

Etude par imagerie in situ des processus biophysiques en milieu fluvial : éléments méthodologiques et applications

Veronique Benacchio

► To cite this version:

Veronique Benacchio. Etude par imagerie in situ des processus biophysiques en milieu fluvial : éléments méthodologiques et applications. Histoire. Université de Lyon, 2017. Français. NNT : 2017LYSE2056 . tel-01619134

HAL Id: tel-01619134 https://theses.hal.science/tel-01619134

Submitted on 19 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



université LUMIÈRE LYON 2

N° d'ordre NNT : 2017LYSE2056

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de

L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

École Doctorale : ED 483 Sciences sociales

Discipline : Géographie, Aménagement et Urbanisme

Soutenue publiquement le 10 juillet 2017, par :

Véronique BENACCHIO

Etude par imagerie in situ des processus biophysiques en milieu fluvial

Eléments méthodologiques et applications.

Devant le jury composé de :

Johannes STEIGER, Maître de conférences HDR, Université Clermont-Ferrand 2, Président

Flavie CERNESSON, Maître de conférences HDR, AGROPARISTECH, Rapporteure

Virginia RUIZ-VILLANUEVA, Docteur, Université de Genève, Examinatrice

Walter BARTOLDI, Docteur, Université de Trento, ExaminateurI

Hervé PIEGAY, Directeur de recherche, Ecole Normale Supérieure de Lyon, Directeur de thèse

Thomas BUFFIN-BELANGER, Professeur d'université, Université du Québec à Rimouski, Co-Directeur de thèse

Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « <u>Paternité – pas d'utilisation</u> <u>commerciale – pas de modification</u> » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.







Université Lumière Lyon 2 - Université de Lyon - CNRS - UMR 5600 EVS

Ecole doctorale 483

Etude par imagerie in situ des processus biophysiques en milieu fluvial

Eléments méthodologiques et applications

Véronique BENACCHIO

Géographie, Aménagement et Urbanisme

Sous la direction de Hervé PIEGAY (CNR UMR 5600 – EVS) et Thomas BUFFIN-BELANGER (Université du Québec à Rimouski)

Thèse présentée et soutenue publiquement le 10 juillet 2017

Composition du jury :

Walter BERTOLDI, Docteur, Università degli studi di Trento(Examinateur)Flavie CERNESSON, Maître de Conférence HDR, AgroParisTech Montpellier(Rapporteure)Virginia RUIZ-VILLANUEVA, Docteure, Université de Genève(Examinatrice)Johannes STEIGER, Maître de Conférence HDR, Université Clermont Auvergne(Rapporteure)

Résumé

Etude par imagerie in situ des processus biophysiques en milieu fluvial Eléments méthodologiques et applications

La télédétection est une technique de plus en plus utilisée dans le domaine fluvial, et si des images acquises à haute, voire très haute altitude via des vecteurs aéroportés et satellites sont traditionnellement utilisées, l'imagerie in situ (ou « imagerie de terrain ») constitue un outil complémentaire qui présente de nombreux avantages (facilité de mise en place, coûts réduits, point de vue oblique, etc.). Les possibilités de programmer les prises de vue fixes à des fréquences relativement élevées (de quelques dixièmes de secondes dans le cas de vidéos, à quelques heures par exemple) mais aussi de pouvoir observer les évènements au moment où ils surviennent, est sans commune mesure avec les contraintes associées à l'acquisition de l'imagerie « classique » (dont les plus hautes fréquences s'élèvent à quelques jours). Cela permet de produire des jeux de données conséquents, dont l'analyse automatisée est nécessaire et constitue l'un des enjeux de cette thèse. Le traitement et l'analyse de jeux de données produits sur cinq sites test français et québécois ont permis de mieux évaluer les potentialités et les limites liées à l'utilisation de l'imagerie in situ dans le cadre de l'étude des milieux fluviaux. La définition des conditions optimales d'installation des capteurs en vue de l'acquisition des données constitue la première étape d'une démarche globale, présentée sous forme de modules optionnels, à prendre en compte selon les objectifs de l'étude. L'extraction de l'information radiométrique, puis le traitement statistique du signal ont été évalués dans plusieurs situations tests. La classification orientée-objet avec apprentissage supervisé des images a notamment été expérimentée via des random forests. L'exploitation des jeux de données repose principalement sur l'analyse de séries temporelles à haute fréquence. Cette thèse expose les forces et les faiblesses de cette approche et illustre des usages potentiels pour la compréhension des dynamiques fluviales. Ainsi, l'imagerie in situ est un très bon outil pour l'étude et l'analyse des cours d'eau, car elle permet la mesure de différents types de temporalités régissant les processus biophysiques observés. Cependant, il est nécessaire d'optimiser la qualité des images produites et notamment de limiter au maximum l'angle de vue du capteur, ou la variabilité des conditions de luminosité entre clichés, afin de produire des séries temporelles pleinement exploitables.

Mots-clés : Géomorphologie fluviale ; Imagerie in situ ; Séries temporelles ; Haute fréquence ; Classification orientée-objet ; *random forest*

Abstract

Study of fluvial biophysical processes using ground imagery Methodological elements and applications

Remote sensing is more and more used in river sciences, mainly using satellite and airborne imagery. Ground imagery constitutes a complementary tool which presents numerous advantages for the study of rivers. For example, it is easy to set up; costs are limited; it allows an oblique angle; etc. It also presents the possibility to set up the triggering with very high frequency, ranging, for instance, from a few seconds to a few hours. The possibility to monitor events at the instant they occur makes ground imagery extremely advantageous compared to aerial or spatial imagery (whose highest acquisition frequency corresponds to a few days). Such frequencies produce huge datasets, which require automated analyses. This is one of the challenges addressed in this thesis. Processing and analysis of data acquired at five study sites located in France and Québec, Canada, facilitated the evaluation of ground imagery potentials, as well as its limitations with respect to the study of fluvial systems. The identification of optimal conditions to set up the cameras and to acquire images is the first step of a global approach, presented as a chain of optional modules. Each one is to be taken into account according to the objectives of the study. The extraction of radiometric information and the subsequent statistical analysis of the signal were tested in several situations. In particular, random forests were applied, as a supervised object-oriented classification method. The datasets were principally exploited using high frequency time series analyses, which allowed demonstrating strengths and weaknesses of this approach, as well as some potential applications. Ground imagery is a powerful tool to monitor fluvial systems, as it facilitates the definition of various kinds of time characteristics linked with fluvial biophysical processes. However, it is necessary to optimize the quality of the data produced. In particular, it is necessary to minimize the acquisition angle and to limit the variability of luminosity conditions between shots in order to acquire fully exploitable datasets.

Keywords: Fluvial geomorphology; Ground imagery; Time series; High frequency; Object-oriented classification; *random forest*

Remerciements

Par ces quelques pages, je souhaite remercier toutes les personnes et les organismes qui ont contribué, de près ou de loin, de manière scientifique, technique, matérielle, administrative ou financière, à la réalisation de cette thèse.

Je remercie tout particulièrement, bien sûr, mes deux directeurs : Hervé Piégay et Thomas Buffin-Bélanger, pour l'encadrement de cette thèse, ainsi que les personnes qui ont accepté de l'évaluer en tant que membres du jury : Walter Bertoldi et Virginia Ruiz-Villanueva, et en tant que rapporteurs : Flavie Cernesson et Johannes Steiger. Merci aussi aux différentes personnes ayant accepté de participer à mon comité de thèse et qui ont donc contribué à la bonne conduite de ce projet : Laure Tougne, Pascal Allemand, Jérôme Lejot, Lise Vaudor et Kristell Michel.

Merci à l'UMR 5600 – EVS, notamment aux plateformes ISIG et OMEAA, à l'Université de Lyon – Université Lumière Lyon 2 et en particulier à l'IRG, à l'ED 483, à l'ENS de Lyon, et à leurs personnels, pour l'ensemble des conditions et des aides dont j'ai bénéficié en vue du bon déroulement de ce travail. Merci à la Région Rhône-Alpes pour la bourse Explo'RA Doc dont j'ai bénéficié pendant mon parcours et merci à l'UQAR, notamment au laboratoire de recherche en géomorphologie et dynamique fluviale, pour leur accueil à cette occasion.

Merci à la CNR et en particulier à L. Pozzobon et F. Abadie, et à Météo France pour l'accès à l'ouvrage de Génissiat ainsi qu'à certaines des données exploitées dans ma thèse. Merci au SAGYRC (notamment L.E. Lecoeur) et au SBVA pour ce qui a concerné l'installation des caméras sur l'Yzeron et sur l'Ain. Merci au riverain de la rue des Riverains pour l'installation de la caméra sur le site de Sainte-Angèle. Et merci aux diverses personnes avec qui j'ai échangé à propos des terrains, des logiciels et des méthodes testés ou exploités dans le cadre de ces travaux. Je les ai contactées ou rencontrées pour demander de l'aide et des conseils et elles m'ont toujours répondu de manière bienveillante et constructive : A. Alber et L. Grospretre pour les sites de l'Ain et de l'Yzeron ; W. Bertoldi, D. Dumont, D. Bourgault et M. Rogez pour la correction des images ; K. Ouji et R. Melo pour l'utilisation de EasyCamCalib ; A. Hauet et J. Le Coz pour l'utilisation de Fudaa-LSPIV ; L. Gosselin pour la modélisation sous Photoscan ; P. Carbonneau pour les indices de texture ; S. Tolscszuc et J. Caveen pour les conseils sur Linux, D. Béal, P. Lemaire et Simon pour les dépannages sous Matlab.

Mener jusqu'au bout ces travaux de thèse n'a pas été sans douleur... et les choix qui m'ont menée jusque-là étaient peut-être inconscients. Aujourd'hui, en pleine connaissance de ce à quoi m'engagerait cette décision que j'ai prise il y a presque cinq ans, referais-je les mêmes ? Mais je ne regrette rien et au contraire, malgré les difficultés et les doutes, cette période a été extrêmement riche, à tous niveaux.

Hervé, je pense sincèrement avoir eu une chance énorme de travailler sous ta direction, d'avoir été intégrée à cette équipe du « couloir ISIG » et de bénéficier aussi bien de sa dynamique et de sa sympathie que de ta propre expérience. Je te remercie vivement de m'avoir guidée patiemment jusqu'au bout. Et je te suis extrêmement reconnaissante pour tout ce que ce travail de recherche m'a amenée à vivre.

Je souhaite remercier l'ensemble des personnes que j'ai côtoyées ou que je côtoie encore dans ce fameux couloir. Nombreux sont ceux qui sont repartis mais les très bons contacts que l'on a eus perdurent parfois. J'ai une pensée particulière pour Bertrand, Vincent, Barbi, Elsa, Pierre C., Clément R., Martin. Mélanie, je souhaite te remercier de tout mon cœur, pour tout ce que nous avons partagé, pour ton amitié, ton écoute et ton accueil toujours disponibles. Merci pour ton aide, tes conseils, et tes relectures hyper efficaces ! Parmi les personnes encore présentes à ISIG, je pense en particulier à Fanny, Pierre L., Marylise, Kéo, Yves, Hélène, Aurélie, Christine, Thomas D., Matthieu, et aux trois « jeunes doctorants » de l'autre bout du couloir : Gaby, Marie et Samuel je vous souhaite tout le meilleur pour vos travaux, et surtout plein de courage ! Lise et Kristell, vous m'avez apporté une aide extrêmement importante et des ressources techniques précieuses tout au long de ma thèse : je vous en remercie tout particulièrement. Je souhaite rendre un hommage spécial à Bianca, meine grüne freundin, qui m'a soutenue tout au long de ce parcours. Merci beaucoup pour ton aide et pour tout ce que nous avons partagé. J'espère pouvoir être d'autant plus présente maintenant, pour t'épauler et t'encourager jusqu'à la fin de ta propre thèse ! Et merci aux stagiaires sympathiques qui ont passé quelques mois à nos côtés, notamment Marianne, qui était là durant toute cette « fin de thèse » et qui a toujours été généreuse en mots gentils et marques de soutien envers moi.

Je remercie bien sûr tout spécialement les membres « permanents » du bureau R238, où j'ai passé tellement de bons moments – en atteste le mur des Bisounours – entre les heures studieuses. En premier lieu Emeline, qui est non seulement une source infinie d'aide et de renseignements en tous domaines, mais également une voisine d'un soutien à toute épreuve. Silvia, dont la petite voix et la naïveté ont souvent été à l'origine des rigolades partagées ici. Je te remercie pour ton amitié et te souhaite énormément de courage pour la fin de ta thèse et la suite de ton parcours. Alvaro, le papito le plus gentil du bureau : merci pour tes encouragements constants et la bonne humeur que tu propages. Seb, que l'on a eu la chance d'accueillir un moment à nos côtés : merci notamment pour tes conseils cartographiques et pour les discussions musicales. J'espère que ta soutenance va lever le mauvais sort qui agit sur toi ! Et Jérémie (presque permanent), qui n'a pas cessé de me soutenir et de m'encourager au cours de ces longs « derniers » mois. Je te suis vraiment reconnaissante pour ton attention, tes avis, tes suggestions et ton aide.

Pas si loin du labo, il y a GeoPeka, dont je tiens à remercier très chaleureusement les deux fondateurs : Guillaume et Nico. Je voudrais vous communiquer toute ma gratitude pour l'opportunité que vous m'avez offerte de travailler à vos côtés au cours de ma quatrième année de thèse. Merci pour l'expérience de travail et de terrain que je vous dois. Guillaume, je te dois également beaucoup pour les quelques discussions que nous avons eues à propos de la rédaction de ma thèse. Les jours de doute, c'est à certains de tes arguments que je me suis raccrochée pour continuer à avancer. Ludo, même si ça n'a pas duré très longtemps, j'ai été ravie de travailler à tes côtés et je te remercie pour tes encouragements.

Thomas, je ne saurais exprimer de manière simple tout ce que je te dois. Bien plus que le coencadrement de ma thèse en tous cas ! Mon séjour à Rimouski, en plus d'avoir été très productif pour mes travaux, a littéralement changé ma vie. L'hiver le plus rude que je n'ai jamais vécu a aussi été le plus merveilleux. Merci mille fois de m'avoir accordé une place au sein de l'équipe des fluvios, aux côtés de qui travailler a été plus qu'un plaisir : merci Maud, Claude-André (pour les raquettes !), Nancy (pour la visite guidée du premier jour), Catherine, Tristan, le duo Sylvio et Taylor, Jérôme, Marie-Andrée. Merci Clément et Simon pour votre aide et vos réponses efficaces à mes sollicitations de retour en France. A chacun, merci de m'avoir emmenée sur vos terrains respectifs pour découvrir vos cours d'eau gelés, et plus de neige que je n'en avais vu au cours de toute ma vie ! J'ai un merci tout particulier à te faire, Max, pour la visite de ton terrain magnifique (pas si impressionnant cet embâcle, sous la neige !), pour m'avoir fait découvrir toute une partie du Québec et présenté de nombreux québécois tous plus adorables les uns que les autres, pour les éléments concernant la Saint-Jean, pour ton aide, et ton soutien bien sûr. Je souhaite également remercier toutes les personnes qui m'ont, consciemment ou non, aussi soutenue tout au long de cette période, par leur amitié. Parfois juste en me permettant de penser à autre chose qu'à la thèse : ma famille, mes amis, les musiciens, les capoeiristes, et Marco qui était là durant toute la fin de cette aventure. Merci aux personnes externes au labo qui ont bien voulu m'accompagner sur le terrain pour installer, vérifier, décharger ou récupérer des caméras : maman, qui a fait de nombreux trajets, Aline, Alex, Philippe Z., et Coralie avec qui nous avons fait du « braconnage subaquatique » pour récupérer la caméra de Mollon.

Et pour finir merci à tous mes relecteurs de la dernière heure (Mélanie, maman, Aline, Coralie, Thomas D., Silvia, Marianne, Samuel et Bibi)...

Sommaire

Sommaire	1
Introduction générale	3
Chapitre I : Télédétection et caractérisation biophysique des rivières	5
Chapitre II : Questionnements scientifiques, méthodologie générale et sites d'étude	57
Chapitre III : Acquisition des images et préparation des données	€
Chapitre IV : Extraction et traitement du signal14	45
Chapitre V : Exploitation des images)3
Conclusion générale et perspectives24	13
Références bibliographiques25	53
Références numériques	51
Table des matières	52
Table des Figures	70
Table des Tableaux	75
Annexes	77

Introduction générale

La géomorphologie fluviale porte sur l'étude des processus physiques et biologiques régissant la géométrie des cours d'eau. Elle s'appuie sur de nombreuses données de terrain, qu'il s'agisse de mesures in situ ou ex situ, des prélèvements étant traités en laboratoire, ou d'observations du milieu. Les campagnes de terrain, qui permettent d'obtenir ces données, sont longues et contraignantes, voire parfois dangereuses, en milieux fluviaux. Cela implique qu'elles ne peuvent être réalisées raisonnablement que ponctuellement ou sur des surfaces limitées et donc qu'il est difficile de couvrir l'ensemble du milieu étudié, à savoir un linéaire de cours d'eau ou même tout un bassin versant. L'imagerie apporte certaines solutions à ces limites : la télédétection, réalisée sur des images satellites ou aériennes, permet d'appréhender des aspects du fonctionnement des cours d'eau, à des échelles beaucoup plus larges, selon la taille des images exploitées. La télédétection est de plus en plus employée afin de quantifier les phénomènes fluviaux et leur évolution. Cela est rendu possible grâce au développement des technologies informatiques et des connaissances acquises pour traiter ces phénomènes.

L'imagerie de terrain présente d'autres avantages. Acquise à faible distance, les surfaces couvertes ne sont pas aussi étendues que celles observées en imagerie « traditionnelle », bien qu'en fonction du point de fixation du capteur, la largeur des scènes puisse aller jusqu'à celle du tronçon. Cependant, cela permet généralement des résolutions spatiales extrêmement fines, donc des analyses de très haute précision, ou des observations d'objets de très petite taille. De plus, les capteurs utilisés pour l'imagerie de terrain peuvent généralement être programmés pour des acquisitions à haute fréquence : une fois fixé, un capteur in situ permet de suivre l'évolution d'une scène avec un cadre fixe à des pas de temps allant de quelques dixièmes de seconde à quelques heures. Les résolutions temporelles disponibles sont donc incomparables avec ce qu'il est possible d'obtenir grâce à l'imagerie « traditionnelle ». Il en est de même des coûts et des contraintes de déploiement entre ces deux types d'imagerie : l'imagerie de terrain bénéficie de capteurs relativement bon marché, les images sont exploitables sans correction liée aux conditions atmosphériques et malgré des conditions météorologiques défavorables, les acquisitions peuvent avoir lieu en tout temps. Avec un angle d'observation qui pourrait s'apparenter à celui d'un opérateur de terrain, elle fournit des éléments dont l'observation est compromise par l'imagerie verticale à haute altitude, tels que les berges, généralement subverticales et souvent masquées par la ripisylve.

3

Il y a donc de réels enjeux à pouvoir exploiter l'imagerie de terrain dans le cadre de l'étude des milieux fluviaux. L'analyse des processus à haute fréquence implique des acquisitions nombreuses et donc des jeux de données conséquents. Leur observation et leur analyse visuelle est d'autant plus longue que les périodes représentées sont importantes : l'un des enjeux principaux serait donc de pouvoir automatiser les procédures d'analyse des données. Mais ce n'est pas le seul, et connaître les potentialités et les limites liées à l'utilisation de l'imagerie in situ dans le cadre de l'étude des cours d'eau constitue l'objectif général des travaux de thèse présentés dans ce manuscrit. Afin de répondre à cette problématique, cette thèse s'appuie sur une série d'exemples concrets. Les retours d'expériences et les analyses qui sont présentés résultent de cinq sites tests très contrastés. De nombreux tests ont ainsi pu être réalisés, aussi bien au niveau de la conception des installations des capteurs que de l'observation des images et de l'extraction des informations que celles-ci contiennent. La synthèse de tous ces éléments a permis de développer une méthodologie générale d'étude des processus biophysiques en milieu fluvial par imagerie in situ (ou « imagerie de terrain »). Cette méthodologie est composée de diverses étapes, regroupées en cinq grandes phases. Certaines de ces étapes sont systématiques, car elles sont nécessaires quels que soient la nature des données et les objectifs de l'étude. D'autres étapes sont optionnelles et à considérer en fonction des données disponibles en complément des images.

Ce manuscrit s'organise en cinq chapitres. Le chapitre I propose un état de l'art centré sur la télédétection appliquée aux milieux fluviaux. Le chapitre II présente dans un premier temps les différents questionnements scientifiques mis en évidence par cet état de l'art et auxquels ces travaux de thèse ont tenté de répondre en partie. Dans un second temps il expose le schéma général de cette méthodologie ainsi que les considérations théoriques au sujet de son application. Puis il présente les cinq sites test ainsi que les jeux de données qui y ont été acquis. Les chapitres III à V traitent des différentes étapes de la méthodologie développée. Lors de la mise en place de chaque étape de la démarche, un certain nombre de questionnements se posent et sont à considérer de manière relative à l'objet d'étude et aux moyens disponibles pour la réalisation de l'étude en question. Les tests réalisés sont présentés dans les chapitres III à V, chacun étant introduit par un schéma positionnant ces différentes problématiques dans le schéma global de la démarche. Les phases d'acquisition des images et de préparation des données sont présentées dans le chapitre III. L'extraction et le traitement du signal ont été regroupés au sein du chapitre IV. Le chapitre V, quant à lui, expose les éléments obtenus sur le plan géomorphologique, grâce à l'exploitation des résultats du traitement des différents jeux de données disponibles.

Chapitre I : Télédétection et caractérisation biophysique des rivières

I- Télédétection appliquée au domaine fluvial

I.1- Un champ scientifique en pleine croissance

Dans le chapitre introductif de l'ouvrage « *Fluvial Remote Sensing* », P.E. Carbonneau et H. Piégay (2012) recensent les nombreux usages de la télédétection appliquée aux rivières et définissent la « télédétection » comme l'acquisition d'informations sur l'état ou la condition d'un objet grâce à des capteurs qui ne sont pas en contact physique avec celui-ci. Ces informations sont généralement représentées sous forme d'images numériques constituées d'une matrice de pixels comportant une ou plusieurs valeurs. Le « pixel » constitue l'élément le plus fin de l'image et représente une portion de la surface sondée. Les valeurs radiométriques des différents pixels sont proportionnelles au rayonnement reçu de cette surface par le capteur.

P.E. Carbonneau et H. Piégay (2012) soulignent que la télédétection est largement reconnue aujourd'hui dans ce domaine de recherche et son usage est même de plus en plus fréquent dans les études actuelles. Pourtant, l'usage de la télédétection est récent car les outils d'acquisition disponibles n'ont pas toujours fourni une résolution suffisante pour l'étude des milieux fluviaux. Selon ces mêmes auteurs, le nombre de publications faisant référence à la télédétection en milieu fluvial est croissant au cours du temps. S'il ne concernait qu'une à trois publications par an de 1976 à 1996, il atteignait 37 productions en 2010, dont un numéro complet sur le sujet dans la revue ESPL. Face à l'intérêt croissant de ces techniques dans le domaine fluvial, Carbonneau et Piégay, (2012) proposaient leur ouvrage entièrement consacré au sujet.

D'après J. Lejot (2008), la télédétection appliquée aux milieux aquatiques a tout d'abord porté sur le milieu océanique et insulaire, notamment pour l'étude des fonds et des profondeurs. La télédétection peut cependant être appliquée dans le cadre d'un large spectre disciplinaire. Dans le domaine fluvial, elle peut s'appliquer à l'hydraulique, qui vise à décrire des lois physiques liées aux conditions d'écoulement, mais également dans le cadre des sciences humaines qui s'intéressent par exemple aux relations entre les populations riveraines et le milieu fluvial qu'elles appréhendent comme milieu de vie. Ce travail s'intéresse principalement au domaine de la géomorphologie fluviale, c'est-à-dire à l'étude des interactions entre les formes et les processus fluviaux qui les régissent et qui s'expriment à diverses échelles spatiales et temporelles (Charlton, 2008).

La télédétection, et en particulier l'imagerie, présente de nombreux avantages pour les travaux en rivières et d'après W. Bertoldi et al. (2012), l'accroissement de l'utilisation des outils de télédétection en rivière a été très important au cours des dernières décennies. W.A. Marcus et M.A. Fonstad (2010) parlaient d'ailleurs de l'émergence d'une nouvelle discipline du champ de la géomorphologie fluviale. Dans le cas de l'imagerie aérienne ou satellite, elle permet notamment d'acquérir grâce à un groupe de clichés, voire sur une seule image, des informations sur tout un linéaire de cours d'eau et donc de s'affranchir d'une prospection de terrain qui représenterait de nombreuses heures de travail. La diversité des types de plateformes existantes permet d'obtenir des combinaisons résolution spatiale/empreinte au sol multiples et adaptées à chaque cas d'étude (Bertoldi et al., 2012). Même sur de courts linéaires, certaines mesures peuvent être laborieuses à acquérir alors que l'imagerie verticale peut donner une vue globale du cours d'eau et ainsi faciliter l'appréhension des distances, longueurs et surfaces. D.J. Gilvear et R. Bryant (2003) donnent l'exemple des cours d'eau de très grande taille comme l'Amazone ou le Brahmapoutre. Les acquisitions aériennes sont le seul moyen d'observer et de quantifier la morphologie globale de ces rivières. Les travaux de T. deCastilhoBertani et al. (2013) ou M. Bertrand et al. (2013) sont des exemples menés à l'échelle régionale par imagerie satellite. Ces nouvelles sources d'information permettent ainsi de renseigner de très grandes surfaces. L'imagerie peut aussi avantageusement remplacer l'intervention d'un opérateur de terrain dans le cas d'un suivi de l'évolution du milieu, ou dans le cas de mesures ou observations en milieux dangereux ou difficiles d'accès, en cas de crue par exemple.

I.2- L'acquisition d'images : quelques notions de base

I.2.1- Des vecteurs et des capteurs

La télédétection repose à la fois sur un vecteur (ou plateforme d'acquisition) et sur un capteur et comporte trois types de résolution : spatiale, temporelle et spectrale. La résolution temporelle dépend directement du vecteur utilisé pour l'acquisition. Elle correspond à une fréquence d'acquisition des informations concernant une scène donnée. Elle est donc liée au type de plateforme utilisé sur laquelle est embarqué le capteur. La résolution spatiale résulte de la combinaison entre les propriétés du capteur utilisé (taille, nombre des pixels et dimensions des clichés, dans le cas de l'imagerie) et de la hauteur et de l'orientation de la prise de vue, donc de la position du vecteur. Elle correspond à la surface au sol représentée par les pixels de l'image. La résolution spectrale, quant à elle, est liée aux paramètres du capteur et correspond à la largeur du spectre d'ondes capté.

I.2.1.a- Vecteurs

Il existe de très nombreuses plateformes sur lesquelles peuvent être embarqués des capteurs dont les plus répandues sont les satellites, les avions ou encore les hélicoptères (Pasqualini et al., 2001; Fonstad et Marcus, 2005; Carbonneau et al., 2004, 2010; Wawrzyniak, 2012). Le développement des drones fournit de nouvelles plateformes pour embarquer des caméras ou autres outils de mesures (Lejot, 2008). Des véhicules terrestres peuvent également être employés pour ce genre d'acquisition, même s'ils sont toutefois peu adaptés au cas particulier des milieux aquatiques. Dans ces milieux, des embarcations nautiques de taille plus ou moins importante en fonction du type de milieu peuvent être très utiles. Il est également possible de réaliser de la télédétection sur des images prises à partir de capteurs fixes (Bertoldi et al., 2012;Hamel et al., 2013;Benacchio et al., 2017; Boivin et al., 2017) ou de supports installés temporairement (Carbonneau et al., 2003; Gilvear et al., 2007; Power et al., 2008; Dramais et al, 2011). Le terme vecteur n'est alors plus vraiment adapté, et il s'agit de parler de mesures « in situ ».

Chaque plateforme présente des avantages et des inconvénients, tels que la facilité et la rapidité de déploiement, un coût plus ou moins élevé, l'altitude d'exploration, la possibilité de vols stationnaires, etc. Dans le cas des vecteurs aériens ou spatiaux, l'altitude de la prise de vue est déterminante pour la résolution spatiale des images (Bertoldi et al., 2012). Le type de vecteur est donc à choisir en fonction des besoins de l'étude et de la précision des images recherchée.

I.2.1.b- Capteurs

Les capteurs sont aussi divers que les informations acquises peuvent être variées. Certains sont dits passifs, d'autres actifs. Les rayons captés sont le plus souvent ceux qui se réfléchissent au niveau de la surface terrestre, et les quantités de lumière perçues dépendent des propriétés optiques des milieux traversés et des surfaces rencontrées. La télédétection passive consiste à exploiter les rayonnements solaires réfléchis par les différentes surfaces composant la scène étudiée. Contrairement à la télédétection passive, les capteurs actifs sont eux-mêmes la source des rayonnements étudiés. Le signal capté correspond à la différence entre les quantités d'ondes émises et la part captée des ondes réfléchies.

7

Les capteurs fournissent des matrices de valeurs radiométriques, qui correspondent à différentes quantités possibles. Chaque valeur de la matrice correspond à un pixel, dont l'ensemble constitue une image. Des images peuvent être acquises dans diverses régions du spectre électromagnétique, telles que les micro-ondes, l'infrarouge, le visible ou l'ultra-violet (Elachi et van Zyl, 2006) (voir figure 1). Chacune de ces régions spectrales peut être subdivisée en différents canaux (ou bandes spectrales), de largeur variable et qui correspondent à des parties finies du spectre électromagnétique. Une image dite « panchromatique » est composée d'une seule bande spectrale. La combinaison de plusieurs (image « multispectrale »), voire de quelques centaines (image « hyperspectrale ») de canaux permet de percevoir différemment les éléments présents dans la scène. Traditionnellement, la photographie capte par exemple les trois canaux du domaine spectral appelé « visible », car perceptible par l'œil humain : rouge, vert et bleu, dont les longueurs d'ondes s'étendent de 450 à 650 nm. D'autres types de capteurs ont un spectre d'acquisition bien plus large, et comprennent par exemple en plus le proche infra-rouge, l'infra-rouge lointain ou bien d'autres longueurs d'ondes supplémentaires, qui constituent le spectre solaire. La figure 1 illustre le spectre des ondes électromagnétiques et donne quelques exemples d'utilisations qui en sont faites.



Figure 1 : Illustration des catégories de champs électromagnétiques et de quelques utilisations courantes, selon la longueur d'onde ou la fréquence. Modifié, d'après www.radiofrequences.gouv.fr.

Il existe divers types de capteurs et donc d'images, selon le type de rayonnements captés et la source qui les fournit. Les exemples suivant peuvent être cités : l'imagerie optique (détection du rayonnement solaire réfléchi par la cible), le LiDAR (*Light Detection And Ranging*) qui émet son propre rayonnement lumineux et capte la fraction qui lui revient, ou le RADAR (*RAdioDetection And Ranging*) qui fait de même en exploitant les ondes radio. Dans l'article qui introduit un numéro spécial sur le thème de la télédétection fluviale, W.A. Marcus et M.A. Fonstad (2010) choisissent ainsi de présenter les articles du numéro par type d'acquisition, car d'après eux la qualité des images détermine le type d'étude dans lesquelles elles peuvent être exploitées.

I.2.2- Quantités mesurées

La lumière peut être quantifiée grâce à différentes quantités. Selon G. Shaepman-Strub et al. (2006), voici la définition de quelques-unes d'entre elles, les plus couramment employées :

- la « radiance spectrale » (aussi appelée« luminance »et symbolisée *L*) est la puissance d'un rayonnement lumineux par unité de longueur d'onde et par unité de surface et d'angle solide, exprimée en W/m²/sr/nm. La radiance spectrale est donc la quantité de lumière émise par une surface donnée.

- la « réflectance » (symbolisée ρ) est le rapport entre l' « émittance énergétique » et l' « irradiance ». L' « émittance énergétique » (parfois appelée « exitance » et symbolisée *M*) est la quantité de lumière émise par unité de surface par une source lumineuse et l' « irradiance » (ou « éclairement », symbolisé *E*) correspond à la puissance du rayonnement électromagnétique reçu par une surface donnée. Certains auteurs préfèrent parler de la réflectance plutôt que de la luminance. Elle est sans dimension, les deux membres du rapport s'exprimant en W/m². Selon la loi de la conservation de l'énergie, elle varie entre 0 et 1 car dans un cas particulier où il n'y aurait pas de perte d'énergie, les deux termes auraient la même valeur.

- le « facteur de réflectance » (symbolisé R), peut également être calculé en télédétection. C'est le rapport entre le flux énergétique réfléchi par une surface et le flux énergétique réfléchi dans les mêmes conditions géométriques (même angle solide) et de longueurs d'onde, par une surface idéale (c'est-à-dire de type lambertienne et sans perte), irradiée par les mêmes conditions. Une surface lambertienne absorbe un rayonnement lumineux incident et en retransmet une partie dans toutes les directions avec la même intensité.

I.3- L'application de la télédétection aux milieux fluviaux

Il existe différentes qualités d'image, définies par la résolution spatiale et/ou spectrale, qui offrent diverses possibilités de traitements. D'après P.E. Carbonneau et H. Piégay (2012), la résolution spatiale des images utilisées et les sujets traités sont interdépendants : la détection de vitesses de surface permettant de déterminer les débits, ou le dénombrement de poissons sont par exemple plutôt étudiés par imagerie in situ ; les modèles numériques de terrain (MNT) et les estimations bathymétriques se réalisent sur des images dont la résolution est plutôt supérieure à 1m ; les formes riveraines et l'occupation du sol sont étudiés grâce à des résolutions de l'ordre du mètre, acquises par satellite ou plateforme aéroportée ; l'étude des inondations et les analyses physico-chimiques sont principalement basées sur des résolutions plus grossières.

C'est précisément la résolution des images qui a longtemps limité les études à des cours d'eau de taille importante, ceux de petite taille ne pouvant être détectés sur des images dont la résolution était encore trop grossière (Lejot et al., 2011). Mais aujourd'hui, suite à l'amélioration des technologies, les acquisitions satellites atteignent des résolutions spatiales très élevées, et l'imagerie acquise à courte portée (où la distance entre la cible et le capteur est inférieure à 200 m, d'après Smith et Pain, 2009) présente un fort potentiel pour l'acquisition d'images à haute, voire très haute, résolution spatiale. Cette imagerie dite « THR » (très haute résolution) est principalement acquise par vecteurs aériens ou aéroportés (drones ou ULM par exemple) qui sont toujours plus performants et offrent de plus en plus de possibilités pour les études en rivière.

Les progrès technologiques concernant les vecteurs d'acquisition d'images ayant été réalisés de manière non homogène, il en a été de même pour les méthodes de traitement d'images qui sont le fait de chercheurs isolés, qui se sont chacun penchés sur leurs propres problématiques (Marcus et Fonstad, 2010). Selon ces auteurs, cette absence de coordination lors du développement de la télédétection fluviale a promu une diversité d'approches et d'applications mais a limité les retours critiques en matière d'applicabilité permettant d'identifier les atouts et les limites de chacune d'elles, les réflexions en matière de généralisation des démarches. Si jusqu'aux années 1990, les moyens techniques constituaient une limite pour le développement de méthodes d'étude des cours d'eau, les innovations technologiques actuelles permettent enfin de répondre aux besoins des chercheurs, et de développer de nouvelles méthodes plus largement applicables.

Les observations réalisées sur des images se font encore très généralement par photointerprétation, c'est-à-dire par reconnaissance visuelle des objets de la scène. Mais selon la résolution des images et selon la taille de la scène étudiée, ce travail peut être relativement laborieux et la reconnaissance automatique des objets est de plus en plus souhaitable. L'automatisation

10

permet d'accélérer le processus de traitement et de limiter certains biais liés à l'opérateur. Une telle opération se base sur les propriétés locales de l'image (radiométrie et texture). En même temps qu'apparaissent de nouveaux types de plateformes, de nouveaux algorithmes de traitements des images continuent à être développés. Ainsi, les méthodes classiquement utilisées pour l'étude des cours d'eau telles que les mesures de terrain, qui contraignent les études à quelques éléments ponctuels et ne permettent pas de connaître la gamme globale de variations dans le système, sont complétées, voire suppléées par la télédétection, qui permet des études globales et répétées des milieux, à des résolutions variables (Marcus et Fonstad, 2010).

