (m)	162	393
n crues / E _{i-1} (n jours)	8 > Q _c (22)	5 > Q _c (13)

Tableau 1 : Statistiques de déplacement des traceurs.

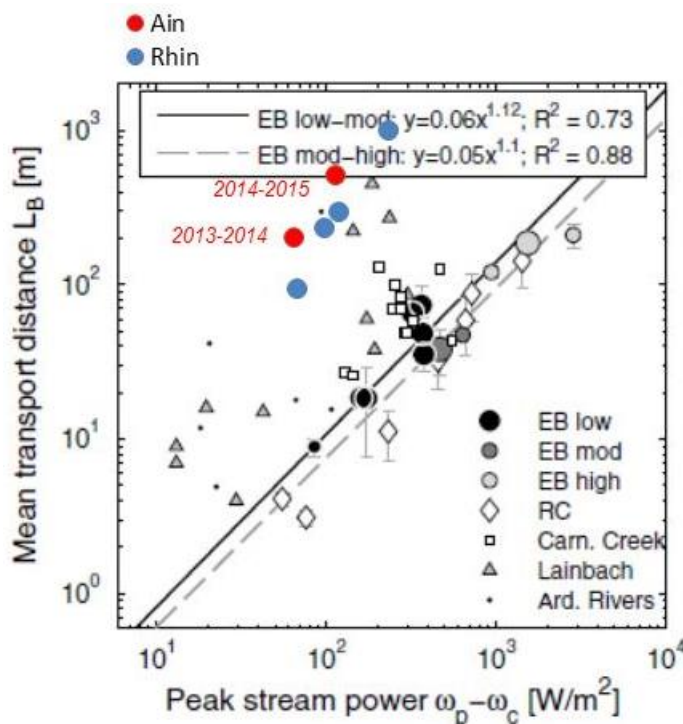


Figure 11 : Distances de déplacement des traceurs en fonction de la puissance spécifique : les résultats de l'Ain sont superposés aux résultats de Schneider et al. (2014). Les résultats obtenus sur le Rhin (Arnaud et al., 2015b) sont montrés pour comparaison.

Conclusions et perspectives

Le suivi RFID réalisé sur quatre sites de la basse vallée a fourni des informations sur les distances de mobilité par secteur et pour une taille granulométrique donnée (lit non pavé/pavé/rechargé). Les suivis de Gévrieux et Varambon ont permis de comparer le tronçon actif et le tronçon déficitaire, et ont montré que les distances moyennes parcourues par les traceurs sont effectivement différentes. Sur le secteur pavé, il est probable que beaucoup de particules soient piégées dans les interstices du pavage, limitant ainsi fortement leur migration aval alors que sur le secteur dynamique, un charriage de l'ensemble du fond du lit est observé. Malgré tout, les analyses sont limitées par le faible nombre de traceurs retrouvés, la diffusion du nuage de traceurs étant importante après six ans.

Dans le cas de l'injection de Terre Soldat, il convient de souligner le très bon taux de retour qui résulte sans doute de deux raisons, (i) des PIT tags plus faciles à détecter et (ii) un gros effort de recherche des traceurs. C'est ainsi que ces traceurs sont détectables 2 km en aval deux ans seulement après l'injection et sans que des événements de crue importants n'aient été enregistrés (max. Q_2).

Il conviendrait encore de coupler le traçage RFID à un suivi topographique fin afin de mieux quantifier les effets des recharges sur la mobilité sédimentaire. Le Lidar bathymétrique réalisé par EDF durant l'été 2015 pourrait permettre prochainement d'effectuer une telle comparaison.

2.2.3 Modélisation hydraulique

Construction et calage des modèles hydro-sédimentaires

Le **code de calcul** hydro-sédimentaire 1D utilisé est **RubarBE** (Paquier, 2013a). Le code de calcul hydro-sédimentaire 2D utilisé est **Rubar 20** (Paquier, 2013b). Tous deux sont développés par Irstea. Les modèles couvrent le linéaire entre Varambon et Pont-de-Chazey.

Nous rappelons ci-après les principaux éléments du calage hydraulique :

- La topographie utilisée est issue des **179 profils** en travers du lit en eau au moment des mesures **réalisées en 2013 et 2014**. Ces profils ont été complétés à l'aide du **Lidar de 2008** et ont été interpolés.
- La **condition à la limite aval** correspond à la courbe de tarage de la station hydrométrique de **Pont-de-Chazey** (DREAL RA) en vigueur en octobre 2013.
- Le calage hydraulique a été effectué à partir des **lignes d'eau de 1977, 2012 et 2013** correspondant à des débits de respectivement **1420 m³/s, 21 m³/s et 123 m³/s** à la station de Pont-de-Chazey. Les données de 1977 sont peu nombreuses et partielles : elles ne concernent que la moitié aval du secteur d'étude.

La discrétisation spatiale est assez fine pour que les modèles numériques hydro-sédimentaires élaborés à partir de ces données topographiques représentent bien les conditions hydrauliques à bas débits, même si certaines zones mériteraient d'être affinées (bras secondaires de Villette-sur-Ain et Gévrioux par exemple). En revanche, nous manquons de données pour valider le calage en crue. Cela pourra notamment avoir un impact sur la modélisation du transport solide.

Les résultats du **calage hydraulique des modèles** sont les suivants :

	Moyenne des écarts en valeur absolue		Moyenne des écarts	
	1D	2D	1D	2D
Ligne d'eau de 2012	17 cm	17 cm	- 6 cm	- 6 cm
Ligne d'eau de 2013	15 cm	12 cm	+ 10 cm	+ 7 cm
Ligne d'eau de 1977	20 cm	29 cm	+ 2 cm	+ 16 cm

L'objectif du **calage sédimentaire** est d'obtenir le meilleur **compromis entre une distribution granulométrique (D_{50} et σ)** cohérente avec les mesures de terrain et le respect des **débits seuils de mise en mouvement** évalués par Rollet (2007).

Les données granulométriques existantes présentent une forte hétérogénéité. Ces variations granulométriques peuvent être dues aux choix et/ou aux incertitudes de mesure (choix du site (banc, chenal, mouille, radier), méthodes utilisées, zones pavées, etc.). Cela rend délicat le passage d'une donnée ponctuelle à une description générale d'un tronçon. Il est donc possible que les valeurs extrêmes ne soient pas représentatives du tronçon étudié.

Dans le cadre d'un modèle numérique, il est préférable de définir un diamètre moyen caractérisant au mieux un tronçon. Cependant, même au sein d'un tronçon considéré comme homogène, les conditions hydrauliques et sédimentaires ne sont pas homogènes sur l'ensemble de son linéaire. Les débits seuils de mise en mouvement des particules sont donc à prendre avec précaution.

Nous avons divisé le secteur d'étude en trois tronçons :

- **Tronçon 1** : de l'amont du modèle à l'amont du méandre de Villette-sur-Ain (PK 10500). Ce tronçon est considéré pavé. Le modèle ne devrait simuler du transport solide que pour un débit supérieur au débit de dépavage (800 m³/s). Sur ce tronçon, l'Ain ne présente quasiment aucun banc non végétalisé.
- **Tronçon 2** : de l'amont du méandre de Villette-sur-Ain (PK 10500) à l'aval immédiat du pont de Gévrioux (PK 15000). Ce tronçon est en cours de pavage mais présente des secteurs très actifs (déplacement latéral important). Le modèle devrait donc simuler localement un transport solide faible à important pour des débits de 550 m³/s.
- **Tronçon 3** : de l'aval immédiat du pont de Gévrioux à l'aval du modèle. Ce tronçon n'est pas pavé. Il présente de nombreux bancs non végétalisés (mais certains en cours de végétalisation). Le modèle devrait donc simuler un transport solide important pour des débits de 550 m³/s.

Après avoir testé différents scénarii, la granulométrie qui semble la plus adaptée aux conditions recherchées est la suivante :

	Tronçon 1	Tronçon 2	Tronçon 3
D_{50} (mm)	45	40	35

La Figure 12 montre que cette granulométrie permet de retrouver les secteurs présentant un transport solide même pour les faibles débits (méandre de Gévrier, aval de Mollon/Martinaz, etc.).

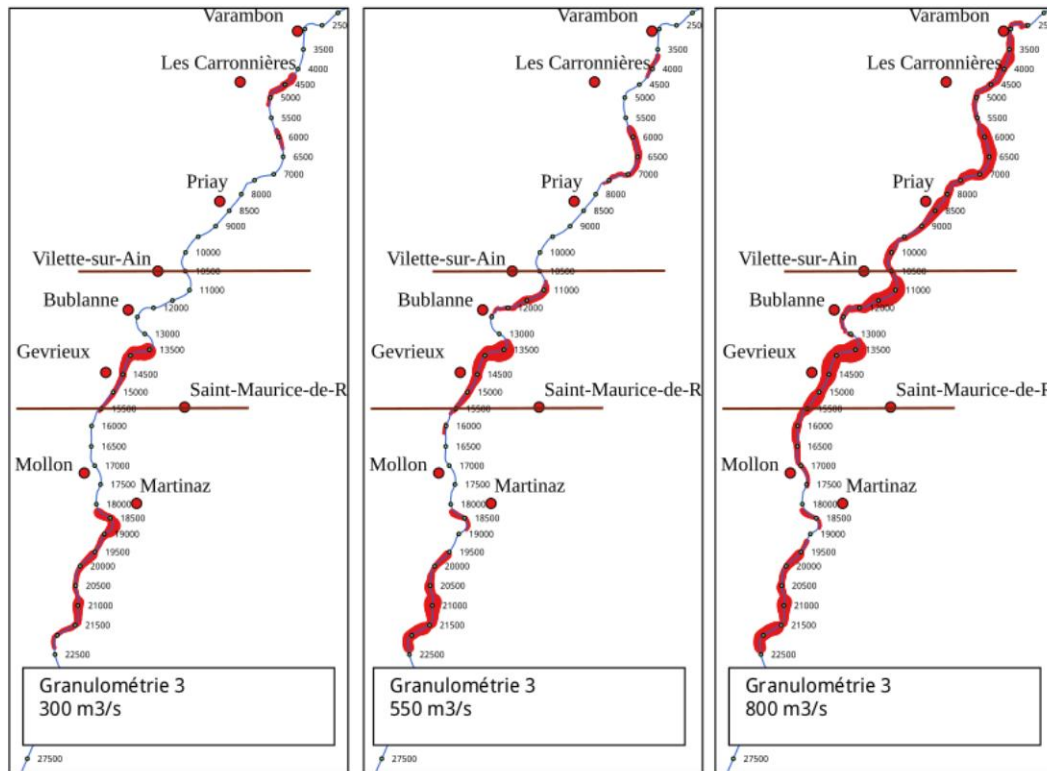


Figure 12 : Localisation du transport solide modélisé en 1D.

Les tests de sensibilité réalisés montrent que les résultats sont très sensibles au D_{50} utilisé. La modélisation réalisée avec un D_{50} plus représentatif du pavage sur le secteur 1 ($D_{50} > 60$ mm) montre qu'il n'y a pas ou très peu de transport solide pour les débits de 800 m³/s (Figure 13), à l'exception des zones très actives (méandre de Gévrier, etc.).

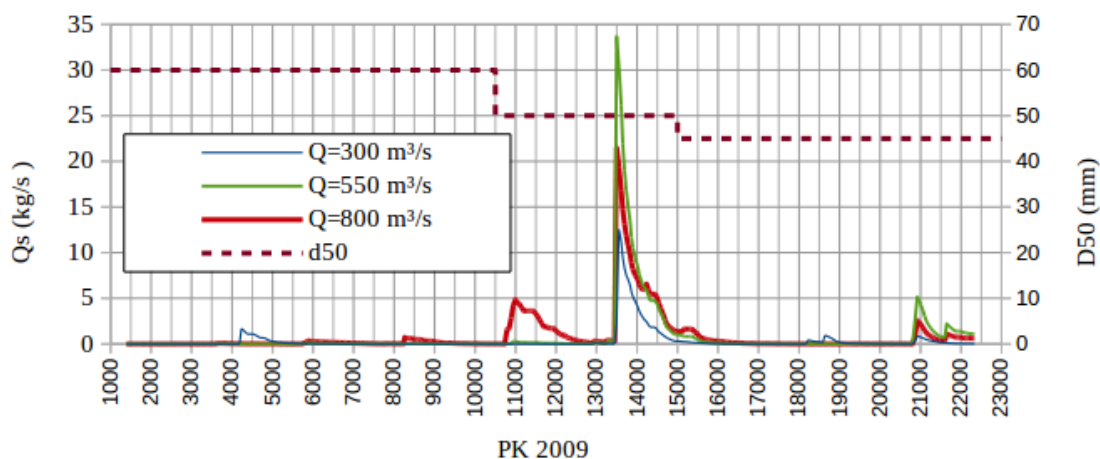


Figure 13 : Profil en long du transport solide modélisé avec le modèle 1D pour une granulométrie grossière.

Le transport solide n'étant pas homogène, il pourrait être utile de modifier très localement la granulométrie moyenne utilisée. Les secteurs concernés sont notamment ceux qui présentent un transport solide pour des débits faibles. Ils correspondent généralement à des zones où la contrainte de cisaillement locale est forte (rupture de pente, rétrécissement de la section d'écoulement, etc.). Une étude plus approfondie de ces sites pourrait permettre de déterminer si ces secteurs sont effectivement mobiles pour de tels débits ou si la granulométrie locale réelle est plus forte que celle choisie dans le modèle, les particules plus fines étant emportées en premier. Les mesures granulométriques effectuées par l'UMR 5600 devraient permettre d'affiner/confirmar ces données.

Vérification du calage à l'aide du suivi RFID : site de Terre Soldat

Les paramètres de calage ont été testés en modélisant le déplacement des PIT tags déployés par l'UMR 5600 sur le site de Terre Soldat (PK 6138). Nous n'avons modélisé que les écoulements supérieurs à 350 m³/s à Pont d'Ain (débit estimé de mise en mouvement des particules) entre le 18/11/2013 et le 18/09/2014. Cela correspond à cinq épisodes de crue.

Afin de déterminer les conditions de mise en mouvement et de déplacement des traceurs, nous avons considéré l'ensemble des profils inérodables à l'exception du site d'injection des PIT tags. Ainsi, tout transport solide détecté ou tout changement de géométrie pourra être interprété comme l'arrivée ou le départ d'au moins une particule. Le D_{50} simulé correspond environ au D_{50} des particules marquées (41 mm).

Les débits de mise en mouvement déterminés par les modèles sont compris :

- entre 400 et 500 m³/s pour un D_{50} de 45 mm
- entre 500 et 550 m³/s pour un D_{50} de 50 mm

Nous nous rendons compte que les débits rencontrés sur la période étudiée sont proches des seuils de mise en mouvement des particules, ce qui rend les résultats très sensibles aux paramètres choisis.

Néanmoins, le modèle tend à montrer que même sur une période relativement courte (1 an) et présentant peu de crues importantes, **la distance de déplacement peut être très importante (plusieurs kilomètres)**. Cela pourrait expliquer en partie le faible taux de recouvrement des particules marquées.

De plus, les modèles confirment que le site de Terre Soldat n'est pas un site de production sédimentaire (pas d'érosion pour les débits testés) et que la géométrie est stable pour les débits étudiés. En revanche, ils montrent que si des matériaux proviennent de l'amont, ou que si la géométrie locale est modifiée (recharge importante), les conditions hydrauliques sont telles que les matériaux qui arrivent de l'amont (ou qui sont érodés) transiteront vers l'aval sur des distances qui peuvent être importantes et qui dépassent la zone de recherche des PIT tags.

Application : Lien entre les forces tractrices simulées et les déplacements des traceurs

Le suivi des PIT tags a montré que seules les particules qui avaient été injectées dans la moitié gauche du chenal ont été déplacées. L'analyse de la géométrie du site (photographies aériennes, bathymétrie levée) montre que l'amont immédiat du site d'injection présente un seuil relativement complexe, avec un banc en rive droite plus ou moins végétalisé selon les périodes qui oriente les écoulements en rive gauche. Bien que le modèle simplifie la géométrie de ce seuil complexe (les profils bathymétriques levés sont situés en amont et en aval du seuil), le modèle confirme cette asymétrie des écoulements au droit du site d'injection. Ainsi, les vitesses d'écoulement et les paramètres de Shields τ^* calculés à l'aide des contraintes efficaces fournies par le modèle sont effectivement décroissantes de la rive gauche vers la rive droite (Figure 14).

La littérature indique que la valeur seuil du paramètre de Shields pour laquelle une mise en mouvement des particules est possible est de l'ordre de 0.047. Cette valeur seuil est bien entendu un ordre de grandeur qui peut varier notamment en fonction de la turbulence des écoulements et sous l'effet de l'imbrication de grains de tailles différentes. Cependant, nous retrouvons le fait que pour un débit de 500 m³/s il n'y a quasiment pas de transport solide ($\tau^* < 0.047$ sur la quasi-totalité du profil) alors que pour un débit supérieur (800 m³/s), un transport de particules peut avoir lieu dans la moitié gauche du chenal.

A environ 850 m en aval du site d'injection, les PIT tags retrouvés s'éloignent de la berge gauche et du talweg et entament un déplacement vers la rive opposée. Dans ce tronçon, les fonds s'aplanissent et au sein des profils en travers les paramètres de Shields maximum fournis par le modèle ont tendance à se recentrer, ce qui va dans le sens des observations *in situ*. En revanche, le

modèle ne décrit pas un déplacement de particules vers la berge droite aussi prononcé que les observations.