I.4- Des potentialités fonction des vecteurs d'acquisition

Il existe plusieurs types de vecteurs pour réaliser des acquisitions d'images. Ils sont présentés cidessous en distinguant l'imagerie satellite et aéroportée et l'imagerie in situ, acquise au niveau du sol. D'après P.E. Carbonneau et H. Piégay (2012), la plupart des publications concernant l'étude des milieux fluviaux par imagerie sont basées sur des images acquises par satellite et dont les résolutions spatiales sont de l'ordre de 10 à 15m. Des publications traitant d'images à plus hautes résolutions spatiales sont bien moins fréquentes, et les images dont les résolutions sont d'ordre métrique à submétrique sont principalement acquises par des vecteurs aéroportés. Elles concernent 25% des publications référencées. L'imagerie acquise au niveau du sol représentait 10% des publications en 2012 (Carbonneau et Piégay, 2012). Au vu du développement constant des capteurs aux précisions toujours plus grandes, les résolutions qu'atteignent aujourd'hui l'imagerie aéroportée et l'imagerie in situ sont potentiellement illimitées (Bertoldi et al., 2012).

I.4.1- Supports satellites et aéroportés

I.4.1.a- Couverture au sol de l'imagerie satellite

Comme évoqué ci-dessus, l'imagerie satellite est le mode d'acquisition qui est encore le plus répandu. Aujourd'hui, il existe de nombreux satellites qui acquièrent régulièrement des images sur l'ensemble du globe (un passage sur une même zone a lieu entre 3 à 18 jours, selon D. Gilvear et al., 2004). L'imagerie permet ainsi de réaliser des études à peu près partout sur Terre, dans des milieux très éloignés et parfois difficiles d'accès comme très étendus.

L'un des principaux avantages de l'imagerie satellite est une couverture au sol très large (quelques dizaines à quelques centaines de km²). Cela permet d'observer, sur quelques clichés seulement, des régions vastes et parfois des linéaires complets de cours d'eau. Mais très souvent, les clichés utilisés dans le cadre d'études scientifiques ne sont pas acquis précisément dans ce but et les missions des satellites ne sont généralement pas modulables à la demande. La conséquence est que

11

l'horaire et la durée du vol au-dessus de l'objet d'étude ne peuvent pas être optimisés, tout comme l'angle de visée des prises de vue. Les conditions météorologiques et atmosphériques lors des acquisitions sont donc souvent une inconnue et comme l'altitude des capteurs est très importante, ils y sont particulièrement sensibles. La couverture nuageuse au-dessus d'une zone peut compromettre complétement l'exploitation des clichés, notamment en zones tempérées humides. C'est ce que déplorent D. Gilvear et al. (2004), qui travaillent sur une rivière écossaise, considérant le coût très élevé des données satellites.

I.4.1.b- Résolution spatiale et flexibilité de l'imagerie aérienne

Même si les progrès techniques sont constants, la résolution au sol des images satellites est encore limitée. P.E. Carbonneau et H. Piégay affirmaient en 2012 que les images pour lesquelles la taille des pixels est inférieure au mètre ne concernent que des données panchromatiques. Aujourd'hui, la constellation Pléiade donne accès à des images couleur de 50 cm de résolution, acquises à une fréquence biquotidienne, ce qui ouvre la porte à de nombreuses possibilités d'études. Toutefois, parce que les acquisitions aériennes sont à la fois plus anciennes et qu'elles présentent généralement de meilleures résolutions, elles ont été utilisées plus tôt en rivières. Elles constituent une source de données permettant l'identification relativement aisée des formes fluviales et d'éléments riverains caractéristiques. Et les campagnes d'acquisition aérienne étant anciennes, leur archivage permet de disposer de données historiques souvent très utiles pour l'analyse multitemporelle des corridors fluviaux (Lejot et al., 2011).

L'emprise au sol des clichés aériens est conditionnée par l'altitude de vol de la plateforme et la couverture de tout un linéaire de cours d'eau n'est généralement possible que grâce à une mosaïque de clichés, ce qui pose certaines limites, évoquées plus loin (Lejot et al., 2007; Lejot, 2008). Cependant, des clichés aériens sont beaucoup moins couteux que des clichés satellites, même si cela est variable selon le type de capteur utilisé (Gilvear et al., 2004). De plus, les plateformes d'acquisition aérienne sont souvent assez flexibles et les campagnes d'acquisition sont totalement programmables. Ainsi, l'horaire, la durée du vol et le nombre de clichés acquis, la zone survolée ainsi que le type de capteur utilisé sont à choisir de manière à optimiser les prises de vue pour l'étude à réaliser. Une plateforme aéroportée n'a pas la même sensibilité aux conditions atmosphériques et météorologiques qu'une plateforme satellite. Cependant, si la qualité des clichés n'est que peu affectée par la couverture nuageuse par exemple, les turbulences liées au vent sont susceptibles de déstabiliser la plateforme et donc de modifier les angles de prise de vue des clichés.

I.4.1.c- Limites des acquisitions aéroportées et satellites

L'acquisition de données par imagerie aérienne ou satellite présente de nombreux avantages par rapport aux acquisitions de terrain. A coût égal, elle permet notamment d'acquérir généralement une plus grande couverture au sol (Bertoldi et al., 2012). Aujourd'hui, l'étude des milieux aquatiques par télédétection est relativement bien développée et de plus en plus accessible pour des nonspécialistes. Il y a toutefois certains cas où l'approche par voie terrestre reste plus avantageuse que l'imagerie verticale. Cela concerne par exemple l'étude des éléments verticaux comme les berges ou lorsque la canopée de la ripisylve obstrue la visibilité de la cible, par exemple. De plus, les acquisitions à pas de temps courts sont souvent intéressantes pour caractériser certains évènements comme les crues, rarement prévisibles, qui sont particulièrement importants pour expliquer la morphologie des cours d'eau. La mise en place de campagnes d'acquisition aérienne, bien que relativement aisée par rapport à celle que nécessite l'imagerie satellite, reste contraignante et la fréquence des vols est toutefois limitée.

I.4.2- Acquisitions in situ

I.4.2.a- Suivi des processus à haute résolution temporelle

L'imagerie acquise au niveau du sol, notamment l'imagerie optique, est particulièrement intéressante dans le domaine de la géomorphologie fluviale parce qu'elle est complémentaire à la fois de l'imagerie verticale et des campagnes de mesures de terrain. Ces capteurs permettent notamment d'atteindre une résolution temporelle bien meilleure que la plupart des autres capteurs. Avec les évolutions techniques récentes, le prix des capteurs est devenu relativement modeste et ceux-ci sont très pratiques car leur déploiement est aisé, y compris pour des acquisitions à très haute fréquence.

Il a déjà été évoqué qu'au cours des dernières décennies, le nombre d'études en géomorphologie fluviale utilisant des données de télédétection a augmenté de manière très importante. L'utilisation de capteurs in situ suit la même dynamique, même si son émergence et sa croissance sont plus récentes dans le domaine de l'étude des rivières. De nombreux objets caractérisant les milieux fluviaux ont déjà été étudiés par ce biais. Par exemple, l'évolution du lit d'un cours d'eau peut être suivie grâce à l'installation d'un capteur sur un point haut de la vallée, de manière à observer toute la largeur de la rivière (Bertoldi et al., 2009). L'appareil étant programmé avec une haute fréquence d'acquisition, les processus d'évolution du lit peuvent être comparés à des données hydrologiques. De la même manière, V. Hamel et al.(2013) ont étudié l'érosion des berges d'une rivière québécoise, en expliquant les budgets sédimentaires observés mensuellement grâce à

13

la combinaison de l'utilisation du LiDAR et de l'imagerie optique, acquise à une résolution temporelle plus élevée.

I.4.2.b- Une résolution spatiale élevée

A courte portée, la résolution spatiale peut-être extrêmement élevée, bien que ce soit généralement au détriment de la couverture spatiale. Cela permet des mesures de précision, sur des objets de taille limitée, afin de caractériser les processus fluviaux. Ce fût le cas pour le calcul de la taille et de la forme des sédiments (Graham et al., 2005 ; Roussillon et al., 2009), ou encore pour calculer un MNT (Modèle Numérique de Terrain) très précis par une approche photogrammétrique (Chandler et al., 2002). B.J. MacVicar*et al.* (2009) évoquaient un gros avantage de l'imagerie de terrain par rapport à l'imagerie aéroportée : fixé à un support, le capteur bénéficie d'une résolution fixe. H. Habersack (2015) soulevait également ce point parce que d'après lui, la qualité de la détection d'un objet dans une image oblique dépend fortement de la résolution fixe associée à de faibles coûts et peu de contraintes de maintenance comme avantages de l'imagerie in situ.

I.4.2.c- Complexité des mesures de terrain et acquisitions continues

L'acquisition de clichés in situ peut également permettre de remplacer des mesures de terrain dont l'acquisition est parfois difficiles, voire dangereuses. J. Dubé (2009) mesurait par exemple la croissance de la couverture de glace grâce à des repères répartis dans ses images ayant un point de vue fixe. B. Moulin et H. Piégay (2004) procédaient de la même manière pour l'étude de l'évolution de la surface d'un embâcle de bois. Egalement afin d'estimer un budget ligneux, B.J. MacVicar et al. (2012) utilisaient la vidéographie pour la détection de bois flottants. Cela correspond à la capture de séries de clichés de manière assez fréquente pour permettre de voir bouger ces objets dans le champ de l'image. Ce principe est également exploité dans le cadre de la technique du LSPIV, développée par A. Hauet et al. (2014). Ces auteurs ont ainsi pu utiliser un jeu de données images pour estimer des vitesses de courant, ce qui est souvent long et parfois compliqué à réaliser sur le terrain. Parce que ces mesures de terrain sont aussi parfois complexes, l'imagerie pourrait grandement faciliter l'estimation des profondeurs d'eau.

I.4.3-Exemples d'études menées en télédétection fluviale

Le tableau 1 présenté ci-dessous propose un recensement non exhaustif d'études menées sur les cours d'eau ou dans les milieux aquatiques par imagerie. Il est intéressant de voir que si l'imagerie aérienne est présente dans presque tous les thèmes, l'imagerie in situ se cantonne surtout à certains domaines : les études diachroniques et l'évolution des formes et processus.

Type d'étude	Type d'images		ges	Lieu	Référence
	Satellite	Aérien	In situ		
Etat hydromorphologique du corridor fluvial		Х		Tummel (Ecosse)	Gilvear et al., 2004
Recensement des habitats		х		Tromie (Ecosse)	Carbonneau et al., 2012a
Recensement des habitats		х		Lamar, Soda Butte Creek (Wyoming)	Marcus et al., 2003
Topographie des zones émergées			х	Sainte Marguerite (Québec)	Carbonneau et al., 2003
Bathymétrie		х		Lamar, Soda Butte Creek (Wyoming)	Marcus et al., 2003
Bathymétrie		Х		Lee Stocking Island (Bahamas)	Louchard et al., 2003
Bathymétrie	Х	Х		Brazos (Texas) et Lamar (Wyoming)	Fonstad et Marcus, 2005
Bathymétrie		х		Saint Marguerite (Québec)	Carbonneau et al., 2006
Bathymétrie	Х			Rhône (France)	Lejot et al., 2011
Bathymétrie		х		Brenta, Piave, Tagliamento (Italie)	Moretto et al., 2013
Calibrage bathymétrie			Х	Forth (Ecosse)	Gilvear et al., 2007
Calibrage bathymétrie			Х	Ain (France)	Benacchio, 2012
Evolution bande active tressée		Х		Tagliamentp (Italie)	Zanoni et al., 2008
Erosion de berge			Х	Ouelle (Québec)	Hamel et al., 2013
Caractérisation de la ripisylve	Х			Ain, Drôme (France)	Lejot et al., 2011
Détection du bois déposé	Х			Isère (France)	Moulin, 2005
Détection du bois stocké			Х	Rhône (France)	Benacchio et al., 2017
Détection du bois en transit			Х	Ain (France)	Ali et Tougne, 2009
Détection du bois en transit			Х	Ain (France)	MacVicar et al., 2009
Détection du bois en transit			х	Ain (France)	MacVicar et Piégay, 2009
Détection du bois en transit			Х	Slave (Canada)	Kramer et Wohl, 2014
Détection du bois en transit			Х	Saint Jean (Québec)	Boivin et al., 2017
Granulométrie zones émergées		х		Sainte Marguerite (Québec)	Carbonneau et al., 2004
Granulométrie en zones émergées		Х		Ain (France)	Lejot et al., 2011
Granulométrie en zones immergées		Х		Sainte Marguerite (Québec)	Carbonneau et al., 2005a
Granulométrie des particules			Х	Progo (Indonésie)	Roussillon et al., 2009
Cartographie végétation		Х		Golf du Saint Laurent (Corse)	Pasqualini et al., 2001
Cartographie végétation		х		Potomac (Maryland)	William et al., 2003
Cartographie du biofilm	х			Loire (France)	Meleder et al., 2003
Evolution du biofilm			х	South Fork of the Eel	Power et al., 2008
Evolution du biofilm			x	Ain (France)	Benacchio 2012
Cartographie type de substrats		х		JurienBay (Australie)	Fearns et al., 2011
Cartographie types de glace	х			Saint François (Québec) et	Drouin, 2007
Fuchation course to the t				Peace (Alberta)	Duk (2000
Evolution couvert de glace	 		X	Sainte Udile (Quebec)	Dube, 2009
Deplacement blocs de glace			X	Saint Laurent (Quebec)	Bourgault, 2008
LSPIV			X	Québec)	Daigie et al, 2013
Vitesse de courant LSPIV			Х	Arc (France)	Dramais et al., 2011
Vitesse de courant LSPIV			X	Ardèche (France)	Hauet et al., 2014
Thermie	Х	Х	Х	Rhône, Ain (France)	Wawrzyniak, 2012

Tableau 1 : Exemples d'études menées sur les milieux aquatiques par imagerie, selon trois types d'acquisition : satellite,

<u>aérienne et in situ.</u>

II- Traitements d'images appliqués à l'étude des cours d'eau

II.1- Analyse visuelle des images

II.1.1- Photo-interprétation et qualité des données

L'analyse visuelle des images, ou « photo-interprétation », est la manière la plus évidente d'acquérir des informations par imagerie. En particulier lorsque le cliché observé est acquis dans le visible, il est facile de reconnaître des formes grâce aux lignes qu'elles dessinent dans le paysage, des objets ou des éléments grâce à leurs couleurs, et l'aspect local ou le grain de l'image permet même de distinguer des petites variations qui renseignent sur l'occupation du sol. De nombreuses études ont mis à profit cette capacité de l'œil humain à discriminer des objets dans une scène pour des applications en rivières. Cela permet par exemple de réaliser des cartes d'occupation du sol qui renseignent sur les écotopes présents dans un corridor fluvial, de cartographier la succession des faciès d'écoulements dans un chenal en eau (Gilvear et al., 2004 ; Zanoni et al., 2008) ou de dénombrer des pièces de bois isolées ou accumulées dans une bande active pour évaluer un budget ligneux (Kramer et Wohl, 2014 ; Boivin et al., 2017).

II.1.1.a- Résolution spatiale

La distinction et la caractérisation des éléments dans une image dépendent fortement de la qualité de l'image ainsi que de l'aspect des différentes catégories d'objets présentes. Par exemple, si la taille de l'objet étudié est inférieure à celle d'un pixel, il sera impossible d'en délimiter les contours. La résolution spatiale des images est donc un élément déterminant en télédétection. Le choix de la résolution des images à exploiter est donc à réaliser en fonction des caractéristiques physiques des objets et de leur distance par rapport à la plateforme d'acquisition. De même, différencier plusieurs espèces d'arbres dans une forêt alluviale peut ne pas être évident et l'utilisation de données annexes peut être utile pour délimiter différents ensembles visuellement proches. J. Lejot et al. (2011) se sont par exemple aidé de la base de données Corine Biotope pour cartographier les différents peuplements de la forêt alluviale de l'Ain.

II.1.1.b- Résolution spectrale

La résolution spectrale des clichés est également primordiale. La disponibilité de plusieurs canaux permet de travailler sur des « compositions colorées ». Les logiciels de télédétection permettent ainsi de visualiser simultanément une à trois bandes spectrales de l'image, en rouge, vert et bleu. Il est possible d'attribuer à chacune les trois canaux rouge, vert et bleu, pour visualiser une image dite en « couleurs naturelles ». Mais il est aussi possible d'affecter à chacune d'autres canaux, ce qui permet de mettre en évidence des éléments difficilement visibles sur une image

16

« traditionnelle ». Pour l'étude de la végétation il est ainsi intéressant de disposer du canal infrarouge, qu'il est possible d'afficher avec les canaux rouge et vert (figure2). Cela fait particulièrement ressortir les taches de végétation. C'est ce principe que Pasqualini et al. (2001) ont utilisé pour délimiter des herbiers marins sur un récif Corse.



<u>Figure 2 : Image multispectrale de la vallée de la rivière Yakima, Washigton, à la mi-août : à gauche, composition en</u> <u>couleurs réelles, bandes 1, 2 et 3 (bleu, vert et rouge) ; à droite, composition colorée infra-rouge, bandes 2, 3, et 5 (vert, rouge et proche infrarouge). Lillesand et al., 2008, page 336.</u>

II.1.2- Calculs et transformation des données

II.1.2.a- Indices spectraux

Des indices peuvent également être produits en combinant les valeurs des différents canaux spectraux. Il est par exemple possible de calculer un NDVI (*NormalizedDifferenceVegetation Index* ou indice de végétation par différence normalisée) permettant de détecter la végétation et d'évaluer son état à partir du canal infrarouge. L'équation (1) correspond à la formule de cet indice :

$$NDVI = (NIR-VIS)/(NIR+VIS)$$
(1)

avec VIS qui correspond au canal rouge, NIR le canal de proche infra-rouge. V. Meleder et al. (2003)ont utilisé cet indice pour localiser la présence de microphytobenthos, qui présente une activité chlorophyllienne, dans un environnement côtier essentiellement vaseux alors que D. la Cecilia et al.(2016) l'ont utilisé pour établir un lien entre les conditions hydrauliques et la répartition de la végétation en place en milieu fluvial.

II.1.2.b- Changement d'espace colorimétrique

En présence uniquement des bandes spectrales du visible, des informations intéressantes peuvent être extraites des images en changeant d'espace colorimétrique. L'un des plus couramment utilisé est l'espace HSI (*Hue, Saturation, Intensity* ou Teinte, Saturation, Intensité, Angulo et Serra, 2004 ; Carbonneau et al., 2004, 2005a), qui décrit relativement bien les sensations perçues par l'œil humain (Gonzalez et al., 2004). Plutôt que décrire les différentes proportions de rouge, vert et bleu contenues dans chaque pixel, l' « intensité »correspond à son niveau de gris donc au niveau de brillance de la moyenne des trois couleurs ; la « saturation »à sa pureté, donc au degré de « dilution » de la couleur pure dans la lumière blanche ; la « teinte »correspond à la couleur pure en elle-même, représentée dans le pixel. La figure3 décrit la relation entre les espaces colorimétriques RGB et HSI et la figure4 illustre les informations décrites par l'espace colorimétrique LSH. Les espaces colorimétriques HSV, HSB ou LSH sont tous des équivalents de HSI, selon que la valeur de la Brillance ou de la Luminance est mentionnée au lieu de l'Intensité.



Figure 3 : Représentation de l'espace colorimétrique HSI sur des plans circulaires. Ceux-ci sont perpendiculaires à l'axe vertical de l'intensité. Gonzalez et al, 2004, page 210.



Figure 4 : Image initiale « parrots » (a), et décomposition de l'image couleur selon lareprésentation en norme L1 : <u>luminance (b), teinte (c) et saturation (d). Angulo et Serra, 2004, page 24.</u>

II.1.3- Limites humaines de la photo-interprétation

Une autre limite que la résolution spatiale des images ou la précision de l'œil est à mentionner, c'est celle du temps qu'un tel travail requiert. La photo-interprétation exhaustive d'un cliché aérien peut-être relativement longue à cause de l'emprise au sol de l'image. Et le travail sur une acquisition spatiale sera d'autant plus long que la zone couverte est importante. Que les clichés soient nombreux parce qu'ils couvrent une grande surface ou parce qu'ils sont répétés dans le temps pose le même problème. L'une des solutions qui se présente pour limiter ce temps de travail est l'automatisation des tâches. C'est le cas de plus en plus d'études, car les quantités de données utilisées sont parfois très importantes (P.E. Carbonneau et al. (2004) ont par exemple travaillé sur plus de 7 000 images, V. Benacchio et al. (2017) avaient à leur disposition 104 667 images). De la même manière que le fait un opérateur, les traitements automatisés des images se basent sur les propriétés locales de l'image, des algorithmes permettant de synthétiser l'information complexe que l'œil interprète immédiatement. Les principes généraux utilisés en traitement d'images et qui tirent parti de ces propriétés locales sont présentés ci-dessous.

II.2- Exploitation du signal radiométrique

II.2.1- Signature spectrale des objets

Les capteurs radiométriques utilisés en télédétection transforment une quantité d'énergie lumineuse captée (la radiance, ou luminance et parfois la réflectance) en information numérique. Chaque objet a des propriétés radiométriques qui lui sont propres dans chaque longueur d'onde : il s'agit de la« signature spectrale »(Lejot, 2008).Pour certains objets, la signature spectrale présente une grande variation d'intensités lumineuses et cette gamme peut être considérée comme une échelle de valeurs. Cette propriété est exploitée pour distinguer des objets entre eux. M.S. Kulikova (2009), par exemple, étudie des espèces d'arbres et base sa distinction entre les espèces de conifères et les espèces à feuilles caduques sur le fait que les feuillus réfléchissent beaucoup plus les longueurs d'onde de l'infrarouge que les résineux. D.J. William et al. (2003) se basent aussi sur des signatures spectrales distinctes pour discriminer deux espèces de plantes aquatiques : la figure 5 montre que les deux espèces étudiées présentent des spectres de réflectance particulièrement différents aux longueurs d'ondes 0,574 et surtout 0,681 µm.



<u>Figure 5 : Spectre de réflectance de l'eau et de deux espèces de végétation aquatique immergée(Va = Vallisneria</u> <u>americana ; My = Myriophyllumspicatum</u>). William et al, 2003, p.388.

II.2.2- Gradients lumineux et absorption

La signature spectrale des objets peut également être exploitée pour étudier des gradients tels que la température de surface ou la profondeur de l'eau. L'étude de la profondeur de l'eau par imagerie est possible en se basant sur le principe d'absorption, donc d'atténuation de l'intensité de la lumière dans la colonne d'eau. L' « absorption » est un phénomène physique qui correspond au fait que l'énergie lumineuse d'un rayon incident n'est restituée qu'en partie par la surface concernée. Généralement, la part de lumière captée par cette surface est transformée en énergie thermique (Béal, 2006). Selon D.R. Lyzenga (1978, d'après D. Feurer et al., 2008), l'énergie lumineuse décroit exponentiellement dans la colonne d'eau. L'information de l'image serait donc relative à la profondeur de l'eau (figure 6). Il existe plusieurs méthodes pour extraire une information bathymétrique d'une image couleur, mais l'une de celles couramment utilisées consiste à étudier une variable X, corrélée à la profondeur de l'eau, selon l'équation (2) (Feurer et al., 2008) :

$$Xi = ln(Li - Lio)$$
 (2)

où i est l'indice de la bande spectrale exploitée,

Li est la radiance mesurée par le capteur,

Lio est la radiance d'une colonne d'eau théorique infinie.

Les possibilités de mesurer des profondeurs dépendent des conditions de turbidité de l'eau car pour une longueur d'onde, des conditions atmosphériques et un type de fond donnés, la valeur de la profondeur d'extinction du signal lumineux dépend du coefficient d'atténuation de l'eau, dont le principal facteur est la turbidité. En réalité, il n'est possible de mesurer une profondeur que si le rayonnement lumineux atteint une surface et s'y réfléchit. Comme il a été dit plus haut, différents substrats ont différentes signatures spectrales (Gilvear et al., 2007 ;Fearns et al., 2011). En fonction des conditions locales, du contexte de chaque site étudié, mais également de la qualité des images, la corrélation entre les variables couleur et profondeur est différente (Moretto et al., 2013).



Figure 6 : Zones en eau (gauche) et bathymétrie couleur (droite) sur un sous-tronçon du Tagliamento (Italie) en 2011. Moretto et al., 2013, page 133.

II.3- Etude de la texture

Le signal radiométrique d'une image représente en soit une information, mais la variabilité locale des valeurs radiométriques renseigne également sur les objets contenus dans l'image. D'après P.E. Carbonneau et al. (2005b), la « texture » correspond à la caractérisation de l'arrangement spatial des niveaux de gris entre les pixels dans une zone d'une image.

II.3.1- Matrice de cooccurrence

Mesurer la texture dans une image permet donc d'étudier de manière statistique l'entourage de chaque pixel en termes de niveaux de gris (Regniers, 2014).C'est ce que permet la « matrice de cooccurrence », présentée par M. Haralick et al. en 1973, qui correspond à une matrice de valeurs « spatio-dépendante » des niveaux de gris dans l'image. La matrice de cooccurrence, qui n'est toutefois pas la seule manière, mais l'une des plus répandues, de représenter la texture d'une image (Regniers, 2014), est la matrice des fréquences relatives P_{ij} dans laquelle deux cellules voisines séparées d'une distance *d* apparait dans l'image (Haralick et al., 1973). L'équation (3) est donnée par H. Drouin (2007) :

$$\mu_{i} = \sum_{i,j=0}^{N-1} i(P_{i,j}) \qquad \mu_{j} = \sum_{i,j=0}^{N-1} i(P_{i,j})$$
(3)

Avec : P_{i, j}, probabilité de cooccurrence à la cellule (i, j) de la matrice de cooccurrence de niveaux de gris symétrique,

- i, valeur de niveau de gris du pixel de référence,
- j, valeur de niveau de gris du pixel voisin.

 μ_i (équation de gauche) est calculée en fonction du pixel de référence (i) et μ_j (équation de droite) est calculée en fonction du pixel voisin (j).

Les dimensions de cette matrice carrée correspondent au nombre de niveaux de gris contenus dans l'image. Pour limiter sa taille et son temps de calcul, il est possible (et courant) de rééchantillonner les couleurs de l'image à 8, 16 ou 32 (Carbonneau et al., 2005b). Comme ce sont des probabilités d'occurrence des paires de niveau de gris qui sont étudiées, il faut diviser le nombre d'occurrences par le nombre total de paires de pixels contenues dans l'image.

II.3.2- Indices de texture

Cette matrice étant toutefois compliquée à manipuler en tant que telle, il est préférable de résumer l'information qu'elle contient par des valeurs simples, qui permettent de la traiter et de

l'interpréter de manière plus aisée. Des indices de textures ont ainsi été proposés par M. Haralick(1973). Ceux-ci sont bien souvent intégrés dans des algorithmes de classification ou de segmentation (Conners et al., 1984). De nombreux indices peuvent être calculés à partir de la matrice de cooccurrence, et leur intérêt est tel, notamment pour la classification des images, que plusieurs auteurs se sont attachés à optimiser leurs temps de calcul (Miyamoto et Merryman, 2005). Les équations(4) et (5) présentent les deux indices de texture les plus utilisés pour résumer l'information de texture d'une image : l' « entropie texturale »(E), et l' « inertie texturale » (I) de R.W. Conners et al. (1984). L'équation (4) est donnée par P.E. Carbonneau et al. (2005b) et l'équation (5) est donnée par P.E. Carbonneau (2005) :

$$E = \sum_{i} \sum_{j} \mathbf{P}_{ij} \log \mathbf{P}_{ij}$$
(4)
$$I = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i - j)^2 P_{ij}$$
(5)

Avec : I, l'inertie texturale, sans dimension,

E, l'entropie texturale, sans dimension,

i et j, les niveaux de gris dans la matrice de cooccurrence P de dimension (L, L).

II.3.3- Exploitation de la texture en traitement d'images

P.E. Carbonneau et al. (2005b) soulignent que les approches de segmentation d'images utilisant la texture donnent de biens meilleurs résultats que celles ne prenant en compte que des indices radiométriques, aussi complexes qu'ils soient. L'emploi de la texture est complétement justifié dans le cadre de l'étude des rivières graveleuses par imagerie ; elle permet notamment d'étudier la granulométrie des bancs émergés (Carbonneau et al., 2004), ou immergées (Carbonneau et al., 2005a) et de distinguer des zones ensablées et graveleuses (Carbonneau et al., 2005b). Afin de conserver une information spatiale dans l'image, les auteurs travaillent dans des fenêtres qui divisent l'image en zones plus petites et dans lesquelles ils calculent des matrices de cooccurrences « locales ». En 2014, O. Regniers réussissait à classer par tranches d'âges des forêts de pins maritimes, via des indices de texture (figure 7). Pour cela, il prenait en compte le diamètre des arbres, l'aspect des rangs et la présence ou pas de trouées. Cependant, le même travail appliqué à des types de parcelles viticoles a été bien moins concluant car l'auteur affirme que dans ce cas, les distances inter-rangs sont bien moindres, et s'approchent parfois de la résolution spatiale des images. Il met ici en évidence le lien entre la résolution des images et l'échelle de texture exploitable. En 2009, M.S. Kulikova s'intéressait à l'espèce des arbres repérés dans l'image. Elle utilisait des
descripteurs radiométriques qu'elle combinait avec des informations texturales et elle associait enfin à cela des indices géométriques pour classer les individus en quatre catégories. A chaque étape, les performances de son modèle étaient améliorées. Pour cartographier différents types de glace constituant le couvert glaciaire de deux cours d'eau du Canada, H. Drouin (2007) a également utilisé des indices de texture calculés à partir de la matrice de cooccurrence.



Figure 7 : Exemples d'occupations du sol texturées dans les images optiques THR.Regniers, 2014, page 1.

II.4- Classification automatique des images

La classification des images consiste à attribuer à chaque pixel une catégorie, en fonction de ses propriétés. Comme il a été dit plus haut, cela peut se faire visuellement : l'opérateur se base sur les propriétés visuelles des pixels, qu'il interprète afin de les classer dans la catégorie adéquate. Il peut ainsi produire des cartes d'occupation du sol, par exemple. D'après D.J. Gilvear et al. (2004), l'interprétation visuelle des clichés reste la méthode la plus précise pour détecter les objets au sein des images et les identifier correctement. Cependant, cette méthode devient très compliquée pour des zones étendues ou pour un grand nombre d'images, c'est pour cela que la tendance à essayer d'automatiser ces traitements est croissante. La classification automatique produit des résultats intéressants et permet d'avoir des estimations correctes de la présence des classes d'objets dans l'image (Gilvear et al., 2004).

II.4.1- Méthodes orientées-pixels ou orientées-objets

Il existe de nombreux algorithmes permettant de classer de manière automatique des objets, qui consistent à prédire une variable de réponse qualitative en fonction d'une ou plusieurs variables d'observation (James et al., 2013). Dans le cas particulier du traitement d'images, elles se distinguent en deux grandes catégories (Geerling et al., 2009). La « méthode orientée-pixels » consiste à classer individuellement chaque pixel de l'image dans différentes catégories, en fonction de ses propriétés radiométriques. Malheureusement, même si cela permet de délimiter des zones assez précisément, le résultat produit souvent un effet dit « poivre et sel » où certains pixels isolés ne sont pas classés comme leurs voisins. Comme cela est souvent gênant lorsqu'il s'agit de délimiter des zones homogènes, il est possible de recourir à différents filtres et méthodes statistiques pour éviter ce genre de phénomène.

La « méthode orientée-objet » consiste à classer des zones homogènes qui ont été délimitées selon les informations contextuelles de l'image, en fonction des propriétés spatiales (par exemple la proximité des éléments entre eux, aussi appelée l' « auto-corrélation spatiale ») et spectrales des pixels, qui sont regroupés selon leurs similarités (Heumann, 2011). Cette seconde méthode est plus semblable à l'analyse visuelle des images, car l'œil n'interprète pas chaque pixel individuellement mais des zones qui paraissent homogènes. Les objets segmentés deviennent alors les entités d'analyse, dans lesquelles sont calculées des statistiques spectrales simples telles que la moyenne ou l'écart type, ou plus complexes telles que des indices de texture (Conners et al., 1984). La forme des objets créés, via des indices géométriques de circularité, compacité, angularité etc., peut également être utilisée pour les décrire (Kulikova, 2009 ; Roussillon et al., 2009). Ces paramètres radiométriques, texturaux et géométriques constituent les variables d'observation sur lesquelles se base la classification automatique.

II.4.2- Apprentissage supervisé et non supervisé

D'un point de vue statistique, il est possible de séparer les algorithmes de classification en deux groupes : avec apprentissage supervisé ou non supervisé (James et al., 2013). L' « apprentissage non supervisé » correspond à une situation dans laquelle pour chaque observation (donc chaque pixel ou chaque objet) un ensemble de mesures (les valeurs des descripteurs) qui n'est pas associé à une réponse (la classe de l'objet) est disponible. C'est-à-dire que pour aucun des pixels ou objets de l'image la classe n'est connue a priori. Il existe différentes procédures statistiques pour conduire une telle démarche. La plus commune est sans doute la classification hiérarchique ascendante. L'algorithme produit des classes par regroupement des individus similaires. Ces classes, dont seul le nombre a été défini au départ, sont identifiées a posteriori de la classification.

Les méthodes de classification avec « apprentissage supervisé »se basent au contraire sur des catégories prédéfinies, pour séparer les objets en fonction de la probabilité qu'ils appartiennent à l'une ou l'autre de ces classes. Une partie des données est classée par un opérateur à dire d'expert et sert à l'apprentissage : pendant cette phase, un modèle qui discrimine au mieux les différents

groupes d'objet est élaboré. Il est ensuite appliqué aux données non étiquetées afin de prédire leur classe. Ces méthodes sont nombreuses et la régression logistique, l'analyse discriminante, les *random forests*, le SVM (Support Vector Machine), peuvent par exemple être citées. D'après D.J. Gilvear et al. (2004), la classification supervisée donne de meilleurs résultats que la classification non supervisée, en ce qui concerne la discrimination des éléments hydromorphologiques d'un corridor fluvial.

II.4.2.a- Random forests

L'approche de classification par « *random forest* » est basée sur celle des « arbres de décision », méthode simple et qui rend l'interprétation des données relativement aisée (James et al., 2013). Cependant, la méthode des arbres de décision n'est pas compétitive avec d'autres approches par apprentissage supervisé en termes de précision de la prédiction. De petites modifications dans les données d'entrainement induisent en effet une grande variance entre les différents arbres, ce qui conduit à de faibles précisions des résultats de classification (Stumpf et Kerle, 2011). Le principe des *random forests* est de produire de nombreux arbres de décision grâce à des sous-jeux aléatoires formés parmi les données d'entrainement et les variables descriptives disponibles. Chaque arbre représente une voix dans le vote pour l'appartenance de l'objet/pixel à l'une des classes. La classe affectée à l'objet/pixel est alors simplement celle qui obtient la majorité des voix. Un tel ensemble présente des performances précises et robustes.

II.4.2.b- Support Vector Machine (SVM)

D'autres méthodes de classification supervisée, qui nécessitent des moyens de calcul informatiques beaucoup plus importants, donnent également de très bons résultats, comme le SVM. C'est une méthode bien adaptée aux espaces de classification non linéaire avec de grandes dimensions (Heumann, 2011). En télédétection, c'est un outil utile pour réaliser des classifications quand les variables, tirées de données multi- voire hyper-spectrales, sont séparées par groupes de manière complexe (non linéaire). L'expression « hyper plan dans un espace spectral à n dimensions »est employée pour parler de la fonction qui sépare ces classes. C'est la méthode qu'utilisait M.S. Kulikova en 2009 pour classer les objets de ses images en quatre catégories d'espèces d'arbres.

II.5- Détection automatique d'objets

II.5.1- Traitements classiques

Les traitements automatiques des images peuvent permettre la détection d'objets ponctuels dans une image, tels que des fragments de bois déposés dans une bande active par exemple. Pour

parvenir à cela, W.A. Marcus et al. (2003) ont tout d'abord appliqué un masque à l'image hyperspectrale étudiée, afin d'isoler les zones d'intérêt du reste, pour limiter les quantités de données à traiter : seuls les bancs émergés ont été conservés car c'est là que se dépose le bois. Une classification des pixels de ces zones d'intérêt est alors réalisée, qui crée une image dérivée où chaque pixel représente une probabilité d'être du bois. Cette classification se fait suite à un apprentissage et les auteurs trouvent que la détection fonctionne mieux quand des pixels utilisés pour cet apprentissage sont plutôt mixtes que purs. Grâce à sa forte signature spectrale, le bois se détecte bien même s'il a une taille inférieure à celle du pixel. Cependant, W.A. Marcus et al. (2003) comme B.J. MacVicar et al. (2009) estimaient que les pièces de bois se distinguaient mal car elles sont souvent comprises dans des pixels mixtes et que le taux de mauvaises détections augmente avec les résolutions les plus grossières. Pour ce genre de travaux, une résolution spatiale et spectrale suffisante est requise.

II.5.2- Avantages de la vidéo

Afin d'estimer le bois en transit pour évaluer le budget ligneux d'un cours d'eau, il est également possible d'utiliser des images acquises à très haute fréquence, voire de la vidéo. Cela implique l'installation de capteurs in situ, qui permettent de remplacer un opérateur pour l'observation d'un cours d'eau et présentent l'avantage d'un angle de vue fixe. La méthode automatique employée par I. Ali et L. Tougne (2009) pour traiter de telles images repose alors sur deux étapes : la segmentation des images et la reconnaissance du bois. Les informations contenues dans deux types de masques sont combinées pour la segmentation. Ces masques, dits « d'intensité » et « de gradient » se basent sur les niveaux de gris des pixels et de leurs voisins et permettent de distinguer les objets en mouvement sur la surface de l'eau. Une comparaison des images consécutives permet de trier les objets selon qu'il s'agit de structures turbulentes ou de bois et de dénombrer alors ces derniers. Cette méthode donne des résultats intéressants ; les auteurs obtiennent un taux de vrais positifs de 90%.La vidéo permet éventuellement de caractériser la forme de l'objet, de noter par exemple la présence de racines, de branches ou de feuilles. Cette approche permet ainsi de caractériser l'état du bois et sa provenance, voire de calculer des vitesses de transport (MacVicar et al., 2009).

II.5.3- Méthode LSPIV

D'autres auteurs tirent parti du potentiel de l'imagerie in situ avec le développement du LSPIV (*Large-Scale Particle Image Velocimetry*). Cela permet d'estimer la vitesse de surface d'un cours d'eau sur des séquences d'images (Hauet et al., 2014). Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre et s'appuie sur un équipement facile à mobiliser, tel qu'un trépied ou un mât télescopique (Dramais et al., 2011). Une caméra acquiert des images à haute fréquence d'un cours

d'eau sur lequel des traceurs sont injectés. Ces particules flottantes sont identifiables par traitement des images, et leurs positions relatives sur différents clichés renseignent sur leur vitesse de déplacement. Cependant, les conditions extérieures impliquent quelques difficultés de traitement par rapport à des images acquises en laboratoire, telles que l'immobilité du capteur, les variations de luminosité ou la distorsion de l'image à cause de l'inclinaison du capteur lors de l'installation (Daigle et al., 2013). Ces auteurs ont utilisé cette méthode pour évaluer les vitesses de déplacement des blocs de glace sur deux cours d'eau canadiens. Une classification des pixels de l'image, basée sur la radiométrie et la texture, permet d'identifier ceux qui correspondent à de la glace, et une comparaison des clichés consécutifs renseigne sur leur vitesse de déplacement.

III- Etude des milieux fluviaux par imagerie in situ

Comme évoqué plus haut, l'imagerie de terrain – ou « imagerie in situ » – est un bon outil, complémentaire à la fois de l'imagerie satellite et aéroportée et des campagnes de mesures de terrain. De nombreuses études réalisées à partir de clichés acquis au niveau du sol ou de supports terrestres ont été menées en rivières, afin de valider des mesures, de préciser des modèles statistiques ou bien même pour remplacer un opérateur de terrain ou un cliché aérien ou satellite (voir tableau 1). Cela est illustré ci-dessous grâce à quelques exemples de la littérature publiés au cours des 15 dernières années.

III.1- Description et évolution d'un environnement fluvial

L'imagerie de terrain permet de décrire les environnements fluviaux et les processus qui les régissent. Les lits fluviaux sont caractérisés par différentes formes, ils peuvent présenter un ou plusieurs chenaux en eau, différents faciès d'écoulements, des îles ou des bancs de graviers par exemple. Chacun de ces éléments peut être caractérisé de manière individuelle. Il est par exemple possible d'étudier la profondeur des chenaux en eau, de caractériser la granulométrie des bancs de galets ou d'étudier des phénomènes thermiques qui affectent les dynamiques physiques et écologiques du cours d'eau.

III.1.1- Description des formes fluviales

En 2009, W. Bertoldi et al. ont utilisé des images obliques acquises à partir d'un point de vue surplombant deux tronçons d'un cours d'eau tressé des Alpes italiennes, le Tagliamento. Les images les plus anciennes étaient acquises manuellement grâce à un appareil photo mais une caméra automatique a ensuite permis de remplacer l'opérateur pour l'acquisition de clichés à fréquence régulière. Le but est de comprendre l'évolution des aspects paysagers du cours d'eau en lien avec les

débits enregistrés : les surfaces immergées et la connexion des entités en eau, ainsi que la planimétrie de la bande active avant et après une crue sont étudiés visuellement. Il est alors possible de caractériser les crues en fonction de leur importance et de leur impact sur les formes du lit. Grâce à certaines mesures réalisées sur le terrain, les hauteurs d'eau observées sur les images peuvent être quantifiées. Les auteurs ont ainsi pu se rendre compte que des changements morphologiques significatifs avaient lieu pour des débits très inférieurs au débit plein bord (sont considérés comme des débits « de plein bord » les débits dont la période de retour est de 2,5 ans). Lors des débits fréquents, W. Bertoldi et al. (2009) ont en effet pu constater des ajustements constants des formes présentes dans la bande active, par des modifications, soit graduelles, soit brutales. Les débits les plus importants ont par contre clairement un effet sur des entités bien établies comme les îles ou la plaine inondable, par arrachement de la végétation et déstabilisation des formes. En 2010, W. Bertoldi et al. parlaient, au sujet de ces deux types d'évolutions, d'un fonctionnement sur deux échelles spatiale et temporelle différentes. Les résultats de 2010 sont cohérents avec ceux observés en 2009, mais grâce à l'orthorectification (correction de la géométrie) des images qui est alors appliquée, la quantification des changements observés est possible et les volumes de sédiments mobilisés au cours d'une crue sont connus.

L'acquisition et le traitement d'images aériennes ou satellites (Pasqualini et al., 2001 ; Capo et al., 2013 ; Atha, 2013 ; Boivin et al., 2017), éventuellement comparées avec des données historiques anciennes (Zanoni et al., 2008 ; Bertoldi et al., 2009) sont intéressantes pour l'étude et la compréhension de l'évolution des milieux fluviaux. L'imagerie in situ, via l'utilisation de caméras automatiques, permet le même genre d'études et de comparaisons à des pas de temps très fins. Un enregistrement continu et sur du long terme permet de couvrir tous les évènements hydrologiques qui sont à la base des changements observés, et de comprendre quel est leur rôle respectif en fonction de leur position dans la chronologie et de leur fréquence.

III.1.2- Elaboration de modèles numériques de terrain

Un autre point particulièrement intéressant de l'imagerie de terrain peut être évoqué concernant l'évolution des lits fluviaux. C'est la haute précision spatiale qui est accessible grâce à des capteurs installés à proximité des objets étudiés. J. Chandler et al. (2002) ont par exemple installé trois capteurs sur un relief surplombant le lit de la rivière Sunwapta au Canada. Chaque caméra est éloignée de celles d'à côté d'une quarantaine de mètres et leur visée permet un recouvrement stéréoscopique des clichés. Un modèle numérique de terrain d'un linéaire de 125 m sur un tronçon tressé est ainsi possible, avec une résolution de 0,2 m. En 2003, P.E. Carbonneau et al. emploient la photogrammétrie pour la création de MNT de précision, afin d'étudier les bancs de galets dans une

rivière du Québec, la Sainte Marguerite. Ils obtiennent des précisions sub-centimétriques, qui ne dépassent pas 10% du D50 des particules composant les zones étudiées. Cependant, à la différence de l'expérience de J. Chandler et al. (2002), les images sont acquises par coulissement sur un portique, donc vraiment très proches du sol, et avec un angle de vue à peu près vertical, ce qui ne requiert pas d'orthorectification des clichés.

Aujourd'hui, il est possible de réaliser très facilement des modèles numériques de terrain grâce à la méthode SFM (*Structure From Motion*, Javernick et al., 2014). Cette méthode est particulièrement accessible puisqu'elle exploite des données images qui peuvent être acquises avec n'importe quel appareil photographique du commerce. Elle ne nécessite pas de support, au contraire : un opérateur prend une série de clichés qui se recouvrent entre eux afin de caractériser l'objet étudié : un logiciel permet de relier les informations contenues dans les différentes images pour élaborer un modèle 3D de la surface photographiée. Les outils informatiques permettant ce genre de traitement sont très nombreux et parfois gratuits. L. Javernick et al. (2014) ont ainsi exploité le logiciel Photoscan, l'un des plus connus, pour modéliser deux tronçons d'un cours d'eau néo-zélandais. Les modèles produits obtiennent des résolutions de 21 cm pour des précisions verticales moyennes de 10 cm. Selon les auteurs, il suffirait d'un ordinateur assez puissant pour modéliser un linéaire de cours d'eau complet avec une précision largement satisfaisante pour des études morphologiques.

III.1.3- Estimation de la bathymétrie

L'étude de la morphologie de la bande active concerne également les zones immergées. La description par imagerie des habitats piscicoles a souvent consisté en un recensement des faciès d'écoulements (Marcus et al., 2003 ; Raso, 2011), qui sont aussi caractérisés par la granulométrie des particules (Carbonneau et al., 2004 ; Lejot et al., 2011 ; Bergeron et Carbonneau, 2012). Ces successions de faciès ont permis la définition de modèles théoriques régissant les structures et le fonctionnement des cours d'eau, vérifiés, complétés ou précisés grâce à des mesures de terrain. A cause du temps de travail requis pour les acquérir, celles-ci restent ponctuelles et éparses dans l'ensemble des systèmes étudiés (Carbonneau et al., 2012a). L'imagerie doit pouvoir permettre d'évaluer les hauteurs d'eau de manière systématique et continue sur tout un linéaire fluvial, et c'est ce qu'ont tenté d'appréhender plusieurs auteurs (Louchard et al., 2003 ; Legleiter et al., 2004 ; Fonstad et Marcus, 2005 ; Lejot et al., 2007 ; Feurer, 2009 ; Moretto et al., 2013).

Si elle ne permet pas de couvrir d'importants linéaires, l'imagerie in situ est aussi un outil intéressant pour ce genre d'études, en ce qu'elle apporte des précisions sur la faisabilité ou la complexité de certaines mesures par imagerie à plus large échelle. En 2007, D. Gilvear et al. ont par

exemple utilisé des capteurs in situ pour simuler la réponse multispectrale obtenue par imagerie aéroportée ou satellite sur différents types de substrats et à différentes hauteurs d'eau. La rivière Forth (Ecosse) étant soumise aux marées, des substrats artificiels ont été déposés puis progressivement immergés. De nombreuses mesures par imagerie verticale ont été faites grâce à un spectro-radiomètre afin de caractériser différentes hauteurs d'eau, dans des conditions ensoleillées. Les différences de réflectances observées sont plus importantes pour des hauteurs d'eau inférieures à 0,75 m et les longueurs d'ondes optimales sont propres à chaque type de substrat. Cependant, les résultats montrent une fenêtre optimale pour la cartographie des profondeurs dans les longueurs d'onde du visible et du proche infra-rouge, en dessous de 1 m de hauteur d'eau.

III.1.4- Caractérisation de la granulométrie et de la morphométrie

La qualité des habitats piscicoles et en particulier salmonicoles est directement influencée par la granulométrie des substrats, qui est donc parfois utilisée comme indicateur de la qualité du cours d'eau (Bergeron et Carbonneau, 2012). Grâce à l'étude de la texture des images, il est possible de cartographier les tailles de particules sur les surfaces émergées (Carbonneau et al, 2004) mais également sur les zones immergées (Carbonneau et al, 2005a), bien que la précision des données soit moins bonne en présence d'eau. Mais d'autres méthodes existent pour appréhender la taille des particules constitutives d'une surface.

W. Bertoldi et al. (2012) présentent par exemple une approche orientée-objet qui consiste à délimiter chaque particule individuellement pour en mesurer la taille directement. Cette méthode est fortement liée aux conditions d'éclairement de la scène, l'optimisation des contrastes étant nécessaire pour discerner au mieux les contours. La méthode présentée par D.J. Graham et al. (2005) produit des résultats dont la précision est similaire à celle obtenue lors des échantillonnages du protocole Wolman, très largement utilisés sur le terrain. Toutefois, les temps de travail sont divisés par six, voire par vingt. Elle consiste en l'acquisition d'images verticales grâce à un appareil photo numérique sur le terrain. L'une des contraintes de la méthode est de s'assurer que la taille de la plus petite particule d'intérêt dans ces images mesure au moins 23 pixels de large. Ce n'est pas l'information de couleur mais d'intensité qui est exploitée pour leur segmentation. Des informations de longueur de l'axe b et de surface sont alors dérivées des images segmentées.

T. Roussillon et al. (2009) exploitent au contraire la couleur pour délimiter le contour des particules et en mesurer divers indices de taille et de forme. Ils préconisent l'acquisition d'images verticales de galets disposés sur une plaque peinte en rouge et mesurant un mètre de côté. L'optimisation des différences de couleurs entre les particules et la plaque utilisée permet d'assurer la meilleure segmentation possible. La comparaison de ce genre de mesures en différents points du

linéaire d'un cours d'eau permet de connaître rapidement l'angularité des particules et d'étudier les processus d'abrasion qu'elles subissent au cours du temps.

III.1.5- Analyse de la température

Une autre mesure physique décrivant l'état des cours d'eau peut être décrite par imagerie in situ : la température des masses d'eau. La thermographie acquise à partir du sol, qui présente quelques limites par rapport aux acquisitions aéroportées, n'est pas développée ici. L'angle d'observation oblique peut par exemple conduire à des imprécisions des mesures à cause des reflets des éléments de la ripisylve (Wawrzyniak, 2012). Cependant, cet auteur met en avant plusieurs avantages que présente ce genre d'imagerie. Outre un faible coût, une position fixe et une résolution spatiale élevée déjà évoqués, elle offre la possibilité de suivis dans le temps. Cela est particulièrement intéressant pour l'étude des cours d'eau, qui évoluent aussi bien au niveau spatial que temporel. Les évolutions observées ont en effet lieu à la fois le long du linéaire et au cours des saisons, voire à des échelles de temps plus longues.

III.2- Mesures diachroniques, suivi temporel à pas de temps fins

L'acquisition d'images à haute fréquence temporelle, qui sont donc comparables entre elles, est l'un des points forts de l'imagerie de terrain. En se substituant ou en complétant des observations de terrain, l'imagerie in situ présente de sérieux atouts pour l'étude des cours d'eau, les processus biophysiques en jeux étant souvent rapides et parfois imprévisibles. L'installation d'un capteur sur un site permet de disposer de périodes d'observation beaucoup plus longues que celles acquises lors de visites de terrain. Et l'enregistrement de données en continu permet de comprendre des phénomènes et de les étudier de manière indépendante.

III.2.1- Connaissance et évolution des processus fluvio-glaciels

Concernant le fonctionnement temporel des cours d'eau, certains subissent des évolutions très importantes à l'échelle annuelle. Selon T. Buffin-Bélanger et N.E. Bergeron (2011), d'après T.D. Prowse et N.C. Gridley (1993), 60% des bassins versants majeurs de l'hémisphère Nord seraient sujets aux processus fluvio-glaciels. Ces processus impliquent une complexité supplémentaire de la morphodynamique des cours d'eau. La formation d'un couvert de glace est en soit un phénomène complexe. Il existe différents types de glace présentant chacun des conditions de formation et des propriétés particulières, qui se succèdent ou se côtoient au cours de l'hiver. La croissance des surfaces de glace peut conduire à l'obstruction complète de la surface libre et modifier complétement les conditions d'écoulement.

Suite à la rupture des couverts de glace, la formation d'embâcles de glace peut causer des inondations très importantes, aux conséquences majeures pour les infrastructures, les communautés riveraines, et la vie aquatique. Pourtant, les efforts pour comprendre et prédire l'occurrence et l'importance de ces embâcles sont très récents (Beltaos, 2008). En effet, l'étude des processus et formes liés aux glaces fluviales est assez complexe car ceux-ci résultent des conditions hydrométéorologiques subies et parce que les conditions de terrain inhérentes rendent les campagnes de mesures plutôt compliquées (Buffin-Bélanger et Bergeron, 2011). L'imagerie de terrain peut encore une fois être un outil précieux pour l'aide qu'elle peut fournir à ce niveau. Remplacer un opérateur par une caméra automatique est par exemple un moyen judicieux de réduire l'effort de terrain et d'être présent en tout temps. C'est la méthode employée en 2009 par Y. She et al. pour étudier les impacts d'embâcles de glace survenus sur la rivière Athabasca en Alberta. Des images prises à hautes fréquences (entre 1 et 15 minutes) par des caméras installées sur quelques points le long du cours d'eau ont permis de compléter les observations aériennes et de terrain pour déterminer le schéma cyclique de stockage et de déstockage de l'eau par les embâcles. J. Dubé (2009) a procédé sensiblement de la même manière pour l'étude de la formation d'un couvert de glace dans une succession seuil-mouille de la rivière Rimouski à Sainte-Odile-de-Rimouski au Québec. Des images prises avec un cadre fixe ont permis de décrire et de quantifier cette évolution quotidiennement.

Sur un cours d'eau de taille beaucoup plus importante (le Saint Laurent, au niveau de la ville de Québec), D. Bourgault (2008) a étudié le déplacement des blocs de glace. Grâce à des images acquises par une caméra automatique, la comparaison de deux clichés consécutifs permet de caractériser les vitesses de déplacement de ces blocs. D'après l'auteur, le fait d'analyser ces images visuellementpermet d'exploiter la très grande précision de l'œil humain, la résolution spatiale étant extrêmement variable, en fonction de la distance entre le capteur et la cible. Cependant, ce travail est laborieux et l'automatisation des traitements est aujourd'hui un enjeu majeur pour quantifier les phénomènes, voire envisager des suivis en temps réel. Mais dans un tel cas, elle semble compliquée et l'auteur indique que les méthodes PIV sont par exemple inefficaces. Au vu de la différence de couleur et de la texture importante de la glace par rapport à l'eau, elles sembleraient pourtant toutes indiquées. Mais les patrons complexes de déplacement des blocs de glace ainsi que les ombres projetées des nuages et les changements de luminosité entre deux prises de vue constituent semble-t-il des limites importantes. A. Daigle et al. ont toutefois réussi à mettre en place en 2013 la méthode PIV pour l'étude du déplacement des blocs de glace.

L'analyse automatique des vidéos de la débâcle de 2012 a également été un exercice difficile pour M. Boivin et al. (2017) sur la rivière Saint Jean (Québec), vu la nature de l'environnement étudié

et le fait que les bois flottés qu'ils souhaitaient détecter étaient mélangés aux blocs de glace transportés. L'analyse a finalement été conduite visuellement. Des taux de transport très élevés ont été mis en évidence, avec jusqu'à 15 pièces de bois détectées par minute, les débits enregistrés à ce moment étant relativement faibles (60 m³/s). Pour une crue d'eau libre observée sur le même cours d'eau, le maximum de pièces de bois détectées par minute atteint seulement 10, pour des débits atteignant pourtant 280 m³/s.

III.2.2- Estimation des flux de bois et budget ligneux

Etudier les flux de bois transportés par les cours d'eau est important pour l'établissement des budgets ligneux. D.J. Martin and L.E. Benda (2001) ont mis en évidence l'importance de réaliser ces budgets ligneux à l'échelle des bassins versants car la dynamique du bois est primordiale au niveau écologique, en particulier au niveau de la répartition des organismes aquatiques dans les réseaux hydrographiques. Les recherches de V. Ruiz-Villanueva et al. (2014b) sur les budgets ligneux se focalisent sur la question des risques d'inondation liés à la formation d'embâcles de bois sur certains tronçons de cours d'eau. Cela rejoint les problématiques des couverts de glace et là encore, l'imagerie in situ peut être intéressante.

L'établissement d'un budget ligneux comprend plusieurs éléments clés parmi lesquels la mobilité et les flux de bois sont cruciaux, bien qu'ils ne soient encore que mal définis. Une fois recruté par le cours d'eau, le bois peut rester sur place parfois très longtemps : jusqu'à 1 000 ans, bien que généralement ce soit moins d'une centaine d'années (Bilby, 2003), voire même le temps de la crue qui l'introduit dans le chenal. Il peut être transporté vers l'aval, selon un schéma complexe d'accumulation/ré-entrainement qui dépend des conditions d'écoulement, de la rugosité du lit et des caractéristiques des pièces de bois (Braudrick and Grant, 2001 ; Boivin et al., 2017). Les comptages de bois pour l'élaboration de budgets ligneux reposent généralement sur un recensement des troncs ou débris isolés et des embâcles de bois répartis sur le terrain (Comiti et al., 2006, 2008; Lassettre et Kondolf, 2012; Ravazzolo et al., 2015; Boivin et al., 2015, 2017). Pourtant, la plupart du temps, l'acquisition de données de terrain est complexe et les observations résultent de plusieurs évènements de crue, les données correspondant à chaque évènement indépendant étant rarement disponibles. Mais comme il a déjà été dit plus haut, l'imagerie in situ pourrait être une solution pour s'affranchir de cette difficulté. Pour mesurer le flux de bois issus d'un bassin versant, B. Moulin et H. Piégay (2004) et V. Benacchio et al. (2017) ont enregistré les quantités de bois accumulées au cours du temps dans le réservoir du barrage de Génissiat sur le Rhône, sur des images acquises au niveau de la couronne du barrage. Celui-ci constitue un très bon site d'observation car le flux de bois est

complètement stoppé par le barrage. Les quantités de bois extraites mécaniquement de manière régulière ont été confrontées aux surfaces de l'embâcle de bois observées sur les images.

Le flux de bois peut également être estimé grâce à un comptage direct de bois flottant dans le chenal. Pour cela, l'imagerie est d'une grande aide et N. Kramer et E. Wohl (2014) ont acquis dans ce but des séquences photographiques à haute fréquence. Elles ont étudié l'efficacité de la détection des éléments ligneux en utilisant l'analyse visuelle d'images et ont montré que cette méthode était assez précise, comparativement à des observations réelles menées sur le terrain, quand le courant est relativement lent. Cependant, l'analyse visuelle de jeux de données importants étant un travail très long, B.J. MacVicar et al. (2009) puis B.J. MacVicar et Piégay (2012) ont essayé d'automatiser la détection du flux de bois sur des vidéos. Ces travaux menés sur l'Ain en France avaient pour but de détecter le passage du bois et de mesurer de manière quasi-instantanée les taux de transport. Ils ont montré que le transport du bois survenait à environ 2/3 du débit plein bord. Celui-ci est corrélé positivement et linéairement au débit jusqu'au niveau plein bord, puis cette relation devient beaucoup moins évidente pour des débits supérieurs. Il apparaît aussi que les taux de transport sont approximativement 4 fois plus élevés au cours de la phase ascendante des pics de crue que pendant la phase descendante.

Les travaux d'I. Ali et L. Tougne (2009), qui utilisent les mêmes images, exploitent les gradients locaux d'intensité pour détecter les contours des objets flottants, afin de dénombrer et caractériser les pièces de bois transportées. L'utilisation de différents masques et la comparaison des clichés consécutifs permet de mettre en évidence la présence et le déplacement de bois dans l'image, mais la rugosité de la surface de l'eau conduit à des fausses détections. En conditions extérieures, la contrainte majeure qui est mise en évidence est le phénomène d'apparition/disparition du bois flottant à la surface de l'eau, du fait de légères turbulences dans l'écoulement. C'est également ce genre de difficultés qu'ont rencontré D.A. Lyn et al. (2003), malgré une approche visuelle pour l'analyse des vidéos acquises au niveau d'un pont. L'accumulation de bois contre une pile et deux déflecteurs a été suivie et comparée au débit au cours du temps. En l'absence de vérification de terrain, certaines incertitudes persistent quant à l'immersion ou à l'export des pièces de bois qui disparaissent du champ de la caméra.

III.2.3- Mesure de la vitesse d'écoulement de surface par LSPIV (Large-Scale Particule Image Velocimetry)

La haute fréquence d'acquisition permise par l'imagerie de terrain peut être exploitée pour calculer des champs de vitesse de déplacement des éléments à la surface de l'eau. Cela peut permettre d'estimer les vitesses de courants de surface et par exemple renseigner sur les vitesses de déplacement d'éléments comme la glace, dont les accumulations peuvent être problématiques. D'après G.Dramais et al. (2011), la LSPIV repose sur cinq étapes : l'illumination de la scène, le déploiement de traceurs flottants à la surface de l'eau, l'enregistrement vidéo de leur passage, l'orthorectification des images et enfin leur traitement.

A. Hauet et al. (2014) présentent un logiciel : Fudaa-LSPIV, qui a été conçu pour faciliter l'application opérationnelle de cette méthode, qui est ensuite testée sur différents cas, en laboratoire et sur le terrain. Bien que cette méthode soit relativement aisée à mettre en place en extérieur, les conditions rencontrées, telles que les mouvements de la caméra, des variations de luminosité ou la distorsion de l'image à cause de l'orientation du capteur, compliquent quelque peu les traitements par rapport à des acquisitions en laboratoire (Daigle et al., 2013). Et d'après A. Hauet et al. (2008), avant leurs travaux, personne ne s'était penché sur l'estimation des incertitudes globales liées au déploiement du LSPIV en conditions naturelles, qu'il s'agisse de la disposition de la caméra par rapport à la rivière, les conditions d'éclairement du soleil, les propriétés des traceurs de surface ou encore l'effet du vent. C'est donc ce que ces auteurs ont tenté de réaliser en laboratoire, grâce à des simulations numériques. Les conditions de terrain imposent certains choix, au niveau de traceurs utilisés ou concernant les méthodes d'orthorectification des images, par exemple. Dans le cas de l'Arc, où l'eau présente un aspect très foncé à cause de la concentration élevée de sédiments en suspension, G. Dramais et al. (2011) ont dû utiliser une mousse blanche en guise de traceurs, afin d'optimiser leur détection sur les images.

Le géoréférencement des images requiert généralement des points de contrôle à la surface du miroir. Or, des points de contrôle fixes sont rarement disponibles à la surface de l'eau et les niveaux d'eau sont généralement instables (Daigle et al., 2013). L'emploi d'éléments flottants localisés précisément dans l'image a donc été nécessaire dans ce cas. Outre les patrons complexes de déplacement des blocs de glace qui pourraient servir de traceurs, D. Bourgault (2008) rencontraient des difficultés à l'application de la LSPIV à cause des ombres portées d'éléments mouvants comme les nuages, ou des changements de luminosité entre les différents clichés. Sur le même cours d'eau, A. Daigle et al. (2013) ont donc développé une méthode pour limiter ces effets sur les images. Un ajustement de la distribution des intensités des pixels pour améliorer les contrastes a permis de réduire l'impact des différences de luminosité entre images. Et les variations de luminosité dues au passage des nuages ont été réduites par soustraction, pour chaque image, de la valeur moyenne d'intensité des pixels. Toutefois, d'après les auteurs, les principales limites pour exploiter ces images restent les ombres et les reflets, qui peuvent être considérablement réduits grâce à l'utilisation d'un filtre polarisant.

III.2.4- Présence de biofilm

Le biofilm, ou périphyton, est l'association des différentes communautés microbiennes qui colonisent toute surface immergée. Cette pellicule se compose de trois groupes biologiques principaux qui remplissent chacun un rôle particulier et donnent son importance fonctionnelle à ce complexe microbien. Etant fixé sur le substrat, le biofilm ne peut que subir les conditions du milieu, qui s'imposent à lui. La disponibilité en nutriments, la pollution de l'eau, la température, la force de cisaillement du courant, le broutage, etc. sont toutes des conditions qui agissent sur la dynamique de croissance et l'évolution du périphyton.

Les micro-organismes exploitent directement les substances dissoutes dans le milieu, ils sont donc sensibles à tout changement dans la composition du milieu nutritif. Grâce à leur cycle de vie court et à leur importante capacité de multiplication, ils peuvent répondre rapidement et s'adapter aux changements environnementaux (Pesce et al., 2008). Pour ces raisons, l'étude du biofilm en milieu aquatique lentique, où le facteur principal agissant sur le développement du biofilm est la quantité de nutriments, permet de connaître la qualité du milieu, et surtout de rendre compte d'une perturbation, d'un stress ou d'une pollution chimique. Pour cette raison, le périphyton est appelé« bio-indicateur ». B. Moss (2010), indique ainsi que parmi les communautés algales, les diatomées prédominent au printemps, alors qu'en été ce sont les algues vertes et cyanobactéries, quand les premières se sont faites brouter par les invertébrés.

Dans les cours d'eau, le facteur limitant l'évolution et la quantité de biofilm semble être la vitesse du courant. E. Madigou (2005) et B. Moss (2010) indiquent que les algues de taille importante (algues filamenteuses et diatomées, voire algues rouges) se retrouvent dans les zones de faible vitesse, alors que dans les zones plus agitées se trouvent uniquement des cellules basses et bien adhérentes. Les substrats trop fins (sables à galets), et donc instables, ne sont pas colonisés, ou trop souvent remaniés pour permettre un développement du biofilm. Pour C. Othoniel (2006), la comparaison de l'évolution du biofilm dans différents niveaux trophiques ne sera en tous cas possible que si les échantillons ont subi les mêmes conditions hydrologiques.

En 2011, T. Raso mettait en évidence une répartition du biofilm non cohérente avec la distribution des faciès d'écoulement. Il semble que cette répartition était probablement liée aux courants et aux forces d'arrachement du cours d'eau. Une telle répartition constituerait selon lui une limite à l'estimation de la bathymétrie par imagerie satellite, qui se base sur l'aspect colorimétrique des images pour estimer la profondeur de l'eau. En 2012, j'ai également tenté de comprendre l'impact de la présence de biofilm sur la radiométrie des images, grâce à une caméra de terrain installée verticalement au-dessus de l'Ain. Les travaux entrepris alors ont été poursuivis et sont

présentés dans le cadre de ce travail de thèse. De la même manière, en 2008 M. Power et al. ont acquis des images quotidiennes d'une mouille afin d'observer au cours du temps la qualité du biofilm et des algues présentes. Les prises de vues étaient faites sous 5 angles différents à 8h, à partir d'une caméra installée sur une perche à environ 5 m de hauteur au-dessus de l'eau. Le régime méditerranéen du cours d'eau étudié permet d'observer les successions végétales qui se réalisent sans perturbation. Ainsi, la dominance taxonomique et les changements de couleurs macroscopiques associées peuvent être plus fortement corrélés que dans des cours d'eau où les perturbations surviennent de manière irrégulière. Une telle étude vise à pouvoir estimer par imagerie la composition des éléments présents au cours du temps. Pour cela, des clichés et des analyses réalisés au niveau du sol permettent de calibrer les images de la caméra.

III.2.5- Erosion des berges par processus subaériens

Avec les mouvements de masse et l'érosion fluviale, les processus subaériens sont l'un des trois processus qui conduisent à l'érosion des berges fluviales. Outre les changements de tracé en plan auxquels elle conduit, l'érosion des berges est aussi une source de particules qui peuvent participer au transport solide du cours d'eau. V. Hamel et al. (2013) ont essayé de quantifier les volumes extraits d'une berge de la rivière Ouelle au Québec, par ces processus subaériens, grâce à des acquisitions horaires d'images in situ, prises de la rive opposée. La comparaison des clichés a été faite visuellement, et les observations ont été comparées aux acquisitions LiDAR mensuelles sur la même zone. Alors que le LiDAR permet de quantifier les volumes érodés, l'observation des images permet de comprendre très précisément les mécanismes, à l'échelle horaire. Six processus différents ont ainsi été observés : le ruissellement à compétence élevée ou faible, le décrochement de particules, les avalanches de neige, les chutes de blocs et de graviers, et enfin les chutes d'arbres. Chacun de ces processus intervient à des moments particuliers, en général lorsque les températures sont proches de 0°C et après des précipitations. Cette méthode comporte toutefois des limites, notamment la visibilité quand la luminosité n'est pas optimale. De plus, les observations sont impossibles lorsque la berge est couverte par la neige, bien que les processus d'érosion liés à ces conditions soient surement très importants.

IV- Contraintes et limites de l'imagerie pour l'étude des cours d'eau

Compte tenu de l'intérêt de l'imagerie pour l'étude des milieux fluviaux, de nombreux auteurs ont comparé mesures de terrain et analyses d'images afin de voir si celles-ci pouvaient se substituer aux premières. Comme évoquées plus haut, certaines limites contraignent toutefois l'exploitation des données images. Si certaines de ces limites sont propres à l'imagerie en général, d'autres résultent des propriétés des milieux étudiés.

C.J. Legleiter et al. (2004) ont par exemple centré leurs travaux sur la caractérisation bathymétrique par imagerie, confirmant que ces développements méthodologiques étaient prometteurs. En effet, pour eux le calcul d'un simple ratio de bande constitue une variable reliée linéairement à la profondeur. Toutefois, la précision radiométrique, soit le nombre de bandes spectrales, et la résolution spatiale, donc la taille au sol des pixels, sont identifiées comme étant des limites fondamentales pour l'application de cette méthode. Selon W.A. Marcus (2002), travailler avec des images de 1 m de résolution plutôt qu'avec des pixels de 5 m de côté augmente la précision de la cartographie des micro-habitats dans un cours d'eau de 18% environ. Pour le même genre de travail, C.J. Legleiter et al. (2002, d'après Marcus et al., 2003) voient leur précision augmenter de 7% quand ils utilisent des images de 128 bandes spectrales au lieu de 8.

Les limites du traitement des images dans le domaine des sciences fluviales se regroupent en deux grandes catégories. La première concerne les qualités physiques de l'image et la visibilité de la scène. B.J. MacVicar et al. (2012) avaient ainsi identifié quatre limites : les conditions météorologiques, l'angle de vue, l'illumination et les contrastes. Ce sont globalement les mêmes éléments que mentionnait J. Lejot (2008), pour qui le signal enregistré par télédétection dépend à la fois des conditions atmosphériques et de la nature du sol, qu'il soit immergé ou non. Dans le cadre particulier de l'étude des milieux aquatiques, il évoquait également les propriétés de réflectance de la colonne d'eau. Pour lui, toute une partie de la qualité du signal enregistré résulte de phénomènes regroupés dans la seconde catégorie, relative à l'exploitation des images en télédétection. Ce sont les ombres portées, l'évaporation, les turbulences à la surface de l'eau, la turbidité de celle-ci, et l'hétérogénéité du fond. D.J. Gilvear et al. (2004) faisaient globalement le même constat, tout en considérant la possibilité d'automatiser les procédures de classification des images, malgré les reflets à la surface de l'eau et les ombres de la canopée. En plus de l'obstruction exercée par la canopée, ils mettent en évidence que lorsque la végétation recouvre certains éléments, leur détection visuelle devient parfois compliquée et est alors source d'erreurs de classification.

IV.1- Résolution spatiale

IV.1.1- Résolution des images et taille des objets étudiés

Les possibilités d'exploitation des clichés dépendent directement du capteur utilisé, il faut ainsi qu'il soit adapté à l'objectif et aux besoins de l'étude. Selon C.J. Legleiter et M.A. Fonstad (2012), audelà des considérations financières et logistiques, il faut prendre en compte 3 points : les résolutions radiométrique (capacité du capteur à détecter des petites différences de radiance) et spectrale (nombre de longueurs d'ondes couvertes et largeur des canaux) du capteur, et la résolution spatiale des images. Il conviendrait d'y ajouter la résolution temporelle du vecteur d'acquisition, qui est déterminante pour certaines questions. La résolution spatiale correspond à la taille au sol des pixels et dépend à la fois de la précision du capteur et de l'altitude du vecteur. Une image doit être assez détaillée pour permettre de détecter l'objet d'étude, et la taille du pixel ne devra ainsi pas être plus grande que la largeur moyenne du cours d'eau, sinon sa détection sera problématique (Legleiter et Fonstad, 2012). D'après ces auteurs, de plus en plus de satellites fournissent aujourd'hui des images aux résolutions inférieures à 2 m, mais les systèmes aéroportés restent avantageux car l'altitude de vol, donc la taille des pixels dans les images, sont modulables en fonction des besoins de la recherche en cours. Selon W.A. Marcus et al. (2003), une résolution trop grossière des images est un obstacle à l'étude des petits cours d'eau alors qu'une résolution élevée (inférieure à 5 m) doit en revanche permettre de cartographier même les petits cours d'eau de montagne, situés en tête de bassin par exemple. Cela peut ainsi permettre de comprendre l'impact de ces éléments dans le fonctionnement des processus fluviaux à l'aval.