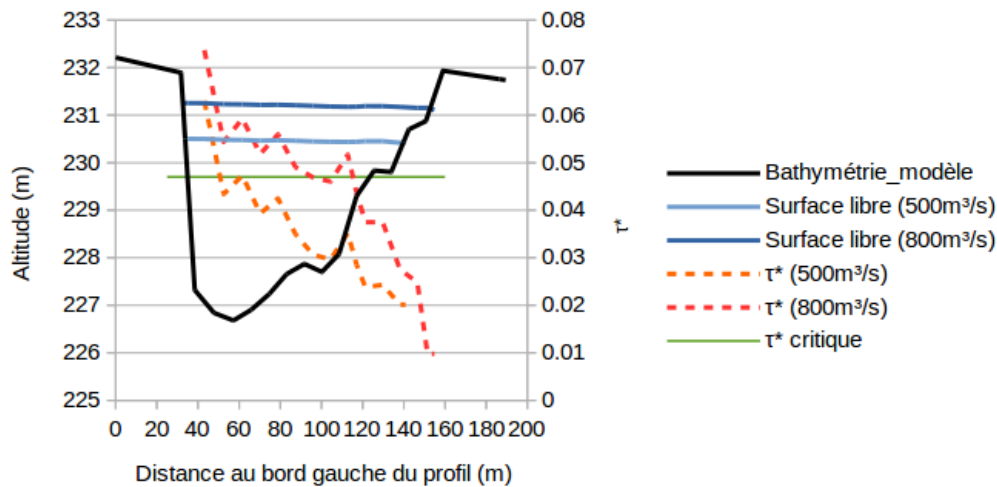


Figure 14 : Bathymétrie, surface libre et paramètre de Shields au droit du site d'injection.

Conclusions et perspectives

Ces modèles permettent de **localiser les sites les plus intéressants** morphologiquement quant à d'éventuelles **recharges sédimentaires** (fortes contraintes de cisaillement, distances de transport les plus importantes possibles), ainsi que d'**évaluer l'impact de ces recharges** sur les lignes d'eau et les fonds sur une période (et une hydrologie) donnée. De telles études doivent être associées à une analyse granulométrique du secteur de recharge et des matériaux constituant la recharge afin de calibrer au mieux les paramètres granulométriques locaux.

Les modèles sont aujourd'hui opérationnels sur le secteur Pont d'Ain - Chazey et pourront être utilisés pour tester différents scénarios en fonction des objectifs définis.

3 Thème 2 – Habitats aquatiques

Ce second thème s'appuie pour partie sur les travaux présentés précédemment, notamment en matière de modélisation.

Les questions sont ici centrées sur l'évolution de l'habitat aquatique : Quelle est la répartition spatiale des séquences seuil-plat-mouille? Sont-elles stables temporellement? Observe-t-on une structuration différente des faciès dans les secteurs rechargés / non rechargés, affectés et non affectés par le déficit? Peut-on estimer les préférendums d'habitats de poissons à partir des données h/V ? Ces préférendums diffèrent-ils selon que l'on est dans le secteur pavé et non pavé ? Où sont localisés les refuges thermiques de la basse vallée ? Est-il possible de comprendre leur variabilité spatio-temporelle ? Quels effets ont-ils sur la température de l'Ain ? Quels sont les effets des apports de nappe et de l'ombrage sur la température de l'eau ?

3.1 Etude diachronique des habitats par imagerie

Les analyses morphologiques permettant d'évaluer l'impact du déficit sédimentaire à l'aval du barrage d'Allement ont avant tout porté sur les milieux émergés, mais encore trop peu concernent des milieux immergés. Il est pourtant nécessaire de mieux évaluer l'impact de ce déficit sur les milieux aquatiques proprement dit afin de faire le lien avec l'évolution des communautés aquatiques. C'est pourquoi **la présente étude est centrée sur les séquences seuil-mouille de la basse vallée de l'Ain et leur évolution avant-après la période de mise en service des barrages.** Cette étude vient compléter l'analyse granulométrique présentée précédemment. La fréquence des séquences seuil-mouille est sensible aux pressions anthropiques et reflète également le fonctionnement écologique de la rivière (Frissel et al., 1986 ; Wyrick et Pasternack, 2014).

Après une première étape d'extraction de la bathymétrie par imagerie, la variabilité longitudinale de la profondeur de l'eau est analysée par des techniques de traitement du signal, puis elle est comparée à des résultats issus de photo-interprétation. Le tronçon analysé s'étend de Varambon à Chazey afin de pouvoir établir une comparaison temporelle entre 1963 et 2012, en intégrant le tronçon connu pour être affecté par le déficit sédimentaire et un tronçon connu pour être encore mobile et actif en termes de transport solide. **L'hypothèse émise est qu'en 1963 le fond du lit du tronçon amont était encore diversifié et assez semblable au tronçon aval, alors qu'en 2012 le tronçon amont est plus homogène que l'aval.**

3.1.1 Matériel et méthodes

Le tronçon étudié mesure 20 km de long. Les images utilisées sont des orthophotos de l'IGN prises lors de périodes de basses eaux (environ 20 m³/s). La bathymétrie est extraite tous les 10 m longitudinalement à partir des valeurs radiométriques des pixels des images. Sur chaque transect, la valeur radiométrique de la profondeur maximale est retenue. Les signaux obtenus pour 1963 et 2012 sont standardisés (normés et réduits) pour qu'ils soient comparables et éviter les écarts liés aux états radiométriques des images (Figure 15). En parallèle, les séquences seuil-mouille sont recensées par photo-interprétation. L'interdistance et la fréquence des faciès sont analysées en 1963 et 2012.

La technique des ondelettes (Torrence et Compo, 1998 ; Gouhier, 2014) a été utilisée pour analyser la périodicité du signal bathymétrique. Deux types de décompositions en ondelettes ont été appliqués : (1) une décomposition en ondelettes continues, qui permet d'analyser la périodicité du signal à toutes les échelles spatiales ; (2) une décomposition en ondelettes discrètes, qui permet d'analyser la périodicité du signal à des niveaux scalaires définis. Cette dernière permet également de visualiser le signal à ces différentes échelles, d'extraire les maximas et les minimas, de déterminer alors la longueur d'onde du signal, et de la mettre en lien avec l'interdistance effectivement mesurée sur les photographies.

Les bathymétries de 1963 et 2012 décomposées en ondelettes discrètes sont également segmentées par la méthode de Hubert (2000 ; Kehagias et al., 2005) afin d'identifier des sous-tronçons dont le signal fluctue autour d'une moyenne significativement différente de celle des sous-tronçons voisins.

3.1.2 Résultats

La localisation des seuils et des mouilles déterminée par photo-interprétation est cohérente avec les profils bathymétriques extraits par imagerie (Figure 15). La Figure 15 permet déjà d'observer visuellement que la variabilité bathymétrique est moindre en 2012 en amont comparativement au secteur aval qu'il soit observé en 2012 ou en 1963. Le cumul des interdistances des faciès seuil-mouille issus de la photo-interprétation met en évidence un déficit des seuils en 2012 sur le secteur amont (Figure 16). **Cela confirme bien l'impact du déficit sédimentaire sur la morphologie du lit.**

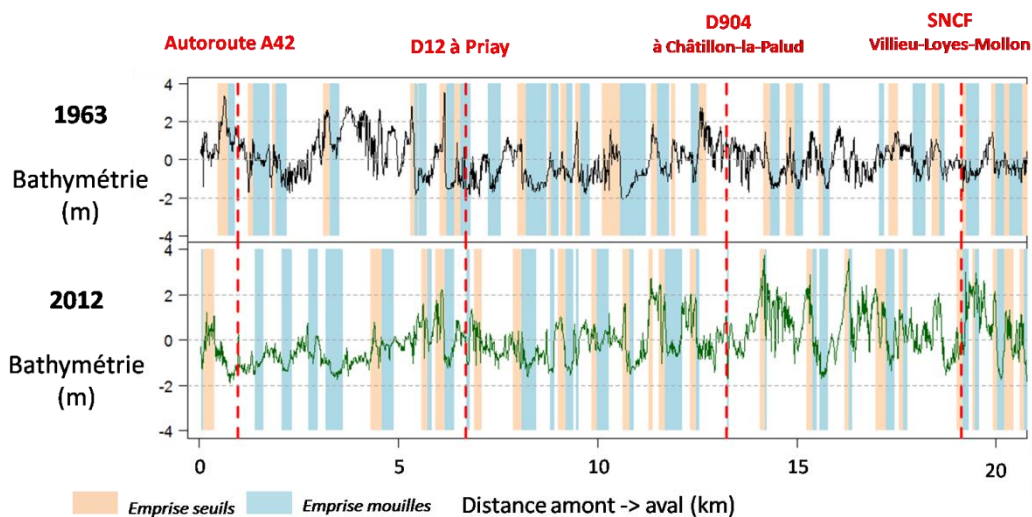


Figure 15 : Signaux radio-bathymétriques standardisés du tronçon étudié ; localisation en arrière-plan des faciès seuils et mouilles recensés par photo-interprétation.

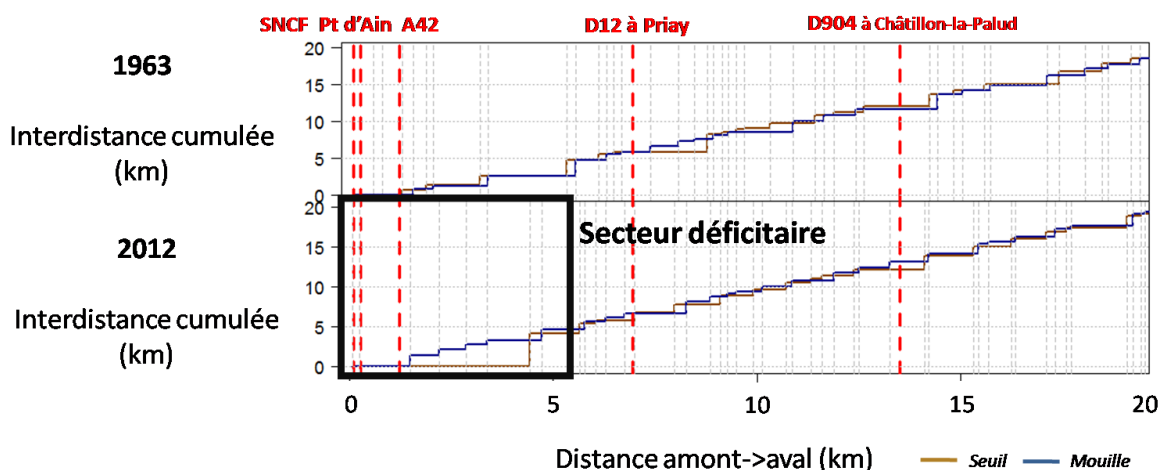


Figure 16 : Interdistances cumulées des faciès seuil-mouille en 1963 et en 2012.

Le spectre de décomposition en ondelettes continues montre également une variance moindre en 2012 sur le secteur amont (Figure 17). L'affaiblissement de la variance s'observe par des teintes de couleurs plus froides (i.e. bleu, vert, orange, rouge orangé) sur ce secteur alors que sur les autres secteurs de 1963 et 2012, les teintes du spectre se réchauffent (i.e. rouge, rouge foncé).

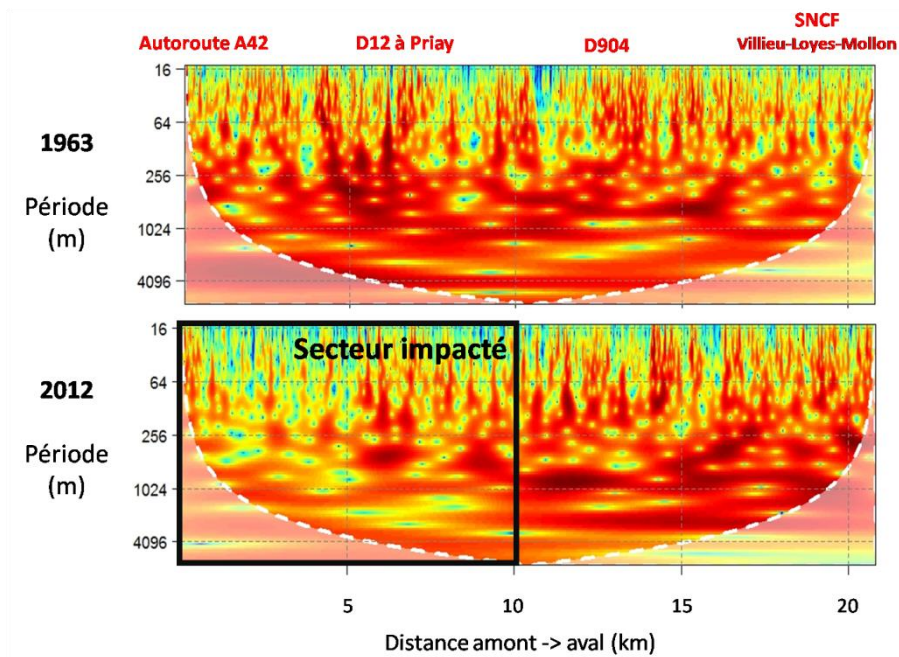


Figure 17 : Spectre de décomposition en ondelettes continues des signaux bathymétriques de 1963 et 2012.

A partir de la photo-interprétation des séquences seuil-mouille, les valeurs médianes des interdistances des seuils sont estimées entre 640 et 980 m et les interdistances des mouilles sont comprises entre 620 et 790 m (Figure 18). L'extraction des seuils et des mouilles par la technique des maxima et minima au niveau d'échelle 5 montre que leur nombre et les valeurs d'interdistance sont du même ordre de grandeur que ceux déterminés par photo-interprétation (Figure 18). C'est notamment bien le cas pour 1963. Pour l'année 2012, la photo-interprétation montre que l'interdistance des seuils est bien plus élevée à l'amont qu'à l'aval. Cette différence n'est pas observée pour les mouilles. L'approche par les maxima et les minima distingue en revanche en 2012 les interdistances mesurées pour les deux faciès.

Ces résultats sont également illustrés par la segmentation des signaux de niveau 5, issus de la décomposition en ondelettes discrètes. **La Figure 19 met bien en évidence que le tronçon amont présente une moindre variance en 2012 comparativement à 1963 et au tronçon aval, qu'il soit observé en 1963 ou en 2012.**

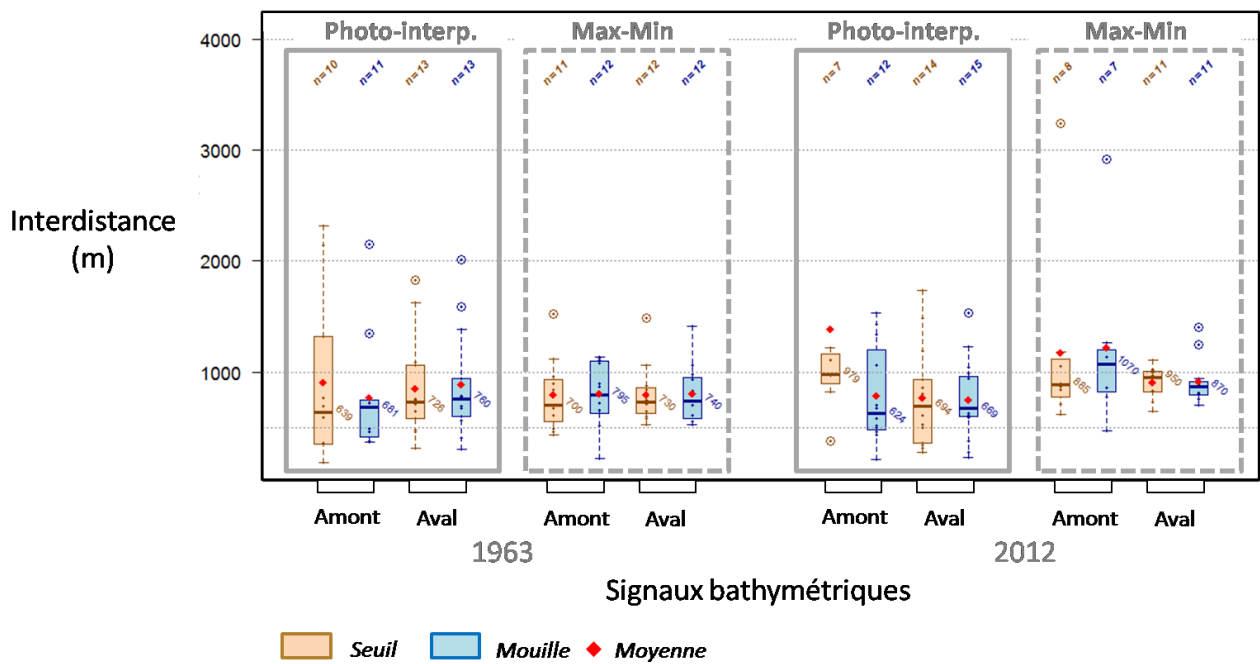


Figure 18 : Diagrammes en boîte de la répartition des inter-distances par sous-trançons homogènes, par année d'observation et par type de détection (photo-interprétation versus mesure).

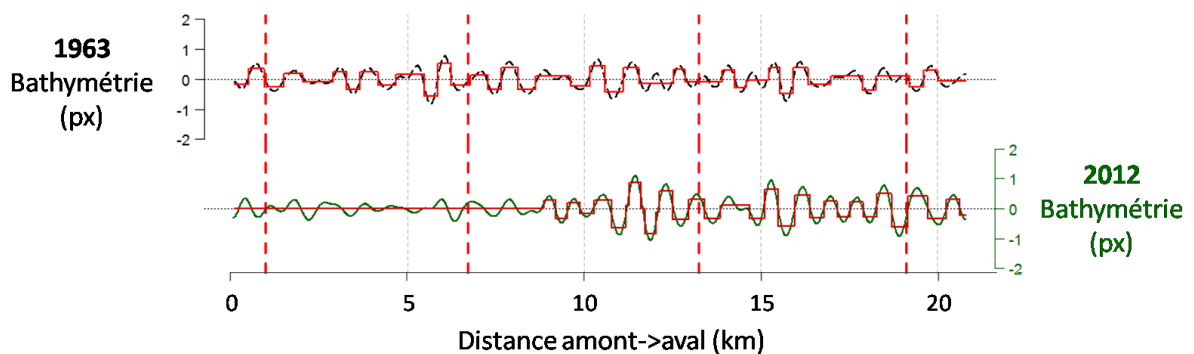


Figure 19 : Segmentation des signaux bathymétriques de 1963 et 2012 décomposés en ondelettes discrètes : Détail de niveau 5.

3.1.3 Conclusions

L'étude diachronique des habitats par imagerie valide l'hypothèse qu'en 1963, le fond du lit était encore diversifié en termes d'alternances seuil-mouille, alors qu'en 2012 l'amont du tronçon présente un fond de lit plus homogène qu'à l'aval. **Ces résultats matérialisent ainsi concrètement les conséquences du déficit sédimentaire sur la simplification des faciès morphologiques sur le tronçon amont en 2012.** Il est fortement probable que ce changement se propage progressivement vers l'aval comme cela est observé pour la granulométrie du lit.