En 2003, W. Turner et al. affirmaient que la télédétection produisait principalement des images qui génèrent une information moyennée sur des dizaines, voire des centaines de mètres. Cela rendait impensable de mener des études par imagerie afin d'appréhender la biodiversité. En 2008, W.A. Marcus et M.A. Fonstad imaginaient qu'au vu des récentes avancées techniques en télédétection, des cartographies précises et continues de bassins versants entiers pourraient être réalisées afin de caractériser les cours d'eau à l'échelle sub-métrique. Au-delà de la résolution des images, les limites évoquées concernaient la clarté de l'eau et les conditions atmosphériques dégagées. Pour W.A. Marcus (2002), une haute résolution spatiale et une couverture hyperspectrale étaient en effet nécessaires dans leur zone d'étude pour cartographier les microhabitats. Des résolutions supérieures à 5 m donnaient des résultats dont il ne pouvait accepter la précision pour l'inventaire et l'analyse des habitats fluviaux. Il en est de même pour ce qui concerne l'étude de la température des cours d'eau : les résultats obtenus par R.N. Handcock et al. (2006) montraient que des mesures de température n'étaient assez précises que pour des cours d'eau de grande taille. Mais avec de la très haute résolution, V. Wawrzyniak parvenait en 2012 à caractériser une structure très fine de répartition des températures à l'intérieur de chenaux en tresses de petite taille.

Cependant, utiliser des images à haute résolution n'est pas sans inconvénient (Legleiter et Fonstad, 2012). La possibilité d'un vol à basse altitude est notamment à évaluer avec précaution car un tel vol n'est pas toujours aisé à effectuer, selon le milieu étudié (à cause du relief, de certaines installations sensibles telles que des centrales nucléaires, etc.). La faible surface couverte par un

cliché acquis dans ces conditions et donc la grande quantité de clichés nécessaires à la couverture de tout un linéaire de cours d'eau sont également à prendre en compte, de même que l'effort qui est nécessaire pour géoréférencer puis analyser ces nombreuses images. Dans de nombreux cas d'applications, une résolution moyenne est plus appropriée qu'une résolution très fine, entre autres pour réaliser certains suivis ou des études à large échelle. Enfin, P.E. Carbonneau et al. (2012), préviennent qu'une haute résolution au sol ne garantit pas toujours une grande qualité de l'image lors de l'acquisition. En effet, si le mouvement du capteur est trop important par rapport à la surface couverte au sol pendant la prise de vue, les clichés pourront être flous et potentiellement inexploitables.

IV.1.2- Le cas des pixels mixtes

Dans les cas où une résolution est considérée comme trop grossière, le problème le plus largement évoqué est la présence de pixels mixtes (Marcus et al., 2003 ; Handcock et al., 2006 ; Legleiter et Fonstad, 2012). Au contraire des pixels dits « purs », les pixels mixtes représentent une surface non homogène : plusieurs types d'habitats, de substrats, une profondeur ou une température variable, etc. Leur présence est inévitable dans les zones marginales (Legleiter et Roberts, 2005), par exemple à l'interface entre les zones émergées et immergées, ou en limite de deux types d'occupation du sol. Mais leur nombre et leur taille sont directement liés à la résolution spatiale des images. En effet, avec des pixels plus petits, la surface concernée par des pixels mixtes est réduite. Les ambiguïtés liées aux variations à l'intérieur d'un même pixel peuvent être levées grâce à des données à haute résolution spatiale (Legleiter et Fonstad, 2012). Pour W.A. Marcus et al. (2003) qui ont comparé la faisabilité de la cartographie de cours d'eau de tailles diverses, les potentialités de l'imagerie dépendent bien de la taille du cours d'eau. En ce qui concerne la détection des unités morphologiques, les résultats sont en effet plus précis pour des cours d'eau de grande taille. De même, pour l'estimation des profondeurs, des résultats moins bons sont obtenus dans les cours d'eau les plus petits. Dans chaque cas, la raison évoquée est la présence de pixels mixtes, qui correspondent à des zones de transition entre les habitats aquatiques ou à différentes profondeurs représentées. Plus la résolution des images est grossière et plus les pixels mixtes sont nombreux ou de surface importante, et plus les erreurs de classification sont importantes (Legleiter et Roberts, 2005).

Cependant, certaines manipulations des données au niveau spectral peuvent permettre de passer outre les limites d'une résolution spatiale trop importante. Grâce à des ratios de bandes sur de l'imagerie hyperspectrale, C.J. Legleiter et D.A. Roberts (2005) parviennent par exemple à tirer des informations précises des pixels mixtes et à les caractériser de manière convenable. Pour eux, la

caractérisation de la morphologie d'un chenal dépend à la fois de la résolution spatiale du capteur et des dimensions du chenal, de manière complexe et variable spatialement. Pour W.A. Marcus et al. (2003), grâce à l'imagerie hyperspectrale, la détection de bois dans les cours d'eau bois peut également être réalisée même si la résolution spatiale est supérieure à la taille des souches détectées. Ils préconisent pour cela que la détection se fasse par classification supervisée et que les pixels utilisés pour l'apprentissage soient plutôt mixtes que purs.

IV.2- Traitements optiques des images

L'acquisition d'images fait entrer en jeu les lois de l'optique. Un capteur traditionnel de type appareil photo représente l'espace réel en 3D sur un plan en 2D, par le biais d'un système optique. L'orientation du capteur par rapport à l'objet visé et les propriétés du système optique utilisé (à cause des imperfections dans l'usinage des lentilles et à cause des imprécisions de montage des éléments de ce système optique) conduisent à des déformations plus ou moins importantes entre l'objet et sa représentation sur l'image. En fonction de l'importance des déformations et des exigences de l'opérateur en termes de précision, il faudra donc recourir à différents types de correction de ces images.

IV.2.1- Calibration

IV.2.1.a- Paramètres et modèles de calibration

La correction des déformations induites dans l'image par le capteur lui-même et son orientation s'appelle la calibration. Cette opération revient à estimer les paramètres « intrinsèques » et « extrinsèques » du capteur. Il est nécessaire de calibrer un appareil si les mesures à réaliser dans l'image requièrent une grande précision ce qui est par exemple le cas en photogrammétrie (Carbonneau et al., 2003). Ceci consiste à coupler les données de deux images, acquises avec deux angles différents, de la même scène afin d'en retrouver les volumes. C'est le cas aussi en médecine, un domaine dans lequel la précision est un enjeux fondamental, avec l'endoscopie par exemple (Barreto et al., 2009), qui consiste à explorer par imagerie l'intérieur d'un corps. Pour J. Heikkilä et O. Silvén (1997), les performances d'un système de vision robotique dépendent avant tout de la précision de la calibration des caméras.

Les « paramètres intrinsèques » sont au nombre de six (Tsaï, 1987). Ce sont des valeurs directement liées au système optique, qui résultent de la géométrie de la caméra et des caractéristiques optiques de l'appareil (Ricolfe-Viala et Sanchez-Salmeron, 2011). Il y a également 6 « paramètres extrinsèques », qui eux concernent la position et l'orientation du capteur, liés au passage d'un repère 3D représentant l'espace réel au système de coordonnées de l'appareil.

Le modèle « sténopé » constitue une base théorique sur laquelle de nombreuses méthodes de calibration s'appuient. C'est le cas par exemple dans la méthode proposée par C. Ricolfe-Viala et A.J. Sanchez-Salmeron (2011), dont la première étape consiste à calibrer le modèle sténopé. Il représente le comportement idéal d'un appareil, où la formation d'images réelles produit des distorsions uniquement à cause des imperfections mécaniques de l'appareil (donc ses paramètres intrinsèques et extrinsèques ; Ricolfe-Viala et Sanchez-Salmeron, 2010a). Le modèle sténopé est basé sur le principe de colinéarité : chaque point-objet de l'espace est projeté par une ligne droite à travers le centre de projection du système optique et l'axe de la caméra est perpendiculaire au plan image. Ce modèle est intéressant car il est très simple, mais cela le rend insuffisant si le modèle de la caméra requière une précision importante. Le plus souvent, les modèles plus élaborés partent de cette base pour y ajouter des corrections plus ou moins complexes (Heikkilä et Silvén, 1997).

IV.2.1.b- Méthodes de calibration

D'après Z. Zhang (2000), il existe deux grandes méthodes de calibration. La première est dite « photogrammétrique » et est relativement complexe. Elle consiste à utiliser un objet 3D dont la géométrie est connue pour déterminer les paramètres du système avec lequel il est observé. La deuxième, dite « auto-calibration », consiste à comparer au moins 3 prises de vue d'une même scène pour retrouver les paramètres intrinsèques et extrinsèques du capteur. Chacune de ces méthodes permet d'élaborer un modèle de correspondance entre une image distordue et une image non distordue. Mais généralement, ce sont des transformations globales qui ne traitent pas les distorsions locales de manière précise (Ricolfe-Viala et Sanchez-Salmeron, 2010a). Pour ces auteurs, il est difficile de choisir le bon modèle de calibration sachant qu'aucun ne corrige parfaitement l'image : ils restent des « approximations globales ».Eventuellement un modèle de distorsion peut être vraiment bon, mais uniquement dans une partie de l'image, ou sur un seul type de déformation.

Pour estimer les paramètres d'un modèle de calibration des caméras, les méthodes sont nombreuses aujourd'hui mais celle de Tsaï (1987) fait toujours office de référence. L'idée de l'auteur était de proposer une méthode qui soit polyvalente et entre autre applicable aux lentilles du commerce. Elle consiste à récupérer en quatre étapes les différents paramètres d'un modèle, en partant de l'estimation de certains d'entre eux, grâce à un algorithme statistique d'optimisation itérative (Horn, 2000). Les estimations de départ sont réévaluées au cours de la démarche. De manière classique, l'approche de la calibration, qui vient de la photogrammétrie, consiste à minimiser l'erreur d'une fonction non linéaire grâce à des algorithmes plus ou moins complexes (Heikkilä et Silvén 1997).

IV.2.2- Orthorectification et géoréférencement

IV.2.2.a- Orthorectification

Du fait de la perspective, le passage à un plan image en deux dimensions conduit à des altérations des proportions de l'espace réel, ayant trois dimensions. C'est notamment le cas si le capteur n'est pas parfaitement parallèle au sol, et plus la prise de vue est oblique, plus les distorsions sur l'image sont importantes. Une image verticale signifie que les trois angles d'orientation de la caméra – couramment appelés« angles d'Euler » – sont proches de zéro. Une image est considérée comme oblique quand l'axe optique du capteur forme un angle supérieur à 5° par rapport à la verticale (Girard et Girard, 1999). De même, la présence de reliefs dans une scène amène à des variations de proportions qui font que chaque pixel de l'image ne représente pas la même surface au sol.

Pour pouvoir réaliser des mesures et obtenir des valeurs quantitatives sur une image oblique ou représentant des reliefs, il faudra donc la traiter de manière à annuler ces distorsions : cela correspond à l' « orthorectification » de l'image (Bertoldi et al., 2012). La correction appliquée permet de voir l'image comme si elle avait été acquise à la verticale. Cette étape est nécessaire si la comparaison entre clichés est souhaitée, qu'ils représentent une même scène à différentes dates ou que ce soit pour comparer différents milieux. Pour parvenir à corriger la géométrie des images, il faut y effectuer une transformation de type photogrammétrique (MacVicar et al., 2012) basée sur la connaissance des positions relatives de quelques points répartis dans l'image. Au moins 6 points sont nécessaires pour appliquer une transformation mais il en faut plus afin de pouvoir calculer des erreurs pour estimer l'imprécision du modèle.

IV.2.2.b- Géoréférencement

Le « géoréférencement » des images consiste, lui, à attribuer à chaque pixel de l'image une position dans un certain système de représentation de l'espace. Cela permet de pouvoir réaliser des mesures absolues sur les images, et surtout de pouvoir caler différentes images les unes par rapport aux autres. Cela est particulièrement utile lorsque plusieurs images permettent d'observer un milieu dans son ensemble, afin de créer une mosaïque d'images, qui sont toutes géoréférencées les unes par rapport aux autres. Par la transformation appliquée lors du recalage d'une image, le géoréférencement permet également son orthorectification si les points de calage possèdent une coordonnée z (d'altitude).

Pour P.E. Carbonneau et al. (2012), il existe 3 approches qui permettent de géoréférencer des images. L' « approche de terrain »se base sur des points de contrôle au sol (ou GCP, de l'anglais

Ground Control Point). Les coordonnées dans l'image et dans la réalité sont connues (coordonnées spatiales) pour chacun de ces points, ce qui permet d'appliquer une transformation à l'image, par correspondance des deux systèmes. L' « approche algébrique » permet de définir les coordonnées d'une image à partir de la connaissance précise de la position et de l'orientation de la caméra au moment de la prise de vue. L'acquisition de ces valeurs avec une précision élevée n'est pas toujours aisée, en particulier pour des plateformes d'acquisition mobiles. Enfin, une troisième méthode pour géoréférencer une image peut être de la caler sur une autre ayant une emprise similaire, qui est ellemême déjà géoréférencée. L'automatisation de ce procédé (on parle de « *co-registration* » des images) se base sur les différences d'intensités entre les pixels de l'image. Cet algorithme est relativement connu et bien développé aujourd'hui (Carbonneau et al., 2012). En 2010, P.E. Carbonneau et al. proposaient par exemple un outil de géoréférencement automatique d'images, adapté spécifiquement aux milieux fluviaux et capable de traiter de gros jeux de données.

IV.3- Condition atmosphériques

En télédétection passive, un capteur mesure des rayonnements électromagnétiques provenant d'une source qui émet ces rayonnements ou sur laquelle ils ont été réfléchis. Pour caractériser cet objet, deux grandeurs sont généralement mesurées : la « luminance » (ou « radiance »), qui correspond à l'énergie électromagnétique émise ou réfléchie par la surface observée, ou la « réflectance bidirectionnelle » (plus généralement appelée « réflectance »), qui est le rapport entre l'énergie réfléchie par la surface et l'énergie incidente (Béal, 2006). La différence entre les deux termes de ce rapport provient du fait que différents processus liés à la composition de l'atmosphère viennent altérer les signaux qui la traversent.

En effet, l'atmosphère agit comme un filtre pour les rayonnements lumineux, à cause de sa composition en molécules de gaz et en aérosols. Ces derniers correspondent aux particules d'eau et aux poussières émises dans l'atmosphère par des processus naturels et par les activités humaines. Selon M. Robin (1995, d'après Lejot, 2008), seulement 50 % du rayonnement émis ou réfléchi dans le visible par une surface est enregistré par le capteur. Deux phénomènes optiques principaux permettent d'expliquer cela : l'absorption et la diffusion (Béal, 2006). Ils sont d'importance variable en fonction de la qualité de l'atmosphère. L' « absorption »est le fait que tout rayonnement incident sur une surface est en partie retenu par celle-ci, et transformé en énergie thermique principalement. La « diffusion » correspond à la dispersion dans différentes directions d'une partie du rayonnement incident sur une surface. Les rayonnements captés lors d'une prise de vue sont ainsi modifiés, une première fois de la source lumineuse à la surface observée, et une seconde fois entre cette surface et le capteur. Plus la prise de vue se fait à haute altitude, plus les effets atmosphériques sont

importants et afin d'estimer le signal au niveau de la source étudiée, certaines corrections doivent être appliquées.

En plus des effets des composants de l'atmosphère, l'environnement de l'objet étudié joue un rôle sur le signal reçu par le capteur. Chaque élément qui fait la qualité de la surface autour de l'objet subit lui-même les phénomènes de réflexion, de diffusion et d'absorption des rayonnements électromagnétiques, et cela entre dans la composition du rayonnement capté. Le relief, donc l'inclinaison du sol, l'angle d'incidence du soleil et celui de la prise de vue sont autant d'éléments à prendre en compte également dans les distorsions atmosphériques. Pour mesurer la luminance d'une surface, il faudra donc appliquer plusieurs types de corrections (Béal, 2006) : la correction des distorsions liées au capteur lui-même, les distorsions atmosphériques et les effets topographiques.

IV.4- Variabilité des conditions lumineuses

En un point fixe, les conditions lumineuses sont très variables au cours du temps et malheureusement, les conditions idéales sont rarement obtenues pour les champs d'application de l'imagerie in situ (MacVicar et al., 2012). L'éclairage n'est pas constant à cause des mouvements solaires au cours du temps et des conditions météorologiques lors de l'acquisition. L'exposition, les reflets à la surface de l'eau ou sur la lentille du capteur, les contrastes ombre/lumière peuvent limiter la qualité des images enregistrées. Le brouillard, la pluie et la neige peuvent également réduire la visibilité de la scène étudiée. Si ces différentes conditions sont souvent exploitées par les photographes du fait de leurs propriétés esthétiques, dans d'autres domaines elles sont une source de problèmes. Représenter informatiquement l'éclairage naturel est par exemple un véritable défi, et le suivi de milieux naturels par imagerie peut être délicat dans certaines situations de luminosité. Compte tenu des enjeux en télédétection, la modélisation des conditions d'éclairage naturel a fait l'objet de nombreux travaux (Lalonde, 2011). Cet auteur propose d'ailleurs un modèle pour représenter de manière virtuelle des conditions lumineuses qui soient les plus proches des conditions réelles. L'imagerie in situ peut être ainsi un réel atout pour étudier dans une scène fixe l'évolution des conditions lumineuses au cours du temps.

A cause de cette variabilité de la luminosité en conditions naturelles, travailler par imagerie peut être délicat pour étudier les phénomènes temporels. Vu la complexité de la tâche, les incertitudes associées aux mesures réalisées par imagerie ont encore été peu étudiées (Hauet et al., 2008). Cependant, un bon positionnement du capteur peut en général permettre d'optimiser la luminosité lors de l'acquisition d'images de terrain (MacVicar et al, 2012). En effet, ajuster la hauteur de la prise de vue pour limiter les reflets au moment de l'acquisition, orienter les caméras en direction du Nord

ou bien là où des arbres protègent l'objectif d'un rayonnement direct du soleil sont par exemple des dispositions à prendre, dans la mesure du possible, pour optimiser l'acquisition des données.

Dans le cas d'acquisitions aériennes, les contraintes sont telles qu'éviter les variations de luminosité n'est pas toujours aisé. Elles peuvent survenir au cours d'une campagne d'acquisition, même de courte durée (Lejot, 2008). Les différents clichés d'une mosaïque représentant tout un linéaire de cours d'eau peuvent ainsi avoir des conditions d'illumination très différentes. Ce problème se traduit par des variations dans les valeurs et la distribution des radiométries des différents clichés, qui n'ont pas de sens au niveau de l'interprétation des images. Pour y pallier, deux types de traitements sont proposés par J. Lejot (2008). Un « étirement dynamique » (« *stretching* ») de l'histogramme de distribution des valeurs radiométriques est préconisé en premier lieu afin de couvrir toute la gamme de valeurs radiométriques présentes dans le jeu de données. Ensuite, un ajustement de l'histogramme (« *matching* ») à celui d'une image du jeu de données, choisie comme référence permet la comparaison de tous les clichés entre eux.

D'après P.E. Carbonneau et al. (2012), il existe de nombreuses approches standardisées pour corriger les effets d'une illumination variable entre les différents clichés d'un même jeu de données. Ces techniques, qui ont été principalement développées pour l'imagerie satellite, consistent entre autre à caler les images les unes par rapport aux autres sur le même principe que le géoréférencement automatique (« *co-registration* »), à partir de données de référence. Pour chacune des images du jeu de données, l'histogramme de distribution est ajusté par rapport à celui de l'image de référence. Le même processus peut être appliqué pour résoudre les problèmes d'ombrage, la modification de la radiance dans les zones ombragées étant du même ordre. Afin de s'affranchir des contraintes liées à la luminosité, une classification peut aussi être réalisée indépendamment sur chaque image, notamment lorsqu'elles n'ont pas été acquises le même jour et pour un même angle d'incidence du soleil. Cette méthode élaborée par W.A. Marcus et al. (2003) a ainsi permis de réaliser une cartographie des habitats fluviaux.

IV.5- Ripisylve et ombres portées

IV.5.1- La ripisylve, un obstacle à la lumière

Dans le cadre de l'étude des milieux fluviaux, la ripisylve est souvent l'objet d'une attention particulière. Au point de vue écologique, elle joue par exemple un rôle très intéressant en fournissant des habitats, des substrats et des conditions physiques particulières pour la faune. Au point de vue géomorphologique, elle a un impact tout aussi important en protégeant les berges de l'érosion et en fournissant des flottants qui modifient alors les écoulements du cours d'eau. Dans le champ de la télédétection, elle est aussi source de nombreuses études, car elle constitue une contrainte pour l'acquisition d'informations dans le chenal ou ses marges. En effet, sur les images verticales, la présence d'une ripisylve le long d'un cours d'eau constitue un artefact qui limite l'observation de certains objets ou phénomènes, principalement ceux qui se situent le long des berges verticales. C'est ce qui constitue l'un des principaux atouts de l'imagerie oblique de terrain, qui peut justement permettre d'observer ce qui se situe en dessous de la canopée.

Outre l'obstacle physique que constituent les arbres et leur couronne, leur ombre portée est également une limite à l'exploitation des images. Les ombres se forment lorsqu'un objet est éclairé par une source lumineuse d'intensité suffisante, à l'opposé de celle-ci. Cette zone représente la surface qui, à cause de l'objet en question, ne reçoit pas le rayonnement directe de la lumière émise. La taille et la forme de l'ombre sont donc dépendantes de celles de l'objet, mais également de la position relative de la source du rayonnement. Les ombres sont d'autant plus marquées que la puissance de la lumière est importante, et elles sont d'autant plus visibles par imagerie, donc problématiques, que la résolution des images est élevée.

IV.5.2- Impact des ombres sur la radiométrie des images

En modifiant le signal radiométrique d'une zone de l'image (Lejot, 2008), les ombres agissent comme une variation dans la profondeur ou dans le type de substrat du chenal, par exemple. Afin d'étudier leur impact sur la précision de leurs travaux, A. Hauet et al. (2008) simulaient la présence d'ombres dans des images. Pour cela, ils abaissaient l'intensité radiométrique de 50, ce qui imite grossièrement ce qui se produit dans une surface ombragée. P.E. Carbonneau et al. (2012) précisent que l'histogramme des valeurs radiométriques est compressé dans une telle surface. Le pic de distribution est beaucoup moins large que dans les zones éclairées directement. Sans traitement, l'extraction d'information par l'étude du signal radiométrique est donc biaisée dans ces zones particulières. Dans leurs travaux en 2004, D.J. Gilvear et al. identifiaient les ombres portées causées par des berges hautes, des arbres ou des immeubles, comme étant les principales causes des erreurs dans les classifications automatiques, au même titre que les reflets en surface de l'eau. Les ombres sont d'ailleurs considérées comme l'un des problèmes majeurs en télédétection puisqu'elles bruitent le signal lumineux (Lejot, 2008 ; Marcus et Fonstad, 2008 ; Carbonneau et al., 2012).

IV.5.3- Traitement des ombres

Afin de s'affranchir de ces contraintes, les auteurs ont cherché à délimiter les ombres pour les traiter indépendamment des zones alentours. Si certains ont choisi de les supprimer simplement de leurs traitements (Lejot, 2008), d'autres essayent de les conserver en leur appliquant des traitements qui les rendent comparables au reste de l'image. P.E. Carbonneau et al. (2012), préconisent par

exemple d'appliquer le même principe que lors du géoréférencement automatique des images. Il s'agit de faire correspondre les histogrammes de distribution des pixels localisés dans les zones ombragées à celui d'une zone de référence. Mais la question de la comparaison des deux types de zones, même après traitement, reste posée. Il semble que les études qui se penchent sur la délimitation et le traitement automatiques des ombres ont principalement été réalisés sur des séquences d'images voire de la vidéo (Lalonde, 2011; Sanin et al., 2012). Les méthodes existantes se basent sur différents éléments des images pour détecter la présence d'une ombre. A. Sanin et al. (2012)ont recensé quatre groupes de méthodes, selon qu'elles étudient les couleurs ou la texture des images, la géométrie des formes représentées ou les conditions d'éclairage et de formation des ombres en s'appuyant sur les lois de l'optique. Travaillant sur une méthode de détection des ombres dans les images isolées, prises au niveau du sol, J-F. Lalonde (2011) propose une approche qui se base sur les propriétés du signal dans une petite région de part et d'autre des bordures détectées automatiquement dans l'image.

IV.6- Surface de l'eau et formation de reflets

Lorsque l'imagerie est utilisée pour étudier des objets ou des phénomènes qui se situent dans la colonne d'eau ou sur le fond du chenal, la traversée de la surface de l'eau par les rayons lumineux est alors à prendre en compte. En effet, l'interface entre deux milieux aux propriétés différentes crée des conditions particulières, régies par les lois de l'optique. De cela résultent deux phénomènes qui peuvent altérer le signal lumineux et nuire aux mesures réalisées : ce sont les phénomènes de réfraction et de réflexion.

IV.6.1- Réfraction des rayons lumineux

L' « indice de réfraction » d'un milieu correspond au rapport entre les vitesses de propagation de la lumière dans ce milieu et dans le vide. L'air et l'eau étant deux milieux aux indices de réfraction différents, un rayon lumineux qui traverse une interface entre les deux subit une « réfraction », c'est le « principe de Fernat » (Feurer, 2009). Cela se traduit par le fait que ce rayon n'est pas rectiligne mais coudé au niveau de l'interface (voir figure 8). L'angle de réfraction est défini par l'une des lois de Snell-Descartes, selon l'équation suivante (6) :

$$n1 * sin(\alpha) = n2 * sin(\beta)$$
 (6)

avec : n1 l'indice de réfraction du premier milieu traversé ;

n2 l'indice de réfraction du second milieu traversé ;

 α l'angle d'incidence ;

β l'angle de réfraction.



Figure 8 : Représentation schématique du principe de réfraction d'un rayon lumineux.

Comme l'image d'un point semble provenir d'un rayon rectiligne, la position apparente de ce point (justement nommé « point apparent ») ne correspond pas exactement à sa position réelle, car le « rayon apparent » et le « rayon réfracté » ne sont pas confondus. La distance entre ces deux points est appelée « déplacement apparent ». Avec une vue oblique, le capteur ne perçoit que des positions virtuelles des points immergés. Et si la surface de l'eau n'est pas plane mais forme des vagues ou des vaguelettes, comme c'est souvent le cas en conditions naturelles, l'interface air/eau est d'autant plus complexe et la vision du fond du lit est complétement déformée : certains points sont visibles plusieurs fois et d'autres au contraire sont invisibles (figure 9).

Ce phénomène n'est réellement observé en télédétection que si la résolution spatiale des images le permet, donc si elle est vraiment très élevée. Une résolution spatiale un peu grossière a en effet tendance à « lisser » le signal et chaque objet apparaît à la place où il devrait être car l'image et l'objet réel sont dans le même pixel. De plus, cela n'est réellement un problème qu'en imagerie oblique, et lorsque des mesures de précision sont à réaliser. C'est le cas en photogrammétrie, exemple présenté par D. Feurer (2009), où l'auteur cherche à reconstituer la bathymétrie d'un chenal.



Figure 9 :Déformations induites par un dioptre non plan pour des incidences fortes (relativement à la rugosité de l'eau).D. Feurer, 2009, page 107, photo : Bruno Roux.

IV.6.2- Réflexion des rayons lumineux

L'interface que constitue la surface de l'eau n'est pas seulement le lieu de réfraction des rayons lumineux, ils s'y réfléchissent également en partie. Comme pour la réfraction, ce sont les lois de Snell-Descartes qui régissent ces phénomènes. La quantité lumineuse d'un rayon incident sur une surface quelconque qui n'est ni absorbée ni transmise, est réfléchie. Le rayon réfléchi est symétrique au rayon incident par rapport au plan perpendiculaire à la surface éclairée (voir figure 10). La formation de reflets dans une image résulte de la réflexion de la partie des rayons du soleil qui se trouvent dans cette configuration. Ils sont donc fonctions de la position du soleil et de l'angle de vue du capteur, mais également de l'état de la surface de l'eau, puisque la formation de vaguelettes multiplie le nombre de plans sur lesquels les rayons sont susceptibles de se réfléchir (Kay et al., 2009).

En fonction de la qualité des rayons incidents et de la surface sur laquelle ils se réfléchissent, et en fonction de l'élément montré, donc de la grandeur étudiée, il existe de nombreuses manières de qualifier et de quantifier l'énergie lumineuse réfléchie par une surface (Schaepman-Strub et al., 2006). Même si les quantités de lumière impliquées peuvent être calculées, les reflets formés à la surface de l'eau sont l'une des principales limites à l'étude des milieux aquatiques par télédétection. Ils sont l'une de causes principales des imprécisions dans les classifications automatiques (Gilvear et al., 2004 ; Marcus et al., 2003 ; Kay et al, 2009). Pour B.J. MacVicar et al. (2012), qui cherchent à mesurer des vitesses de surface sur des séquences d'image, les reflets sont également à proscrire car ils sont interprétés de la même manière que les traceurs utilisés pour la visualisation du courant. A peu près immobiles, les reflets faussent donc complétement les estimations faites par LSPIV.



Figure 10 : Représentation schématique du principe de réflexion d'un rayon lumineux.

Pour S. Kay et al. (2009), la présence des reflets n'est pourtant pas une fatalité. Ils proposent ainsi de séparer l'information produite par les reflets de celle qui provient réellement de la colonne d'eau. Le principe généralement appliqué est d'estimer la part de la contribution des reflets dans la radiance totale captée par le capteur, afin de la soustraire au signal reçu. Pour cela, il est notamment possible de se baser sur le fait que les rayons contenus dans le proche infra-rouge sont complétement absorbés par la colonne d'eau : il est alors possible de considérer qu'après correction atmosphérique, tout le signal capté dans ce canal résulte de la réflexion en surface. Malgré cela, le plus simple pour limiter l'impact des reflets dans les analyses est bien de chercher à les éviter. Certaines préconisations sont émises à cet égard lors de l'acquisition des données. En imagerie satellite, les instruments sont par exemple souvent inclinés de 20° par rapport au « nadir » (la projection du nadir étant opposée au « zénith », sur la normale à la surface observée). Et en imagerie aérienne, un angle de 30° à 60° par rapport au zénith est recommandé (Kay et al., 2009). D'après les mêmes auteurs, un angle de 40° par rapport au nadir et de 135° par rapport au soleil seraient des conditions idéales pour qu'aucun rayon réfléchi n'atteigne le capteur. Enfin, malgré les idées reçues, J. Lejot (2008) indique que pour limiter l'apparition de reflets dans les images acquises, profiter d'un ciel parfaitement dégagé ne constitue pas les meilleures conditions. En effet, le signal ayant dans ce cas une direction préférentielle, la formation de reflets est plus facile. Afin d'homogénéiser la qualité des différents clichés d'une mosaïque, une couverture nuageuse homogène est donc préférable.

IV.7- Automatisation des traitements

IV.7.1- Une nécessité dans un contexte spatial et temporel de plus en plus étendu

Une autre limite de la télédétection concerne le temps d'exploitation de cette information, que les données étudiées correspondent à des images aux emprises très larges ou à de très nombreux clichés. Pour D.J. Gilvear et al. (2004) ou pour N. Kramer et E. Wohl (2014), l'interprétation visuelle des clichés reste la méthode la plus fiable et la plus précise pour la détection d'objets dans des images, et pour A. Stumpf et N. Kerle (2011), malgré des temps de travail très longs, la photo-interprétation et la digitalisation manuelle, avec les enquêtes de terrain, sont encore de loin les méthodes les plus utilisées. Cependant, ils s'accordent à dire que cela devient difficile, voire impossible dans le cadre de zones étendues, et l'étude d'un cours d'eau à l'échelle de son bassin versant est par exemple difficilement concevable à partir de démarches visuelles. L'analyse d'évolutions temporelles devient également vite fastidieuse si l'opérateur ne peut s'appuyer que sur des interprétations visuelles.

IV.7.2- Des tests prometteurs

Les traitements automatiques des images se développent peu à peu et la classification automatique produit par exemple des résultats intéressants que D.J. Gilvear et al. (2004) proposent d'affiner si besoin en intégrant d'autres types de données. Outre un gain de temps indéniable, l'automatisation des classifications permet de limiter les biais des méthodes liés à l'intervention d'un opérateur (Marcus et al., 2003 ; Stumpf et Kerle, 2011). Dans le cadre d'un géoréférencement des multiples clichés d'une campagne d'acquisition avec un drone, P.E. Carbonneau et al. (2010) ont testé avec succès l'automatisation de la procédure. Sans recours à des points de contrôle au sol (GCP), cela requière un temps de travail minimal. V. Benacchio et al. (2017) ont également montré que l'automatisation du traitement de gros corpus d'images était possible pour l'étude d'un phénomène à pas de temps fin et sur de longues périodes.

D'après N. Kramer et E. Wohl (2014), l'analyse visuelle est bien meilleure que les détections automatiques mais dans le but de mettre en place des suivis en continu par imagerie in situ, elles ont réalisé plusieurs tests. Dans un premier temps, elles ont cherché à savoir quelle serait la fréquence d'acquisition la plus adaptée au comptage des pièces de bois en transit dans un cours d'eau. Le but était de définir l'effet d'un échantillonnage à des intervalles de temps plus ou moins grands, afin de réaliser le meilleur compromis entre le plus faible nombre de clichés à traiter et la moindre perte d'information. Dans un second temps et en envisageant l'automatisation du traitement des clichés, elles ont cherché à déterminer l'erreur associée aux pièces de bois non comptabilisées dans l'image. Les résultats d'observations de terrain ont été comparés aux analyses faites sur les images acquises au même moment et le succès des détections automatiques atteint un taux de 85 %.

B.J. MacVicar et al. (2009), eux, se sont penchés sur la détection de pièces de bois sur des acquisitions vidéo. En phase de crue, des séquences de 15 min de vidéo ont été analysées et il apparaît que les erreurs surviennent principalement dans le cas d'une détection manquée sur l'arrière-plan de l'image, où la résolution spatiale est moindre, ou lorsque les acquisitions se font avec une faible luminosité, par exemple la nuit. Ils se sont aperçu que 90 % des pièces de bois passaient dans la zone de l'image où la résolution est la meilleure, qui correspond au thalweg du cours d'eau.

IV.7.3- Des limites qui persisteront

Si les traitements automatiques semblent prometteurs dans certains cas, de nombreuses adaptations et des développements supplémentaires seront nécessaires pour atteindre des précisions comparables aux analyses visuelles. Et malheureusement D.J. Gilvear et al. (2004) pensent que vu la diversité des cas, à la fois temporellement et spatialement (variations des conditions lumineuses, aspect du substrat, éléments émergés et immergés, etc.), un algorithme universel de classification automatique parait très compliqué à développer. Il en va surement de même pour tous les types d'analyses envisageables.

Quand bien même les procédures automatiques fonctionneraient parfaitement, une validation par des mesures in situ serait toujours utile, voire indispensable. Les travaux de D.A. Lyn et al. (2003) laissent à penser qu'une étude conduite uniquement par imagerie est en effet limitée. Dans le cas de l'étude d'embâcles de bois, la disparition de ceux-ci correspond soit à un transfert des pièces vers l'aval, soit à une perte de flottabilité. Sans validation de terrain, l'incertitude sur la réalité ne peut être levée. Pour W.A. Marcus et M.A. Fonstad (2008), les récentes avancées techniques en télédétection laissent à penser que des cartographies précises à l'échelle de bassins versants entiers pourront être réalisées pour caractériser les différents aspects des cours d'eau, éventuellement même à des échelles spatiales très fines. Mais parmi les obstacles logistiques il est principalement possible d'évoquer les difficultés de mettre en place des mesures de validation de terrain concomitantes aux acquisitions d'images. À l'échelle de tout un bassin versant, en particulier dans le cas d'un accès difficile au cours d'eau, cela paraît impossible.

V- Conclusion du chapitre I

Dans le cadre des travaux de thèse présentés dans ce manuscrit, je me propose de développer une méthodologie d'étude des cours d'eau par imagerie in situ, afin de tirer profit des potentialités et avantages évoqués dans ce chapitre à propos de ce type d'images. Il ne s'agit plus de démontrer l'utilité de l'imagerie de terrain, qui à l'instar de la télédétection au sens large, a déjà largement été prouvée (Marcus et Fonstad, 2010; Bertoldi et al., 2012). Mais il s'agit de mieux définir les potentialités et les limites des jeux de données acquis grâce à des caméras de terrain, en concentrant en particulier l'effort au niveau de l'automatisation des traitements.

De manière à mieux connaître les outils disponibles sur le marché, d'identifier puis de dépasser certaines des limites mises en évidence précédemment, de nombreux tests ont été réalisés. Pour cela, je me suis appuyée sur des données issues de plusieurs capteurs imageant des contextes fluviaux différents. Cela m'a permis de comparer différents paramètres relatifs aux installations en elles-mêmes et de comprendre les points particuliers auxquels prêter attention dans le but d'optimiser la qualité des jeux de données. Le matériel et les équipements utilisés sur les différents sites exploités sont présentés dans le chapitre II. Une méthodologie générale d'acquisition puis de traitement des données relatives au fonctionnement biophysique des cours d'eau est également présentée. Elle a été élaborée sous forme d'étapes successives, pour certaines systématiques et pour d'autres optionnelles. Les différents chapitres de cette thèse ont été découpés selon ces étapes, elles-mêmes réparties en cinq grandes phases :

- l'acquisition des images ;
- la préparation des données en vue des traitements à effectuer ;
- l'extraction du signal de l'image ;
- le traitement de ces informations ;
- l'exploitation des résultats.

Les résultats et les conclusions tirées de ces différents tests et correspondant à ces différentes phases de travail sont présentés dans les chapitres III à V qui composent cette thèse. En réalisant ces travaux, le but était de fournir une méthodologie simple et adaptable à différents contextes, accessible à des chercheurs comme à des gestionnaires concernés par les cours d'eau. Cet outil a pour vocation d'être une aide à la connaissance des cours d'eau ainsi qu'à la prise de décision.

Chapitre II : Questionnements scientifiques, méthodologie générale et sites d'étude

I- Questionnements scientifiques et méthodologie

I.1- Questionnements scientifiques

Le chapitre précédant met en évidence les principaux verrous méthodologiques rencontrés par les auteurs dans l'utilisation de l'imagerie pour l'étude des cours d'eau. Plusieurs champs de questionnement peuvent être dégagés de ces éléments, certains ayant déjà été soulignés par différents auteurs, souvent communs à différents types d'études menées dans le domaine fluvial. Cette thèse se focalise sur les questionnements propres à l'utilisation et la valorisation de l'imagerie in situ avec l'objectif général de *cerner les potentialités et les limites liées à l'utilisation de l'imagerie in situ dans le cadre de l'étude des cours d'eau*. Les méthodes de traitement d'image ayant été surtout développées pour l'imagerie verticale aéroportée ou satellite, leur transposition à de l'imagerie in situ n'est pas toujours évidente. Et malgré les nombreux avantages que présente cette dernière, son utilisation soulève encore quelques questions.

L'objectif général se décline en sept problématiques émanant de la littérature et que j'expose ici accompagnées de questions guidant ces 7 chantiers de ma recherche.

D'abord, la qualité des clichés, donc leur exploitation potentielle, dépend des conditions d'installation des capteurs. En conditions extérieures, les facteurs limitant sont nombreux (variation des conditions d'éclairement, mouvements du capteur, par exemple) et s'ils ne sont pas anticipés, ils peuvent compromettre l'analyse.

→ Quels sont ces facteurs limitants et quelles sont les conditions requises afin d'optimiser les prises de vues en extérieur ?

Deuxièmement, le signal extrait des images n'est pas toujours directement exploitable et certaines mesures complémentaires sont parfois nécessaires pour calibrer les observations réalisées

sur les clichés ou pour les orthorectifier par exemple. Pourtant cette prise de mesure est parfois compliquée.

- → Le signal brut extrait des images est-il exploitable en tant que tel ?
- → Quels types de données sont nécessaires à l'exploitation des informations fournies par les clichés ?
- → L'orthorectification des images obliques est-elle aisée à mettre en place dans le cadre de l'étude des milieux aquatiques ?

Troisièmement, le type de capteur et en particulier la résolution des images (spatiale et spectrale) conditionnent les traitements applicables et les analyses réalisables. Les travaux entrepris dans le cadre de cette thèse s'appuient sur des capteurs relativement bon marché qu'il s'agisse de « pièges photographiques » ou de caméras de surveillance, qui produisent des images de qualité moyenne.

- → L'étude biophysique des cours d'eau est-elle possible avec de tels outils, qui captent une information dans le domaine visible uniquement ?
- → La résolution spatiale de tels capteurs est-elle suffisante pour la détection des objets liés au fonctionnement biophysique des cours d'eau ?

Quatrièmement, en modifiant le signal radiométrique des images, les ombres posent beaucoup de problèmes en télédétection (abaissement des valeurs et resserrement de la forme de la distribution des zones d'intérêt). Dans le cadre de la détection et de la classification automatique des images, elles sont l'un des principaux facteurs d'imprécision des résultats.

→ Les ombres posent-elles les mêmes problèmes en télédétection à courte portée qu'en traitement d'images « traditionnelles », pour la détection des objets ?

Cinquièmement, la présence d'eau produit certains phénomènes optiques qui peuvent limiter la qualité des images et complexifier leur analyse. C'est notamment le cas de la réflexion des rayons lumineux sur la surface des masses d'eau, qui conduit à la formation de reflets. Au même titre que les ombres, les fluctuations du signal lumineux associées aux reflets sont l'une des contraintes majeures pour la détection des objets. De plus, l'interface air/eau peut induire une déformation des objets observés à cause du phénomène de réfraction. Enfin, la turbidité de la colonne et l'absorption du signal lumineux peuvent être limitantes pour l'étude des éléments immergés de la scène.

- → La production de reflets à la surface de l'eau est-elle limitante sur les images acquises à courte portée ?
- → L'observation du fond du lit est-elle possible par imagerie in situ ?

Sixièmement, l'un des points forts évoqués à propos de l'imagerie in situ est l'acquisition de clichés à haute fréquence temporelle, ce qui permet des études diachroniques à pas de temps fins. L'un des enjeux potentiels est de pouvoir suivre les processus fluviaux à l'échelle d'un évènement hydrologique critique par exemple.

→ Quelle fréquence d'acquisition est nécessaire pour identifier les processus biophysiques et les évènements individuels liés au fonctionnement des cours d'eau ?

Et finalement, face au nombre grandissant de clichés à traiter, l'automatisation des traitements est souhaitable, voire nécessaire. De nombreuses considérations entrent alors en compte quant aux méthodes à employer et aux paramètres à choisir. A l'instar des classifications appliquées en imagerie satellite ou aérienne, la qualité des échantillons d'apprentissage, le nombre et le type de descripteurs utilisés ou le cas des pixels mixtes conditionnent potentiellement la qualité des résultats.

- → Le traitement automatique des images in situ est-il possible dans le cadre de l'étude des cours d'eau ?
- → La classification automatique des images est-elle applicable sur des gros jeux de données acquis à haute fréquence temporelle ?
- → La classification supervisée peut-elle être judicieuse et quel type d'outils statistiques faut-il utiliser ?
- Dans le cadre de la classification supervisée des images, comment constituer les échantillons de validation et d'apprentissage ?
- → Comment classer les pixels mixtes : faut-il les considérer comme une classe à part entière ?
- → L'utilisation d'indices de texture peut-elle améliorer les résultats des classifications automatiques ?

Cette thèse s'appuie sur des données issues de plusieurs capteurs imageant des contextes fluviaux différents pour ouvrir des chantiers de recherche visant à répondre aux questions soulevées par les 7 problématiques. Une série de tests a ainsi été réalisée dans des situations variées afin de
mettre en évidence les potentialités et les limites d'utilisation de l'imagerie in situ pour l'étude des cours d'eau. Cela a également permis de comparer les paramètres relatifs aux installations en ellesmêmes et d'exposer les considérations pratiques cruciales pour optimiser la qualité des jeux de données. Une synthèse du matériel et des équipements utilisés sur les différents sites exploités est présentée ci-dessous, en section I.3.1. Ces éléments sont détaillés davantage dans la section II de ce chapitre, où chaque site d'étude est présenté dans son contexte particulier. La section I.3.2 présente les conclusions d'une réflexion théorique sur l'utilisation de l'imagerie in situ dans le cadre de l'étude des cours d'eau. Cette réflexion, basée sur les retours des expériences réalisées dans le cadre de cette thèse, indique que différents types de suivis et procédures de traitement d'image peuvent être mis en place grâce à trois types de paramètres, en fonction des contextes envisagés. Ces contextes correspondent à une combinaison entre le type de milieu observé (quatre ont été définis) et le type d'objet étudié, dont une dizaine d'exemples sont proposés. La section I.3.3 de ce chapitre recense l'ensemble des tests réalisés dans le cadre de ces travaux de thèse, en le replaçant dans le contexte de la méthode globale présentée en figure 11.

I.2- Protocole méthodologique général

La figure 11 illustre la méthode générale de suivi des processus biophysiques des cours d'eau par imagerie in situ adoptée dans cette recherche. Les étapes qui la composent sont regroupées en cinq grandes phases : l'acquisition des images, la préparation des données, l'extraction du signal, le traitement du signal et finalement l'exploitation des résultats. Certaines de ces étapes, représentées en vert sur le schéma, sont optionnelles : selon les données disponibles et les besoins de l'étude, elles sont à intégrer ou pas au squelette principal de la démarche. Le but général de la méthode est de pouvoir suivre l'évolution d'un état ou d'un objet au cours du temps, à un pas de temps très fin, donc avec une haute résolution temporelle.

L'installation du capteur constitue l'étape initiale de la démarche car la qualité des images acquises dépend directement de la qualité de l'installation réalisée sur le site d'étude. L'étape de constitution du jeu de données permet ensuite de définir le nombre d'images sur lesquelles les analyses seront réalisées et découle du mode d'échantillonnage qui est décidé. La préparation des données se résume en deux éléments : la définition de la ROI (zone d'étude des images) permet de délimiter la surface dans laquelle le signal sera extrait ; la segmentation, qui est optionnelle, permet de subdiviser cette ROI en des zones plus petites, cela peut être intéressant pour la localisation de l'information résultant de la chaîne de traitement. Suite à l'extraction, le signal peut éventuellement subir différents types de traitement avant d'être réellement exploité, cela permet notamment d'en faciliter l'interprétation. Finalement, l'exploitation des résultats peut correspondre à différents types d'analyse des éléments extraits des images, en fonction de la nature du signal produit ou traité. L'utilisation de données complémentaires est toujours nécessaire afin de pouvoir interpréter les résultats.



Figure 11 : Schéma global de la démarche proposée pour l'étude des cours d'eau par imagerie in situ. En italique : grandes phases de la méthode ; en noir : principales étapes ; en vert : étapes optionnelles.

L'étape de classification impliquant de nombreuses tâches et autant de choix à réaliser, j'ai fait le choix de la traiter comme une phase de la méthode à part entière, bien qu'elle soit optionnelle. La figure 12 représente les différentes étapes de la « phase de classification ». Le but de cette dernière est de prédire automatiquement la catégorie d'appartenance des éléments observés dans l'image. Ces éléments correspondent soit aux pixels de l'image, soit aux objets qui résultent de sa segmentation. Dans mon cas, j'ai uniquement traité d'objets, obtenus selon divers modes de segmentation. Dans un « échantillon d'observés », qui a été classé à dire d'expert, j'ai distingué deux sous-échantillons. L'apprentissage, qui correspond à l'élaboration d'un modèle prédictif des classes d'individus, se fait grâce à l' « échantillon d'apprentissage ». L'élaboration de ce modèle se base sur les modalités des différentes variables obtenues pour décrire chaque objet. La validation de la qualité de ce modèle se fait sur l' « échantillon de validation ». Lors de cette étape, la précision de la classification automatique est étudiée, et éventuellement améliorée si besoin. Le modèle prédictif est alors appliqué au reste du jeu de données, afin d'interpréter de manière automatique le signal extrait dans l'ensemble des images disponibles.



Figure 12 : Schéma de la phase optionnelle de classification automatique des images (en violet). En noir : étapes du squelette principal de la méthode ; en vert : étape optionnelle de la méthode.

I.3- Sites d'étude, capteurs, tests réalisés et objets étudiés

Afin de d'explorer les cinq phases du schéma méthodologique (figure 11), cinq sites d'étude ont été observés. Les jeux de données acquis sur chacun ont permis de réaliser un à plusieurs tests. Cette section présente une synthèse rapide de ces différents tests et données, les détails méthodologiques et les variables exploitées sur chaque site sont présentés plus en détails dans la section II de ce chapitre.

1.3.1- Sites d'étude et capteurs utilisés

Trois sites d'étude sont situés en France dans le bassin versant du Rhône (figure 13). Une caméra a été placée sur le Rhône lui-même, au niveau du barrage de Génissiat. Les autres sont localisées sur des affluents du fleuve : l'Ain, sur la commune de Mollon, et l'Yzeron, au niveau de Francheville. Les deux autres sites sont dans l'Est-du-Québec (figure 14). L'un est localisé le long de la rivière Mitis dans la municipalité de Sainte-Angèle-de-Merici, dans le Bas-Saint-Laurent. La rivière Mitis se jette dans l'estuaire du Saint Laurent. L'autre se situe en Gaspésie, au niveau de la fosse Home, sur la rivière Saint-Jean, qui se jette dans la baie de Gaspé et qui se trouve dans la municipalité du même nom.



Figure 13 : Carte de localisation des trois caméras utilisées en France.



Figure 14 : Carte de localisation des deux caméras utilisées au Québec.

Le tableau 2 présente de manière synthétique les caractéristiques des capteurs et des installations effectuées sur chacun de ces sites. Deux types de capteurs ont été utilisés dans le cadre de ces travaux : une caméra de surveillance de la marque Axis 211W et des pièges photographiques de type Reconyx PC800, initialement développés pour les suivis faunistiques (voir figure 15). Ces deux types de capteurs, éventuellement équipés d'accessoires de sécurité, sont adaptés aux conditions extérieures. Plus d'éléments sur les contextes de chacun des sites d'étude sont fournis dans la section II de ce chapitre.



Figure 15 : Illustration des capteurs utilisés sur les différents sites test : Axis 211W (a) et Reconyx PC800 (b).

1.3.2- Objets d'étude et types de traitements : réflexion théorique sur la méthode élaborée

1.3.2.a- Milieux observés

Grâce aux divers jeux de données disponibles, des traitements ont été expérimentés dans deux zones du cours d'eau : la surface et le fond du lit (voir tableau 3). Cependant, grâce à l'imagerie in situ, il est également envisageable de réaliser des mesures dans deux autres types de milieux : la colonne d'eau, et la zone aérienne que je n'ai pas explorées personnellement. Les mesures effectuées dans chacun de ces milieux (désignés par A, B, C, ou D sur la figure16) présentent certaines limites, que j'ai tenté de recenser (figure 16). Ces dernières sont inhérentes à ces quatre milieux, et leurs effets s'additionnent. Par exemple, la réalisation des mesures dans la zone aérienne ou en surface de l'eau n'est soumise qu'aux contraintes liées à l'atmosphère (et dans le cadre de l'imagerie in situ, principalement aux conditions de luminosité), à la présence d'artéfacts dans la zone aérienne, aux ombres portées des éléments riverains, et éventuellement à la formation de reflets, qui altèrent la qualité des images acquises (voir figure 16.a). Mais la présence de la surface de l'eau devient particulièrement gênante lorsque l'objet étudié se situe en dessous de celle-ci (figure 16.b et 16.c). Pour étudier un objet posé sur le fond du cours d'eau (figure 16.c), il faut tenir compte de toutes les contraintes associées à la fois à la zone aérienne, à l'interface air/eau, à la colonne d'eau, et éventuellement au fond lui-même. Le tableau 3 recense les types de milieux observés dans les différents jeux de données exploités dans le cadre de cette thèse.

Site d'étude	Cours	Variables d'intérêt (unité)	Marque du	Angle de vue	Surface observée	Taille de l'image	Fréquence
	d'eau		capteur		(environ, m²)	(pix)	(min)
Génissiat	Rhône	Flux de bois flotté (m³/j)	Axis 211W	Oblique	35 000	640*480	10
Mollon	Ain	Cycle de développement d'un	Reconyx PC800	Vertical	12	2048*1356	15
		biofilm (nombre de jours relatifs à					
		un évènement d'arrachement)					
Francheville	Yzeron	Evolution de la surface	Reconyx PC800	Oblique	900	2048*1356	30
		d'ensablement (m²/j)					
Fosse Home	Saint-Jean	Surface relative des types de glace	Reconyx PC800	Oblique	12 000	2048*1356	60
		recouvrant la rivière (%) au cours du					
		temps					
Saint Angèle	Mitis	Détection des signes de la formation	Reconyx PC800	Oblique	12 000	2048*1356	10
		d'embâcles glacielles					
		(présence/absence et fréquence)					

Tableau 2 : Synthèse des caractéristiques techniques, des localisations, des réglages et des prises de vue des capteurs utilisés en fonction des variables d'intérêt.



Figure 16 : Représentation des contraintes et limites inhérentes aux différents types de mesures possibles par imagerie : en zone aérienne (A), à l'interface air/eau (B), dans la colonne d'eau (C), ou sur le fond du lit (D).

Milieu observé	Génissiat	Mollon	Francheville	Fosse Home	Saint Angèle
Zone aérienne (A)					
Surface de l'eau (B)	Х			Х	Х
Colonne d'eau (C)					
Fond du lit (D)		Х	Х		

Tableau 3 : Milieu observé à partir des jeux de données acquis sur les différents sites d'étude.

1.3.2.b- Eléments étudiés : objets caractérisés au cours du temps

Quel que soit le milieu observé, les suivis et les processus de traitement mis en place sur les images d'un jeu de données peuvent être de différents types également. Le choix de ces traitements dépend avant tout du type d'objet étudié. Le tableau 4 recense un certain nombre d'objets qu'il est possible d'étudier par imagerie in situ, sur les temporalités associées à la méthode proposée, c'est-àdire sur du temps court à moyen (jusqu'à quelques années), avec des hautes fréquences d'acquisition (quelques minutes à quelques heures). Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle couvre l'ensemble des milieux qui ont été présentés dans la section précédente (voir figure 16). Chaque objet peut être décrit par un certain nombre de caractères, évaluables sur les images individuelles des jeux de données produits sur le terrain. Il peut être caractérisé par sa présence ou son absence, mais aussi par ses caractéristiques physiques, de taille, de surface, d'état, etc. Ces caractères peuvent aussi être considérés dans le temps, ce qui permet d'évaluer différents types d'évolution de ces objets : une dégradation, un déplacement, une fréquence, une durée etc. : c'est ce que permet l'étude de séries temporelles qui résultent de l'analyse des jeux de données dans leur globalité.

Sur le jeu de données acquis à Génissiat, la caractérisation de la surface du radeau de bois au cours du temps devait permettre d'évaluer les volumes de bois provenant du bassin versant amont du Rhône. Grâce aux caméras installées sur les sites québécois, il était prévu d'étudier la glace de deux manières différentes, dans le cadre de deux problématiques bien distinctes. A la fosse Home, l'analyse de l'état du couvert de glace au cours du temps devait permettre de décrire la mise en place de ce couvert et la date de sa rupture. A Sainte-Angèle-de-Merici, l'étude de la fréquence de passage des blocs de glace associée à des variations de hauteurs d'eau devait correspondre aux signes de la formation d'embâcles glacielles en aval du site d'étude. En ce qui concerne les études du milieu « D », qui correspond au fond du lit, les caméras installées à Mollon et à Francheville étaient prévues pour deux types de suivis. Sur l'Ain, la présence de biofilm devait être caractérisée au cours du temps pour mettre en évidence le cycle de développement et les évènements d'arrachement de cet assemblage chlorophyllien. La détection de la surface ensablée sur le lit de l'Yzeron devait quant

à elle permettre de définir les conditions de dépôt et de remise en mouvement des sables en fonction de l'hydrologie.

Milieu	Objet suivi	Caractère étudié	Dans la temporalité	Site d'étude
concerné				concerné
А	Berge	Position	Recul, migration latérale	
		Hauteur	Erosion	
		Etat (cohésion, solidité,	Erosion	
		etc.)		
А	Végétation	Présence	Colonisation du milieu	
	riveraine	Surface	Croissance	
		Hauteur	Vieillissement	
		Nature	Succession des	
			populations	
В	Radeau de bois	Présence	Production de bois	Génissiat
		Surface	Accumulation	
		Densité	Cycle de compaction/	
			décompaction	
В	Couvert de	Présence	Date de la débâcle,	Fosse Home
	glace		durée de l'englacement	
		Etat (types de glace)	Fermeture/ Fonte du	
			couvert	
В	Blocs de glace	Présence	Fréquence de passage	Sainte-Angèle
		Position	Vitesse de déplacement	
		Taille	_	
В	Pièces de bois	Présence	Fréquence de passage	
		Position	Vitesse de déplacement	
		Etat (branches, racines)	_	
С	Lame d'eau	Profondeur	Date et durée des pics	
			de crues	
		Turbidité	_	
D	Sédiments	Granulométrie	Transport solide	
	grossiers			
D	Biofilm	Présence	Arrachement	Mollon
		Surface	Colonisation du fond	
		Nature	Succession des	
			populations	
D	Zone ensablée	Présence	Durée de colmatage du	Francheville
			milieu	
		Surface	Evacuation du sable	

Tableau 4 : Types de suivis possibles par imagerie in situ en fonction du milieu concerné, et types de suivis envisagés sur les

différents jeux de données disponibles.

1.3.2.c- Types de suivis et procédures mises en place

En fonction de l'objet qu'il faut caractériser, différents protocoles de traitement d'image peuvent être mis en place. Ces protocoles consistent à étudier différents aspects de la radiométrie des images contenue dans la ROI ou dans des zones plus petites qui la subdivisent. Trois types de paramètres peuvent être étudiés :

- la radiométrie, soit la distribution des valeurs de pixels (ou « niveaux de gris ») contenus ladite zone ;
- la texture, soit l'agencement de ces niveaux de gris entre eux ;
- la géométrie, soit les paramètres de forme de ladite zone.

Chacun de ces paramètres peuvent être résumés par divers indices, qui présentent l'information sous forme de valeurs simples et comparables entre elles. Ainsi, la radiométrie peut être étudiée grâce à des valeurs telles que la moyenne, la médiane, l'étendue, les quantiles etc. La texture peut être résumée grâce à la variance, l'inertie, entropie, etc. Enfin, la géométrie, dont l'étude n'a vraiment d'intérêt que si les limites de la zone dans laquelle est extraite la radiométrie ne sont pas régulières, peut être appréhendée grâce au périmètre, à la compacité, la longueur de l'axe b, par exemple.

En fonction du type d'objet étudié, ces différents paramètres seront donc mobilisés car selon le contexte de la scène, la détection ou la caractérisation de cet objet résultera d'une discrimination au niveau de la couleur (donc de la radiométrie), du grain (donc de la texture) ou de la forme (donc de la géométrie). La radiométrie peut par exemple permettre d'estimer la bathymétrie d'un cours d'eau (l'épaisseur de la lame d'eau), comme l'ont fait J. Moretto et al. (2013). Des indices de texture peuvent permettent d'estimer la granulométrie de bancs de galets (Carbonneau et al., 2004 ; 2005a).

La segmentation de l'image permet de subdiviser la ROI en des zones plus petites. Ce processus, qu'il soit automatisé ou pas, se base généralement sur les valeurs radiométriques pour identifier des zones homogènes. Les « objets » ainsi produits peuvent alors être caractérisés, selon les trois types de paramètres évoqués précédemment. B.J. MacVicar et al. (2009) ont par exemple utilisé la radiométrie des images pour détecter puis dénombrer les pièces de bois transportées lors des crues. L'étude de la forme des objets a ensuite permis d'en définir l'état (présence ou absence de branches, de racines) afin d'en déduire le lieu de provenance.

La classification de l'image peut ensuite permettre d'attribuer une catégorie à chaque objet délimité et de « discriminer les différentes surfaces » de la ROI : P.E. Carbonneau et al. (2005b) ont

69

ainsi automatisé une telle procédure pour discriminer les surfaces du lit d'un cours d'eau recouvertes par du sable ou des particules grossières.

1.3.3- Tests réalisés

Certaines étapes de la démarche proposée en figure 11 ont été testées sur les jeux de données disponibles (tableau 5). Ces tests et leurs résultats sont décrits en détail dans chacun des chapitres III à V. Le tableau 5 recense les tâches réalisées sur chacun des jeux de données, en les regroupant en différentes phases : le chapitre décrivant chaque élément est donné entre parenthèses. Parmi les différents jeux de données présentés, celui acquis à Génissiat a été le plus largement exploité pour la réalisation de tests dans le cadre du développement de la méthodologie proposée. La très grande majorité des étapes du schéma présenté en figure 11 ont été testées sur ce jeu de données et différentes options de traitement ont été explorées.

		Génissiat	Mollon	Francheville	Fosse	Saint
Tests réalisés				Home	Angèle	
(chapitre de description)						
Acquisition des données	Utilisation d'un filtre			Х		Х
(111)	polarisant					
Préparation des données	Tri des données à traiter	Х	Х		Х	Х
(111)	Définition ROI/ masque	Х	Х	х	х	Х
Préparation des données	Segmentation des images	Х				
(IV)	Extraction par grille	Х			х	
Extraction des variables	Extraction du signal	Х	Х		Х	Х
d'intérêt (IV)						
Traitement du signal	Classification automatique	Х			х	
(IV)	Différences entre bandes		Х			
	spectrales					
	Orthorectification	Х		х		
	Transformation des	Х				
	données					
Analyse de la temporalité	Analyses visuelles	Х	Х	х	х	Х
des variables extraites	Ondelettes/ Fourier	Х				
(V)	Corrélation	Х	Х			

Tableau 5 : Synthèse des tests, procédures et analyses réalisés sur les différents jeux de données acquis.

II- Sites d'études : contexte opératoire et données utilisées

II.1- Site de Génissiat (Rhône, France)

II.1.1- Localisation du capteur et contexte de l'installation

Le Rhône est l'un des principaux cours d'eau français, avec un linéaire total de 812 km et une surface drainée de 98 500 km². Ce fleuve prend sa source dans un glacier suisse portant le même nom, mais 92 % de son bassin versant se situe dans le quart Sud-Est de la France (figure17). La station de jaugeage de Beaucaire, située juste en amont du delta du Rhône, enregistre un débit moyen interannuel de 1 690 m³/s (Banque Hydro, 2015).

Le barrage de Génissiat est un ouvrage hydro-électrique de 105 m de hauteur, construit en 1948 et situé sur le haut Rhône français (le linéaire situé en amont de Lyon est désigné ainsi). C'est l'ouvrage hydro-électrique situé la plus en amont sur le Rhône français, d'autres ouvrages existant en amont de la frontières suisse. Il est localisé à 266 m d'altitude, à 50 km en aval de Genève et à 160 km en amont de Lyon (figure 17). La taille du bassin versant contrôlé par le barrage est de 10 910 km², le module qui y transite est de 359 m³/s (Banque Hydro, 2015). La retenue formée par cet ouvrage mesure 23 km de long, pour une surface d'environ 3,2 km².



Figure 17 : Carte de localisation du barrage de Génissiat dans le bassin versant du Rhône.

Le barrage constitue un obstacle à l'écoulement de l'eau mais également au transit du bois provenant de l'amont : tous les flottants produits par le bassin versant amont sont bloqués par l'ouvrage et en s'accumulant forment un radeau dans le réservoir, qui grossit au cours du temps. Selon B. Moulin et H. Piégay (2004), le temps de résidence de l'eau dans la retenue du barrage est de 12 h, pour un débit équivalent au module. Cela est relativement court et implique que les pièces de bois provenant de l'amont arrivent rapidement jusqu'au barrage au lieu de flotter dans la retenue, lors d'un évènement de crue. Comme l'ouvrage ne possède pas de vanne en surface, ce bois ne peut pas être exporté vers l'aval, même en période de hautes eaux. Il reste donc bloqué par l'ouvrage. Il ne peut pas être évacué d'une autre manière que par intervention de la société gestionnaire du lieu (la Compagnie Nationale du Rhône - CNR). A raison de 2 à 4 fois par an, quand cet embâcle devient trop important, la CNR met en place des campagnes d'extraction mécanique du bois. Cela se fait généralement après une arrivée massive de flottants, donc juste après une crue importante.

Un partenariat avec la CNR a permis l'installation en février 2011 d'une caméra sur la couronne du barrage en rive gauche (voir figure 18.a et 18.b). Le but était d'étudier l'évolution temporelle du radeau de bois (figure 18.b), et de le caractériser au cours du temps. Le modèle de caméra installé est l'Axis 211W (voir figure 15). Elle a été paramétrée pour acquérir des images de 640*480 pixels dans le domaine du visible (canaux rouge, vert et bleu), toutes les 10 min entre 6h et 18h50 (soit 78 images par jour ou 28 500 images par an). Les images acquises sont obliques (figure 18.c) et l'angle de vue horizontal est de 57° (figure 18.b). La portion du réservoir visible sur les images mesure environ 35 000 m².





Figure 18 : Installation réalisée sur le site de Génissiat (Rhône) (a) ; localisation et angle de vue de la caméra (b) ; exemple <u>d'image prise par la caméra (c).</u>

II.1.2- Variables d'intérêt

II.1.2.a- Accumulations de bois dans la retenue du barrage

Le barrage de Génissiat constitue un obstacle à l'export du bois flotté vers l'aval. En cela il constitue une fenêtre d'observation parfaite pour caractériser les quantités de bois sortant du Rhône en amont de ce site et contribuer ainsi à établir un budget ligneux (Moulin et Piégay, 2004; Seo et al., 2008). Les tests photographiques effectués par B. Moulin et H. Piégay (2004) sur quelques semaines, ont montré que l'utilisation de l'imagerie in situ était très adaptée à une telle étude. Vu les pratiques d'enlèvement régulier du bois stocké dans la retenue, j'ai fait l'hypothèse que les quantités de bois qui coulent au fond de la retenue sont faibles et que les quantités enlevées rendent compte du flux de bois arrivant effectivement au barrage. V. Ruiz-Villanueva *et al.* (2016) ont d'ailleurs montré qu'en fonction de l'espèce et de l'état de décomposition des pièces de bois, elles coulent après un temps de flottage de deux à quatre mois. De plus, lors des inspections de maintenance des parties submergées du barrage, la CNR n'a jamais observé de quantité particulière de bois avant sombré au pied de la structure, ce qui indique que peu de bois coule avant les extractions mécaniques. J'ai donc considéré que les quantités de bois observées dans la retenue, via la surface du radeau formé contre la couronne, était un très bon proxy de la production ligneuse de ce bassin.

Le but de l'exploitation du jeu de données acquis à Génissiat était d'estimer automatiquement les flux de bois qui arrivent au barrage au cours du temps. Ces images ont permis de tester la plupart des étapes de la méthode proposée (schématisée par la figure 11). En plus de divers tests réalisés au niveau du tri et du choix des données, l'extraction de divers paramètres a été testée selon plusieurs modes de zonage des images, et plusieurs outils de classification automatique ont été considérés afin d'optimiser la discrimination des pixels occupés par le bois et par l'eau dans les différents clichés. L'acquisition de points de contrôle, sur la structure du barrage et dans la retenue à partir d'une embarcation, a permis de procéder à l'orthorectification des images. Ainsi, des surfaces de bois ont pu être estimées au cours du temps. En comparant les différences de surfaces du radeau, il a été possible d'estimer des flux de bois puis d'étudier la production du bassin versant du Rhône amont.

Les flux de bois calculés par imagerie ont été comparés au débit du Rhône et de ses affluents, et les quantités de bois estimées par imagerie ont été comparées aux quantités de bois mesurées lors des extractions mécaniques. En effet, lors de chaque extraction mécanique, l'entreprise en charge des opérations pèse les déchets banaux industriels (DIB), et la CNR estime les quantités globales de bois exportées lors de chaque campagne. Entre février 2011 et juillet 2015, 14 extractions ont été réalisées. Elles ont toutes été enregistrées par imagerie à l'exception de trois d'entre elles, suite à des défaillances techniques. Chaque opération d'enlèvement consiste à extraire tout le bois présent dans le réservoir. Avant chaque opération d'enlèvement, la surface du radeau de bois a donc été évaluée et les quantités de bois présentes dans le réservoir ont été prédites en fonction de la surface occupée par le radeau.

II.1.2.b- Bassin versant du Rhône en amont de Génissiat et données hydrologiques

Le lac Léman, qui se situe un peu à l'amont de la frontière franco-suisse (voir figure 17 ou figure 19), modifie considérablement l'hydrologie du fleuve. Au niveau de la production ligneuse, tout ce qui provient de l'amont du lac y est piégé. Cela fait que les affluents qui se situent en aval du lac sont les principaux producteurs de bois pour le Rhône au niveau de Génissiat (Moulin and Piégay, 2004). Le Rhône possède deux affluents principaux entre le lac et le barrage : l'Arve, en rive gauche, et la Valserine, en rive droite.

L'Arve draine le massif du Mont Blanc et son bassin versant est glaciaire à 6 % (Moulin et Piégay, 2004). C'est un cours d'eau alpin, qui rafraichit le Rhône et lui fournit une grande quantité de sédiments en suspension (Olivier *et al.*, 2009). Il se jette dans le Rhône au niveau de Genève, 2 km à l'aval de l'exutoire du lac, mais la plus grande partie de son bassin versant de 1 976 km² est français. La station de jaugeage de Genève - Bout du monde enregistre un module de 77,3 m³/s (OFEV, 2015). La section de l'Arve qui se situe à l'aval de Cluses (environ 35 km à l'amont de Annemasse, voir figure 19) draine principalement une vallée alluviale. Le cours d'eau y est largement endigué, cependant il peut éroder ses berges localement et ainsi renouveler sa végétation riveraine. D'autres sections à l'amont peuvent aussi produire des éléments ligneux grâce à divers processus de versants (Keller et Swanson, 1979).

74

La Valserine est une rivière beaucoup plus petite, avec un bassin versant d'une surface de 374 km² et un module de 16 m³/s à la station de jaugeage de Bellegarde-sur-Valserine (Moulin et Piégay, 2004). C'est à cet endroit qu'elle se jette dans le Rhône, seulement 7,5 km en amont du barrage de Génissiat (figure 19). Cette rivière est connue pour être restée relativement naturelle, enregistrant relativement peu de pressions humaines. C'est pourtant sur ce cours d'eau que la première usine hydro-électrique française a été construite, en 1884. La Valserine draine une vallée calcaire aux versants escarpés (Olivier et al., 2009).



Figure 19 : Localisation des stations hydrologiques du bassin versant du Rhône entre le Lac Léman et le barrage de Génissiat utilisées dans cette étude.

Les séries hydrologiques du Rhône, de l'Arve et de la Valserine qui ont été utilisées proviennent de quatre stations de jaugeage (figure 19). Les données du Rhône et de la Valserine ont été fournies par la Banque Hydro. Les débits journaliers du Rhône ont été mesurés à la station de Surjoux, située 3,7 km à l'aval de Génissiat. Comme il n'y a pas d'affluent important entre le barrage et cette station, les séries hydrologiques reflètent directement les débits provenant du réservoir. Ces valeurs sont comparables à celles qui provenaient de la station d'Injoux-Génissiat, située au niveau du barrage et utilisées en 2004 par B. Moulin et H. Piégay. Les débits de la Valserine ont été recomposés en combinant les débits de deux stations, celle de Bellegarde-sur-Valserine ne fournissant plus de données. La première est celle de Chézéry-Foreins, localisée sur la Valserine, 15 km en amont de sa confluence avec le Rhône (figure 19). La seconde est celle de Chatillon-en-Michaille, sur la Sémine, l'un des principaux affluents de la Valserine, au niveau de leur confluence, 5 km à l'amont de la confluence entre la Valserine et le Rhône (figure 19). La somme de ces deux débits est assez proche du débit mesuré auparavant à Bellegarde ; elle le sous-estime légèrement (tableau 6). Les débits moyens journaliers de l'Arve utilisés pour ce travail ont été mesurés à la station de Genève – Bout du monde, gérée par l'OFEV et localisée 4,5 km en amont de sa confluence avec le Rhône (OFEV, 2015) (figure 19). Tous les débits caractéristiques relatifs à cette station n'étaient pas disponibles, les valeurs mesurées auparavant à la station de Arthaz- Pont Notre Dame ont donc parfois été utilisées, située 5 km en amont d'Annemasse.

	Valserine River		Arve River		Rhône River	
Gauging station	Chatillon-en-Michaille	Bellegarde sur	Genève – Bout	Arthaz – Pont	Surjoux	Injoux -
	+ Chézéry-Foreins	Valserine	du Monde	Notre Dame		Génissiat
Catchment area (km ²)	302	374	1976	1984	10,950	10,910
Mean interannual	13.8	16	77.3	73	371	356
discharge (m ³ /s)						
Q ₂ (m ³ /s)	186	131	_	295	950	822
Q ₁₀ (m ³ /s)	270	242	_	434	1200	1197
Period of acquisition	1959-2015+1960-2015	1961-1983	1935-2015	1961-2011	1999-2015	1920-2013

Tableau 6: Données hydrologiques et débits caractéristiques du Rhône, de l'Arve et de la Valserine, provenant des différentes stations de jaugeage utilisées.