Beaucoup d'auteurs ont souligné que les faciès (seuil ou mouille) présentent une fréquence d'occurrence de 5 à 7 fois la largeur du chenal en eau (Leopold et al., 1964 in Richards, 1976 ; Church, 1972 ; Wiederkehr et al., soumis). Selon ces estimations, la fréquence d'occurrence des faciès devrait être de 350 à 500 m sur l'Ain, la largeur moyenne du chenal en eau sur le tronçon étudié étant d'environ 70 m. Les inter-distances que nous avons calculées variant entre 600 à 1000 m, leur fréquence est donc de 8.6 à 14 fois la largeur du chenal en eau, ce qui est relativement plus élevé. Ainsi la rivière présente un linéaire à plat lotique qui devient de plus en plus dominant.

3.2 Modélisation de l'habitat hydraulique des organismes aquatiques

3.2.1 Introduction

Les modèles d'habitat traduisent certaines caractéristiques d'altération hydrologique (modification des débits bas à moyens) **en altération hydraulique** (ex. : modifications de vitesses du courant et de hauteurs d'eau) **puis en altération de qualité de l'habitat hydraulique pour les organismes** (le plus souvent les poissons et les macroinvertébrés). L'approche part du principe que le débit n'est pas le descripteur le plus pertinent de l'habitat des organismes aquatiques, qui évoluent dans des champs de vitesses, de hauteurs d'eau, de contraintes exercées sur le fond du lit ou d'autres caractéristiques hydrauliques du "microhabitat" (échelle spatiale assez fine pour refléter l'environnement instantané des organismes ; Lamouroux et al., soumis). La traduction hydraulique est donc importante, car un même débit sera associé à des caractéristiques hydrauliques très différentes dans différents cours d'eau en fonction de leur morphologie (ex. : pente, substrat, section en travers). L'approche part également du principe que les "préférences" des organismes pour leur habitat hydraulique dépendent de l'espèce, de son activité et de son stade de développement, tout en gardant à l'esprit que les caractéristiques hydrauliques ne sont pas suffisantes à elles seules pour décrire l'habitat des organismes (Lamouroux et al., soumis). Ainsi, il est important de quantifier la sensibilité des communautés en place aux altérations hydrauliques.

Cette partie présente une description de l'habitat hydraulique des poissons dans la basse vallée de l'Ain, avec comme espèce cible **l'ombre commun**, entre Varambon et Chazey. Le premier objectif de cette partie est avant tout d'expliquer et d'illustrer la démarche suivie pour obtenir les simulations d'habitat et non d'arriver à des conclusions très précises quant aux conditions d'habitat des poissons ou des invertébrés sur le linéaire de la basse vallée. En effet, certaines données sont trop partielles (e.g. topographie) ou manquantes (e.g. substrat) à ce stade du projet pour parvenir à de telles conclusions. Ensuite, le second objectif est de montrer la puissance de la modélisation hydrodynamique en deux dimensions (2D) pour l'analyse des effets des éclusées en termes de disponibilité en habitat, et plus précisément en termes de dynamique spatio-temporelle de la disponibilité en habitat, pour les poissons ou les invertébrés (Capra et al., 2011).

3.2.2 Matériel et méthodes

Le secteur d'étude de Varambon à Chazey se divise en deux tronçons situés de part et d'autre de Priay. Chaque tronçon est représenté par une station d'étude d'environ trois kilomètres. Le tronçon amont est représenté par le linéaire qui s'étend de l'aval du coude de Varambon à Vorgey (3.18 km) et le tronçon aval est représenté par le linéaire qui s'étend de Mollon au pont SNCF de Chazey (3.26 km). Au sein du tronçon aval une station englobant le Méandre de Gévrieux (MdG, de l'aval de Priay au pont de Gévrieux; 5 km) sera utilisée pour la modélisation hydrodynamique en 2D (approche dynamique).

Description hydraulique

La description hydraulique des stations est issue du travail de modélisation hydrodynamique présenté ci-dessus. Dans un premier temps nous avons sélectionné cinq profils dans chaque station (Figure 20) pour illustrer l'évolution du niveau d'eau en fonction du débit. Le choix des profils était guidé par la volonté de représenter au mieux la diversité morphologique (chenal droit simple ou avec banc de galets, méandre, bras secondaire...) des stations pour décrire les conséquences des variations de débit sur le niveau d'eau dans différentes morphologies.

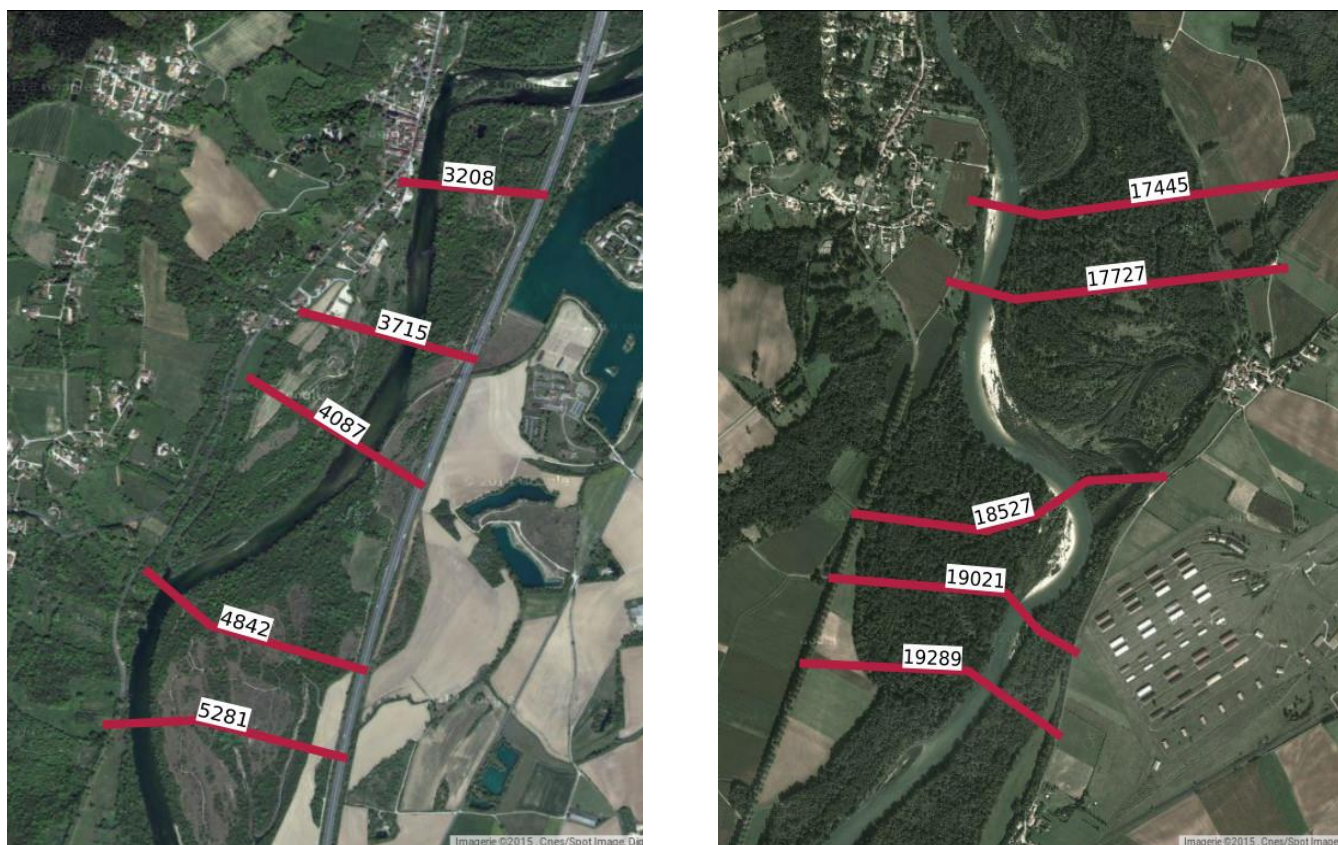


Figure 20 : Position et référence des cinq profils en travers choisis dans la station Varambon_Vorgey (tronçon amont, à gauche) et dans la station Mollon_Chazey (tronçon aval, à droite).

Pour chaque station nous avons également décrit l'évolution de la surface mouillée, de la distribution de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant en fonction du débit. Les distributions de hauteur (0.8, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6, 3.2 et > 3.2 m) et de vitesse (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.4 et > 1.4 m.s⁻¹) sont calculées, pour un débit donné, en surface de représentativité par classe.

Modélisation de l'habitat – approche statique

Les simulations d'habitat pour les poissons ou les macroinvertébrés benthiques sont basées sur le modèle hydrodynamique présenté précédemment et sont réalisées dans la gamme de débit retenue après validation du modèle hydraulique. Pour cela, des modèles d'habitat (généralement sous forme de courbes de préférence) sont utilisés pour traduire les conditions hydrauliques simulées aux nœuds du maillage en indice d'habitat pour un taxon donné. En chaque nœud du maillage, pour un débit donné, le modèle hydrodynamique calcule une valeur de profondeur d'eau et de vitesse d'écoulement. Des courbes de préférences d'habitat, qui existent pour un grand nombre de taxons de poissons (e.g. Lamouroux et al., 1999 ; Mallet et al., 2000) et d'invertébrés (Dolédec et al., 2007 ; Mérigoux et al., 2009), sont utilisées pour transformer les valeurs de chaque variable hydraulique, profondeur (H) et vitesse (V), en un indice d'habitat (I_H et I_V ; il existe une courbe de préférence pour chaque variable hydraulique). Le substrat n'est pas utilisé dans notre étude car il n'est pas renseigné. L'indice d'habitat varie de 0 (conditions pas favorables) à 1 (conditions très favorables). Le produit des indices d'habitat (également compris entre 0 et 1) s'appelle la **valeur d'habitat (VH)**. Une valeur d'habitat peut donc être calculée pour chaque nœud du maillage, pour chaque débit modélisé, et pour chaque taxon (stade de développement ou espèce) étudié. Pour illustrer la démarche nous avons choisi d'utiliser les courbes de préférence de l'ombre commun (*Thymallus thymallus*) de Mallet et al. (2000) issu d'un échantillonnage dans la rivière d'Ain à l'aval de Gévrioux. L'intégration de cette variable valeur d'habitat (pour un taxon donné) sur la surface des éléments du maillage en eau de la station d'étude détermine la Surface Pondérée Utile (SPU, en m²) pour un taxon et pour un débit (approche statique). En réalisant ce calcul pour toute la gamme des débits permis par la modélisation hydrodynamique, on peut réaliser un graphe représentant l'évolution de la SPU en fonction du débit. Cette courbe exprime l'évolution de la quantité d'habitat disponible pour le taxon étudié en fonction du débit. Nous avons modélisé l'évolution de la SPU pour les trois stades de développement de l'ombre commun (0+ (7-13 cm ; jeunes de l'année), 1+ (18-28 cm ; juvéniles) et 2+ (> 30 cm ; adultes)) définis par Mallet et al. (2000). La SPU totale de chacune des deux stations d'étude est modélisée pour chacun des trois stades de développement et pour 20, 40, 60, 80, 100, 125, 150, 175, 200, 225 et 250 m³.s⁻¹. Pour comparer les stations nous avons exprimé leur SPU en fonction de leur surface mouillée à 80 m³.s⁻¹. Pour chaque débit modélisé, il est possible de créer des cartographies (vues en plan) de la profondeur, de la vitesse, des indices d'habitat I_H et I_V, et de la VH. Classiquement cette représentation cartographique se fait à l'aide d'iso-surfaces, dessinées à partir de polygones regroupant des nœuds (ici les cellules du maillage) ayant des valeurs de la variable étudiée appartenant à la même classe. Nous proposons de représenter la valeur d'habitat des ombres

commun - 1+ de chaque station pour 80, 150 et 250 m³.s⁻¹ avec cinq classes de VH (< 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 et > 0.8).

Modélisation de l'habitat – approche dynamique

L'approche dynamique basée sur une modélisation hydrodynamique en 2D permet de mieux rendre compte des changements hydrauliques locaux, tels que les conséquences des montées et des baisses de débit générées par un régime d'éclusées (Vanzo et al., 2015). Pour illustrer ce propos nous avons sélectionné deux semaines différentes dans la chronique de débits instantanés de Pont-de-Chazey (Banque Hydro, Figure 21) située à l'aval du secteur d'étude. La première semaine du 3 au 9 septembre 2007 se caractérise par des variations de débit de plus de 100 m³.s⁻¹, entre 20 m³.s⁻¹ et 140 m³.s⁻¹, avec 3 éclusées. La seconde semaine du 2 au 8 mars 2009 se caractérise par des variations de plus de 150 m³.s⁻¹, entre 50 m³.s⁻¹ et 250 m³.s⁻¹, avec 5 éclusées.

Nous avons modélisé les conditions hydrodynamiques de la station-MdG correspondantes aux hydrogrammes des deux semaines d'éclusées (Figure 21) avec une approche pseudo stationnaire. Il s'agit en fait de réaliser, à chaque pas de temps de la modélisation (ici 1 heure), des interpolations linéaires à partir des résultats de simulations stationnaires pour des débits encadrant le débit de l'heure étudiée. Cette approche est une simplification de la modélisation dite non stationnaire (avec défilement de l'hydrogramme réel en conditions limites à l'entrée du domaine modélisé, en opposition à la modélisation dite stationnaire basée sur un débit constant). Dans notre exemple 11 débits ont été utilisés : 20, 40, 60, 80, 100, 125, 150, 175, 200, 225 et 250 m³.s⁻¹.

Pour la modélisation pseudo-stationnaire on fabrique une base de données avec en ligne les cellules du maillage (nœuds) et en colonnes (n=22) les profondeurs (n=11) et les vitesses (n=11) pour chacun des 11 débits stationnaires étalonnés. De cette base on crée une nouvelle base avec en ligne les cellules du maillage et en colonnes (n=336) les valeurs de profondeur (n=168) et de vitesse (n=168) pour chacun des débits horaires de chacune des deux semaines étudiées. Cette base de données nous permet alors de calculer et de présenter de manière cartographique des statistiques descriptives de la dynamique temporelle des conditions hydrauliques de chaque cellule de la station-MdG, avec par exemple :

- le coefficient de variation de la vitesse au pas de temps horaire pour chaque cellule et par semaine ($\text{Ecart-type}(V_{\text{horaire}}) / \text{Moyenne}(V_{\text{horaire}})$ sur la semaine);
- le nombre d'heures par jour et par cellule du maillage pendant lesquelles la profondeur était < 0.05 m (nombre d'heure d'exondation d'une cellule au cours de la semaine étudiée);
- la surface exondée chaque heure par rapport à l'heure précédente (exprimée en pourcentage de la surface mouillée totale). La variabilité de la surface exondée en fonction du temps peut être présentée graphiquement en lien avec le débit.

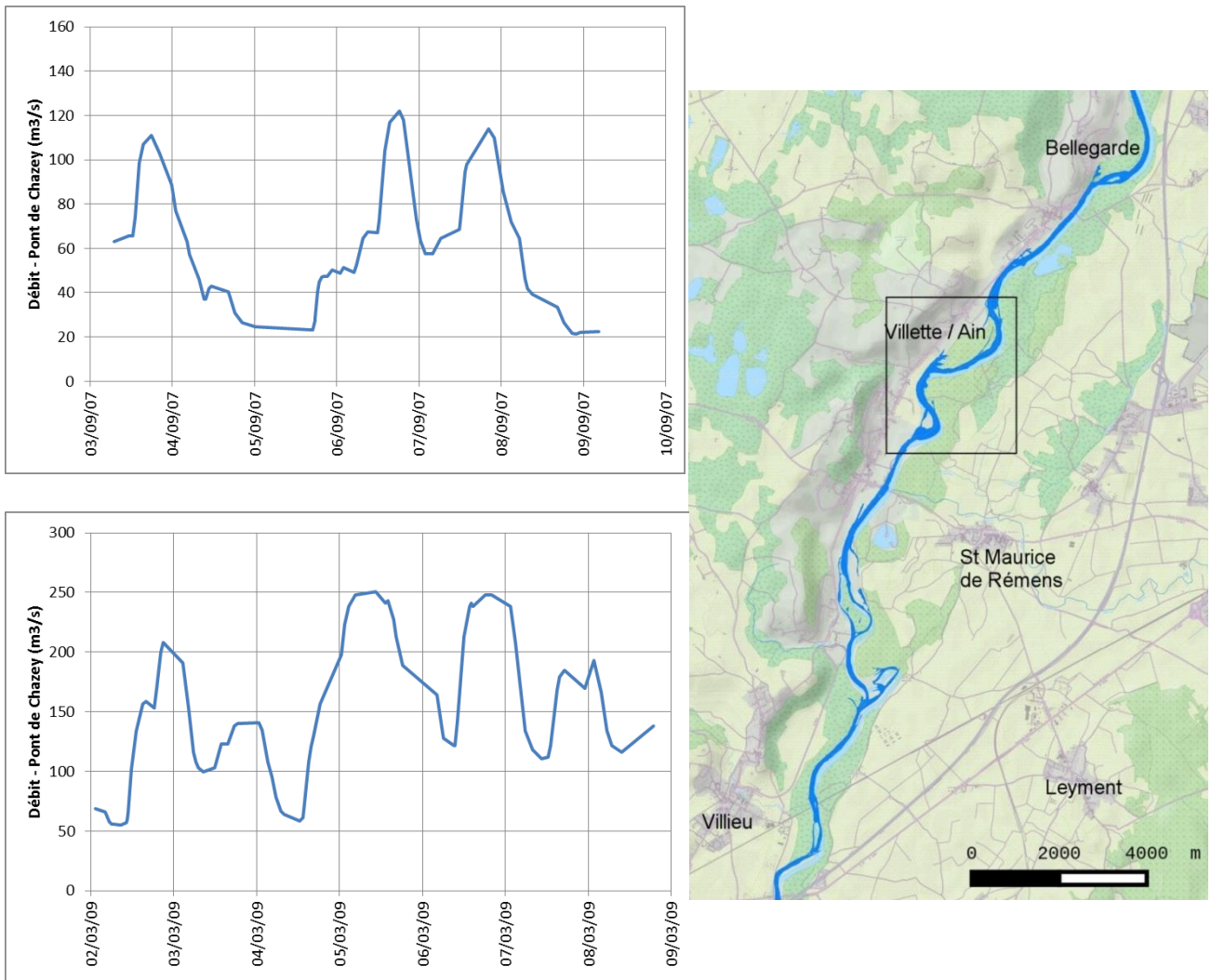


Figure 21 : chronique de débit au pas de temps variable à Pont-de-Chazey du 3-9 sept 2007 (en haut à gauche) et du 2-8 mars 2009 (en bas à gauche; données issues de la Banque Hydro). A droite, cartographie générale de la station- MdG (Méandre de Gévrioux) étudiée pour l’approche dynamique avec la modélisation hydrodynamique en 2D.