II.2- Site de Mollon (Ain, France)

II.2.1- Localisation du capteur et contexte de l'installation

L'Ain est l'un des plus importants affluents de rive droite du Rhône. Cette rivière mesure environ 130 km de long et c'est un cours d'eau d'ordre 6, selon la classification de Strahler (Rollet, 2007). Son bassin versant mesure 3 630 km² au niveau de la station hydrologique de Chazey sur Ain, située à une vingtaine de kilomètres de l'embouchure avec le Rhône, en face de la commune d'Anthon (figure 20). A Chazey-sur-Ain, le module est de 120 m³/s, et le débit d'étiage de 18 m³/s (Bassin RM&C, 2012). La haute et la basse vallée de l'Ain, localisée respectivement en amont et en aval d'Allement, se distinguent nettement du fait de leur contexte géomorphologique (figure 20). Les gorges de l'Ain, qui traversent des plateaux calcaires, ont été largement exploitées pour la production d'hydroélectricité : elles sont équipées de cinq retenues de tailles importantes (dont le réservoir d'Allement). Ainsi, le régime du cours d'eau dans sa plaine aval, qui était avant aménagement pluvionival, est aujourd'hui fortement influencé par cette gestion anthropique.



Figure 20 : Localisation du site de Mollon et de la station hydrométrique de Chazey-sur-Ain dans le bassin versant de l'Ain.

L'Ain est considéré comme l'une des plus belles rivières de France, en particulier pour ses écosystèmes et sa dynamique naturelle. Elle a ainsi bénéficié d'un effort de préservation exceptionnel et a fait l'objet de nombreuses études, notamment au sein de l'UMR 5600 (Rollet, 2007 ; Lejot, 2008 ; Wawrzyniak, 2012). Les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse concernent le site de Mollon. Ils ont été engagés à la suite du mémoire de T. Raso (2011), dont les résultats appelaient à des études complémentaires afin de mieux identifier le rôle des biofilms en tant que facteur limitant la prédiction de la bathymétrie par télédétection. D'après T. Raso (2011), il semble en effet que le biofilm affecte la prédiction des hauteurs d'eau par imagerie satellite et aérienne, en en modifiant la radiométrie du chenal. Une étude du fond du lit par imagerie in situ devait permettre d'estimer l'impact du développement du biofilm sur la signature radiométrique des surfaces et donc potentiellement sur la prédiction des hauteurs d'eau.

Le site d'étude, localisé sur la commune de Villieu-Loyes-Mollon (figure 21.a), a été choisi afin de disposer d'une zone à la fois relativement calme, car les remous en surface limitent la visibilité du fond du lit, et qui ait une profondeur assez importante afin de ne pas être à sec en étiage. Ce site, localisé en rive droite de l'Ain (figure 21.b), présente une berge abrupte qui n'est pas menacée par une érosion à court terme et une lame d'eau relativement importante au droit immédiat de la berge.

Cette situation permet ainsi d'équiper le site d'une caméra fixée sur un arbre en berge et déportée dans le chenal (figure 21.c). Un capteur de hauteur d'eau a été installé à proximité immédiate du site, en rive gauche de la rivière et à une plus faible profondeur (figure 21.d).



Figure 21 : Localisation du site d'étude sur la commune de Villieu-Loyes-Mollon (a), et localisation des différents capteurs (b) : un capteur de pression atmosphérique, une caméra (c) et un capteur de hauteur d'eau (d).

Sur ce site, une caméra Reconyx de la série Hyperfire PC800 (voir figure 15) a été installée sur une perche métallique, celle-ci étant fixée à un arbre, de manière à prendre des images verticales permettant de caractériser la lame d'eau et la nature du fond du cours d'eau (figure 21.c). Les prises de vue ont été programmées chaque jour entre 5h00 et 22h00, de manière à couvrir toute la période lumineuse de la journée. En cas de trop faible intensité lumineuse, les photographies sont alors acquises en noir et blanc. La fréquence d'acquisition programmée est de 15 min et la résolution de l'appareil est de 3.1 millions de pixels, la mise au point et les réglages optiques étant automatiques.

Sachant que la caméra est placée à 5,55 m au-dessus du fond du lit au droit de l'objectif, la surface couverte au sol par les clichés est théoriquement de 12,33 m². La réfraction observée à l'interface air/eau explique que cette surface est légèrement inférieure, et n'est pas tout à fait constante au cours du temps, à cause des variations de hauteur d'eau. En effet, d'après la loi de Snell-Descartes, la réfraction des rayons lumineux à la surface de l'eau modifie l'importance de la zone visible au sol. L'un des clichés pris par la caméra le 8 août 2012 permet de visualiser le type d'images acquises par ce capteur (figure 22). La berge de rive droite de l'Ain, est parallèle à la base de l'image. La hauteur d'eau sous la caméra au moment de la prise de vue est de 102,2 cm, au centre de l'image.



Figure 22 : Exemple d'image constituant le jeu de données de Mollon : image acquise le 8 août 2012 (102,2 cm d'eau).

II.2.2- Variables d'intérêt

Une caméra a été installée sur le site de Mollon afin de comprendre l'impact du biofilm chlorophyllien sur la radiométrie des images. En effet, la radiométrie observée sur les images est utilisée pour prédire la profondeur de l'eau, en se basant sur le fait que plus les pixels de l'image sont sombres, plus ils représentent des zones profondes. Cependant, le biofilm produit des pigments chlorophylliens ce qui modifient la radiométrie de l'image, celle-ci ne retranscrivant plus de manière systématique la hauteur de la lame d'eau (Power et al., 2008). T. Raso (2011) a ainsi montré que sur l'Ain, la répartition spatio-temporelle de ce biofilm dans le lit du cours d'eau pouvait compliquer

l'étude des faciès d'écoulements. D'après ces travaux, il semblerait que cette répartition évolue à la fois spatialement en fonction de la répartition des forces d'arrachement, et dans le temps car ces forces d'arrachements évoluent également en fonction des débits du cours d'eau.

Sur ce site, le but était de comprendre l'impact du biofilm au cours du temps, d'un point de vue colorimétrique, donc de définir de quelle manière évoluait la radiométrie du cours d'eau lors de son cycle de développement. Pour cela, des campagnes de terrain ont été organisées pour brosser le fond du lit et arracher le biofilm en place, afin de simuler l'action des crues. La réinstallation du périphyton devait être mise en évidence par l'étude de l'évolution de la radiométrie des images.

Afin d'observer le biofilm, la visibilité du fond du lit est nécessaire : un tri des images en fonction de ce facteur a donc eu lieu avant tout. La hauteur d'eau, bien sûr, mais également de nombreux autres facteurs qu'ils soient météorologiques ou horaires, sont apparus comme des limites à l'observation du fond du chenal. Après avoir été recensés, ils ont été étudiés dans ce cadre. Plusieurs problématiques, citées ci-dessous, ont donc été abordées :

- Quelle est la probabilité de voir le fond en fonction des paramètres hydrologiques, météorologiques et chronologiques ?
- En cas de visibilité du fond, est-il possible de détecter la présence de biofilm ?
- La présence ou l'absence de ce biofilm a-t-elle une influence sur la détermination de la hauteur d'eau par imagerie ?

Pour répondre à cela, diverses données complémentaires ont été nécessaires. Elles sont présentées ci-dessous.

II.1.2.a- Hauteur d'eau sous la caméra

Dans le cadre de l'étude de la visibilité du fond, mais également afin d'élaborer un modèle prédictif de profondeur de l'eau, il est nécessaire de disposer de valeurs réelles de hauteur d'eau. De manière à enregistrer directement les variations de hauteurs d'eau subies par la rivière au niveau de la caméra, un tensiomètre a été installé à proximité du capteur (figure 21.b et 21.d). Une sonde autonome de type mini-diver DI501, qui mesure la hauteur de la colonne d'eau grâce à une mesure de la pression de l'eau (Eijkelkamp, 2007) a été utilisée. Fabriquée par Schlumberger Water Service, elle fonctionne en couple avec une sonde barométrique, dont les données de pression atmosphérique servent à calibrer les données aquatiques (voir figure 21.b). Ce matériel sert généralement au suivi du niveau des nappes phréatiques, mais permet facilement d'enregistrer en continu les niveaux d'eau de surface. Le pas d'acquisition des mesures, qui se règle via une interface, a été calé sur celui des prises de vue de la caméra. La sonde barométrique est localisée à proximité, à

l'abri de la vue des passants potentiels. L'accès aux deux sondes est facile, ce qui permet un déchargement régulier de ces données.

Le premier piézomètre qui a été installé pour calculer les hauteurs d'eau a subi une avarie au cours d'une crue et les mesures disponibles grâce à ce capteur ont été enregistrées entre le 30 mars et le 9 juin 2012. Une seconde sonde a été installée, qui a subi le même sort. Cette seconde période d'enregistrement s'étend du 12 juillet 2012 au 22 février 2013. La période d'acquisition des images étant beaucoup plus longue (du 30 mars 2012 au 1^{er} avril 2013), les mesures de débits effectuées par la DREAL à la station de Chazey-sur-Ain (figure 20) ont permis d'estimer en continu les hauteurs d'eau sous la caméra. Le pas de temps le plus fin disponible à la station de Chazey est horaire, l'information a été interpolée linéairement pour attribuer à chaque cliché, acquis à la fréquence de 15 min, une hauteur d'eau. Ces hauteurs d'eau « prédites » ont ensuite été comparées au signal extrait des images.

La figure 23 représente le lien entre les valeurs de hauteurs d'eau mesurées sur le site d'étude et les débits mesurés à Chazey. La loi qui relie ces données n'est pas tout à fait constante au cours du temps. Cela est très probablement lié à la modification de la géométrie du lit du cours d'eau entre Mollon et Chazey-sur-Ain au cours des différents évènements hydrologiques survenus pendant la période d'étude. Ce phénomène est mis en évidence par une représentation des différentes périodes homogènes par différentes couleurs. La première correspond à la période d'enregistrement du premier piézomètre. Au cours de la période d'enregistrement du second piézomètre, deux évènements ont conduit à une modification notable de la relation entre les deux valeurs (voir figure 23) : ils sont survenus le 28 novembre et le 15 décembre 2012.

Afin d'estimer la hauteur d'eau pour la période successive à l'avarie du premier piézomètre, le modèle défini pour la première période d'enregistrement du second piézomètre : calculée entre le 12 juillet et le 28 novembre 2012 a été extrapolé. Cette loi, représentée sur la figure 24, correspond à l'équation (7) ci-dessous. Elle représente relativement bien les données pour les petites valeurs de débits, mais elle est un peu imprécise et sous-estime légèrement les hauteurs d'eau importantes. Toutes les images acquises après l'avarie du second piézomètre ont été associées à des hauteurs d'eau estimées selon la loi définie sur la période du 15 décembre 2012 au 22 février 2013, donnée cidessous par l'équation (8) :

$$y = 3,58 * (x - 17,3)^{0,66} + 6,6$$
 (7)

$$y = 1,92 * (x - 63,7)^{0,74} + 28,4$$
 (8)



Figure 23 : Hauteur d'eau mesurée à Mollon en fonction du débit mesuré à Chazey-sur-Ain. Les couleurs représentent les acquisitions faites sur différentes périodes.



Figure 24 : Relations statistiques utilisées pour la prédiction des hauteurs d'eau au niveau de la caméra durant les périodes où les piézomètres n'ont pas fonctionné.

Afin d'estimer la hauteur d'eau visible sur chaque image, il a ensuite fallu tenir compte du différentiel de niveau du fond du lit entre le lieu d'implantation du piézomètre et la surface d'observation couverte par la caméra. La charge hydraulique mesurée par le piézomètre est reliée à la hauteur d'eau sous la caméra par une relation simple, obtenue grâce à quelques mesures réalisées lors des missions de terrain : la hauteur d'eau est relevée exactement en dessous de la caméra et comparée avec la valeur enregistrée par le piézomètre à la même heure. Le tableau 7 présente ces éléments. Une différence moyenne de 92 cm a donc été mesurée pour la période correspondant au premier piézomètre. Le second piézomètre n'étant pas placé rigoureusement au même endroit, la différence moyenne mesurée par rapport à la caméra est de 91 cm.

Date	Heure de mesure	Hauteur d'eau sous la caméra	Hauteur d'eau au piézomètre (cm)	Piézomètre actif	Différentiel moyen (cm)
		(cm)			
02/05/2012	12h00	145	56,8	piézo 1	91,7
09/05/2012	17h45	184	87,1	piézo 1	
16/05/2012	10h15	170	79,1	piézo 1	
30/05/2012	09h30	135	44,1	piézo 1	
12/07/2012	16h45	127	36,6	piézo 2	90,9
30/07/2012	14h45	102	10,7	piézo 2	

Tableau 7: Hauteurs d'eau mesurées manuellement sous la caméra et par le piézomètre à la même heure pour calculer le différentiel de niveau entre les deux.

Le tableau 8 confronte sur la période d'étude du site, c'est-à-dire du 30 mars 2012 au 1 avril 2013, les débits mesurés à Chazey-sur-Ain et les hauteurs d'eau estimées au niveau de la caméra pour quelques valeurs caractéristiques.

Value	Water depth (cm)	Discharge (m ³ /s)
Minimum	97.4	17.9
	100	18.6
	150	67.6
Interanual discharge Ain River	166.2	123
	200	179.0
	300	540.5
Maximum	406.4	909.0
Mean	172.3	144.6

Tableau 8 : Débits mesurés à la station de Chazey-sur-Ain et hauteurs d'eau correspondantes estimées sous la caméra,

II.1.2.b- Données météorologiques et campagnes de balayage

En plus des données de hauteur d'eau, les informations extraites des images ont été comparées à d'autres valeurs, dont des mesures météorologiques. Cela a permis de comparer d'une part les signaux radiométriques et d'autre part la probabilité de voir le fond sur les images, en fonction des conditions environnementales. Ces données proviennent de la station météorologique d'Ambérieu en Bugey, située à environ 9 km du site d'étude (voir figure 20).

Deux types de données ont été exploités : l'insolation et la nébulosité. Le but est ainsi de quantifier la lumière présente lors des prises de vue. Des données d' « insolation horaire » mesurées à la station Météo France d'Ambérieu en Bugey, qui correspondent au nombre de minutes par heure pendant lesquelles le soleil a brillé assez fort pour permettre de distinguer les ombres portées, étaient disponibles pour l'ensemble de la période d'étude, soit du 30 mars 2012 au 1^{er} avril 2013. La « nébulosité » quant à elle représente l'importance surfacique de la couche nuageuse dans le ciel au moment de la mesure. Elle est mesurée en octas, le 0 correspondant à un ciel parfaitement dégagé et le 8 à un ciel totalement couvert. La classe 9, qui n'est pas représentée dans ces données, correspond au brouillard. Ces mesures ne sont disponibles que du 30 mars au 3 septembre 2012.

Au cours de la période d'étude, des campagnes de balayage du lit ont été menées, afin de simuler l'arrachement du biofilm par des crues. La moitié aval de la surface observée par le capteur a été brossée, la moitié amont n'étant pas touchée, afin de comparer le signal radiométrique provenant des deux zones de l'image. En tout, huit campagnes ont eu lieu au cours du printemps et de l'été 2012 (6 avril ; 2, 9, 16 et 30 mai ; 23 juin ; 12 et 30 juillet). La figure 25 illustre la campagne du 12 juillet 2012.

Le tableau 9 récapitule les périodes couvertes sur le site de Mollon par les différents jeux de données exploités dans le cadre de l'étude. Différents tests ayant été réalisés à différentes périodes de ces travaux de thèse, les données ne couvrent pas toujours les mêmes périodes de temps

84

Type de données	Fréquence /	Nombre d'images	Début de la période	Fin de la période
	horaire exploités			
Acquisition des images	15 min	28 835	30 mars 2012	1 ^{er} avril 2013
Classification selon la visibilité du fond	15 min	9 928	30 mars 2012	1 ^{er} avril 2013
Analyse des facteurs limitant la visibilité	15 min	2 155	30 mars 2012	30 mai 2012
Extraction radio dans la zone centrale	15 min	9 928	30 mars 2012	1 ^{er} avril 2013
Extraction radio dans les zones « Brushed/	Avant 9h00,	605	30 mars 2012	31 août 2012
Unbrushed »	15 min			
Extraction radio dans l'emprise carrée de la	15 min	4 931	30 mars 2012	31 août 2012
zone « brushed »				
Hauteurs d'eau piézomètre 1	15 min	_	30 mars 2012	9 juin 2012
Hauteurs d'eau piézomètre 2	15 min	_	12 juillet 2012	22 février 2013
Débits Chazey-sur-Ain Banque Hydro	60 min	_	30 mars 2012	1 ^{er} avril 2013
Insolation Météo France	60 min	_	30 mars 2012	1 ^{er} avril 2013
Nébulosité Météo France	60 min	-	30 mars 2012	3 septembre 2012

Tableau 9 : Synthèse des périodes couvertes par les différents jeux de données exploités dans le cadre de l'étude du site de Mollon,



Figure 25 : Illustration des campagnes de balayage à Mollon. La partie droite est brossée, la partie gauche est non brossée.

II.3- Site de Francheville (Yzeron, France)

L'Yzeron est un petit cours d'eau qui se jette dans le Rhône en rive droite et au niveau d'Oullins, juste à l'aval de Lyon (figure 26). Il mesure 26 km de long pour une surface de bassin versant de 147 km² (Grosprêtre, 2011). Les débits de ce cours d'eau présentent un régime pluvial et sont généralement relativement faibles, avec un module interannuel de 0,664 m³/s mesuré à la station limnimétrique de Taffignon, à Francheville (figure 26) (Bassin RM&C, 2016). Cependant, le contexte géologique qui induit une faible capacité d'infiltration des eaux de ruissellement conduit à des crues rapides et intenses, dont les conséquences en termes d'inondations sont accrues par une urbanisation croissante (Grosprêtre, 2011 ; Flaminio et al., 2015).

Le bassin versant de l'Yzeron est communément divisé en trois sous-unités, reflétant à la fois le contexte géomorphologique et l'occupation du sol. A l'Est, il correspond à la paléovallée du Rhône et de la Saône et est très fortement urbanisé. Le relief y est relativement peu contrasté. Dans la partie centrale du bassin, la rivière draine le plateau lyonnais. Celui-ci présente une croissance périurbaine, le tissu urbain étant ainsi moins dense que dans la partie aval du bassin versant. Le relief est un peu plus important, les altitudes variant de 250 à 400 m. L'Ouest du bassin versant présente des pentes plus importantes. Le cours d'eau draine alors les Monts du Lyonnais qui atteignent 918 m d'altitude. L'occupation du sol y est encore très largement rurale et la déprise agricole engendre un déstockage sédimentaire de la plupart des cours d'eau situés en têtes de bassins. Ceux-ci ont ainsi tendance à s'inciser. La section aval au contraire, subit certains problèmes d'ensablement, liés à cette incision du

réseau amont dont l'effet est accru par l'augmentation à la fois de l'intensité des crues et de l'imperméabilisation des sols résultant de l'urbanisation (Grosprêtre, 2011).



Figure 26 : Localisation du site d'étude de Francheville dans le bassin versant de l'Yzeron.

Face aux nombreux problèmes de gestions que pose l'Yzeron, de nombreuses études ont été menées sur ce bassin versant (le projet AVUPUR, par exemple) et un gros projet de restauration est mené sur les communes riveraines les plus à l'aval. Dans sa thèse, L. Grosprêtre (2011) a recensé les différents secteurs incisés et ensablés du réseau hydrographique. Suite à ces travaux et en concertation avec le SAGYRC, le syndicat de gestion de ce bassin versant, il a été décidé d'implanter une caméra in situ sur la commune de Francheville. L'objectif était de suivre l'évolution de l'ensablement du lit principal de l'Yzeron au cours du temps, dans un secteur connu pour être particulièrement affecté par ce phénomène.

Une caméra automatique de type Reconyx Hyperfire PC800 a été installée et programmée pour acquérir des images toutes les 30 minutes entre 6h00 et 20h30, à une résolution de 3,1 millions de pixels. La mesure des débits acquis à la station limnimétrique de Taffignon, située environ 500 m à l'amont de l'emplacement de la caméra (figure 27.a), permet de caractériser l'hydrologie du site au cours du temps. Ce site étant complétement urbain, l'installation a été sécurisée : fixée en hauteur grâce à un boitier métallique et un cadenas (figure 27.b). Le but étant d'observer le fond du lit, la caméra a été équipée d'un filtre polarisant qui limite les reflets en surface de l'eau (voir figure 27.c et 27.d). Une campagne d'acquisition de points a été menée au DGPS sur les berges et dans le lit du cours d'eau afin d'orthorectifier les images et pouvoir estimer les surfaces couvertes par les clichés.



Figure 27 : Emplacement et angle de vue de la caméra sur le site de Francheville (Yzeron) (a) ; installation du capteur (b) et exemples d'images prises par la caméra, sans (c) et avec (d) filtre polarisant, à deux jours de décalage à 17h00.

II.4- Site de la fosse Home (Saint-Jean) et site de Sainte-Angèle-de-Merici (Mitis), Québec

Dans les régions froides, les rivières présentent un fonctionnement particulier au cours l'hiver, du fait de la présence de glace qui se développe à la surface de l'eau ou sur le fond de leur lit. Les portions couvertes étant variables au cours du temps en fonction des conditions météorologiques et hydrologiques, les conditions d'écoulement se voient modifiées de manière plus ou moins importante. C'est également le cas lors de la débâcle, lorsque cette glace disparaît, plus ou moins rapidement à cause des phénomènes thermiques et hydrologiques du printemps. La débâcle est dite thermique, si la glace disparait principalement en fondant suite à la remontée progressive des températures. Elle est appelée mécanique quand le couvert de glace est rompu par les modifications brutales des conditions hydrologiques, liées à la fonte rapide des neiges et des glaces. Le charriage de blocs de glace ainsi évacués conduit à des processus d'érosion et d'arrachement du fond du lit, des berges et de la végétation riveraine, qui sont autant de modifications morphologiques du cours d'eau. Des embâcles peuvent également se former du fait de la rétention de ces blocs, et au même titre que des embâcles ligneux, peuvent créer des retenues d'eau en amont et conduire à une inondation des zones riveraines. L'étude de la dynamique glacielle, bien que complexe à cause de la nature de l'objet et des conditions environnementales inhérentes, présente donc des enjeux importants. L'imagerie in situ semble particulièrement intéressante dans un tel contexte, par les facilités d'observation qu'elle fournit, tout en limitant les interventions d'opérateurs sur le terrain. Afin de tester les potentialités des caméras automatiques dans ce but-là, deux jeux de données acquis sur des rivières québécoises au cours de l'hiver 2010-2011 et du printemps 2014 ont été étudiés.

II.4.1- Site de la fosse Home

La rivière Saint-Jean, au Québec, se situe tout à l'Est de la péninsule gaspésienne (figure 28.a). Cette rivière draine un bassin versant de 1 134 km² et parcourt un linéaire de 130 km de long, avant de se jeter dans la baie de Gaspé (Boivin, 2016). Son module interannuel est de 30 m³/s, et son régime hydrologique est pluvio-nival. En hiver, généralement de décembre à fin avril, elle est recouverte par un couvert glaciel. La Saint-Jean est restée une rivière très naturelle : d'après M. Boivin (2016), les aménagements et pressions anthropiques sont très limités dans ce bassin versant, et c'est l'une des plus réputées au monde pour la pêche au saumon. Depuis les années 1960, un embâcle de bois très important se développe au niveau du delta de la rivière (figure 28.a). Ce phénomène serait peut-être lié à l'arrêt des activités forestières dans le bassin versant. De par sa taille hors du commun (plusieurs kilomètres de long) et face à l'enjeu économique que constitue la pêche de loisir sur ce cours d'eau, cet embâcle a été très étudié ces dernières années, notamment dans le cadre de la thèse de M. Boivin (2016).

Dans le contexte de cette thèse, une caméra in situ de la marque Reconyx (série Hyperfire PC800) a été installée. La séquence d'images acquise durant l'hiver 2010-2011 a ainsi été exploitée pour étudier l'évolution du couvert glaciel au niveau du méandre nommé « fosse Home » (figure 28.b). La caméra a été implantée à environ 9 km du delta de la Saint-Jean dans la Baie de Gaspé. Dans ce secteur, ce cours d'eau graveleux présente des méandres très dynamiques (Boivin, 2016). Le capteur ayant été retiré avant le début de cette thèse, aucune photo pour illustrer cette installation n'est disponible. Il avait été programmé pour acquérir une image toutes les heures entre 7h00 et 16h00, du 12 décembre 2010 au 8 avril 2011. Puis jusqu'au 25 avril 2011, afin de couvrir la période correspondant à une débâcle thermique, une image a été acquise toutes les 30 minutes entre 6h00 et 18h30.





Figure 28 : Localisation du site d'étude dans le bassin versant de la saint-Jean (a), site de la fosse Home : emplacement et angle de vue de la caméra (b) ; exemple d'une mage acquise le 12 décembre 2010 à 15h00 (c).

Sur ce jeu de données, la reconnaissance par classification automatique des différents types de glaces constituant le couvert glaciel et leur évolution au cours du temps, depuis la mise en place du couvert jusqu'à son évacuation lors de la débâcle, a été testée. 7 classes de glace ont été définies pour cela : elles sont illustrées par la figure 29. Aucune autre donnée n'étant disponible pour l'orthorectification de ce site, seule une caractérisation qualitative du couvert de glace a été réalisée, en étudiant les successions des différents types de glace au cours du temps, sans pouvoir mesurer leur surface réelle.

Afin d'interpréter les résultats obtenus sur la Saint-Jean, des données météorologiques et hydrologiques ont été confrontées au signal extrait des images. De même que l'ont fait M. Boivin et al. (2017), les chroniques de débits mesurées sur la rivière York ont été utilisés. Cette rivière, qui se jette dans la baie de Gaspé au Nord de la Saint-Jean, est à la fois très proche géographiquement (voir figure 28.a) et très similaire de la Saint-Jean d'un point de vue géomorphologique (longueur, surface et orientation du bassin versant, gradient notamment). Ces données ont été mesurées par le centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Les données climatiques (températures, précipitations liquides et solides et intensité du vent) ont été mesurées au niveau de l'aéroport de Gaspé, à une distance euclidienne de 3 km seulement de la fosse Home. Ces données sont fournies par Environnement Canada.



Figure 29 : Illustration de la classification des glaces utilisée.

II.4.2- Site de Sainte-Angèle

La rivière Mitis s'écoule au Sud du Québec, dans la région communément appelée Gaspésie mais qui correspond administrativement au Bas-Saint-Laurent. Elle prend sa source dans la chaîne des Appalaches, à 305 m d'altitude, et se jette dans l'estuaire du Saint Laurent (voir figure 30.a). Elle s'écoule donc globalement du Sud au Nord, sur un linéaire de 68 km. Son bassin versant représente une surface de 1 828 km² et le module interannuel mesuré est de 33,8 m³/s (Besnard, 2016). Cette rivière enregistre un pic de crue au printemps, lors de la débâcle, et présente ainsi une dynamique typiquement glacielle.

Le bassin versant de la Mitis regroupe 19 municipalités et les activités humaines liées au cours d'eau sont nombreuses (Besnard, 2016). Entre autres, la pêche au saumon y est pratiquée et plusieurs centrales de production électrique y sont implantées (figure 30.a). Les enjeux de cette rivière sont d'autant plus importants que les inondations sont fréquentes. La commune de Sainte-Angèle-de-Merici semble particulièrement affectée. Les inondations dues aux embâcles de glace sont importantes, et d'après C. Besnard (2016), les zones touchées par ce type de crues tout comme les

conséquences qui résultent de ces inondations sont différentes de celles provoquées par des eaux libres. Le propriétaire de l'une des résidences riveraines ayant donné son autorisation d'accès et d'installation de capteurs sur son terrain, le site de Sainte-Angèle-de-Merici et plus particulièrement dans la rue des riverains, qui est particulièrement affecté par ces inondations (figure 30), a été choisi pour l'installation des caméras automatiques.

Des caméras Reconyx de la série PC800 Hyperfire ont été installées au début du mois d'avril 2014 afin d'enregistrer la débâcle (figure 30.b).Le but de cette acquisition était double. Il s'agissait de détecter les conséquences de la débâcle glacielle et notamment le passage de blocs de glace et leur accumulation en embâcles à l'aval du site, par l'observation des fluctuations rapides du niveau d'eau. Deux capteurs ont été installés, l'un juste au-dessus de l'autre (voir figure 30.b). L'un était équipé d'un filtre polarisant et l'autre non, afin de tester l'utilité d'un filtre polarisant pour l'étude de la glace sur les cours d'eau. Les figures 30.d et 30.e présentent les vues des deux appareils.

Une image a ainsi été acquise toutes les 10 min entre 7h00 et 19h50, du 4 au 30 avril 2014. Le détecteur de mouvement avait été programmé afin de pouvoir visualiser le passage des blocs de glace à la suite de la rupture du couvert glaciel. Malheureusement, aucune crue particulière n'a été enregistrée cette année-là dans ce secteur et l'épisode de débâcle a été relativement rapide. L'analyse de ce jeu de données a simplement consisté en une comparaison des signaux extraits des deux types d'images, afin de comprendre l'effet du filtre polarisant sur la radiométrie des images.





93



Figure 30 : Linéaire des principales branches drainant le bassin versant de la Mitis (a) ; emplacement et angle de vue de la caméra sur le site de Saint Angèle (Mitis) (c) ; installation des capteurs (c) et exemples d'images prises par la caméra, avec (d) et sans (e) filtre polarisant, le 4 avril 2014 à 16h30.

Chapitre III : Acquisition des images et préparation des données

Ce chapitre examine la mise en œuvre et l'optimisation des trois premières étapes de la chaîne de traitements des images in situ présentée dans le chapitre II. La figure 31 illustre ces étapes ainsi que différents questionnements qui se posent lors de la mise en œuvre de chacune d'entre elles. Ce chapitre explore différentes configurations des caméras mais également l'effet de conditions environnementales variables sur la qualité des images in situ. Les résultats originaux de divers tests sont présentés : ceux-ci ont été réalisés afin d'optimiser les choix de mise en œuvre et d'analyses des images.

La section I de ce chapitre porte sur l'acquisition des images. Avant toute chose, il importe d'acquérir des images dont la qualité permet la réalisation satisfaisante du cortège d'analyses envisagées. Plusieurs points sont à considérer pour réaliser une installation solide et efficace : le choix du capteur employé, le type de support, ou la fréquence des prises de vue à programmer. Une phase test d'acquisition peut être engagée afin de disposer d'un premier jeu de données à analyser, qui permet d'identifier les problèmes potentiels et d'ajuster si nécessaire les conditions d'acquisition. En effet, il peut être difficile d'appréhender certaines des caractéristiques du site avant même de les avoir observées sur les images.

Les sections II et III traitent respectivement de la constitution des jeux de données et de la définition de la zone d'étude (ROI) au sein de la scène imagée. Ces étapes sont préalables à l'extraction du signal. La constitution d'un échantillon de l'ensemble des images acquises est parfois judicieuse pour limiter la redondance d'information, l'espace de stockage et la durée des analyses. Il faut dans ce cas définir le nombre d'images à échantillonner ainsi que les modalités de sélection de ces images. Il faut donc comprendre ce qui rend une image meilleure qu'une autre parmi l'ensemble disponible, dans la perspective des traitements envisagés. Ensuite, le signal ne sera pas extrait dans toute l'image si elle ne couvre pas exclusivement la zone d'intérêt pour l'étude : la zone concernée doit donc être définie, en considérant la surface représentée ou les éléments susceptibles de nuire à la qualité des analyses, par exemple.


Figure 31 : Schéma global de la démarche proposée pour l'étude des cours d'eau par imagerie in situ : mise en évidence des étapes traitées dans ce chapitre et problématiques associées.

I- Conception d'une installation pour l'acquisition d'images

I.1- Recommandations concernant la conception de l'installation

I.1.1- Choix du site d'étude et du support du capteur

Le choix du lieu de l'installation d'un capteur correspond à la volonté de suivre un site, un processus ou un type de milieux définis au préalable. Dans tous les cas, plusieurs critères sont à considérer pour optimiser l'installation. Entre autres, l'accessibilité du capteur ou le type d'aménagement envisagé sont primordiaux. Ils dépendent avant tout de la configuration du site d'étude, il faut donc mener une réflexion sur l'emplacement optimal du capteur avant de l'installer.

Tirer parti des infrastructures existantes (piles de ponts, poteaux télécom ou EDF, par exemple) est souhaitable car ils constituent des supports fixes, solides et durables. Il faut cependant considérer les aspects légaux et les restrictions administratives propres à chacune d'elles. Utiliser la végétation riveraine comme support peut permettre une installation à la fois plus simple d'accès et plus discrète. Cependant, il faut prévoir de sécuriser l'installation si le lieu est fréquenté, pour limiter le risque de vandalisme. Pour cela, il est possible d'employer des cadenas ou des boitiers de sécurité, qui soient discrets de préférence (figure 32).



Reconyx : tiré du manuel d'utilisation des caméras de la série Hyperfire

Il est recommandé d'installer autant que possible le capteur sur un support solide et immobile. Le but étant de comparer les informations contenues dans différentes images, il faut conserver au maximum un cadre fixe au cours du temps et donc limiter les décalages entre les prises de vue. La figure 33 illustre le type de décalage qui peut survenir à cause d'un mouvement du capteur, lors du déchargement des données par exemple. Si le support est un arbre, il faut qu'il soit robuste et peu soumis aux vents, afin de limiter le nombre de prises de vues floues à cause des mouvements du capteur lors du déclenchement.



Figure 33 : Modification du cadre des prises de vue due au décalage de la caméra dans le temps, sur la rivière Saint-Jean (le 12 décembre 2010 à gauche, le 5 janvier 2011 à droite ; cadre initial en jaune sur les deux images)

Figure 32 : Boitier de sécurité métallique (gauche) et camouflage des caméras (droite) de la marque Reconyx.

La croissance de la végétation peut également poser des problèmes et perturber l'analyse des données en obstruant la scène observée (voir figure 34) : il faut ainsi prévoir d'entretenir le site pour limiter le développement de la végétation. De la même manière, les chutes de neige peuvent recouvrir une partie de la scène, et les gouttes de pluie ou les flocons de neige peuvent obstruer une partie de l'objectif (voir figures 35.a et 35.b). Ces désagréments sont éventuellement acceptables s'ils ne sont que ponctuels, mais il est souhaitable de les limiter au maximum en jouant sur l'angle de la caméra lors de son installation, en l'équipant d'un dispositif adéquat (un toit par exemple), ou bien en le disposant dans un abri.



Figure 34 : Obstruction d'une partie de la zone d'étude par la croissance de la végétation sur l'Yzeron, le 12 février 2015 (gauche) et le 18 novembre 2013 (droite).



Figure 35 : Altération de la visibilité de la scène par la pluie (a) ou la neige (b).

I.1.2- Choix du capteur

Le type de capteur doit être choisi en considérant les caractéristiques et les paramètres qui sont les plus adaptés au type de prise de vue souhaité : la taille, les dimensions et la résolution des images notamment, les bandes spectrales exploitées, mais également les caractéristiques de la focale (notamment si la mise au point se fait automatiquement ou pas), les déformations induites par le type de lentille utilisée, les réglages et les programmations possibles pour le déclenchement des prises de vue, etc. Le type d'alimentation du capteur et sa consommation en énergie, ainsi que le support de stockage des données conditionnent les aménagements à réaliser sur le site. Une accessibilité plus ou moins aisée est à prévoir en fonction de la fréquence d'accès nécessaire à la maintenance de l'installation. Il faut notamment savoir que des températures trop basses peuvent conduire au déchargement brutal des batteries. Afin de ne pas perdre trop de données, il faut veiller à les remplacer rapidement après une période de froid intense, ou après une longue période d'utilisation en conditions « normales ». Le tableau 10 présente les caractéristiques techniques des deux types de capteurs (illustrés en figure 15 du chapitre II) utilisés lors des tests réalisés dans le cadre de cette thèse.

	Axis 211W	Reconvx PC800	
Alimentation	Secteur 7 à 20V	12 piles/ batteries 12V	
Stockage des données	Carte mémoire ordinateur relié	Carte mémoire SD (<32 Go)	
Domaine spectral	Visible	Visible	
Angle de vue	27° – 67° horizontal	42,2° horizontal 32,3° vertical	
Focale	Progressive, jusqu'à 8,0 mm	Fixe, 8,5 mm	
Mise au point	Inconnu	Automatique, >2,44 m	
Format des images	4:3	4:3 ou 16:9	
Résolution des images	640*480 à 160*120 pix	3,1 Mp : 2048*1536 pix ou 1080P : 1920*1080 pix	

Tableau 10 : Caractéristiques techniques des capteurs utilisés sur les différents sites test.