3.2.3 Résultats

Description hydraulique

Les profils en travers des deux stations sont très différents (Figure 22) : beaucoup plus larges et chaotiques (plusieurs bras secondaires) dans la station aval, Mollon - pont SNCF de Chazey, que dans la station amont, Varambon - Vorgey. Dans la station amont, entre 20 et 250 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ seul le chenal principal est en eau, avec une profondeur minimum toujours importante (minimum de ≈ 1 m à 20 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur le profil 4087). Dans la station aval, la mise à sec de bras secondaires en dessous de 80 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et par des profondeurs d’eau assez faibles de partout à 20 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

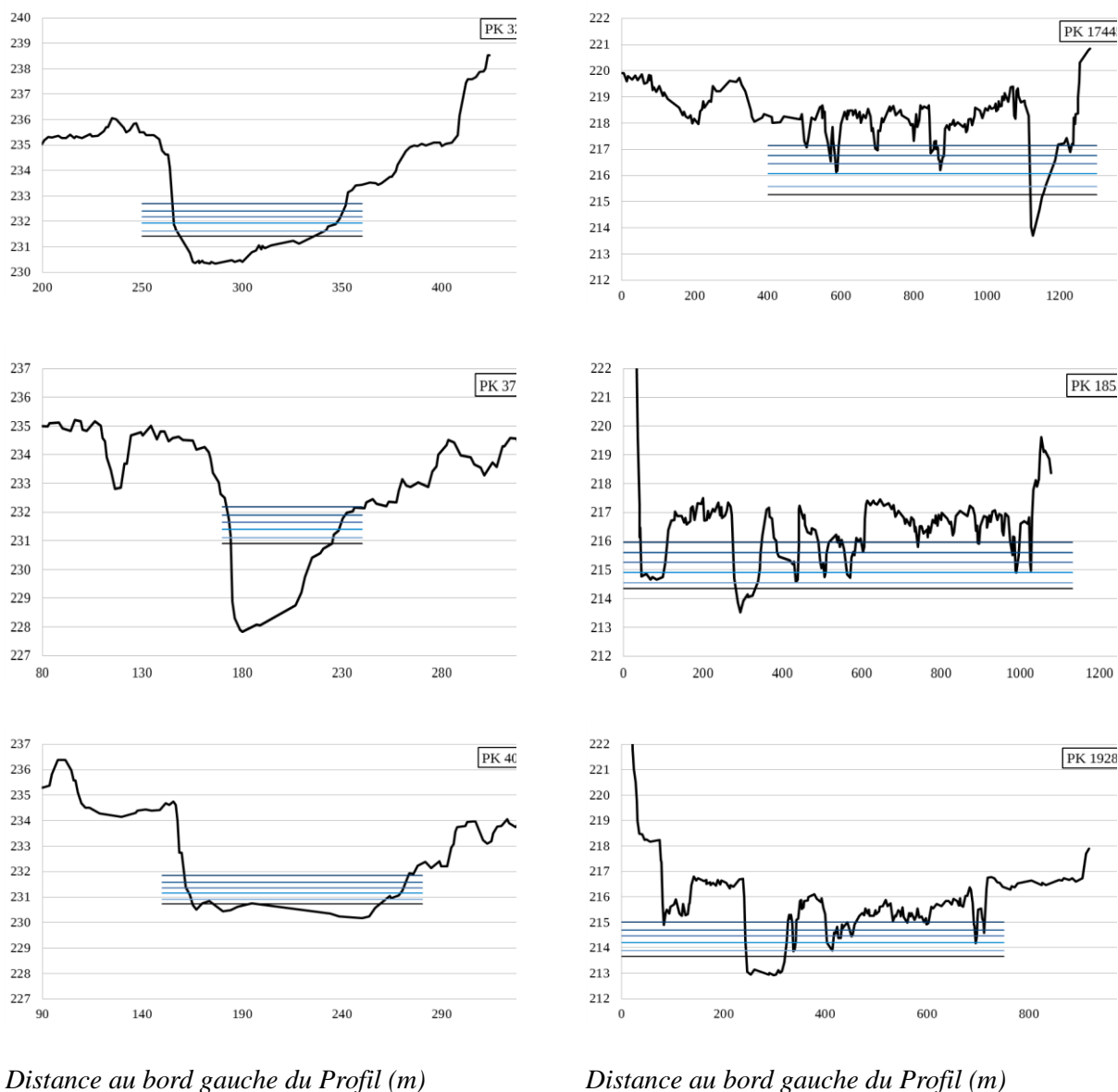


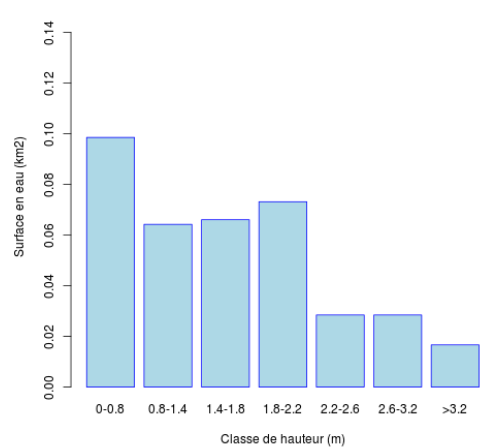
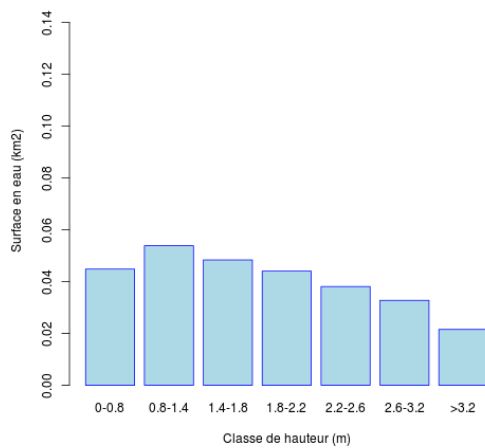
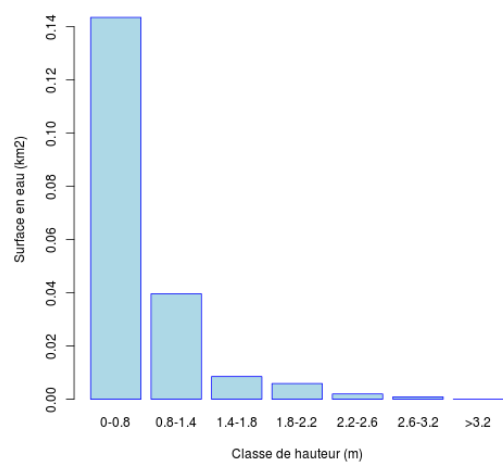
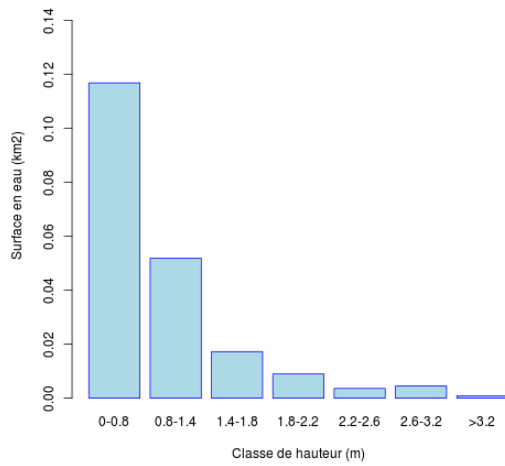
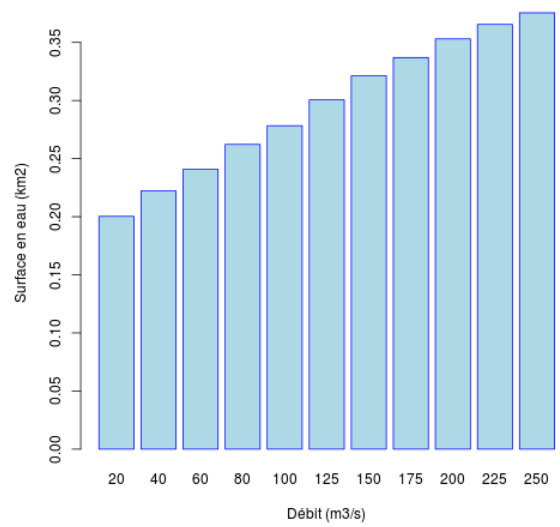
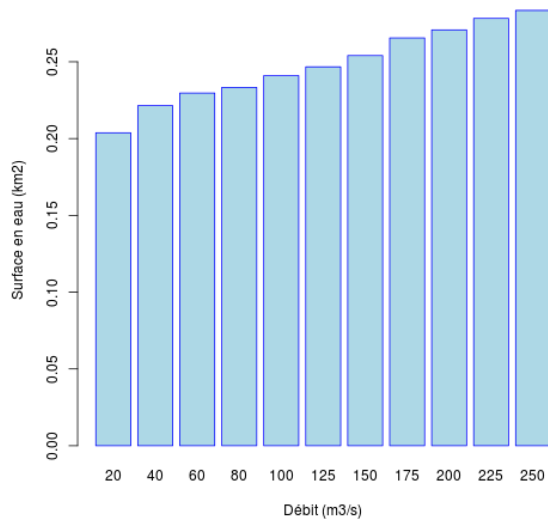
Figure 22 : Evolution du niveau d'eau (Altitude en m) sur trois des cinq profils en travers pour 20, 40, 80, 125, 175 et 250 m³.s⁻¹ (niveau d'eau évoluant de bas en haut) de chaque station (amont à gauche et aval à droite).

La surface mouillée dans la station amont évolue de 0.20 à 0.27 km² entre 20 et 250 m³.s⁻¹, tandis que dans la station aval la surface augmente de 0.20 à 0.36 km² dans la même gamme de débits (Figure 23).

La distribution de la hauteur d'eau dans la station amont devient de plus en plus homogène lorsque le débit augmente alors que la proportion des faibles profondeurs demeure importante dans la station aval (Figure 23). Globalement les profondeurs restent majoritairement < 2.2 m.

L'évolution des distributions de vitesse de courant sont plus homogènes entre les deux stations, même si les vitesses > 1 m.s⁻¹ deviennent plus vite majoritaires (dès 80 m³.s⁻¹) dans la

station aval (Figure 23). Globalement les vitesses sont assez soutenues avec peu de surfaces ayant une vitesse $< 0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ au-delà de $80 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.



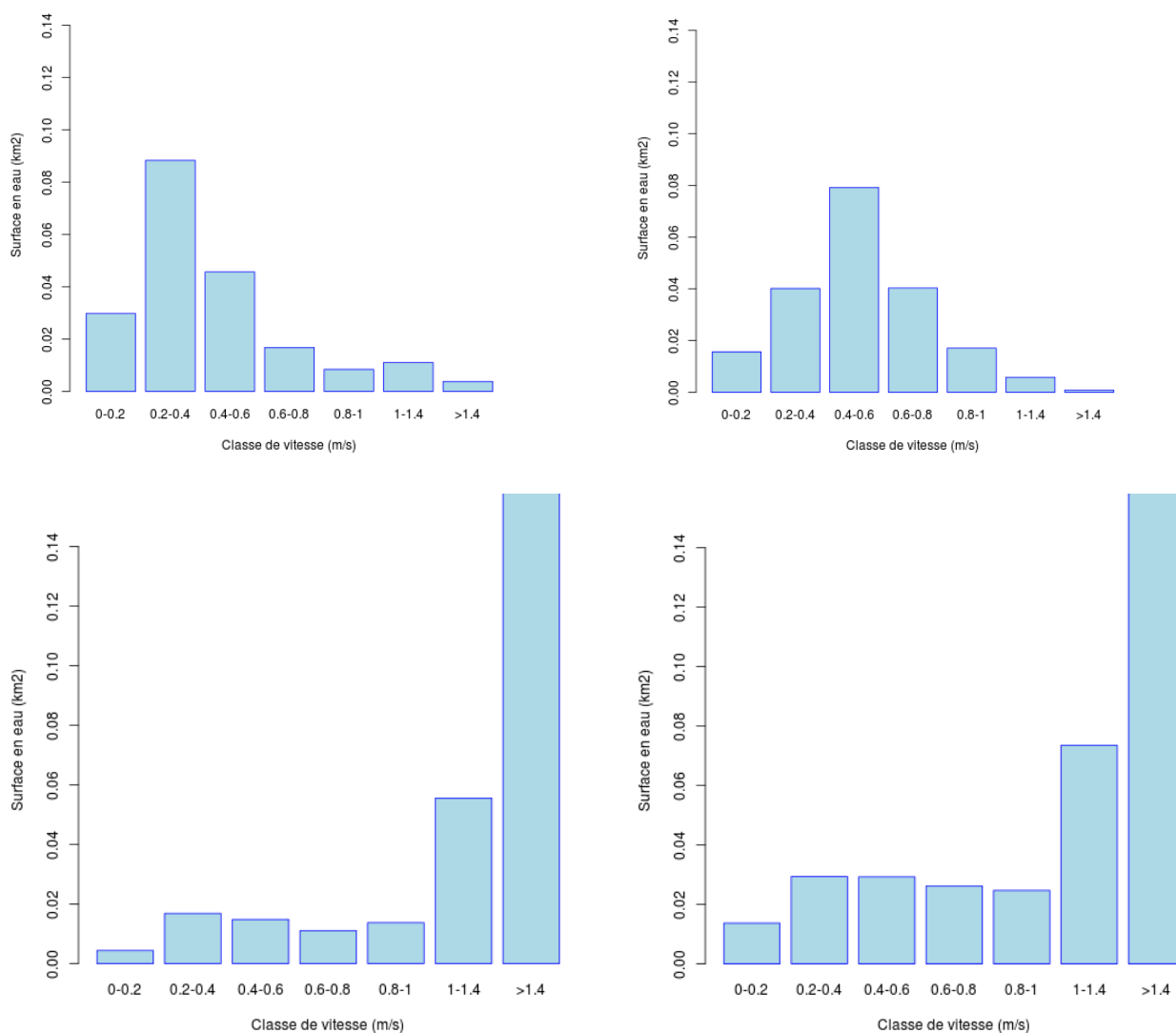


Figure 23 : Evolution de la surface mouillée en fonction du débit (ligne 1). Distribution (en surface par classe) de la hauteur d'eau (ligne 2 & 3) et de la vitesse (ligne 4 & 5) à 20 et 250 m³.s⁻¹. Pour la station amont (gauche) et pour la station aval (droite). *Noter que la barre des vitesses de courant > 1.4 m. s⁻¹ à 250 m³.s⁻¹ est tronquée.*

Modélisation de l'habitat – approche statique

Les deux stations sont très semblables en termes d'évolution de l'habitat disponible pour l'ombre commun en fonction du débit (Figure 23). Pour les juvéniles d'ombre commun (Figure 24) la similitude est très forte. Pour les deux autres classes d'âge (0+ et 2+), l'évolution de l'habitat disponible en fonction du débit est globalement similaire entre les deux stations même si les maximums ne sont pas observés pour les mêmes gammes de débit. Globalement, pour les trois classes d'âge, la quantité d'habitat favorable est plus importante dans la gamme 40-125 m³.s⁻¹ (Figure 24). En dessous de 40 m³.s⁻¹ la disponibilité en habitat pour les trois classes d'âge diminue fortement. Au-delà de 125 m³.s⁻¹ la disponibilité en habitat diminue également mais moins rapidement et finit même par augmenter au-delà de 200 m³.s⁻¹ dans la station aval (0+ et 1+ ; Figure 24).

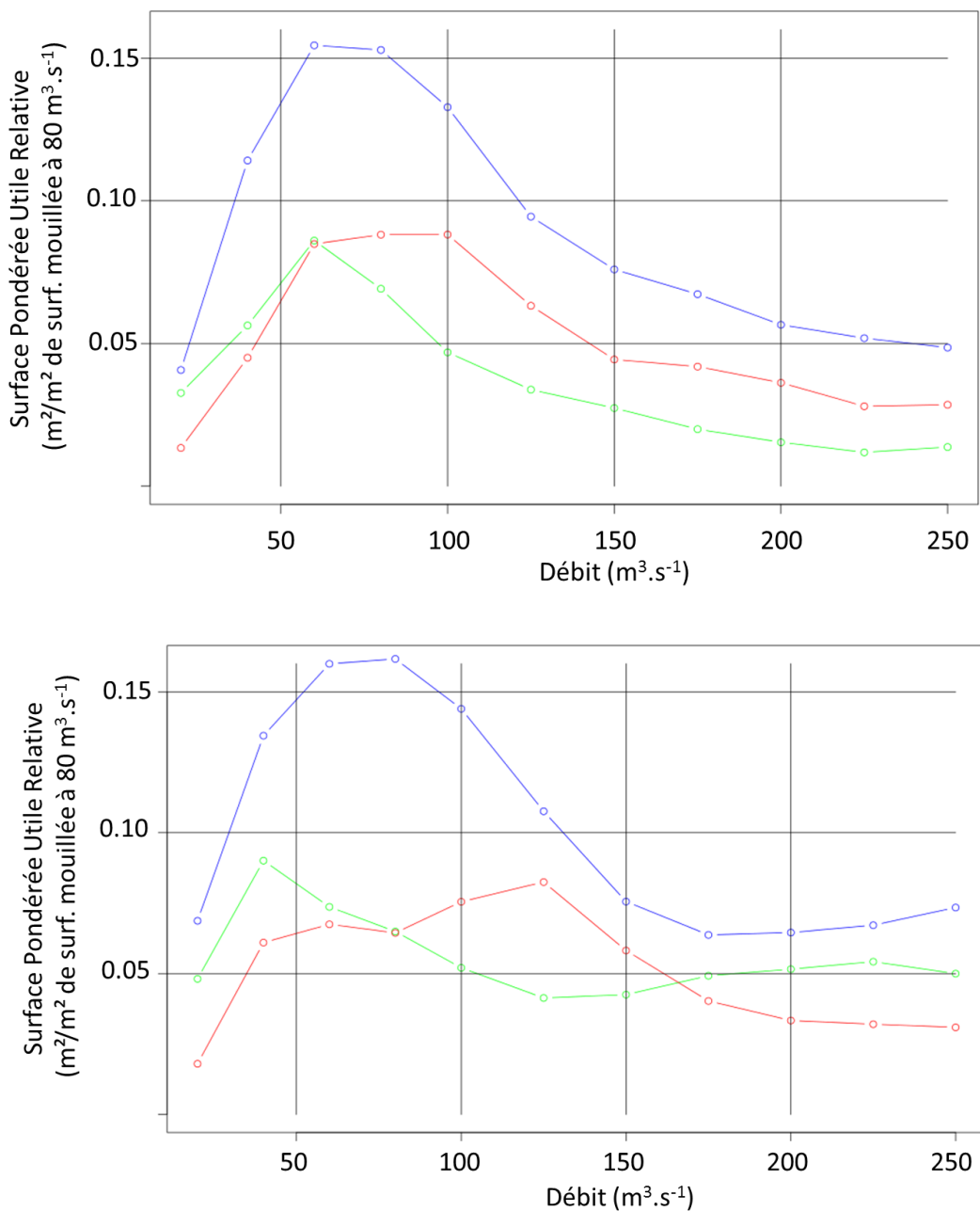


Figure 24 : Evolution de l'habitat disponible (SPU) pour l'ombre commun dans la station Varambon - Vorgey (haut) et dans la station Mollon - pont SNCF de Chazey (bas). L'habitat disponible est exprimé en % de la surface mouillée de chaque station à 80 m³.s⁻¹, pour les 0+ (alevins, vert), les 1+ (juvéniles, bleu) et les 2+ (adultes, rouge). Les valeurs d'habitat des cellules du maillage sont estimées à partir des courbes de préférence pour l'ombre commun de Mallet et al. (2000).

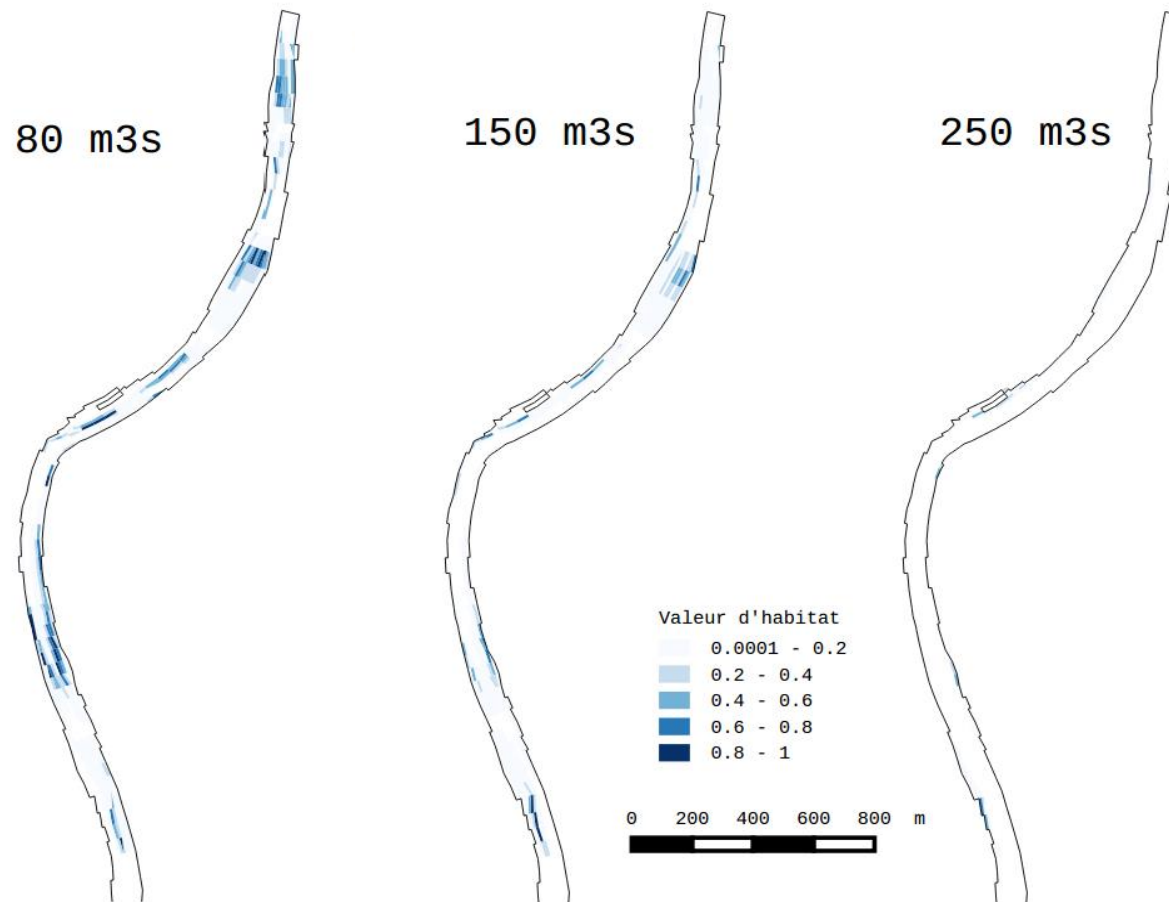


Figure 25 : Cartographie de la valeur d'habitat des 1+ d'ombre commun (Courbes de préférences de Mallet et al., 2000) pour la station Varambon-Vorgey et pour 80, 150 et 250 m³.s⁻¹.

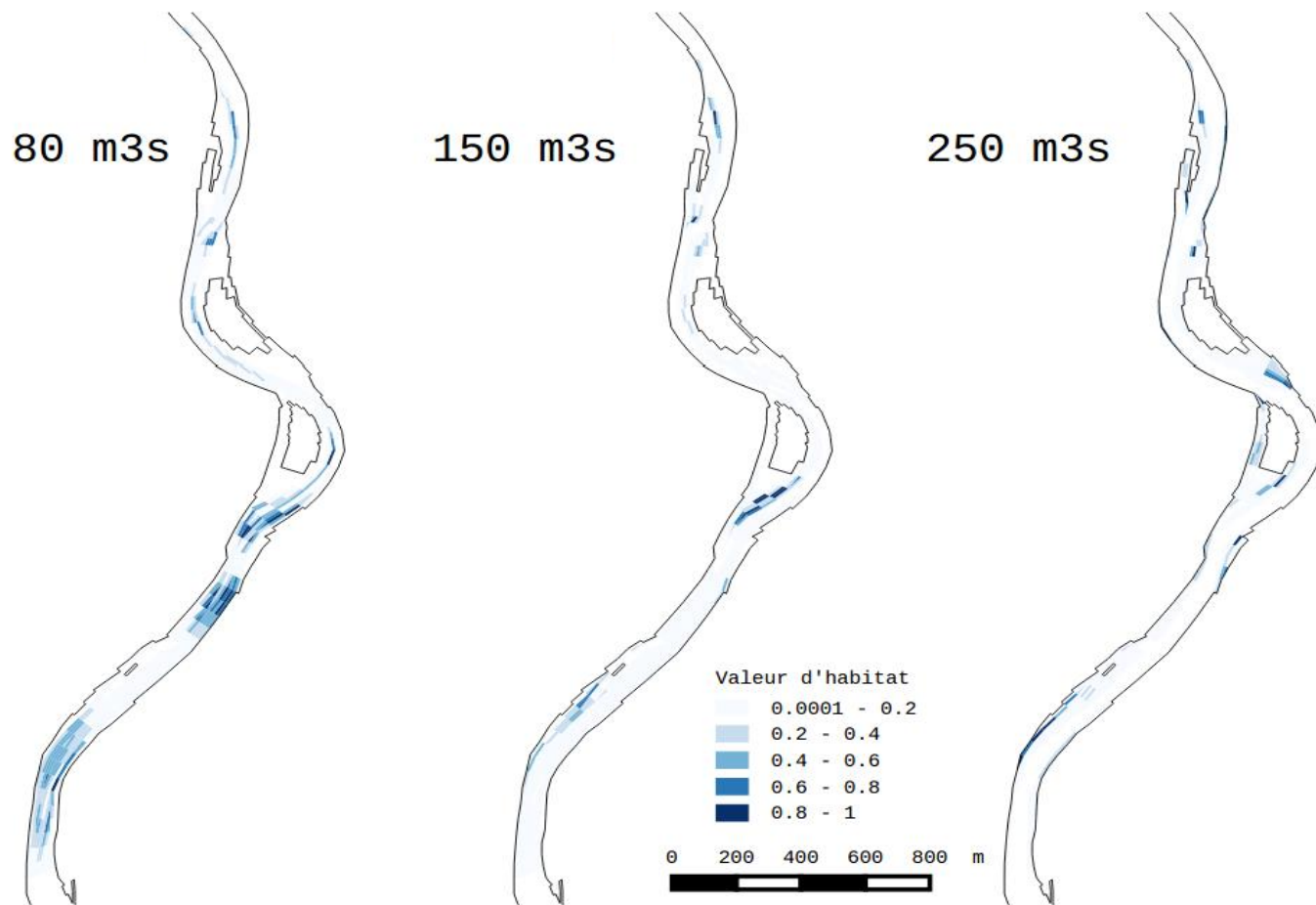


Figure 26 : Cartographie de la valeur d'habitat des 1+ d'ombre commun (Courbes de préférences de Mallet et al., 2000) pour la station Mollon - pont SNCF de Chazey et pour 80, 150 et 250 m³.s⁻¹.

L'étude des cartographies de valeur d'habitat des juvéniles d'ombre commun montre que dans la station amont l'habitat favorable important à $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ disparaît rapidement en fonction du débit pour devenir quasiment inexistant à $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dans la station aval, au contraire, l'habitat favorable pour les juvéniles d'ombre commun semble moins dense mais reste présent même à très fort débit (Figure 25 et Figure 26).

Modélisation de l'habitat – approche dynamique

Dans la station-MdG, l'analyse des coefficients de variation de la vitesse horaire indique que la variabilité de la vitesse d'écoulement dans le chenal est assez modérée mais que le long des berges et surtout dans les annexes ou bras secondaires, les CV peuvent atteindre plus de 600% (Figure 27).

L'évaluation du nombre d'heures d'exondation par cellule met en évidence que quand le débit descend en dessous de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ il y a des déconnexions qui peuvent être assez longues au cours d'une semaine (Figure 28). Avec des débits de base autour de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, seul le chenal principal reste en eau 100% du temps au cours de la semaine du 3-9 sept 2007. La surface jamais exondée est supérieure au cours de la semaine du 2-8 mars 2009 du fait d'un débit minimum autour de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

L'analyse dynamique de la surface exondée en fonction des variations de débit au cours de la semaine 2-9 mars 2009 (Figure 29) montre bien qu'elle dépend principalement de l'amplitude de la variation de débit mais également du débit de base (début et fin d'écluse). Par exemple la perte de surface mouillée à la 50^{ème} heure (débit de fin d'écluse proche de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) de la chronique étudiée est plus importante que celle de la 100^{ème} heure (débit de fin d'écluse proche de $75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pour une baisse de débit moindre (moins de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ contre plus de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ respectivement).

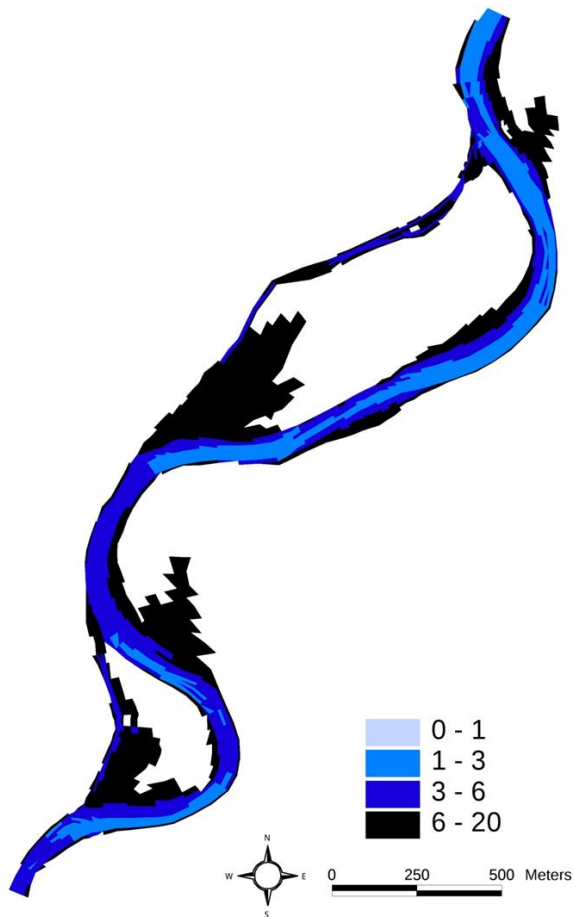


Figure 27 : Coefficient de variation de la vitesse d'écoulement par cellule dans la station-MdG au cours de la semaine du 2-8 mars 2009 (modélisation pseudo-stationnaire).

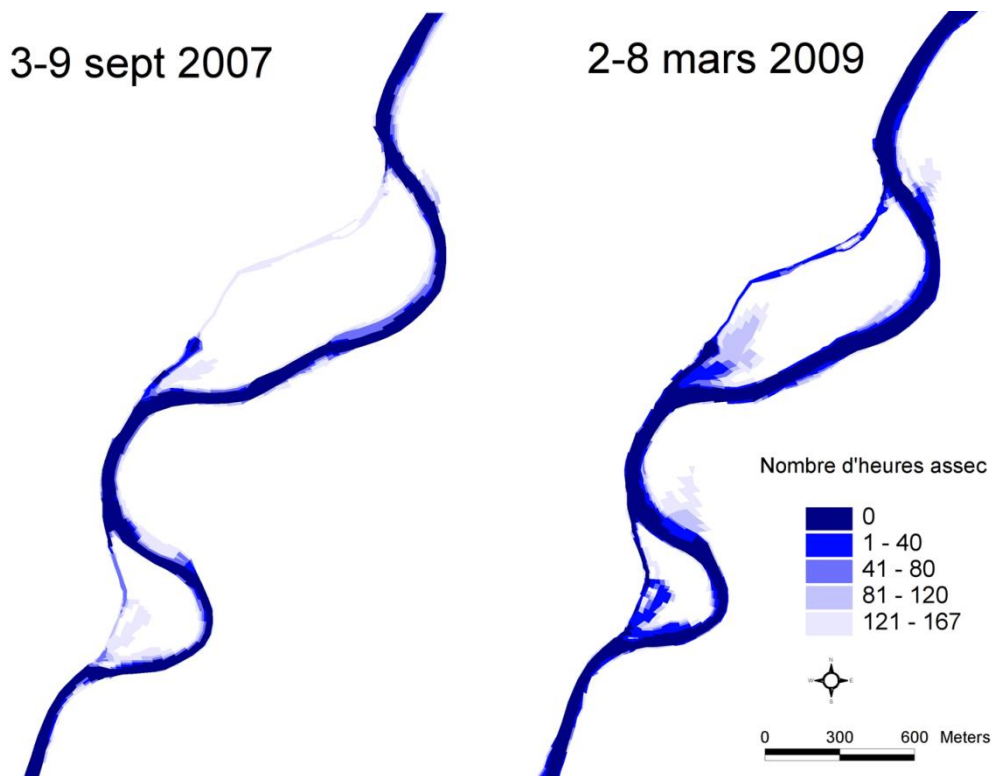


Figure 28 : Nombre d'heures, sur l'ensemble de chaque semaine étudiée (168 heures), pendant lesquelles chaque cellule du maillage (station-MdG) était exondée (Chronique

de débit à Pont de Chazey - Données Banque Hydro ; Figure 21). Résultats obtenus avec une simulation pseudo-stationnaire.

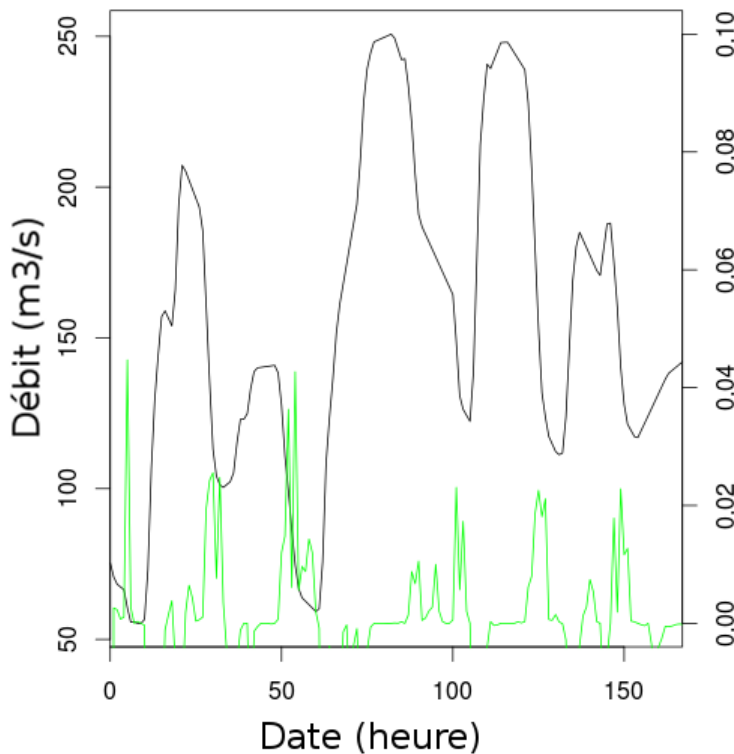


Figure 29 : Superposition de la chronique de débit horaire de la période 2-9 mars 2009 (noir ; échelle de gauche) et de la variabilité de la surface exondée (station-MdG) au pas de temps horaire (exprimée en % de la surface mouillée à chaque pas de temps ; vert ; échelle de droite) estimée à partir d'une simulation pseudo-stationnaire.