I.1.3- Configuration de l'installation

Une fois le site d'étude identifié, il convient de prendre en compte l'angle de prise de vue souhaité pour observer la scène d'étude, afin de définir le support du capteur. La largeur du cours d'eau ou de l'objet suivi, et la hauteur d'installation possible sont déterminantes dans ce choix. Mais il faut aussi tenir compte des conditions de luminosité du site, c'est à dire de l'ombrage et de l'incidence du soleil. En effet, les variations spatiales et/ou temporelles de luminosité peuvent poser problème lors de l'extraction des paramètres dans l'image (Lejot, 2008). Les figures 36.a et 36.b illustrent le genre de problèmes potentiellement causés par l'incidence du soleil à certaines heures de la journée. Les reflets qui se forment à la surface de l'eau peuvent être gênants pour l'observation du fond du cours d'eau (figure 36.a). Une mauvaise orientation de la caméra par rapport à la course du soleil peut être à l'origine d'une image saturée par les reflets des rayons qui arrivent directement dans l'objectif (figure 36.b). Différentes solutions existent pour optimiser l'installation et la qualité des prises de vue à ce niveau. Sur les caméras installées sur l'Yzeron et sur la Mitis, des filtres polarisants ont par exemple été testés afin de limiter les reflets qui se forment à la surface de l'eau. Il convient aussi de tenir compte de l'angle et de l'orientation des capteurs afin de limiter ce genre de désagrément. Les trois angles d'Euler (voir figure 37) caractérisent la direction de la prise de vue des caméras. Il faut aussi noter qu'il peut être intéressant de mesurer ces angles avec précision car ces valeurs permettent par exemple d'effectuer l'orthorectification des images obliques. Cependant, ces mesures sont parfois compliquées en conditions externes et plus ou moins complexes selon le type de support utilisé.

Certains outils, comme ceux fournis par le site www.sunearthtools.com, permettent de visualiser a priori la course du soleil et la trajectoire des ombres portées au cours de la journée et de connaître les horaires de levé et de coucher du soleil pour n'importe quelle date et en tout point de la surface du globe. Pour un site d'étude donné, cela peut permettre d'anticiper les conditions lumineuses au cours du jour et de l'année, afin de définir au mieux la position du capteur à envisager.



Figure 36 : Illustration de l'un des problèmes à prendre en compte lors de l'installation des capteurs : la formation de reflets en surface de l'eau (ainsi que les ombres portées), qui limitent la visibilité du fond du cours d'eau (a) ou qui saturent complétement l'image (b).



Figure 37 : Illustration des angles d'Euler et de leur signification pour l'orientation de la prise de vue des capteurs.

I.2- Remarques relatives à l'acquisition des images

I.2.1- Cadres légaux en France et au Québec

I.2.1.a- Installation de capteurs

En France, la législation précise qu'il existe deux types de cours d'eau, qui sont dits « domaniaux » et « non domaniaux ». Cette dénomination résulte de la distinction entre les cours d'eau qui étaient dits « navigables ou flottables » et ceux qui ne l'étaient pas. Dans les deux cas, si l'eau est considérée comme un « patrimoine commun » (LOI n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, www.legifrance.gouv.fr), les berges et le lit du cours d'eau sont appropriés et leur gestion ainsi que leur accès sont soumis à deux régimes légaux différents puisque la propriété est dans un cas public et dans l'autre cas privée. Dans tous les cas, l'accès aux berges est soumis à l'autorisation des propriétaires. Souvent aujourd'hui, le propriétaire privé délègue la gestion des berges au syndicat en charge du cours d'eau, ce qui permet à la fois d'avoir un interlocuteur unique et une meilleure cohérence des interventions sur le linéaire en question. Au Québec, dans la mesure où ils n'ont pas fait l'objet d'une concession par l'administration publique, selon l'article 919 du Code civil du Québec c'est l'Etat qui est propriétaire de la zone riveraine des cours d'eau, « jusqu'à la ligne des hautes eaux », (legisquebec.gouv.qc.ca).

Dans le cas du Rhône au niveau du barrage de Génissiat, l'installation du capteur s'est faite sous convention entre l'UMR 5600 - EVS et la CNR, qui est gestionnaire de l'ouvrage hydro-électrique. Les autorisations d'accès et d'exploitation des images obtenues sont régies par cette convention, dont

les termes lient le laboratoire à la CNR. Dans le cas de l'Ain et de l'Yzeron, j'ai agi en concertation et avec les syndicats de rivières concernés : respectivement le Syndicat de la Basse Vallée de l'Ain (SBVA, www.bassevalleedelain.com) et le Syndicat d'Aménagement et de Gestion de l'Yzeron, du Ratier et du Charbonnières (SAGYRC, www.riviere-yzeron.fr). Ayant pris contact avec ces organismes pour manifester mon intention d'installer des caméras sur les berges de ces cours d'eau, la localisation de ces installations a été définie en concertation avec eux (sur l'Yzeron) ou bien soumise à approbation avant leur réalisation (sur l'Ain). Sur la Mitis, les caméras ont été installées sur un terrain privé, le propriétaire d'une des résidences riveraines m'ayant donné son accord. Sur la Saint-Jean, la caméra a été installée à proximité d'un bâtiment de recherche du Ministère des forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Mais aucune autorisation particulière n'a été nécessaire pour l'installation de cette caméra.

I.2.1.b- Acquisition et exploitation d'images

Une fois les capteurs installés, il faut avoir conscience que la production d'images où figurent des personnes fait référence à l'Article 9 du Code civil français, qui affirme que « chacun a droit au respect de sa vie privée ». Cela se traduit par le fait que toute personne peut s'opposer à la diffusion mais également à la conservation des images où elle figure et est reconnaissable, que celles-ci soient acquises dans un lieu public ou privé (www.service-public.fr/particuliers/vosdroits). En l'absence d'une autorisation signée de sa part, une personne peut donc exiger la destruction des enregistrements sur lesquels elle figure. Bien que les images acquises par l'ensemble des capteurs installés ne soient pas vouées à être diffusées ou publiées hors du cadre de cette thèse, cette mesure légale est à prendre en compte lors de l'acquisition des clichés, car il existe un risque de devoir détruire les données acquises. Je n'ai cependant jamais remarqué la présence de personnes autres que les opérateurs intervenant pour la maintenance des sites. Les articles 35 et 36 du Code civil du Québec affirment que « toute personne a droit au respect de sa réputation et de sa vie privée », et que « capter ou utiliser son image ou sa voix lorsqu'elle se trouve dans des lieux privés » y porte atteinte. Cependant, sur les deux sites d'étude québécois, les images enregistrées représentent uniquement le domaine public et donc aucune contrainte légale ne semble s'appliquer à l'exploitation de ces données.

I.2.2- Fréquence d'acquisition

Dans le but d'optimiser les temps de traitement mais également pour ne pas stocker de données inutiles, il est judicieux de limiter le nombre d'images acquises. Cependant, le principe de cette démarche étant de détecter un objet ou un phénomène peu fréquent et se manifestant sur un pas de temps court, il est généralement souhaitable de disposer d'un grand nombre d'images pour

102

obtenir un signal à haute résolution temporelle et le capter. L'enjeu lors de la constitution du jeu de données est donc de trouver le meilleur compromis entre la résolution temporelle attendue et les contraintes de stockage ou relatives au temps de traitements.

Le choix de la fréquence d'acquisition dépend directement de la question posée. Le pas de temps fixé sera très différent selon qu'un flux de bois soit étudié : une image par minute, voire toutes les 10 minutes, permet dans certains cas de détecter les pièces de bois passant devant l'objectif (Kramer et Wohl, 2014), ou qu'une érosion de berge soit étudiée : une image par heure permet d'observer les changements morphologiques liés à la chute d'un arbre ou à l'arrachement de la berge (Hamel et al., 2013). Si les conditions de stockage le permettent, il est toutefois souhaitable de pouvoir programmer les acquisitions à un pas de temps plus fin que le pas optimal a priori. Cela laisse ainsi la possibilité de suivre le processus ou l'objet étudié à une échelle temporelle encore plus fine, ou de réaliser un échantillonnage différent permettant de s'affranchir de certains problèmes d'acquisition. En disposant de cinq images par heure, la validation des résultats horaires par la répétition des mesures pourrait être l'un des moyens de valoriser les images acquises à une fréquence plus élevée que nécessaire a priori. Le calcul de la moyenne horaire grâce aux différentes valeurs disponibles peut également permettre de lisser le signal afin de limiter la variabilité temporelle locale, par exemple. Le tableau 11 référence les fréquences et le nombre d'images produites dans les différents sites test exploités.

Site	Fréquence (min)	Plage horaire	Nombre d'images par jour	Période d'acquisition	Nombre d' total (théo	images rique)
Génissiat	10	6h00	78	2 février 2011	148 902	
		– 18h50		– 25 avril 2016		
Francheville	30	6h00	30	30 14 décembre 2012		23 850
		– 20h30		– 20 mars 2015		
Mollon	15	5h00	79	30 mars 2012	28 835	
		– 21h45		– 1er avril 2013		
Fosse Home	60	7h00	10	13 décembre 2013	1 140	1 556
		– 16h00		– 7 avril 2011		
	30	6h00	26	8 avril 2011	416	
		– 16h30		– 24 avril 2011		
Sainte-Angèle	10	7h00	78	29 mars 2014	2 106	
		– 19h50		– 24 avril 2014		

Tableau 11 : Fréquence des prises de vue et nombre d'images produites sur chaque site test.

I.2.3- Résolution spatiale des images

La résolution spatiale des images influence en partie la précision avec laquelle les objets de l'image pourront être discriminés, notamment si ceux-ci sont petits. La texture peut être une variable de classification intéressante si la surface à discriminer présente une telle propriété mais son calcul est appliqué sur une surface dont la taille dépend évidemment de la résolution initiale. La taille de la maille retenue pour le calcul aura ainsi une influence directe sur l'estimation de la surface de l'objet. Les images étant par ailleurs souvent obliques, la surface couverte par chacun des pixels est donc variable. Lorsque l'image est alors orthorectifiée, les pixels localisés à l'arrière-plan ont une taille importante, dont il faut tenir compte au départ si les surfaces à détecter sont préférentiellement présentes dans cette partie de l'image. Il est important d'avoir une idée a priori de la résolution minimale nécessaire pour répondre à la question posée afin d'intégrer cette contrainte lors du choix de l'équipement et du site d'implantation.

La plupart des caméras ou appareils photo proposent plusieurs niveaux de résolution. La prise en compte de la nature de l'objet d'étude est primordiale pour définir cette résolution, ainsi que la distance entre le capteur et la cible. Mais de manière générale et dans la mesure du possible (en fonction de l'espace de stockage disponible également), il est prudent de maximiser la qualité des images par rapport à la cible envisagée, quitte à la dégrader au cours de la phase de traitement des données.

I.3- Retours d'expériences sur l'utilisation d'un filtre polarisant

Des filtres polarisants ont été adaptés aux capteurs installés sur l'Yzeron et la Mitis. Sur le jeu de données acquis sur l'Yzeron à Francheville, le but était d'observer le fond du lit pour estimer la surface ensablée au cours du temps. L'emploi d'un filtre polarisant était indiqué pour limiter les reflets en surface qui gênent la visibilité dans la colonne d'eau. Ce principe est bien connu des pêcheurs, qui utilisent des lunettes à verres polarisants pour mieux voir le poisson à travers l'eau. Mais le jeu de données acquis sur la Mitis avait pour but l'étude du couvert de glace et en particulier de sa débâcle. L'utilisation d'un filtre polarisant a été testée afin de déterminer son intérêt dans un environnement enneigé, sachant que la neige réfléchit beaucoup de lumière et que la glace peut potentiellement être source de reflets.

I.3.1- Principe optique du filtre polarisant

La lumière est une onde électromagnétique. Un rayon lumineux se propage ainsi dans une direction donnée, en vibrant. La lumière naturelle, qui provient du soleil, comme celle provenant de nombreuses autres sources lumineuses, est dite « non polarisée » : les axes de vibration des ondes

lumineuses correspondent à toutes les directions (voir figure 38). La lumière dite « polarisée », au contraire, ne vibre que selon un seul axe (figure 38), donc dans un plan. La lumière qui se réfléchit sur une surface lisse non métallique se polarise, selon un axe parallèle à la surface de réflexion. L'œil humain n'est pas capable de distinguer la lumière non polarisée de la lumière polarisée : un rayon provenant directement du soleil ou provenant d'une surface lisse sur laquelle il s'est réfléchi est donc similaire.

Un verre polarisant est constitué de cristaux qui polarisent la lumière. Comme ils sont tous orientés dans le même sens, tous les rayons passant à travers le filtre ont le même axe de vibration. Un filtre polarisant possède donc un « axe de polarisation », qui définit la direction des axes de vibration qui pourront être transmis à travers ce filtre. Tous les rayonnements qui se propagent selon cet axe seront transmis, tous les autres seront stoppés. Les rayons qui se sont réfléchis sur la surface de l'eau, qui se propagent donc avec un axe de vibration à peu près horizontal, peuvent donc être stoppés grâce à un filtre polarisant dont l'axe de polarisation est placé verticalement (figure 38).



Figure 38 : Schéma du principe de la polarisation de la lumière et du filtre polarisant.

I.3.2- Evaluation de l'effet d'un filtre polarisant sur la Mitis à Sainte-Angèle

Sur la Mitis, l'effet et l'intérêt de l'utilisation d'un filtre polarisant a été testé dans un environnement enneigé. Pour cela, les signaux extraits des deux jeux de données synchronisés,

acquis par deux caméras disposées l'une au-dessus de l'autre, ont été comparés. Sur les deux séries d'images, seuls les clichés acquis chaque heure entre 10h00 et 17h00 ont été conservés. Cela représente deux lots de 204 images, prises entre le 4 et le 30 avril 2014. Dans la ROI (voir figure 39), certaines statistiques concernant les distributions radiométriques dans les canaux R, V, B et H, S, I ont été extraites : la moyenne, la médiane, la variance, le mode, l'étendue et l'intervalle interquartile. Pour le canal rouge, quelques-uns des indices de texture proposés par Haralick et al. (1973) ont en plus été calculés : l'énergie, l'entropie, le contraste et l'homogénéité. Des séries temporelles ont ensuite été tracées pour comparaison des tendances avec et sans filtre polarisant. Les distributions de certains de ces paramètres statistiques ont également été comparées dans les deux cas, puis les images acquises avant et après la débâcle, survenue le 16 avril, ont été considérées distinctement dans le but d'étudier l'évolution des signaux suite au changement d'état de la surface, de la glace à l'eau. La figure 39 illustre les aspects de la scène étudiée, avec et sans filtre, et avant, pendant, puis après la débâcle glacielle.

La figure 40 représente le mode de la distribution radiométrique dans la ROI des images. Il semble que le filtre polarisant n'ait pas vraiment d'effet dans le canal vert, puisque toutes les distributions radiométriques déterminées sur les images avec et sans filtre sont très similaires. Cependant, les valeurs radiométriques dans le rouge augmentent, alors que celles dans le bleu diminuent avec l'emploi du filtre. La distribution des valeurs radiométriques est particulièrement étendue dans le canal bleu non filtré après la débâcle, donc lorsque la surface observée correspond à de l'eau libre. Comme elle est très nettement réduite avec l'emploi du filtre, cette distribution particulièrement étendue s'explique probablement par la formation de reflets à la surface de l'eau, qui génère des valeurs très élevées.

La figure 41 représente la distribution des intervalles interquartiles des huit images acquises chaque jour entre 10h00 et 17h00. Cette statistique représente la variabilité de la gamme des valeurs présentes dans la ROI de chaque image. D'une part, ces distributions sont généralement très peu étendues avant la débâcle, et légèrement plus après cet évènement. D'autre part, une augmentation générale des valeurs de ces distributions a lieu après la débâcle (qui survient le 16 avril). La distribution des 15 et 16 avril, quand le couvert glaciel se rompt, est particulièrement large. La figure 39 représente la scène d'étude dans les trois configurations : avant la débâcle, le 9 avril, pendant la débâcle, le 16 avril et après la débâcle, le 22 avril. Les patrons radiométriques observés sur les images du 16 avril (figure 39.c et 39.d) sont singuliers, avec des intervalles interquartiles particulièrement élevés. La glace s'évacuant dans la journée du 16, l'étendue de la distribution s'explique par des aspects très divers de l'ensemble des images acquises à cette date.



Figure 39 : Illustration de l'évolution de l'aspect des images acquises sur la Mitis au cours du temps, sans (a, c, e) et avec (b, d, f) filtre polarisant : le 10 (a et b), le 16 (c et d) et le 22 (e et f) avril 2014 à 11h00.

Comme la figure 40, la figure 41 montre que la présence d'un filtre polarisant augmente les valeurs dans le canal rouge alors qu'elles les diminuent dans le canal bleu. Cela est particulièrement remarquable au cours de la période suivant la débâcle. Cela est peut-être dû à l'aspect bleuté des images acquises sans filtre (voir figures 39.a, 39.c et 39.e), et peut-être lié aux réglages automatiques réalisés par la caméra. Ces images ont un aspect plutôt rougeâtre avec le filtre polarisant (voir figures 39.b, 39.d et 39.f). Ce comportement n'est peut-être pas compromettant pour des

traitements pour autant. Au contraire, l'étude d'éléments dans la colonne d'eau ou sur le fond du lit se fait généralement en exploitant le canal rouge des images, car c'est celui qui montre les variations radiométriques les plus sensibles. L'augmentation des distributions observée est peut-être synonyme d'une meilleure exploitation possible du signal. Cela reste toutefois une hypothèse à ce stade des analyses



Figure 40 : Mode des valeurs radiométriques avant et après la débâcle, extraits de la ROI des images acquises sur la Mitis
dans les canaux rouge, vert et bleu, avec et sans filtre polarisant



Figure 41 : Distributions des intervalles interquartiles calculés dans la ROI des images acquises sur la Mitis avec et sans filtre polarisant.

I.3.3- Discussion des résultats du test et recommandations

Les filtres adaptés aux caméras de terrain ont été découpés dans des verres de lunettes de pêches. Dans la mesure du possible, lors de cette opération j'ai essayé de respecter l'axe de polarisation de ces verres mais il est possible que l'opération ne soit pas parfaite et que l'axe de polarisation de ces filtres artisanaux soit légèrement incliné. Cela conduirait à une altération de leur efficacité, car les reflets qui sont parallèles à la surface de l'eau ne seraient pas ceux qui sont réellement stoppés.

La lumière est polarisée quand elle se reflète sur une surface lisse. Un filtre polarisant ne peut donc être efficace que dans un tel cas, or, la surface des deux cours d'eau étudiés, en particulier la Mitis, qui est un cours d'eau de taille un peu plus importante, est rarement parfaitement lisse. Il restera donc toujours une partie des reflets dont il n'est pas facile de s'affranchir, et la visibilité du fond du lit sera toujours compromise par des reflets, en particulier dans le cas d'images obliques.

L'utilisation de filtres polarisants dans le temps pose également deux questions, à deux échelles différentes. A l'échelle de la journée, le filtre polarisant atténuant une partie de la quantité lumineuse reçue par le capteur, la période de jour pour laquelle la quantité de lumière est suffisante à la prise de clichés couleur est réduite légèrement. Ce point est à considérer si les images intéressantes pour l'étude sont celles acquises tôt le matin ou en toute fin de journée. A l'échelle de plusieurs années, la question est également de savoir si le filtre ne subit pas une dégradation au cours du temps, et si la qualité des images acquises est comparable d'une année sur l'autre.

En conclusion, l'utilisation d'un filtre polarisant a bien un effet sur les images. De manière globale, il permet d'abaisser les valeurs dans le canal bleu, et il a au contraire tendance à augmenter celles du canal rouge. Les verres utilisés pour la conception de ces filtres étaient en effet teintés en marron : utiliser un verre non teinté, est peut-être souhaitable, mais d'autres tests sont nécessaires pour montrer si cet effet est à limiter ou s'il n'a pas d'impact significatif sur le traitement des images.

D'après la figure 40.b, le principal effet du filtre polarisant, à savoir une réduction nette de l'étendue des distributions des modes dans le canal bleu, s'observe surtout après la débâcle, donc quand de l'eau, et non de la glace, est visible sur l'image. Cela résulterait ainsi de la réduction des reflets qui se forment en surface de l'eau ce qui est précisément le rôle, bien connu, des filtres polarisants. D'après ces résultats et conclusions, il semble donc que ces reflets ne soient pas très présents avant la débâcle. Ils ne constitueraient donc pas réellement un problème dans le cas d'un environnement enneigé, et l'emploi d'un filtre polarisant ne semble pas se justifier dans ce cadre.

II- Evaluation de la variabilité inter- et intra-journalière comme préalable à la sélection des images à traiter

Bien qu'une réflexion concernant la fréquence d'acquisition des images soit menée en amont de l'installation du capteur, le traitement de l'ensemble des clichés disponibles n'est pas forcément nécessaire. Afin de limiter les temps de traitements, mais éventuellement aussi les rendre plus efficaces ou plus adaptés à l'objet étudié, il pourra être judicieux de travailler sur une partie seulement des données acquises. En effet, l'observation et une pré-analyse des images peuvent notamment mettre en évidence que les images acquises dans certaines conditions ne sont pas de qualité satisfaisante. Afin de ré-échantillonner les images du jeu de données, il est tout d'abord possible d'envisager d'éliminer celles qui semblent de mauvaise qualité, à cause de la luminosité, ou parce que la scène est cachée partiellement par exemple, et dont la qualité du traitement paraît compromise. Cependant, ce genre de tri « individuel » des images n'est pas toujours aisé et peut être laborieux si le nombre total d'images est important. Il est souhaitable d'automatiser au maximum les opérations de tri.

De manière automatisée, il est par exemple possible d'exclure tous les horaires pour lesquels les conditions lumineuses ne sont pas favorables (tôt le matin ou tard le soir, en particulier en période hivernale), ceux où les ombres affectent généralement la scène de manière significative, ou encore ceux où la formation de reflets est très fréquente. Au contraire, si les conditions trouvées le plus souvent pour certains horaires sont plus favorables, il faudra retenir ceux-là en priorité. En ce qui concerne les conditions lumineuses, il faut par exemple favoriser un ombrage homogène, minime ou inexistant, ou bien une incidence du soleil indirecte, qui limite la formation de reflets sur la surface de l'eau. Même s'il est possible de l'anticiper en étudiant la configuration du site, le choix de l'horaire « optimal » ne pourra cependant être validé que suite à une phase d'observation visuelle du jeu de photos, afin d'en définir les caractéristiques principales, les atouts et les limites.

II.1- Effet des ombres et de la luminosité sur l'observation d'éléments à la surface de l'eau

La présence d'ombres portées complique le traitement d'images (Gilvear et al., 2004 ; Bourgault, 2008 ; Lejot, 2008 ; Lalonde, 2011 ; Daigle et al., 2013) si bien qu'il importe de limiter la surface affectée par les ombres dans les images. Sur les jeux de données acquis à Génissiat et à la fosse Home, l'extraction des valeurs radiométriques a été réalisée uniquement sur des clichés acquis aux alentours de 12h, où le soleil est le plus proche du zénith, afin de ne traiter que des images où les ombres étaient réduites au minimum. De plus, cet angle d'incidence du soleil favorise également une bonne luminosité, et donc potentiellement une meilleure distinction des objets dans l'image. Cependant, une luminosité trop importante peut aussi conduire à des clichés surexposés, en particulier si les surfaces observées sont claires (bancs de galets, neige, etc.).

Une analyse visuelle des images acquises à Génissiat supporte la sélection des images acquises à 13h car c'est sur celles-ci que les ombres les plus réduites sont généralement observées. D'après la figure 42, avec l'orientation du soleil à 13h, ces ombres proviennent principalement du couronnement du barrage. La ripisylve située en rive gauche de la retenue produit principalement

111

des ombres le matin. La figure 42 illustre l'évolution des ombres ainsi que les changements de luminosité au cours de la journée dans la scène.

La figure 43 illustre l'effet des ombres sur la radiométrie d'une image acquise à Génissiat : les différents profils radiométriques tracés sur l'image montrent non seulement des caractéristiques très distinctes entre le bois et l'eau, mais ils mettent aussi en évidence l'abaissement des valeurs radiométriques enregistré en présence d'ombres. Le signal est beaucoup plus lisse et les valeurs des différentes bandes sont assez nettement séparées dans l'eau. Le bois présente au contraire trois bandes aux valeurs similaires et une variabilité locale beaucoup plus importante. Les zones ombragées se distinguent assez clairement des zones ensoleillées, en particulier pour la classe « bois » : la variabilité locale du signal correspond à des distributions de valeurs beaucoup plus étendues et des valeurs moyennes plus élevées dans le cas des zones ensoleillées.





Figure 42 : Evolution des ombres et de la luminosité sur les clichés acquis chaque heure à Génissiat, le 2 octobre 2012.



Figure 43 : Profiles radiométriques des bandes rouge (traits pleins), verte (traits tiretés) et bleue (traits pointillés) en plusieurs localisations d'une image de la retenue du barrage de Génissiat. La gauche des graphiques correspond à la gauche ou au haut de l'image.

Sur le jeu de données acquis à la fosse Home, les images acquises à 13h ont également été sélectionnées pour les traitements, pour les raisons évoquées ci-dessus. C'est aussi à 13h00 que le meilleur compromis entre la luminosité et les ombres portées est obtenu. En plus de limiter la présence des ombres dans la scène observée, ce choix conduit à maximiser la luminosité, le soleil étant proche du zénith. Il faut cependant remarquer que dans un environnement enneigé, une luminosité importante a très vite tendance à saturer l'image. La figure 44.a illustre cela avec des clichés acquis sur la Saint-Jean le 27 mars 2011, à 12h00. La figure 44.b permet de visualiser la même scène sans saturation, à 11h00.

Dans le cadre de ces travaux de thèse, je n'ai pas eu l'occasion de quantifier l'impact des ombres sur les résultats des traitements d'images effectués. Cependant, une étude un peu plus poussée a été menée sur le jeu de données acquis à Mollon, pour étudier la visibilité du fond du cours d'eau en fonction de différents facteurs. En plus de l'heure, la date, donc la période de l'année où les images sont acquises, ainsi que les conditions météorologiques, semblent être des facteurs déterminant la qualité des images en vue des traitements envisagés. J'ai essayé de quantifier cela par les tests évoqués ci-dessous.



Figure 44 : Illustration de l'effet de saturation résultant d'une trop forte luminosité, le 27 mars 2011 sur la Saint-Jean à 12h (a). La figure (b) présente la même scène, photographiée à 11h, qui n'est pas surexposée.

II.2- Effet de la date, de l'heure et des conditions environnementales sur l'observation d'éléments sur le fond du cours d'eau : tests réalisés sur l'Ain

Evaluer la qualité des images est une opération relativement délicate puisque cela relève du domaine de l'expertise. Cependant, dans le cas d'une analyse d'images, il a été considéré que l'image était de qualité suffisante lorsqu'il était possible d'y distinguer le ou les différents objets étudiés. Dans le cas du site test de Mollon par exemple, les images intéressantes pour l'étude sont celles qui permettent de distinguer le fond du cours d'eau, car l'objet d'étude est le biofilm qui s'y développe. J'ai émis ainsi l'hypothèse que cette capacité à voir le fond était dépendante des différentes conditions horaires et environnementales. Un test a été réalisé pour mettre cela en évidence.

II.2.1- Méthodologie

Plusieurs tests ont été réalisés sur le jeu de données acquis à Mollon pour comprendre l'effet de l'horaire, de la date de prise de vue et de différents paramètres météorologiques sur la qualité des images. Sur un jeu de données constitué des clichés acquis entre le 30 mars 2012 et le 1^{er} avril 2013 (soit 9 907 images), la zone centrale de l'image, dont les dimensions correspondent à un tiers de la hauteur et un tiers de la largeur (voir figure 45) a été exploitée. D'une part, une classification visuelle des images en fonction de la visibilité du fond y a été réalisée, et d'autre part la moyenne, la médiane et la variance ont été extraites des canaux rouge, vert et bleu. Seuls les clichés enregistrés en couleurs ont été exploités : toutes les images en noir et blanc, qui résultent de la programmation

automatique du capteur en mode « nuit », ont été automatiquement supprimées du jeu de données. Le fond n'est jamais visible sur ce genre de clichés.



Figure 45 : Illustration de la zone centrale des images acquises à Mollon : zone d'observation pour la classification en fonction de la visibilité du fond et zone d'extraction des paramètres radiométriques.

Une valeur de hauteur d'eau a été attribuée à chaque image (voir section II.2.2.a du chapitre II). Sur une sous-période allant du 30 mars au 30 mai 2012, représentée par 2 084 images, la hauteur d'eau maximale pour laquelle le fond du cours d'eau était visible correspondait à 201 cm en dessous de la caméra. Les différents facteurs limitant la visibilité du fond malgré une hauteur d'eau limitée ont alors été étudiés : sur toutes les images de cette période où la hauteur d'eau était inférieure à 201 cm (soit 607 images), les facteurs empêchant la visibilité du fond ont été recensés. Quatre facteurs ont été définis, à savoir : la présence d'ombres, la présence de reflets, la présence de vagues ou la turbidité de l'eau. La contribution relative de chacun de ces facteurs a été évaluée sur cette sous période.

Les catégories citées ci-dessus (voir aussi figure 46) résultent principalement des conditions météorologiques : la formation d'ombres et de reflets est la conséquence directe des quantités de lumière incidente, elle-même limitée par la nébulosité. La lumière incidente correspond également à l'angle d'incidence du soleil donc à période d'acquisition des images, dans la journée ou dans l'année. Différents facteurs ont donc été étudiés pour comprendre quels étaient ceux qui affectaient la visibilité du fond du cours d'eau. Les résultats de ces analyses comparatives sont présentés cidessous. Ils concernent la hauteur d'eau, la période d'acquisition (heure et mois), les conditions météorologiques (grâce à des valeurs d'insolation et de nébulosité, utilisés en tant que proxy de la

quantité lumineuse dans la scène voir section II.2.2.b du chapitre II). La formation de vagues, liée à la turbulence de l'eau donc au débit ou à la hauteur d'eau, peut aussi être liée à l'intensité du vent. A cause de l'absence de données à proximité immédiate de l'emplacement de la caméra, ce facteur n'a pas été testé.

II.2.2- Facteurs limitant la visibilité du fond par imagerie

II.2.2.a- Proportion relative des différents facteurs limitant la visibilité du fond

Chaque image acquise à Mollon pendant une période d'un an (du 30 mars 2012 au 1^{er} avril 2013) a été classée visuellement en deux modalités, selon que le fond du cours d'eau est visible dans la zone centrale de l'image (voir figure 45) ou pas. Le nombre d'images classées dans chacune de ces deux catégories est respectivement de 4 740 et 5 167. Les 2 155 images acquises au cours des deux premiers mois de cette période ont permis de recenser les différents facteurs qui apparaissent comme des obstacles à la visibilité du fond, malgré une hauteur d'eau inférieure à 201 cm. La figure 46 illustre certaines de ces catégories.





Figure 46 : Illustration des facteurs recensées sur 607 images pour expliquer l'impossibilité de voir le fond du lit en basses eaux (hauteur d'eau sur site <201 cm) : ombres (a) ; reflets (b) ; vagues (c).

La catégorie « reflets » représente 22 % des cas. Ces reflets peuvent présenter des aspects divers, probablement en fonction de l'angle du soleil et de la nébulosité lors de la prise de vue. La rugosité de la surface joue également un rôle important dans l'aspect qu'ils prennent. Il est intéressant de constater que leur présence est largement liée à l'heure de prise de vue : ils apparaissent très généralement en fin de journée, après 16h00 (heure locale), et sont aussi souvent présents le matin, mais beaucoup moins en milieu de journée (voir figure 47).



Figure 47 : Effectifs des images pour lesquelles le fond est invisible à cause des reflets, en fonction de l'heure.

Les « vagues » ne sont observées que dans une toute petite proportion des cas (<1 %). Ce phénomène ne met pas en jeu la réflexion de la lumière, mais seulement la réfraction sur l'interface air/eau. Le fond du lit n'est pas discernable car les vaguelettes brouillent le signal lumineux, sans qu'il y ait véritablement de reflet (voir figure 46.c).

Les « ombres » correspondent au cas où la présence d'ombres dans l'image génère un contraste trop important avec les zones de lumière, ce qui altère la visibilité du fond à travers la colonne d'eau (voir figure 46.a). Cela ne représente qu'un petit pourcentage du lot d'images étudiées (2 %) mais surtout ce cas n'apparaît qu'au mois de mai : la formation d'ombres importantes est peut-être liée à la feuillaison, et à une luminosité croissante au cours du printemps.

La classe « turbidité » est de loin celle qui est la plus couramment représentée (c'est le cas pour environ 75 % des images). Cette catégorie correspond aux images sélectionnées pour lesquelles il n'apparait aucun des facteurs présentés ci-dessus. Dans cette catégorie, la cause de l'invisibilité du fond pourrait cependant aussi être une luminosité trop faible, pour laquelle le mode « nuit » ne se déclenche pas pour autant. En effet, l'effet respectif de ces deux facteurs est difficile à distinguer lors d'un simple visionnage des images et sans connaître le contexte au moment de la prise de vue. Bien que la hauteur d'eau puisse en théorie le permettre, le fond du lit n'est pas visible si la quantité de lumière incidente n'est pas suffisante.

Cette analyse permet de conclure que pour permettre la visibilité du fond, la luminosité doit être suffisante, mais pas non plus trop importante, sous peine de générer des ombres et où des reflets. De plus, étant donné que les proportions de ces facteurs semblent évoluer au cours du temps, comme c'est par exemple le cas des ombres, il semble délicat de considérer que ces résultats reflètent les tendances au cours de la période d'étude globale.

II.2.2.b- Impact de la hauteur d'eau sur la visibilité du fond

La figure 48 représente les hauteurs d'eau estimées sous la caméra au cours de la période d'étude (du 30 mars 2012 au 1^{er} avril 2013). Chaque image classée est représentée par un point : rouge pour celles où le fond n'est pas visible et vert pour celles où il l'est. Il semblerait qu'au-delà de 2 m de profondeur, il n'est jamais possible de distinguer le fond. En dessous de 150 cm au contraire, il est visible le plus souvent (dans 87 % des cas). Cependant, il y a des hauteurs d'eau très faibles où ce n'est pas le cas : probablement à cause des facteurs évoqués précédemment. Plusieurs pics de crues présentent un phénomène particulier : la hauteur d'eau pour laquelle le fond est visible est supérieure en décrue. C'est le cas fin avril 2012, début juillet 2012, et fin février 2013. Peut-être que cela correspond à une turbidité moins importante en décrue que lors de la montée du niveau d'eau, ou bien peut-être qu'un biofilm ou une matière minérale couvrant le fond et limitant la visibilité des galets est détruit lors de la crue, ce qui permet une meilleure réflexion de la lumière.

Le tableau 12 présente les valeurs caractéristiques de la visibilité du fond sur les images du jeu de données, en fonction des débits et des hauteurs d'eau observés. Il est possible de voir le fond jusqu'à 2 m de profondeur d'eau, alors qu'elle peut dépasser les 4 m. Au contraire, la hauteur d'eau minimale pour laquelle le fond n'est pas visible est de 1 m, ce qui correspond presque à la hauteur minimale observée sous la caméra. La hauteur d'eau moyenne observée sous la caméra est de 1,67 m, ce qui correspond grossièrement au module de l'Ain. La figure 49 représente la distribution des deux classes « Fond visible » et « Fond non visible » sous forme de *boxplot*. Il est à noter que le D90 de la classe « Fond visible » correspond à peu près à la médiane de la classe « Fond non visible ».



Figure 48 : Hauteur d'eau estimée sous la caméra entre le 30 mars 2012 et le 1^{er} avril 2013, avec visibilité ou invisibilité du fond du lit sur les images du jeu de données.

Characteristic values observed on pictures during the study period	Bottom visibility	Water depth under camera (cm)	Corresponding discharge at Chazey (m ³ /s)
Maximum	-	403.9	879.3
Maximum	YES	201.5	192.2
Minimum	-	98	17.6
Minimum	NO	100.7	20.0
Mean	-	167.4	105.2
Mean	YES	129.3	48.3
Mean	NO	201.6	185.0
interanual discharge in the study period	-	155.6	97.3
"official" interanual discharge in the Ain River		166.2	123

Tableau 12 : Valeurs caractéristiques des hauteurs d'eau estimées sous la caméra : maximales, minimales et moyennes permettant la visibilité du fond sur les images. Pour chaque valeur de hauteur d'eau, le débit à la station de Chazey sur Ain <u>a été calculé en moyennant les valeurs correspondantes observées.</u>



Figure 49 : Distribution des hauteurs d'eau estimées sous la caméra, par classe de visibilité du fond.