3.2.4 Conclusions et principales recommandations

D'après le travail de Mallet et al. (2000), les 1+ (juvéniles ou sub-adultes) ont des préférences plutôt moyennes pour la vitesse ($\approx 80 \text{ cm.s}^{-1}$) et la hauteur (110 cm) en comparaison aux 0+ (jeunes de l'année) qui eux sélectionnent plutôt des vitesses fortes (100 cm.s^{-1}) et des hauteurs d'eau faibles (50 cm) ou aux 2+ (adultes) qui eux sélectionnent des vitesses plus faibles ($< 80 \text{ cm.s}^{-1}$) et des hauteurs d'eau fortes (120 cm). De ce fait entre 50 et $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ les juvéniles rencontrent des conditions d'habitat très favorables. Les deux autres stades sont pénalisés soit par la hauteur d'eau soit par la vitesse et l'habitat favorable est de fait moins abondant. Au-delà de $125\text{-}150 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, l'habitat disponible est moins favorable pour les trois classes d'âge. Mais au-delà de $200\text{-}250 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, dans la station Mollon - pont SNCF Chazey, la mise en eau de bras secondaires offre à nouveau des habitats favorables. Si ces mises en eau sont suivies rapidement par une exondation (au cours d'une éclusée par

exemple), ces habitats sont alors susceptibles de favoriser les échouages (à l'image de l'exemple de la station-MdG ; cf. aussi station aval). En revanche ils peuvent servir d'habitat de refuge en cas d'occurrence de forts débits ($> 300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). La courbe d'évolution de la SPU en fonction du débit est la traduction de l'évolution des conditions hydrodynamiques, dans une station donnée (i.e. avec une morphologie propre), en fonction du débit, par les préférences des organismes aquatiques. Pour une qualité donnée de modèle de préférences, les simulations d'habitat seront d'autant plus pertinentes et exploitables à l'échelle locale (microhabitat) que la représentation de la topographie (modèle numérique de terrain) sera fine. Dans l'étude actuelle le nombre de profils levés (1 tous les 120 m en moyenne) et leur simplification afin d'obtenir des temps de calcul acceptables ne sont pas compatibles avec l'obtention de résultats précis à l'échelle du microhabitat pour les poissons ou les invertébrés. **Les courbes de SPU relatives très semblables dans les deux stations sont certainement le résultat d'une combinaison de facteurs différents entre les stations** : surface en eau importante avec une valeur d'habitat faible à moyenne pour la station aval, et l'inverse pour la station amont. La remontée de la courbe de SPU relative pour les juvéniles dans la station aval est due à la mise en eau régulière de certains habitats latéraux jusqu'à $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

L'utilisation des courbes de préférence de Mallet et al. (2000) se justifie aisément du fait qu'elles ont été développées sur ce secteur de la rivière d'Ain (chenal principal et bras secondaire ouest à hauteur de Mollon). Ces courbes sont le meilleur modèle de préférence disponible pour l'ombre commun dans l'Ain à l'heure actuelle. Cependant, compte tenu du faible nombre de campagnes d'échantillonnage de la sélection de l'habitat par l'ombre commun, les courbes de préférences de Mallet et al. (2000) sont à utiliser avec de GRANDES précautions. Par exemple, les gammes de profondeur et de vitesse présentes dans le milieu à $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sont sans doute plus larges que celles échantillonnées par Mallet et al. (2000) et de ce fait les simulations d'habitat à très fort débit (pour le moment il est difficile d'évaluer précisément un seuil de débit) sont à analyser avec beaucoup de précautions.

L'interprétation des courbes de SPU en fonction du débit (Figure 24) ne peut aussi se faire qu'à la lumière d'autres résultats, tels que les cartographies de VH (Figures 22 et 23) ou encore l'hydrologie de la rivière. Cette vision est cependant trop statique par rapport aux fortes variations horaires du débit que peuvent générer les éclusées énergétiques. Ainsi, ce que ne disent pas les résultats de la méthode classique, ce qu'ils ne permettent pas de quantifier, c'est la variabilité de la disponibilité en habitat dans le temps et dans l'espace. Pour visualiser et quantifier ce phénomène non stationnaire une approche plus dynamique est nécessaire.

Dans l'exemple de la station-MdG, la disponibilité en hauteur d'eau et en vitesse de courant est très variable dans le temps et dans l'espace (e.g. semaine 2-8 mars 2009 ; Figure 27). Les habitats marginaux (e.g. intérieurs de méandres) ou les bras secondaires et annexes fluviales sont les habitats qui présentent le plus de variabilité temporelle des conditions hydrauliques. Ce sont aussi des habitats utilisés par beaucoup de taxons, soit en tant

qu'habitat de croissance (e.g. alevins) soit en tant que refuges hydrauliques, notamment par les jeunes stades d'ombre commun (Gaudin et Sempeski, 2001) et ces variations aussi fortes que fréquentes peuvent représenter un stress important pour ces individus. Notons ici qu'il est aussi possible de faire les mêmes types d'analyses avec la valeur d'habitat à conditions que les modèles de préférences utilisés soient compatibles avec les gammes de conditions hydrauliques rencontrées (ici nous nous sommes limités aux conditions hydrauliques). Cette approche en mode non stationnaire (par opposition aux visualisations statiques de l'approche classique) est donc très pertinente pour l'évaluation des changements de conditions hydrauliques et d'habitat en fonction des variations infra-journalières du débit.

L'utilisation d'une modélisation hydrodynamique en 2D, basée sur un modèle numérique de terrain assez fin (compatible avec l'échelle du microhabitat) rend possible la visualisation mais aussi la quantification des risques d'assèchement ou des changements significatifs de conditions hydrauliques entre différents scénarios de fonctionnement par éclusées (e.g. semaine 2007 versus semaine 2009 dans notre étude). L'outil de modélisation de l'habitat peut ainsi évaluer le degré de dangerosité pour les poissons ou les invertébrés de différents modes de gestion par éclusées, et ce dans différents contextes géomorphologiques (Person et al., 2014). Avec une modélisation en 2D, plus précise localement (échelle du microhabitat), il est possible d'estimer des vitesses de déplacement d'habitats favorables et de mieux évaluer les risques encourus par les peuplements aquatiques lors de fortes montées ou lors de fortes baisses de débit, liées par exemple à la gestion par éclusées (Courret, 2014).

Ainsi, dans le cadre de prochaines études, il serait très pertinent de décrire le plus précisément possible, notamment au niveau des berges et des zones présentant des abris ou des contre-courants, grâce à une modélisation hydrodynamique en 2D, la variabilité spatio-temporelle des conditions d'habitat pour les poissons et les invertébrés en réalisant en parallèle des études de type comportementales pour évaluer les réponses de ces organismes à cette variabilité de la disponibilité en habitat. L'intérêt de la modélisation hydrodynamique en 2D est d'offrir la possibilité d'intégrer l'hétérogénéité de l'habitat à l'échelle des individus (microhabitat ; cf. Hauer et al., 2014).

3.3 Approche spatio-temporelle des anomalies thermiques

3.3.1 Matériel et méthodes

Un total de sept vols a été effectué sur la basse vallée de l'Ain. Un ULM a été utilisé pour la première acquisition alors que les autres campagnes ont été réalisées avec un hélicoptère. Pour cartographier la température, des caméras thermiques ont été utilisées. Elles peuvent détecter des différences de température de 0.1°C au sein d'une image. Pour l'étude sur les anomalies thermiques, uniquement les campagnes estivales de 2010, 2011 et 2014 sont utilisées. Les conditions météorologiques et hydrologiques sont relativement similaires. Les débits sont d'environ $14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ce qui permet de bien détecter les anomalies.

Les images thermiques ont été géoréférencées à l'aide des photos aériennes de la BD ORTHO® (IGN). La résolution spatiale moyenne varie entre 0,60 m et 1,50 m pour les trois campagnes. Une méthode automatique a été mise en place afin de détecter les anomalies thermiques (= zones montrant une température d'au moins $0,5^{\circ}\text{C}$ inférieure à celle de la rivière). Lors des vols, la rivière à Pont d'Ain ($20\text{-}22^{\circ}\text{C}$) présentait un fort contraste thermique avec les eaux souterraines, qui avaient une température d'environ $11\text{-}13^{\circ}\text{C}$ (mesurée par piézomètres dans les bras morts latéraux). Les anomalies thermiques identifiées automatiquement ont été vérifiées par photo-interprétation à partir de photos aériennes.

Parallèlement aux trois vols, des enregistreurs de température VEMCO Minilog (précision de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ entre -5°C et 35°C) ont mesuré de la température de l'eau in situ. Certains dispositifs ont été placés au fond du lit, sur les bords du cours d'eau, dans des zones où l'écoulement est turbulent. D'autres dispositifs ont été placés dans des bras latéraux où l'écoulement est faible. Les données horaires des points de mesures d'EDF ont également été utilisées pour la comparaison avec les images. Même si la précision absolue moyenne des données est de $2,6 \pm 1,2^{\circ}\text{C}$, les régressions linéaires entre T_{image} et $T_{\text{in situ}}$ sont statistiquement significatives ($p\text{-values} < 0,01$). Les coefficients de détermination (R^2) indiquent également de bonnes corrélations.

3.3.2 Résultats

Dans la plupart des cas, les anomalies thermiques sont froides car elles sont alimentées par des eaux souterraines. Quatre types d'anomalies ont été observés : les bras latéraux froids, les résurgences, les remontées hyporhéiques et les panaches d'affluents (Figure 30). Les bras latéraux froids peuvent être d'anciens chenaux résultant d'un recouplement de méandres, ou

des basses de convexités. Les résurgences sont situées directement dans le cours d'eau, sur ses bords. Elles sont générées par les entrées froides d'eaux souterraines à travers les berges de la rivière. Les remontées hyporhéiques se produisent à l'extrémité aval de bancs de galets. Elles résultent d'écoulements superficiels à travers les alluvions sous les bancs (zone hyporhéique). Enfin, les panaches des affluents sont simplement générés par les affluents froids confluant dans l'Ain.

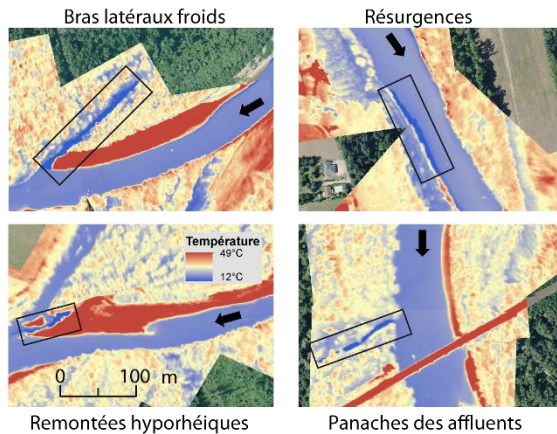


Figure 30 : Les quatre types d'anomalies thermiques observés dans la basse vallée de l'Ain.

Afin de décrire la variabilité longitudinale des anomalies thermiques le long de la rivière, toutes les anomalies observées au cours des trois campagnes ont été agrégées (Figure 31).

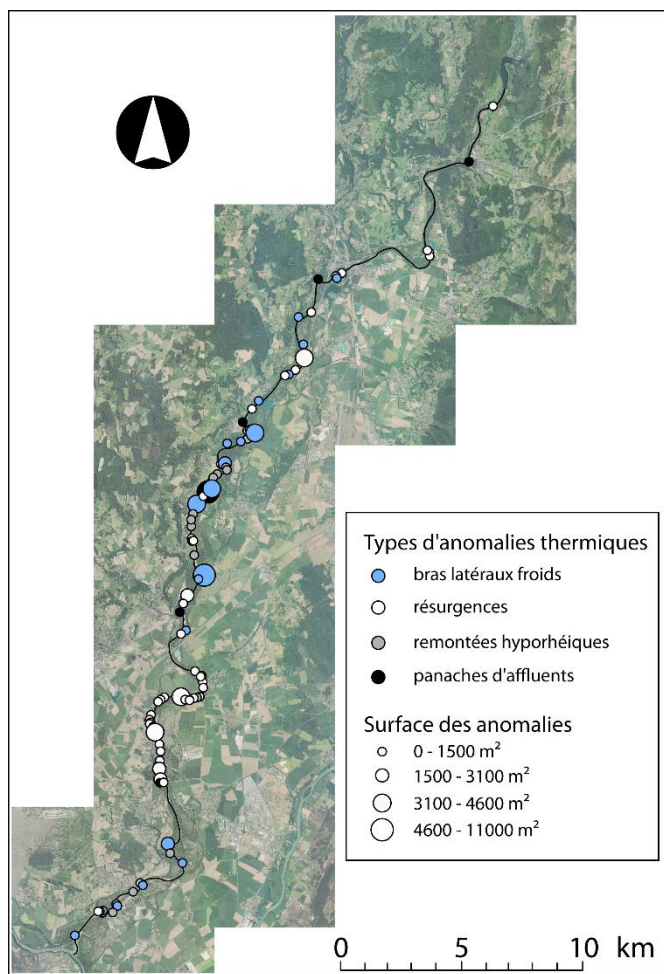


Figure 31 : Anomalies thermiques observées le long de la basse vallée de l'Ain.

La distribution longitudinale des anomalies a été comparée à la présence de bancs de galets, la surface de la bande active et la largeur du fond de vallée (Figure 32). Les remontées hyporhéiques (Figure 32d) sont localisées dans des sections montrant de nombreux bancs de galets (Figure 32e) et une bande active bien développée (Figure 32f), par exemple les km 25 et 30 ou vers le km 50. Une corrélation positive significative a été observée entre la présence de remontées hyporhéiques et les surfaces de bancs de galets ainsi que les surfaces de bande active de 2009. Les bras latéraux froids montrent une distribution relativement semblable. Ils sont situés dans deux sections : entre les km 13 et 34 et entre les km 44 et 54. Ces sections présentent d'importantes surfaces de bancs de galets et un fond de vallée particulièrement large (jusqu'à 3,7 km). Une corrélation positive significative a été observée entre la présence de ces bras latéraux froids et plusieurs paramètres : les surfaces de bancs de galets des 1945 et 2009, les surfaces de bande actives de 1945 et la largeur du fond de vallée.

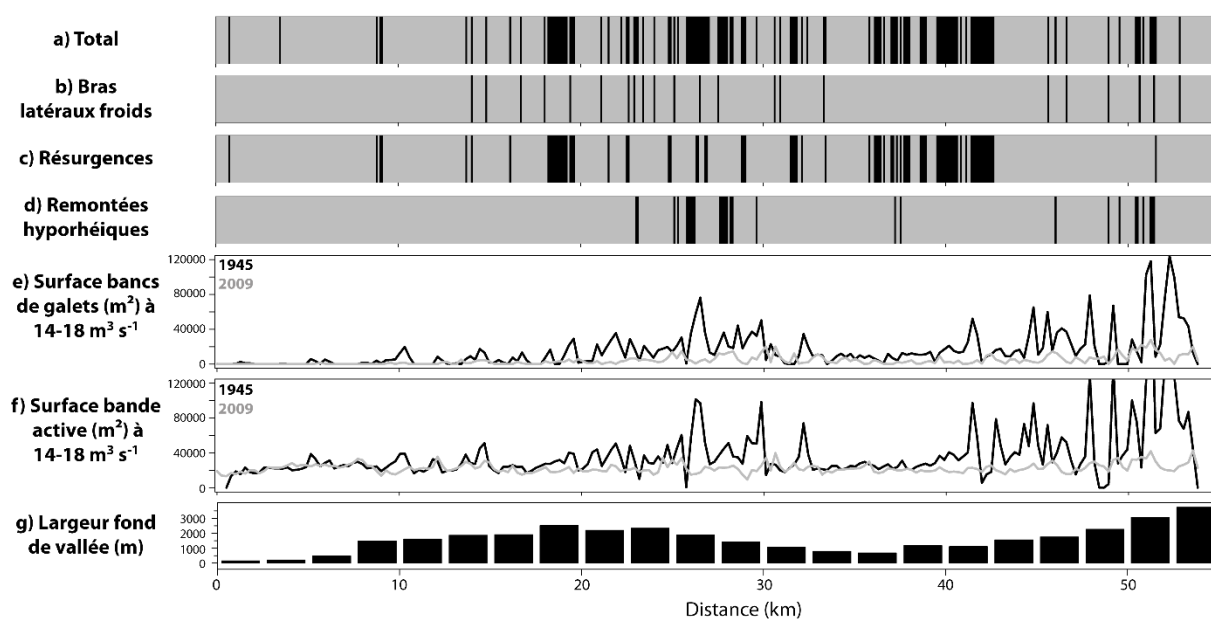


Figure 32 : Anomalies thermiques et indicateurs géomorphologiques le long de la basse vallée de l'Ain. Le noir indique les segments (100 m de long) présentant au moins une anomalie. Le gris représente l'absence d'anomalie.

La répartition longitudinale des résurgences (Figure 32c) est différente. Ces dernières sont distribuées de manière plus homogène le long de la rivière, bien que des densités très élevées de ce type d'anomalies soient observées vers les km 19 et 40. Aucune relation claire entre la présence de résurgences et les surfaces de bancs de galets ou la largeur du fond de vallée n'a été identifiée. Néanmoins, une corrélation négative significative entre la présence de résurgences et les surfaces de bandes actives de 2009 a été observée. Cela indique que les résurgences sont plutôt situées dans des secteurs assez étroits.

Le nombre d'anomalies thermiques et leur surface varient entre les années en relation avec le niveau de nappe. Le niveau de nappe était le plus élevé pour la campagne de 2014, suivie de la campagne 2010 et la campagne de 2011. Le nombre d'anomalies thermiques augmente avec le niveau de nappe (Figure 33a).

Cette relation est particulièrement claire pour les résurgences et les remontées hyporhéiques. Pour les bras latéraux froids, la tendance est différente : peu d'anomalies (8) sont observées en 2011 (8 patches), mais le même nombre est observé en 2010 et 2014 (10). Les panaches d'affluent ne montrent presque aucun changement. En ce qui concerne l'extension spatiale, les anomalies montrent une variabilité temporelle relativement similaire (Figure 33b). Pour les résurgences et les remontées hyporhéiques, des surfaces plus importantes ont été observées en 2014, puis en 2010, et en 2011. Les panaches d'affluent

montrent la même tendance. En revanche, les bras latéraux froids sont plus étendus spatialement 2010, puis en 2014, et en 2011.

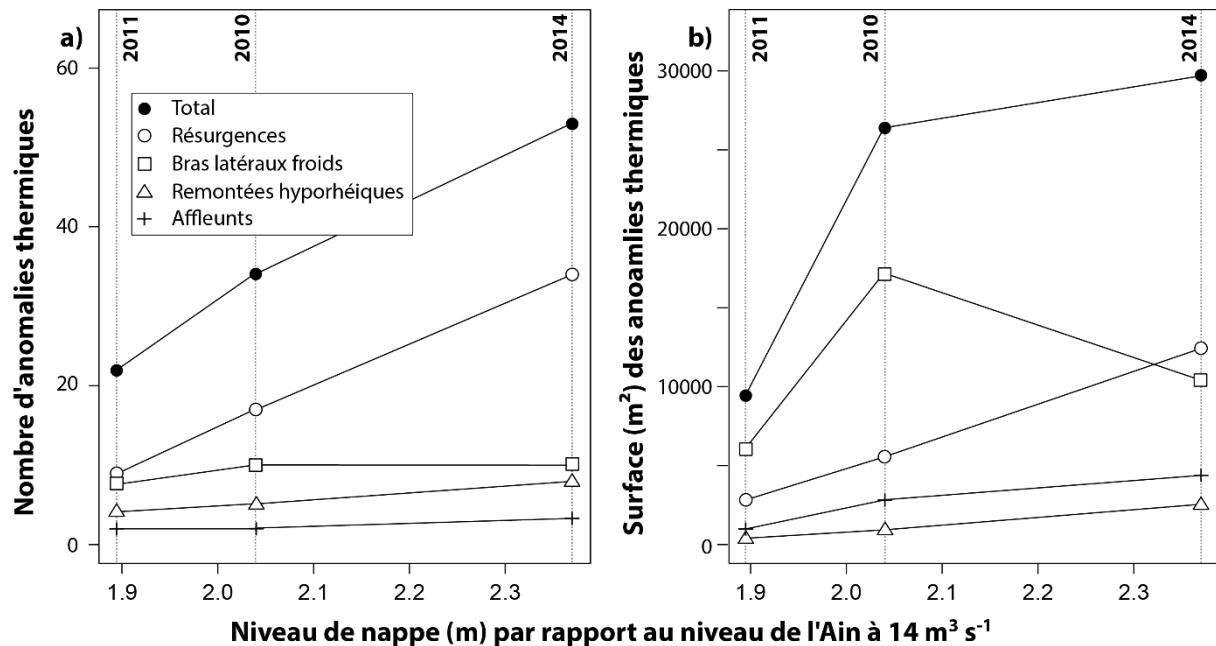


Figure 33 : Relations entre le nombre (a) et la surface (b) des anomalies thermiques et le niveau de nappe. Le niveau de nappe correspond au niveau moyen à Saint-Maurice-de-Rémens et Chazey-sur-Ain par rapport au niveau de la rivière à 14 m³ s⁻¹. Voir la Figure 2.1 pour l'emplacement des stations. Les données d'altitude de la rivière proviennent de Naudet et al. (2014).

3.3.3 Conclusions et principales recommandations

Les résultats montrent que le nombre d'anomalies thermiques est lié au niveau de nappe. Il est ainsi possible d'envisager un suivi du niveau de nappe pour pouvoir anticiper les impacts écologiques d'un événement estival particulièrement intense. Des données sont notamment disponibles aux stations piézométriques de Saint-Maurice-de-Rémens et de Chazey-sur-Ain. A défaut, il est également possible de suivre le débit sur les six derniers mois. En effet, nous avons observé que les années présentant peu d'anomalies thermiques en été étaient caractérisées par un débit plus faible au printemps (Wawrzyniak et al., 2016).

La cartographie des anomalies thermiques pourrait permettre de cibler des zones à préserver. Il serait judicieux de préserver les secteurs présentant de nombreuses anomalies thermiques mais aussi ceux où la diversité des types d'anomalies (résurgences, bras latéraux froids, remontées hyporhéiques) est importante. **La préservation d'un transport solide**

permettant de favoriser ces entités morphologiques où les échanges sont importants est donc dans ce cadre un enjeu opérationnel important.

Enfin, tenir compte de la stabilité temporelle des anomalies pourrait également être pertinent. En effet, nos résultats ont montré que certaines anomalies étaient particulièrement stables au cours de temps (Wawrzyniak et al., 2016). C'est notamment le cas de plusieurs bras morts.

Au-delà de la seule question de la préservation, il est aussi possible d'identifier des secteurs sans anomalies dans une optique de restauration. Des actions de restauration d'anomalies thermiques pourraient être proposées dans le plan de restauration de la plaine alluviale et de recharge sédimentaire. **Ces actions permettraient de disposer de tels habitats dans des secteurs qui en manquent, comme c'est par exemple le cas dans le secteur Varambon-Priay. Là encore la question de la recharge sédimentaire est posée pour augmenter les échanges hyporhéiques.**

3.4 Effet de la nappe et du couvert végétal sur la température de l'Ain en basses eaux estivales

Pour évaluer les effets de la végétation et des apports phréatiques sur la température de l'Ain, trois modélisations ont été effectuées : en tenant compte de la végétation et des apports phréatiques, en tenant compte uniquement de la végétation, et en ne tenant compte ni de la végétation ni des apports phréatiques. Deux périodes de cinq jours ont été retenues (du 28/07/2010 au 01/08/2010 et du 26/06/2011 au 30/06/2011). Elles correspondent aux acquisitions thermiques estivales de 2010 et 2011.

3.4.1 Matériel et méthodes

Dans cette étude, la température horaire de l'Ain est modélisée en 1D sur une section de 21 km entre Pont d'Ain et Chazey à l'aide d'un modèle hydro-thermique (Figure 34).

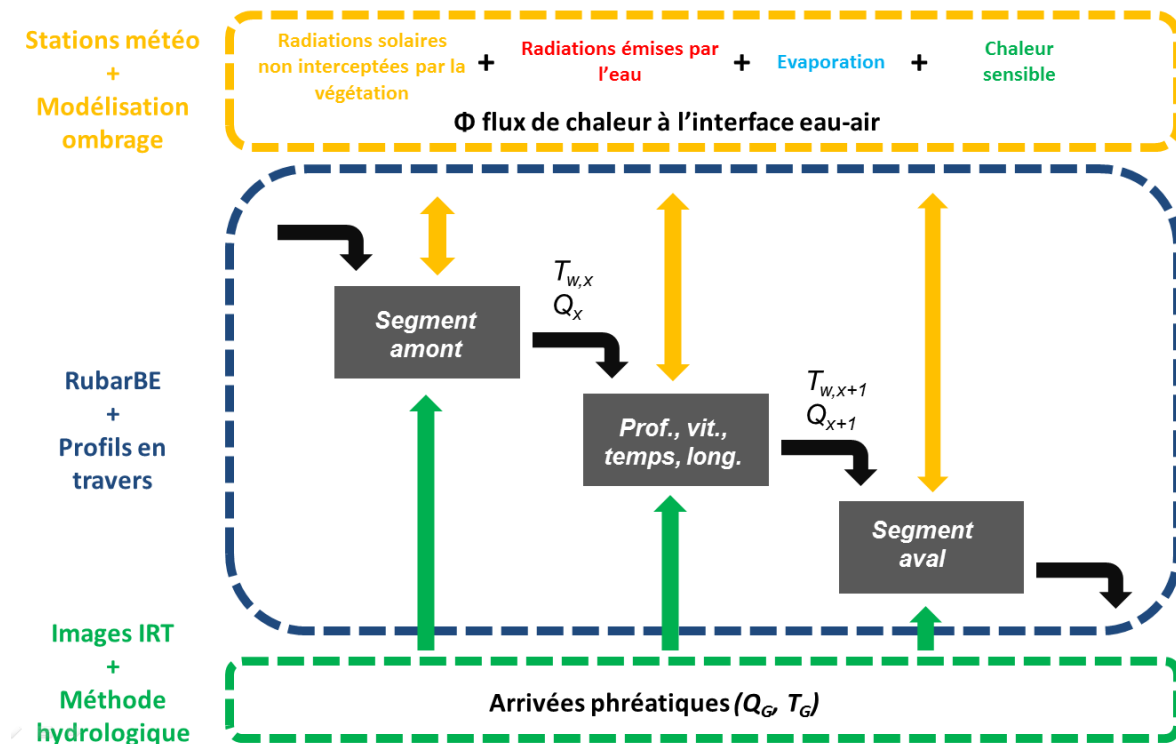


Figure 34 : Modèle hydro-thermique. La température de sortie d'un segment ($T_{w,x+1}$) dépend des propriétés hydrauliques du segments, des flux de chaleur à l'interface eau-air (Φ), des apports souterrains (caractérisés par leur température T_G et leur débit Q_G), du débit de l'Ain (Q_x) et de la température arrivant du segment amont ($T_{w,x}$).

La rivière a été découpée en segments caractérisés par leur largeur (W), section mouillée (A), vitesse (v), temps de résidence (t), et longueur (L). Ces segments sont ceux du modèle hydraulique de Naudet et al. (2014). La température en amont est connue (mesure de la station de Pont d'Ain). Pour chaque segment, la température va changer (Figure 34) en fonction des flux de chaleur et des caractéristiques du segment (par exemple, un segment peu profond sera plus sensible qu'un segment profond). Les différents flux de chaleur ont été calculés à partir des données horaires des stations météorologiques d'Ambérieu-en-Bugey et Macon. L'interception du rayonnement solaire par la végétation a été prise en compte. Pour cela, le modèle d'ombrage développé par Bailly (2014) a été utilisé (Figure 35).

Les effets des apports souterrains sur la température des segments ont également été pris en compte (Figure 34). Leur débit a été estimé par une méthode hydrologique indirecte (différente entre les débits sortant (aval) et entrant (amont + affluents)). Les images thermiques ont été utilisées pour déterminer la localisation des apports. Enfin, leurs températures ont été mesurées par des thermomètres placés dans la nappe alluviale et dans des bras morts froids.

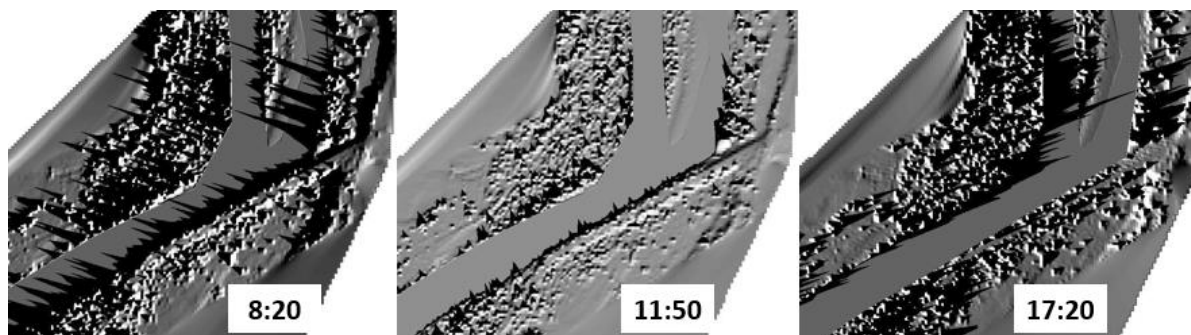


Figure 35 : Résultats du modèle d'ombrage pour le mois de Juin (Bailly, 2014).

3.4.2 Résultats

La modélisation prenant en compte la végétation et les apports phréatiques a été comparée aux mesures *in situ* (Figure 36). La précision des résultats - environ 0,5°C - est comparable aux études précédentes de la littérature.

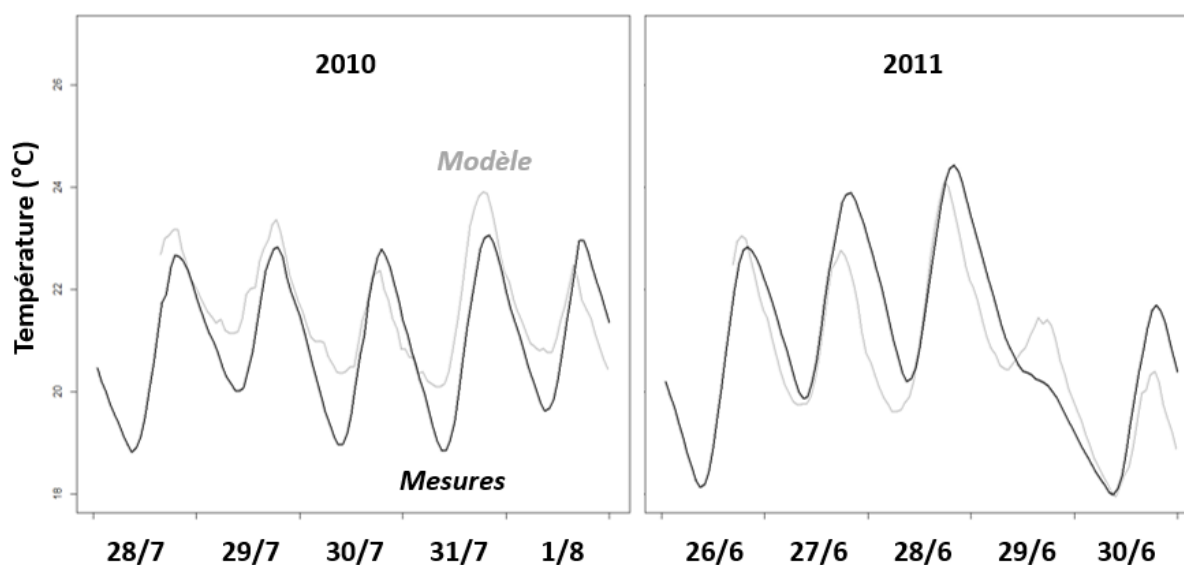


Figure 36 : Températures modélisées (en gris) et mesurées (en noir) à Chazey-sur-Ain (extrémité aval de la section étudiée).

La comparaison entre les courbes grises et vertes (Figure 37) permet de visualiser les effets de la végétation sur la température du cours d'eau. De manière générale, en interceptant une partie du rayonnement solaire, la végétation entraîne une diminution de la température de l'Ain : 0,4°C en moyenne pour 2010 et 0,45°C en moyenne pour 2011. L'effet de la végétation est variable au cours de la journée (il varie par exemple entre 0 et 0,9°C pour 2011). Il est évidemment nul la nuit. A l'inverse, la diminution de température est plus

importante en fin de journée lorsque la température de l'Ain est à son maximum. Des différences allant jusqu'à 0,9°C sont modélisées. A noter également que la végétation a pour effet de retarder l'augmentation de température dans le temps.

La comparaison entre les courbes bleues et vertes (Figure 37) permet de visualiser l'effet des apports phréatiques. Cet effet est plus variable temporellement que celui de la végétation. En 2010, le débit phréatique est négligeable : il est estimé à 2% du débit de l'Ain. L'effet sur la température est très faible (diminution de 0,1°C). Inversement, lorsque le débit phréatique est plus conséquent comme en 2011 où il représente environ 16% du débit de l'Ain, une diminution de température de 0,7°C est modélisée. A noter qu'à l'échelle journalière (différence entre le jour et la nuit), l'effet des apports phréatiques est moins variable que celui de la végétation. Par exemple, pour 2011, il varie entre 0,4 et 0,85°C.

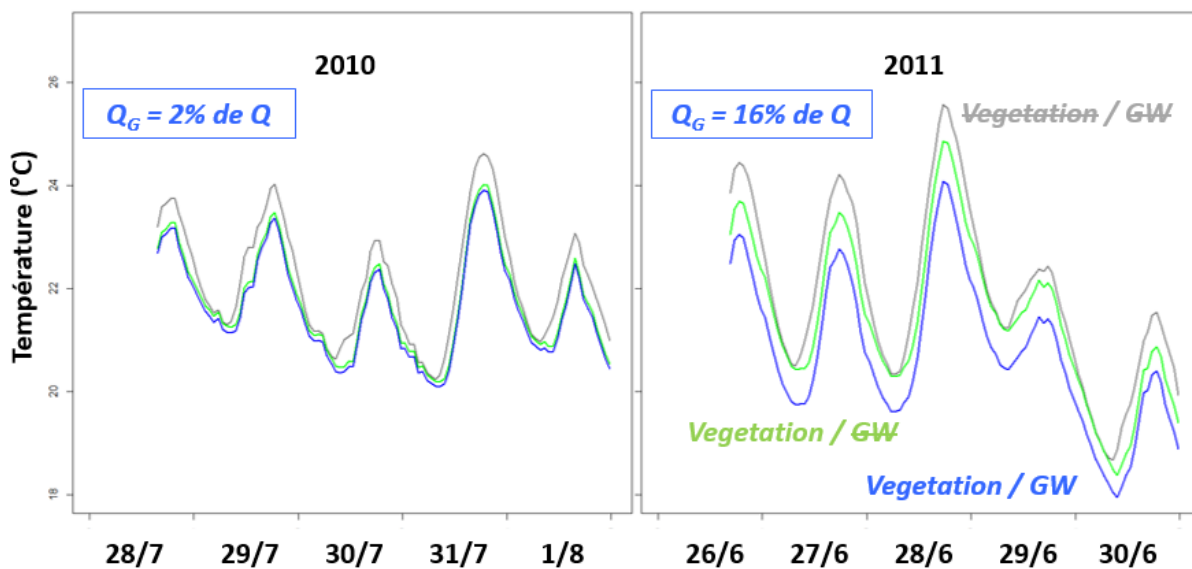


Figure 37 : Températures modélisées à Chazey-sur-Ain. Trois modélisations sont représentées : en tenant compte de la végétation et des apports phréatiques (en bleu), en tenant compte uniquement de la végétation (en vert), et en ne tenant compte ni de la végétation, ni des apports phréatiques (en gris).

3.4.3 Conclusions et recommandations

Les effets des apports phréatiques et de la végétation peuvent paraître faibles. Ils sont cependant non négligeables au regard de la variation de température observée entre l'aval et l'amont de la zone d'étude (1-2°C).

Les évolutions de la rivière au cours des dernières décennies ont pour certaines permis de limiter l'augmentation thermique estivale. Le couvert par la canopée est sans doute plus

important aujourd'hui car la forêt riveraine est plus développée et le cours d'eau plus étroit. Les apports du réservoir de Vouglans sont également plus froids que ceux qu'apporterait le bassin versant pendant ces périodes en l'absence de l'aménagement. Malgré tout, nous avons vu que la dynamique fluviale de la basse vallée joue un grand rôle dans la maximisation des échanges verticaux que ce soit en termes d'apports hyporhéiques ou latéraux *via* les annexes fluviales. Dans ce contexte, et comme indiqué précédemment **la préservation du transport solide et d'une dynamique latérale active est un des éléments importants pour maintenir ces échanges et ne pas exacerber encore la situation thermique estivale actuelle.**

4 Conclusions générales

Les analyses morphologiques effectuées dans le secteur de la haute vallée de l'Ain ont montré qu'un flux sédimentaire est observé à l'amont du barrage de Blye. Depuis la mise en place de cet ouvrage, on a constaté une disparition progressive des bancs de galets, disparition qui s'exprime de l'amont vers l'aval, ce qui est typique d'un blocage sédimentaire. Ce travail montre ainsi assez bien l'effet de la chaîne de barrages sur le transfert sédimentaire aval et les changements morphologiques qui en résultent.

Les analyses morphologiques effectuées dans le chenal de la basse vallée soulignent que le fond du lit est localement très grossier et qu'il y a une disparition progressive des alternances seuil-mouille, et notamment des seuils. On observe également que la mobilité des particules est significativement plus importante dans le secteur encore dynamique, comparativement au secteur pavé qui a tendance à piéger dans les interstices du fond du lit cette charge en transit. Il semble que ces modifications morphologiques s'accompagnent d'une modification des échanges entre la nappe et le chenal, et donc d'une modification des capacités de pondération thermique du système fluvial. En effet l'étude des anomalies thermiques a montré que celles-ci étaient très liées à un transport solide actif à l'origine de formes fluviales diversifiées dans le lit, et à une dynamique latérale active à l'origine d'annexes jouant un rôle important dans les échanges entre la nappe et le chenal. En revanche, il apparaît que les courbes de préférendum d'habitat établies pour l'ombre commun en termes de hauteur d'eau et de vitesse sont très semblables entre le tronçon pavé et le tronçon dynamique malgré le fait que ces deux tronçons présentent des morphologies différentes. Le modèle ne prend actuellement pas en compte ni les différences de substrat, ni les abris et la présence d'habitats périfluviaux qui sont importants pour certains stades de développement.

Le suivi par traçage RFID a permis de mesurer les distances de mobilité des particules du lit, distances qui donnent ainsi des ordres de grandeur importants pour programmer les actions de recharge. Nous disposons en outre d'un modèle hydrodynamique 2D qui permet d'identifier les sites les plus intéressants pour des recharges sédimentaires (c'est-à-dire ceux pour lesquels la mise en mouvement des sédiments est la plus probable pour des événements de crue courants) et de mesurer le transport solide selon différents scénarios opérationnels et pour différentes granulométries de projet. Ce modèle 2D constitue également un outil important pour les scénarios visant à évaluer la disponibilité en habitat pour les poissons et les invertébrés en intégrant la variabilité morphologique du lit. Enfin l'étude des anomalies thermiques a permis de montrer qu'il était possible d'anticiper les fortes contraintes estivales quelques mois à l'avance en suivant les niveaux piézométriques.

5 Bibliographie

- Alber A., 2012. *Etude multi-scalaire de la dynamique latérale des tronçons fluviaux. Application au bassin rhodanien. Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon 2 (262 pp.)*.
- Arnaud F., Piégay H., Vaudor L., Fantino G., Bultingaire L., 2015a. *Technical specifications of low-frequency radio identification bedload tracking from field experiments: differences in antennas, tags and operators. Geomorphology 238 : 37-46.*
- Arnaud F., Staentzel C., Beisel J.N., Piégay H., Grac C., Trémolières M., Combroux I., Schmitt L., Barillier A., Garnier A., 2015b. *Geomorphic and ecological monitoring of an experimental sediment reintroduction into the Rhine River downstream of the Kembs dam. International Conference on Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers (ISRivers), 22-26 juin 2015, Lyon, France, 3 p.*
- Bailly S., 2014. *Restitution des zones d'ombre du chenal à l'échelle de la basse vallée de l'Ain à partir de données Lidar pour caractériser les zones de refuge piscicole. Mémoire de Master 1, Université Lumière Lyon 2 (107 pp.)*.
- Bichet V., Campy M., 2009. *Montagnes du Jura - Géologie et paysages. Néo-Edition, Besançon (303 pp.)*.
- Capra H., Pella H., Morin J., LePichon C., Perraud C., Datry T., Secretan Y., Jouve P., Matte P., 2011. *Conséquences de l'artificialisation de l'hydrologie du Rhône sur la structuration des communautés d'invertébrés et de poissons. Rapport Final. Rapport Cemagref – Agence de l'Eau RMC (109 pp. et Annexes)*.
- Church M.A., 1972. *Baffin Island sandar: a study of Arctic fluvial processes. Geol. Survey of Canada, Bull., 216 (208 pp.)*.
- Courret D. 2014. *Caractérisation de la perturbation hydrologique induite par les régimes d'éclusées hydroélectriques et définition d'un indicateur. Réflexion sur les mesures de mitigation des impacts des éclusées sur les populations de poissons. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse.*
- DIREN, 2009. *Espace de mobilité des rivières en Franche-Comté.*
- Dolédec S., Lamouroux N., Fuchs U., Méricoux S., 2007. *Modelling the hydraulic preferences of benthic macroinvertebrates in small European streams. Freshwater Biology 52: 145–164.*
- Drissi N., 2014. *Caractérisation diachronique de la morphologie de la rivière d'Ain en amont du barrage de Vouglans : géoréférencement, digitalisation, analyse spatiale et temporelle. Mémoire de Licence 3 Aménagement, Université Lyon 3 (36 pp.)*.
- Frissell C.A., Liss W.J., Warren C.E., Hurley M.D., 1986. *A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. Environmental Management 10: 199-214.*
- Gaudin P., Sempeski P., 2001. *The role of river bank habitat in the early life of fish: the example of grayling, Thymallus thymillus. Ecohydrology & Hydrobiology 1: 203-208.*
- Gouhier T., 2014. *Biwavelet: Conduct Univariate and Bivariate Wavelet Analyses. R-CRAN.*

- Hauer C., Unfer G., Holzzapfel P., Haimann M., Habersack H., 2014. Impact of channel bar form and grain size variability on estimated stranding risk of juvenile brown trout during hydropeaking. *Earth Surface Processes and Landforms* 39: 1622–1641.
- Hubert P., 2000. The segmentation procedure as a tool for discrete modeling of hydrometeorological regimes. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 14 (4-5): 297-304.
- Kehagias A., Nidelkou E., Petridis. V., 2005. A dynamic programming segmentation procedure for hydrological and environmental time series. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 20 (1-2): 77-94.
- Lamouroux N., Capra H., Pouilly M., Souchon Y., 1999. Fish habitat preferences in large streams of southern France. *Freshwater Biology* 42: 673-687.
- Lamouroux N., Augeard B., Baran B., Capra H., Le Coarer Y., Girard V., Gouraud V., Navarro L., Prost O., Sagnes P., Sauquet S., Tissot L. Débits écologiques : la place des modèles d'habitat dans une démarche intégrée. *Soumis à Hydroécologie Appliquée*.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P., 1964. *Fluvial Processes in Geomorphology*. San Francisco, Freeman (522 pp.).
- Mérigoux S., Lamouroux N., Olivier J.M., Dolédec S., 2009. Invertebrate hydraulic preferences and predicted impacts of changes in discharge in a large river. *Freshwater Biology* 54: 1343–1356.
- Naudet, G., Le Coz, J., Camenen B., Paquier A., 2014. *Plan de gestion sédimentaire de la basse vallée de l'Ain : Modélisation numérique 1D des scénarios de redynamisation sédimentaire*. IRSTEA (40 pp.).
- Paquier A., 2013a. *Logiciels RubarBE 3 – RubarBE - Notice d'emploi*.
- Paquier A., 2013b. *Logiciel Rubar 20 - Notice d'emploi*.
- Pégot Augier T., 2012. *Caractérisation du patron granulométrique du lit du Rhône par imagerie. Mémoire de fin d'études d'ingénieur CPE* (56 pp.).
- Person E., Bieri M., Peter A., Schleiss A.J., 2014. Mitigation measures for fish habitat improvement in Alpine rivers affected by hydropower operations. *Ecohydrology* 7: 580–599.
- Richards K.S., 1976. The morphology of riffle-pool sequences. *Earth Surf. Process.* 1: 71-88.
- Rollet A.J., 2007. *Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. Thèse de Doctorat, Université Jean Moulin Lyon 3* (305 pp.).
- Rollet A.J., MacVicar B., Piégay H., Roy A., 2008. L'utilisation de transpondeurs passifs pour l'estimation du transport sédimentaire: premiers retours d'expérience. *La Houille Blanche*, 4: 110-116.
- Rollet, A.J., Piégay, H., Dufour, S., Bornette, G., Persat, H., 2013. Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river bed downstream of dams in restoration perspectives: application of a multicriteria, hierarchical and spatially explicit diagnosis. *River Research and Applications*, doi: 10.1002/rra.2689.
- Schneider J., Turowski J.M., Rickenmann D., Hegglin R., Arrigo S., Mao L., Kirchner J.W., 2014.

Journal of Geophysical Research : Earth Surface, 19: 533-549.

Segret P.Y., 2015. *Caractérisation granulométrique du lit par imagerie immergée : traitement des images, analyses de résultats et réflexions méthodologiques*. Mémoire de Licence 3 Aménagement, Université Lyon 3 (46 pp.).

Tissot C., 2014. *Caractérisation granulométrique des lits fluviaux par imagerie : développements méthodologiques sur deux tronçons de la rivière d'Ain (amont de Pont-de-Poitte et aval de Pont d'Ain)*. Mémoire de Master 2 Interface Nature Société, Université Lyon 3 (87 pp.).

Torrence C., Compo G.P., 1998. *A Practical Guide to Wavelet Analysis*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (1): 61-78.

Vanzo D., Zolezzi G., Siviglia A., 2015. *Eco-hydraulic modeling of the interactions between hydropeaking and river morphology*. *Ecohydrology*. doi:10.1002/eco.1647.

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.

Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H., soumis. *Are in-channel features and fluvial styles really nested? Multi-scale remote sensing perspectives of the lower Drôme reach (France)*.

Wyrick J.R., Pasternack G.B., 2014. *Geospatial organization of fluvial landforms in a gravel-cobble river: Beyond the riffle-pool couplet*. *Geomorphology* 213: 48-65.

6 Table des figures

Figure 1A : Evolution des largeurs de chenal en eau (n = 28 segments de 250 m de long communs aux différentes séries d'images aériennes). 1B : Evolution de la superficie totale des bancs.....	7
Figure 2 : Cumul des superficies de bancs de l'amont vers l'aval.	8
Figure 3 : Surfaces érodées, végétalisées et stables entre 1953 et 2010.....	8
Figure 4 : Dispositif d'acquisitions photographiques sous l'eau.....	10
Figure 5 : Procédure de traitement du logiciel Analyz.	10
Figure 6 : Tracé des axes b des dix plus grosses particules et mesure des longueurs d'axes.....	11
Figure 7 : Evolution granulométrique longitudinale du fonds du lit de l'Ain entre Pont d'Ain et Mollon.....	12
Figure 8 : Chronologie du suivi RFID de Gévrieux et Varambon (2005-2013) : dates de déploiement (flèches) et de recherche (étoiles) des PIT tags (station hydrométrique de Chazey-sur-Ain).	14
Figure 9 : Position des traceurs retrouvés (A) à Gévrieux ; (B) à Varambon.	15
Figure 10 : Position des traceurs retrouvés à Terre Soldat : (A) en septembre 2014 ; (B) en juillet 2015 (en jaune : traces GPS de prospection).....	16
Tableau 1 : Statistiques de déplacement des traceurs.....	17
Figure 11 : Distances de déplacement des traceurs en fonction de la puissance spécifique : les résultats de l'Ain sont superposés aux résultats de Schneider et al. (2014). Les résultats obtenus sur le Rhin (Arnaud et al., 2015b) sont montrés pour comparaison.	17
Figure 12 : Localisation du transport solide modélisé en 1D.....	20
Figure 13 : Profil en long du transport solide modélisé avec le modèle 1D pour une granulométrie grossière.	21
.....	23
Figure 14 : Bathymétrie, surface libre et paramètre de Shields au droit du site d'injection.	23
Figure 15 : Signaux radio-bathymétriques standardisés du tronçon étudié ; localisation en arrière-plan des faciès seuils et mouilles recensés par photo-interprétation.	26
Figure 16 : Interdistances cumulées des faciès seuil-mouille en 1963 et en 2012.	26

Figure 17 : Spectre de décomposition en ondelettes continues des signaux bathymétries de 1963 et 2012.....	27
Figure 18 : Diagrammes en boîte de la répartition des inter-distances par sous-trançons homogènes, par année d'observation et par type de détection (photo-interprétation versus mesure).	28
Figure 19 : Segmentation des signaux bathymétriques de 1963 et 2012 décomposés en ondelettes discrètes : Détail de niveau 5.....	28
Figure 20 : Position et référence des cinq profils en travers choisis dans la station Varambon_Vorgey (tronçon amont, à gauche) et dans la station Mollon_Chazey (tronçon aval, à droite).	30
Figure 21 : chronique de débit au pas de temps variable à Pont-de-Chazey du 3-9 sept 2007 (en haut à gauche) et du 2-8 mars 2009 (en bas à gauche; données issues de la Banque Hydro). A droite, cartographie générale de la station- MdG (Méandre de Gévrieux) étudiée pour l'approche dynamique avec la modélisation hydrodynamique en 2D.	33
Figure 22 : Evolution du niveau d'eau (Altitude en m) sur trois des cinq profils en travers pour 20, 40, 80, 125, 175 et 250 m ³ .s ⁻¹ (niveau d'eau évoluant de bas en haut) de chaque station (amont à gauche et aval à droite).....	34
Figure 23 : Evolution de la surface mouillée en fonction du débit (ligne 1). Distribution (en surface par classe) de la hauteur d'eau (ligne 2 & 3) et de la vitesse (ligne 4 & 5) à 20 et 250 m ³ .s ⁻¹ . Pour la station amont (gauche) et pour la station aval (droite). <i>Noter que la barre des vitesses de courant > 1.4 m. s⁻¹ à 250 m³.s⁻¹ est tronquée.</i>	36
Figure 24 : Evolution de l'habitat disponible (SPU) pour l'ombre commun dans la station Varambon - Vorgey (haut) et dans la station Mollon - pont SNCF de Chazey (bas). L'habitat disponible est exprimé en % de la surface mouillée de chaque station à 80 m ³ .s ⁻¹ , pour les 0+ (alevins, vert), les 1+ (juvéniles, bleu) et les 2+ (adultes, rouge). Les valeurs d'habitat des cellules du maillage sont estimées à partir des courbes de préférence pour l'ombre commun de Mallet et al. (2000).....	37
Figure 25 : Cartographie de la valeur d'habitat des 1+ d'ombre commun (Courbes de préférences de Mallet et al., 2000) pour la station Varambon-Vorgey et pour 80, 150 et 250 m ³ .s ⁻¹	38
Figure 26 : Cartographie de la valeur d'habitat des 1+ d'ombre commun (Courbes de préférences de Mallet et al., 2000) pour la station Mollon - pont SNCF de Chazey et pour 80, 150 et 250 m ³ .s ⁻¹	39
Figure 27 : Coefficient de variation de la vitesse d'écoulement par cellule dans la station-MdG au cours de la semaine du 2-8 mars 2009 (modélisation pseudo-stationnaire).	41
Figure 28 : Nombre d'heures, sur l'ensemble de chaque semaine étudiée (168 heures), pendant lesquelles chaque cellule du maillage (station-MdG) était exondée (Chronique de débit à Pont de Chazey - Données Banque Hydro ; Figure 21). Résultats obtenus avec une simulation pseudo-stationnaire.	41

Figure 29 : Superposition de la chronique de débit horaire de la période 2-9 mars 2009 (noir ; échelle de gauche) et de la variabilité de la surface exondée (station-MdG) au pas de temps horaire (exprimée en % de la surface mouillée à chaque pas de temps ; vert ; échelle de droite) estimée à partir d'une simulation pseudo-stationnaire.....	42
Figure 30 : Les quatre types d'anomalies thermiques observés dans la basse vallée de l'Ain.....	46
Figure 31 : Anomalies thermiques observées le long de la basse vallée de l'Ain.....	47
Figure 32 : Anomalies thermiques et indicateurs géomorphologiques le long de la basse vallée de l'Ain. Le noir indique les segments (100 m de long) présentant au moins une anomalie. Le gris représente l'absence d'anomalie.....	48
Figure 33 : Relations entre le nombre (a) et la surface (b) des anomalies thermiques et le niveau de nappe. Le niveau de nappe correspond au niveau moyen à Saint-Maurice-de-Rémens et Chazey-sur-Ain par rapport au niveau de la rivière à 14 m3 s-1. Voir la figure 2.1 pour l'emplacement des stations. Les données d'altitude de la rivière proviennent de Naudet et al. (2014).....	49
Figure 34 : Modèle hydro-thermique. La température de sortie d'un segment ($T_{w,x+1}$) dépend des propriétés hydrauliques du segments, des flux de chaleur à l'interface eau-air (Φ), des apports souterrains (caractérisés par leur température T_G et leur débit Q_G), du débit de l'Ain (Q_x) et de la température arrivant du segment amont ($T_{w,x}$).	51
Figure 35 : Résultats du modèle d'ombrage pour le mois de Juin (Bailly, 2014).	52
Figure 36 : Températures modélisées (en gris) et mesurées (en noir) à Chazey-sur-Ain (extrémité aval de la section étudiée).	52
Figure 37 : Températures modélisées à Chazey-sur-Ain. Trois modélisations sont représentées : en tenant compte de la végétation et des apports phréatiques (en bleu), en tenant compte uniquement de la végétation (en vert), et en ne tenant compte ni de la végétation, ni des apports phréatiques (en gris)..	53