Sur la figure 50, la probabilité de voir le fond (en %) est représentée en fonction de la hauteur d'eau estimée sous la caméra, par classes de 6 cm de hauteur d'eau. Il apparaît clairement que plus il y a d'eau et moins il est probable de voir le fond du cours d'eau. Jusqu'à 1,50 m, les probabilités de voir le fond de l'Ain sont importantes (toujours supérieures à 70 %). Au-delà de 1,50 m cette probabilité décroit rapidement, et pour une différence de niveau d'eau de 50 cm, cette valeur passe de 40 % à 0 %. Pour étudier le fond du lit de l'Ain il faut donc privilégier sur cette station des acquisitions pendant les périodes qui correspondent à des débits inférieurs à 69 m³/s, soit des hauteurs d'eau qui ne dépassent pas 150 cm. Dans la gamme de débits allant de 69 à 189 m³/s

(jusqu'à 200 cm de hauteur d'eau), il faut vraiment de très bonnes conditions pour voir le fond. C'est dans cette gamme qu'il est intéressant de savoir quelles sont les conditions idéales pour de telles observations.



Figure 50 : Probabilité de voir le fond par classe de hauteurs d'eau sous la caméra.

II.2.2.c- Impact de la période d'acquisition sur la visibilité du fond

• Heure

Afin d'étudier l'impact de la période d'acquisition sur la visibilité du fond, la probabilité de voir le fond du cours d'eau a été estimée en fonction de l'heure de la journée et en fonction du mois de l'année. D'après la figure 51, il apparait que les heures les plus matinales sont les plus propices à la visibilité du fond sur les images : c'est particulièrement le cas entre 8h00 et 10h00 (heure locale, ou 06h00 – 08h00 UTC). Pour ces horaires, il y a environ 60 % de chances de voir le fond. A partir de 09:00 UTC, et jusqu'à 15:30 UTC (17h30, heure d'été sous la caméra), les probabilités de voir le fond se situent entre 40 et 50 %, ce qui reste assez élevé. Par contre au-delà de 16:00 UTC, il devient compliqué de voir le fond, avec une probabilité d'environ 20% seulement.



Figure 51 : Probabilité de voir le fond par heure de prise de vue.

• Mois

La figure 52.a représente les effectifs des images du jeu de données classés par mois d'acquisition. Les deux classes « Fond visible » et « Fond non visible », permettent d'illustrer les probabilités de voir le fond pour chaque mois de l'année. Il est clair que la probabilité de voir le fond est relative à la période de l'année, étant très élevée pour les mois estivaux et quasiment nul pour les mois d'hiver. Cependant, cette différence dépend très probablement du débit, lui-même très lié à la saisonnalité, comme le montre la figure 52.b. Si toutefois une partie de l'explication des variations de probabilité de voir le fond au cours de l'année correspond à d'autres facteurs que la hauteur d'eau, il s'agit sans doute des facteurs météorologiques ou liés à l'angle d'incidence du soleil.



Figure 52 : Effectifs des images prises par mois et où le fond est visible ou pas (a) et distribution des hauteurs d'eau estimées sous la caméra (cm) en fonction du mois (b).

II.2.2.d- Impact des conditions météo (insolation et nébulosité) sur la visibilité du

fond

Insolation

L'insolation horaire représente le nombre de minutes par heure pendant lesquelles le soleil a brillé assez fort pour pouvoir distinguer les ombres portées. Ce facteur a été étudié sur la période du 30 mars 2012 au 1^{er} avril 2013. Sur la figure 53 présentée ci-dessous, la probabilité de voir le fond du cours d'eau est représentée en fonction de l'insolation. Bien que la variabilité des probabilités soit assez importante d'une classe à l'autre, la tendance à une probabilité croissante en même temps que

l'insolation est à peu près linéaire. Cependant, la probabilité maximale, atteinte pour une insolation de 57 min, est d'environ 80 % : il semble donc qu'une quantité de lumière importante ne soit pas toujours la garantie d'une bonne qualité des images pour l'observation du fond du cours d'eau. J'ai également fait l'hypothèse que l'insolation était liée à la période de l'année et qu'elle était proportionnellement plus élevée au cours des mois estivaux. La figure 54 permet d'affirmer que c'est bien le cas : il est clair que le nombre relatif d'images prises avec une forte insolation est bien plus important de mai à septembre que pendant le reste de l'année.



Figure 53 : Probabilité de voir le fond du cours d'eau en fonction de l'insolation vécue dans l'heure.



Plus l'insolation est importante, plus la couleur est claire

Figure 54 : Effectif des images pour chaque classe d'insolation, en fonction du mois de l'acquisition des clichés.

Nébulosité

La nébulosité représente l'importance surfacique de la couche nuageuse dans le ciel au moment de la mesure. Elle est mesurée en octas, le 0 correspondant à un ciel parfaitement dégagé et le 8 à un ciel totalement couvert (la classe 9, qui n'est pas représentée ici, correspond au brouillard). Les mesures de nébulosité ayant cessé en septembre 2012 à la station Météo France d'Ambérieu en Bugey, seule une petite période a pu être étudiée pour cette variable. Elle s'étend du 30 mars au 3 septembre 2012. Les probabilités de voir le fond en fonction de la nébulosité présentent une évolution inverse de l'insolation (voir figure 55). Cela paraît logique puisque plus la couverture nuageuse est importante, moins l'insolation peut l'être, a priori. Cependant, cela contredit les observations de J. Lejot (2008) qui préconise, pour de la prédiction bathymétrique, une couche nuageuse homogène, afin de limiter la réflexion du soleil à la surface de l'eau. Au contraire, un temps moyen avec une couverture nuageuse assez importante semble favorable à la formation de reflets importants, qui forment un voile opaque en surface et empêchent de voir le fond (voir figure 46.b). En effet d'après ces données et la figure 55, plus la couverture nuageuse est importante, plus la probabilité de voir le fond est faible.



Figure 55 : Probabilité de voir le fond du cours d'eau en fonction de la nébulosité.

II.2.3- Conclusions du test et recommandations

Plusieurs facteurs limitent la visibilité du fond du cours d'eau à partir d'image in situ acquises verticalement. La hauteur d'eau (profondeur) au niveau du site d'implantation du capteur, directement liée aux débits du cours d'eau, est le principal facteur limitant. Cependant, pour une même hauteur d'eau, si le fond est visible sur certaines images, ce n'est pas le cas pour toutes. Plusieurs raisons à cela ont été évoquées, à savoir la formation de reflets ou la présence de vagues, qui apparaissent en surface de l'eau, la formation d'ombres portées sur le fond du cours d'eau, ou encore la turbidité de l'eau.

La turbidité de l'eau est variable au cours du temps, et correspond à la concentration de matières en suspensions, minérales ou végétales, contenues dans l'eau. Elle dépend principalement des conditions hydrologiques dans le bassin versant du cours d'eau, en amont du site d'étude. La concentration des eaux de ruissellement en différents points du bassin versant apporte des quantités de sédiments fins variables. Elle peut aussi être liée à des concentrations en algues en suspension, donc aux températures ou aux concentrations en nutriments disponibles dans l'eau. Ces différentes valeurs évoluent au cours du temps, à différentes échelles. Mais dans un contexte comme celui de l'Ain, la saison semble être un facteur primordial à cette évolution : les hautes eaux, dues à des précipitations plus intenses, qui surviennent principalement au cours de la saison hivernale, sont généralement accompagnées d'une turbidité plus importante en termes de matières minérales. Au contraire, des concentrations élevées en matières végétales seraient plus fréquentes au cours des périodes chaudes.

La notion de turbidité est cependant directement liée à celles de la quantité de lumière : pour une eau de même turbidité et de même profondeur, la quantité de lumière incidente peut être déterminante dans le fait de voir le fond ou pas. Et même avec une faible profondeur, le fond ne sera pas visible si la luminosité de la scène est trop faible, malgré une turbidité relativement faible.

La lumière peut être évaluée de différentes manières. Le facteur d'insolation, qui est une valeur qualitative et permet d'étudier le temps où un certain seuil de luminosité est dépassé, a été utilisé dans ce but. Sans que cette tendance soit très franche, il apparaît que plus cette valeur est importante et plus la probabilité de distinguer le fond du cours d'eau est élevée. Cependant la luminosité peut aussi être de différentes qualités, directe ou diffuse par exemple, selon l'heure de la journée, ou selon certains facteurs comme la nébulosité. Les conséquences de cette variabilité de qualité sont diverses, comme la formation d'ombres portées dans le cas d'une lumière directe importante, ou l'apparition de reflets, dont l'aspect paraît également lié à la nébulosité, mais également à la rugosité de surface, ou à l'angle d'incidence du soleil. Des études supplémentaires

127

pourraient être envisagées afin de qualifier le type de reflets présent et le caractériser en fonction de ces différentes causes potentielles.

La présence d'ombres portées a été présentée comme l'une des limites à la visibilité du fond du cours d'eau. Cependant il est envisageable que s'il est possible de discerner des ombres, c'est bien au contraire qu'il est encore possible de distinguer le fond (sauf dans le cas où la turbidité de l'eau agirait comme une surface opaque). Par contre, ces ombres altèrent la perception du fond du chenal, et du fait de la compression de la distribution de la radiométrie (Carbonneau et al., 2012), il devient plus compliqué d'apercevoir les détails tels que la granulométrie ou la présence d'objets tapissant le fond. Vu l'abaissement des valeurs radiométriques engendré, l'impression donnée est que la profondeur est supérieure à ce qu'elle n'est réellement : cette limite à l'estimation de la bathymétrie par imagerie a déjà été évoquée dans la littérature (Lejot, 2008 ; Carbonneau et al., 2006).

Bien que ce phénomène soit très peu fréquent dans le jeu de données utilisé, la présence de vagues a été considérée comme une autre des limites à l'observation du fond du cours d'eau. Cependant, si à l'instar des ombres, la présence de vagues limite la visibilité des objets sur le fond du cours d'eau, au contraire elle ne modifie pas a priori la radiométrie moyenne des images dans la zone observée. Elles ne semblent pas perturber des estimations de profondeur d'eau par exemple. Elles sont cependant une limite réelle à des mesures de granulométrie par imagerie, qui se baseraient sur des mesures de texture de l'image. Il semble donc que le nombre et l'importance des facteurs limitant la visibilité du fond soient en réalité très relatifs aux objectifs de l'étude et à la méthodologie employée pour y parvenir.

Une approche empirique devrait permettre de déterminer les conditions idéales d'acquisition des images sur l'Ain à Mollon, en vue de prédire la bathymétrie du cours d'eau. Bien que cet ensemble de conditions ne soit valable que pour ce site précis, relativement à sa configuration, ces informations mais surtout le protocole d'analyse utilisé servent de guides pour la mise en œuvre d'acquisitions sur d'autres sites. D'après les analyses effectuées dans la section précédente, afin d'optimiser l'observation du fond de l'Ain à Mollon, il faut acquérir des images en période estivale, car cela s'accompagne de hauteurs d'eau limitées et généralement d'une luminosité importante. Le matin avant 10h00 est le plus propice à une bonne qualité d'images, avant que le soleil ne produise une lumière directe sur la scène, donc potentiellement des ombres et des reflets. La hauteur d'eau sous la caméra ne doit pas dépasser 1,50 m de préférence, ce qui correspond à un débit de 70 m³/s à Chazey-sur-Ain. Acquérir des images avec une bonne luminosité mais une lumière indirecte, ainsi que des hauteurs d'eau limitées semble garantir une qualité permettant d'estimer la bathymétrie par imagerie.

128

II.3- Effet de la fréquence d'échantillonnage sur les variabilités inter- et intrajournalières du signal extrait : test réalisé à Génissiat

Les résultats présentés ci-dessus dans la section II.2 permettent d'affirmer que certaines conditions sont plus favorables à l'acquisition d'images de bonne qualité, relativement aux traitements prévus. La cause de ce phénomène est la variabilité desdites conditions au cours du temps, qui s'exprime concrètement par une variabilité des aspects de la scène observée et de l'objet d'étude. Comme cela a été montré, certains horaires, parce qu'ils rassemblent ces conditions, sont donc plus intéressants que d'autres pour optimiser les traitements et donc la qualité des résultats qui en découlent : il faut chercher à travailler sur les images acquises à ces horaires en priorité. Le but est de ne pas altérer l'information essentielle, donc la variabilité du signal qui s'exprime au pas de temps adapté à l'étude de l'objet en question. Il s'agit au contraire de supprimer le bruit lié à une variabilité des conditions locales s'exprimant à un pas de temps inférieur au pas de temps défini pour l'étude. Un test réalisé sur le jeu de données acquis à Génissiat est présenté ci-dessous. Les signaux radiométriques sont comparés à des pas de temps horaire et journalier afin de mettre en évidence les phénomènes de variabilités inter- et intra-journalières.

II.3.1- Méthodologie

Le jeu de données acquis à Génissiat est constitué de 78 images par jour, acquises toutes les 10 minutes. Bien que ces données soient disponibles, il n'est pas forcément judicieux de toutes les exploiter et l'effet du pas d'échantillonnage sur les fluctuations temporelles de la superficie du radeau de bois estimée est analysé ici. Il a été choisi de n'utiliser qu'un seul cliché par jour : celui acquis à 13h, car c'est celui qui présente a priori les meilleures conditions visuelles dans la scène d'étude. Mais un test a été réalisé afin de confirmer que l'exploitation de cet unique cliché par jour permettait de représenter l'évolution de la surface du raft de manière satisfaisante et pour savoir si l'exploitation d'images à la fréquence horaire était plus intéressante pour la précision des résultats.

Pour cela, cinq périodes de quelques mois ont été étudiées. La surface du radeau de bois présent dans la retenue a été prédite pour les 7 images acquises chaque jour entre 10h00 et 16h00 :

- du 1^{er} au 31 décembre 2012 ;
- du 10 juillet au 17 septembre 2013 ;
- du 18 septembre au 20 novembre 2013 ;
- du 21 novembre 2013 au 14 janvier 2014 ;
- du 15 janvier au 17 février 2014.

Cela représente 250 jours étudiés, soit 1750 images qui ont été classées automatiquement selon la procédure décrite dans la section I.2 du chapitre II, et plus en détails dans la section I.5.2.a du chapitre IV. Pour cela, un *random forest* a été réalisé à partir de 69 descripteurs, extraits dans des cellules orthogonales découpant la ROI de l'image. Les moyennes calculées sur les 7 images acquises par jour ont été comparées aux valeurs prédites à 13h00 et la variabilité intra- et inter-journalière a été étudiée. La surface occupée par le bois stocké dans le réservoir et l'évolution de cette surface ont été étudiées au cours du temps. L'évolution de la surface a été obtenue en soustrayant à la surface de chaque jour celle de la veille. Cette opération permet d'évaluer un flux de bois, exprimé en m²/jour. Les valeurs de débits relatifs des deux affluents du Rhône français amont : l'Arve et la Valserine, ont été représentées sur les mêmes graphiques que ces quantités de bois. Ces débits relatifs correspondent au débit moyen journalier rapporté au module interannuel du cours d'eau.

II.3.2- Variabilités intra- et inter-journalières de la surface de bois détectée

Les prédictions horaires de la surface du raft ont entre autres été calculées pour le mois de décembre 2011 : elles ont été représentées pour l'exemple dans la figure 56. Deux séquences principales sont observées : avant et après le 16 décembre, où est survenue une crue de la Valserine (figure 56.b). A cette occasion, le débit a atteint 103 m³/s, la crue biennale étant de 186 m³/s. Jusqu'au 15 décembre, le raft est de taille modeste, et les prédictions sont globalement homogènes d'une image à l'autre. D'après la figure 56, il n'y a pas vraiment de variabilité inter-journalière, malgré une légère augmentation de la surface, illustrée par les figures 57.a et 57.b). Avant le 16 décembre, la surface moyenne journalière maximale observée est de 22 % de la surface visible du réservoir, alors que la valeur minimale est de 0 %. Après la crue du 16 décembre, la surface du radeau de bois augmente de manière significative (figure 57.c : jusqu'à 87 % de la zone d'échantillonnage, avec une proportion moyenne observée de 67 % au cours de cette seconde période), tout comme la variabilité intra- et inter-journalière (figures 56.a et 56.b ; figures 58.a et 58.b).

La valeur moyenne journalière de la surface du raft (la ligne rouge sur la figure 56.a), qui lisse la variabilité intra-journalière, a ensuite été calculée. La plupart du temps, les prédictions faites à 13h (la ligne bleue sur la figure 56.a) ne sont pas tellement différentes des valeurs moyennes : le coefficient de détermination (R²) entre les deux valeurs pour l'ensemble des 250 images testées est de 0,93 (figure 59). Cela confirme qu'il est acceptable de n'utiliser la donnée que d'une seule image, en l'occurrence celle acquise à 13h00, pour étudier l'évolution des quantités de bois dans la retenue du barrage de Génissiat. Sur des séries temporelles de plusieurs années, cela allège

130

considérablement la quantité de données à traiter et cela permet de lisser la variabilité du signal à court terme.



 Figure 56 : Surface du raft prédite (m²) (a) et flux de bois (m²/j) (b) en décembre 2011, avec séries temporelles des valeurs

 horaires (acquises chaque heure entre 10h00 et 16h00) et quotidiennes (acquises à 13h00).


Figure 57 : Illustration du radeau de bois à 13h00 les 2 (a), 16 (b), 17 (c), 20 (d), 28 (e) et 29 (f) décembre 2011.



Figure 58 : Valeur moyenne journalière de la surface du radeau de bois (a) et variabilité intra-journalière (b) avant et après la crue du 16 décembre 2011.



Figure 59 : Surface du radeau prédite à 13h00 en fonction de la surface moyenne calculée à partir de la prédiction réalisée sur 7 images par jour, pour les cinq périodes étudiées (soit 250 images).

Dans un faible nombre de cas où la variabilité intra-journalière est importante, les valeurs moyennes et acquises à 13h00 sont assez différentes. C'est le cas par exemple des 10, 20 et 26 décembre. Ce résultat confirme aussi que la surface de l'embâcle de bois peut présenter des variations quotidiennes importantes même s'il n'y a, a priori, pas eu d'apport de bois dans le réservoir. Dans ce cas, même après un pic de crue, la surface du raft a décru légèrement alors qu'une augmentation de celle-ci, suite à de nouveaux apports de bois durant la phase de décrue, était plutôt attendue. Le bois peut ainsi se déplacer de manière importante à la surface du réservoir et sortir de

la ROI, qui ne couvre qu'une petite partie (un hectare) de la surface totale. Il est également possible que l'embâcle subisse des variations de densité.

Les plus grandes variabilités intra-journalières observées au début du mois (les 5, 6, 10 décembre, voir figure 56) peuvent être expliquées par des changements de temps au cours de la journée. De même, au cours de la seconde partie du mois, la variabilité intra-journalière est principalement due à l'aspect des images à cause des conditions météorologiques. Par exemple, du 18 au 21 décembre, la détection de la surface du radeau est difficile du fait de la présence de neige, qui modifie l'aspect de celui-ci ainsi que l'aspect des reflets de la rive droite. De plus, du gel se développe sur l'objectif de la caméra, ce qui réduit la zone visible du réservoir et donc du radeau (voir figure 57.d). Lors des journées hivernales, les conditions météorologiques peuvent être défavorables, notamment brumeuses, mais également très variables. C'est le cas des 20 et 28 décembre, qui présentent des variabilités intra-journalières particulièrement élevées en ce qui concerne la détection de la surface du raft (figures 56.a et 56.b).

Comme la variabilité intra-journalière, la variabilité inter-journalière augmente aussi après le 16 décembre même s'il n'y a pas eu ni d'apport ni d'extraction du bois. Les meilleurs exemples sont ceux des 24 et 29 décembre, où les prédictions ont été relativement homogènes au cours de chaque journée, mais particulièrement basses (figure 56.a). La figure 57.f donne une explication à ce phénomène : le radeau n'est pas moins important mais il se répartit de manière différente sur la surface du réservoir, en occupant toute sa largeur. Une grande partie du bois se situe alors contre la rive droite, hors de la ROI, donc la surface globale du raft est sous-estimée. De plus, la densité du raft est clairement plus importante le 29 que le 28 décembre (voir figures 57.e et 57.f), et celui-ci occupe ainsi une moindre surface à volume identique.

II.3.3- Conclusions du test et recommandations

L'analyse intra-journalière des surfaces du raft suggère que les variations temporelles de la superficie occupée par le radeau ne sont pas seulement dues à des apports ou à des extractions de bois. Elles peuvent être causées par des erreurs de classification, qui semblent plus fréquentes avec certaines conditions météorologiques, à cause de la présence d'ombres, à cause des reflets ou peutêtre même à cause du bois par exemple. Ces éléments expliquent l'essentiel de la variabilité intrajournalière dans le cas de Génissiat. S'il est nécessaire de limiter le nombre de clichés exploités, il faut donc utiliser ceux qui semblent être les plus représentatifs des conditions moyennes journalières et qui limitent ces variations. Dans le cas du jeu de données de Génissiat, les clichés acquis à 13h00 semblent répondre à cela et être représentatifs de la situation quotidienne, puisqu'une bonne corrélation entre ces valeurs et les moyennes journalières est observée.

Les changements dans la surface de l'embâcle semblent aussi causés par les mouvements du bois dans le réservoir, qui peut modifier sa densité ou sortir de la ROI. Ces éléments sont également à prendre en compte dans les conditions d'étude de la scène. Le vent, en particulier, semble l'un des facteurs affectant significativement la répartition des flottants à la surface de l'eau. Lors de l'installation d'un capteur sur un site d'étude, la taille de la ROI et/ou la surface visée par le capteur est également à considérer relativement au risque de la perte de vue de l'objet d'étude, si celui-ci peut en sortir.

En l'absence d'une connaissance préalable du site, certains phénomènes peuvent être mis en évidence grâce à l'analyse des différentes formes de variabilités intra- et/ou inter-journalières : l'effet de la taille de la ROI, de la densité du radeau ou bien l'effet de la luminosité peut ainsi être mieux évalué. Si le phénomène étudié varie peu à l'échelle de la journée et qu'un pas de temps journalier ou hebdomadaire est pertinent pour l'étudier, il est bon de minimiser les effets intra-journaliers de lumière et de ne sélectionner que certains clichés pour constituer la série temporelle. Il semble que dans de nombreux cas, ceux acquis vers 13h00 minimisent l'effet des ombres portées ainsi que les variations de luminosité dues à la longueur des journées qui évolue au cours des saisons. Sans connaître le meilleur horaire pour un site, il est toujours possible d'acquérir des informations à un pas de temps plus fin et de moyenner les résultats pour les analyses.

III- Définition de la zone d'étude (Region Of Interest, ROI)

III.1- Extraction de certaines zones en vue de l'amélioration du traitement

III.1.1- Application d'un masque aux images

Lors de l'installation des capteurs sur un site d'étude, il faut que l'emprise des images cadre au mieux sur la zone d'étude (ROI) du jeu de données, qui correspond à la surface sur laquelle peut survenir le phénomène ou apparaître l'objet étudié. Cependant, il est rarement possible de visualiser exclusivement la ROI sur les images : généralement, des zones annexes apparaissent aussi, telles que les berges du cours d'eau étudié, les surfaces maçonnées du barrage observé, etc. Les traitements envisagés sur les images ne prenant pas en compte ces éléments, un masque a été appliqué pour les exclure (voir figure 60). Il faut donc définir la taille du masque dont les limites coïncident avec celles de la ROI, afin d'optimiser les traitements et la précision des résultats. Réduire la ROI consiste à s'affranchir d'une partie de la scène observée, qui peut pourtant être source d'informations. Cependant, s'il s'agit de s'affranchir des zones localisées en arrière-plan de l'image, ce sont également celles qui présentent la résolution la plus grossière et donc la plus forte imprécision en

termes de superficie couverte. Il s'agit donc de réaliser le meilleur compromis entre la surface observée et la précision des résultats.

A titre d'illustration, la figure 60 présente les images brutes et masquées des jeux de données acquis sur le Rhône à Génissiat, sur l'Yzeron à Francheville et sur la Saint-Jean au niveau de la fosse Home. Ces masques cachent tout ce qui ne correspond pas à la surface du cours d'eau, puisque dans chaque cas, c'est sur la surface de l'eau ou dans le lit que se situe l'objet d'étude. Pourtant, il est bon de se demander si s'affranchir de certaines zones supplémentaires, notamment celles situées à l'arrière-plan des images, ne serait pas judicieux. La zone de reflets située en rive droite de la retenue de Génissiat, par exemple, parce que l'eau y présente un aspect très particulier. Ou encore les zones situées au-delà de la courbure des méandres (à l'amont dans les cas de l'Yzeron et à l'aval dans le cas de la Saint-Jean). Etant situés en arrière-plan, la résolution pourrait y être trop grossière pour permettre de détecter les éléments intéressants.





Figure 60 : Masques délimitant les ROI des images acquises à Génissiat (Rhône) (a), Francheville (Yzeron) (b) et Fosse Home (Saint-Jean) (c) : dans la colonne de droite n'apparaissent que les ROI.

III.1.2- Réflexion des éléments riverains sur la surface de l'eau : l'exemple de Génissiat

En plus des zones qui sont clairement à exclure de la ROI (couronne du barrage de Génissiat, berges de l'Yzeron ou de la Saint-Jean par exemple), une réflexion sur l'exclusion de certaines zones supplémentaires, en vue d'optimiser le traitement des images, peut-être menée. En effet, certaines zones de l'image, par leur emplacement ou par ce qu'elles représentent, ne semblent pas représentatives du reste de la ROI. Et l'information extraite à leur niveau peut constituer un biais à l'analyse de résultats. Dans le cas d'une classification automatique par exemple, il y aurait un risque que les prédictions présentent de faibles précisions au sein de ces zones. Ou bien dans le cas du calcul de statistiques zonales, les valeurs seraient influencées par le signal contenu dans ces zones particulières. C'est le cas, par exemple, de zones concernées par la formation de reflets en surface de l'eau, ou bien de celles qui sont colonisées par la végétation riveraine, dont l'aspect s'éloigne progressivement de plus en plus de celui de l'eau. Inclure ces zones dans les traitements n'est donc pas forcément judicieux. Et il peut être bon de mener une réflexion et éventuellement quelques tests pour connaître l'impact réel de ces éléments sur la précision des résultats, afin de définir s'ils doivent ou non être conservés dans la ROI.

La figure 61 illustre le cas du jeu de données acquis à Génissiat : l'arrière-plan de l'image est affecté par la présence de reflets qui correspondent aux arbres riverains en rive droite de la retenue. La surface de cette zone est variable en fonction de la hauteur d'eau dans la retenue : la limite des reflets varie entre les deux traits rouges représentés sur la figure 61.b. Les reflets de la végétation riveraine présentent clairement l'aspect du bois, alors que dans le cadre de ces traitements et sur une image comme celles présentées en figures 61.a ou 61.b, il est primordial que cette surface soit bien classée comme de l'eau. Les erreurs subies lors d'une opération de classification automatique étant fréquentes dans cette zone, il est légitime de se demander si cette surface est à inclure ou pas dans les traitements. J'ai fait le choix de conserver une partie seulement de cette zone pour mes traitements.

De même, la figure 61.b illustre le fait qu'en situation de basses eaux, une partie du sol apparaît en rive gauche de la retenue, presque sous la caméra. Ce sol présente également un aspect proche de celui du bois constituant le radeau de bois flottant, cependant il n'est pas forcément judicieux de considérer cette surface comme une partie du radeau. Le même genre de questionnements, concernant la conservation ou non de cette partie de la ROI, émerge alors. Etant proche de la caméra, cette zone est de taille limitée. De plus, de telles hauteurs d'eau, particulièrement faibles, ne sont pas très fréquentes. Dans le cadre de mes traitements, j'ai donc fait le choix de maintenir cette zone dans la ROI.



Figure 61 : Illustration des limites haute et basse de la zone de reflets des éléments riverains (a) et apparition du sol en basses eaux en rive gauche (b) de la retenue du barrage de Génissiat.

III.2- Evaluation de l'effet de la réduction de la ROI sur une image oblique

Généralement, les images acquises in situ sont obliques, afin que la scène visible soit la plus large possible, malgré la faible altitude de prise de vue. La conséquence de cet angle de visée est que la résolution spatiale de l'image n'est pas homogène, et que les pixels représentant les zones les plus éloignées de la caméra ont une surface beaucoup plus étendue que ceux qui se trouvent près du capteur. Les imprécisions des traitements sont relatives à cette différence de taille au sol des pixels. Il est donc préférable, dans la mesure du possible, d'exploiter les zones les plus proches de la caméra. Celle-ci doit se situer au plus près de la ROI, et réciproquement, il vaut mieux que la ROI ne s'étende pas trop dans le fond de l'image. Le test proposé ici illustre le fait que la présence de pixels très distordus, à cause du point de vue oblique de la caméra, était compromettante pour la qualité des résultats obtenus lors du traitement automatique des images.

III.2.1- Méthodologie

Les résultats de la détection automatique du radeau de bois réalisée sur les images acquises à Génissiat avec deux masques différents ont été comparés. Le premier masque (hachures pleines sur la figure 62) correspond à la zone la plus fidèle au masque présenté en figure 60.a. Il a été dessiné en sélectionnant certaines cellules sur une grille d'une maille de 20 pixels. Le second masque (hachures tiretées en figure 62) comprend une ligne de cellules supplémentaires dans la zone supérieure de l'image. La grille qui découpe l'image a servi à l'extraction de paramètres radiométriques et texturaux en vue d'une classification automatique. La procédure suivie est décrite dans la section I.2 du chapitre II et plus en détail dans la section I.5.2.a du chapitre IV. Elle a été appliquée à un lot de 92 images, sur lesquelles la surface du radeau a été prédite grâce à l'application d'un random forest. Pour la phase d'apprentissage, 20 000 cellules ont été choisies au hasard, et la validation du modèle a été faite sur le reste des individus. Ce second masque permet d'extraire les cellules dont la surface au sol est la plus importante, ce qui induit les plus grosses imprécisions en cas de mauvais classement. Des cartographies du nombre de mauvais classements sont produites pour comparer les deux situations, puis les modèles comparant les surfaces de bois observées et prédites sont également comparés. La surface au sol représentée par chaque cellule est connue après une phase d'orthorectification des images (voir section II.2 dans le chapitre IV).



Figure 62 : Masques appliqués lors des tests de classification automatique sur les images acquises à Génissiat : masque « normal » en hachures pleines et masque « agrandi » en hachures tiretées.

III.2.2- Impact des cellules distantes sur la précision des résultats

Le Tableau 13 présente les caractéristiques des jeux de données obtenus avec les deux masques, ainsi que les indices de précision des modèles correspondants.

	Masque « normal »	Masque « agrandi »
Nombre de cellules dans le masque	152	181
Nombre de cellules dans la ROI	616	587
Nombre d'individus total (ROI)	56 647	53 980
Taux de bons classements (%)	96,72	97,16
Sensibilité	0,98	0,98
Spécificité	0,95	0,96

Tableau 13 : Caractéristiques des deux masques et ROI testés et efficacité des modèles obtenus avec chacun.

Dans les deux cas, l'efficacité des modèles est très bonne : tous les indices calculés sont supérieurs à 95 %. Les scores sont également très proches pour les deux modèles, ce qui ne permet pas d'affirmer qu'un masque restreint est plus intéressant au niveau de la prédiction des classes. Cependant, la figure 63 illustre le nombre de mauvais classements par cellule de la ROI : pour chaque cellule de la grille découpant les images, la taille du cercle est proportionnelle au nombre d'erreurs comptabilisé sur l'ensemble des individus constituant l'échantillon de validation. Les cellules localisées sur l'arrière-plan enregistrent clairement un taux de mauvais classements très supérieur aux autres cellules, d'où l'intérêt de tester le même type de classification automatique en s'affranchissant de cette zone. Les taux de mauvais classements dans le reste de la ROI sont assez similaires entre les deux modèles.

La Figure 64 présente les résultats de la prédiction des surfaces du raft sur chaque image de l'échantillon en fonction de la surface effectivement observée. Cette fois, la différence entre les deux modèles est claire, celui réalisé avec l'application du masque « agrandi » étant beaucoup plus précis (R² = 0,91, contre R² = 0,45 avec un masque « normal »). Cela montre que la réduction de la taille de la ROI peut permettre d'améliorer le modèle prédictif : même si les taux de bons classements semblent équivalents, à cause du point de vue oblique de la caméra, l'efficacité de la prédiction diffère en fonction du masque choisi. Les zones situées au fond de l'image sont source d'erreurs plus nombreuses (en termes de taux de mauvais classements) et plus importantes (en termes d'imprécision des surfaces prédites, engendrée par l'utilisation d'une ROI plus large).



Figure 63 : Nombre de mauvais classements pour chaque cellule de la ROI : avec masque initial (a), et « agrandi » (b).



Figure 64 : Surface prédite en fonction de la surface observée sur les 92 images de l'échantillon : avec application d'un masque « normal » (a) et d'un masque « agrandi » (b).

III.2.3- Conclusions du test et recommandations

Ce test met en évidence l'un des enjeux de l'acquisition d'images obliques : tous les pixels de l'image ne représentent pas la même surface au sol et leur taille croît en s'éloignant du lieu d'implantation de la caméra. Cela a plusieurs conséquences, la première étant que l'aspect des éléments observés sur l'image n'est pas le même au premier et à l'arrière-plan. Il semble donc nécessaire de prendre en compte ces variations lors de la phase d'apprentissage, en vue d'une classification automatique des images. Mais la taille représentée par les cellules étant supérieure, les éléments mixtes, c'est-à-dire représentant plusieurs types d'objets, sont plus fréquents. Et cela conduit bien souvent à des erreurs de classifications (Marcus et al., 2003 ; Handcock et al., 2006 ; Legleiter et Fonstad, 2012). En effet, il a été montré que la détection automatique de bois dans le ROI la plus large possible conduit à des erreurs de classification fréquentes sur les images de Génissiat. De plus, les surfaces au sol représentées étant plus importantes, ces erreurs de classement sont plus lourdes pour la précision des résultats et l'impact sur les surfaces prédites est non négligeable.

Lors de l'installation du capteur, il apparaît donc important de prendre en compte ce genre de limites pour le choix du site d'étude et pour la conception de l'aménagement. Dans la mesure du possible, il est important de minimiser l'angle de vue du capteur par rapport à la verticale. Cela a comme effet la réduction de la surface observée, qui pourrait être compensée en privilégiant une plus grande hauteur d'acquisition. Il faut donc trouver un point haut ou élaborer un système de mât assez solide pour supporter le capteur et résister au vent. Moins l'angle de visée sera oblique et plus les pixels de l'image auront des empreintes au sol proches en termes de surface : cela augmentera probablement l'efficacité des tests de classification s'il est nécessaire d'en établir. S'il n'est pas possible d'orienter le capteur de manière à réduire l'angle de visée, il est toujours possible d'appliquer un masque aux images, afin de limiter la taille de la ROI.

IV- Conclusion du chapitre III : éléments à retenir

Le tableau 14 synthétise les résultats et les recommandations extraits des quatre tests présentés dans ce chapitre. Il résume en quelques phrases les éléments à retenir, qui sont développés plus haut dans le texte.

Etape de la chaîne de	Test	Objectif	Conclusion	Recommandations
traitement				
Installation du capteur	Intérêt du filtre	Montrer l'intérêt du filtre	Le filtre limite la présence de	Utiliser un filtre polarisant
	polarisant sur la Mitis	polarisant pour l'observation	reflets sur l'eau mais pas sur la	uniquement pour les observations
		d'un environnement enneigé.	neige.	d'éléments immergés, inutile pour
				observer la glace.
Constitution du jeu de	Impact de la date,	Montrer l'impact de différents	Les acquisitions de meilleure	Privilégier une bonne luminosité
données	l'heure et les conditions	facteurs environnementaux	qualité à Mollon se font avant	mais une lumière indirecte pour
	environnementales sur	sur la visibilité du fond.	10h00 et pour des débits	limiter les reflets, et des hauteurs
	l'Ain		inférieurs à 70 m ³ /s.	d'eau limitées pour observer le
				fond du cours d'eau et estimer la
				bathymétrie.
	Variabilité inter- et	Mettre en évidence l'existence	Certains phénomènes peuvent	Etudier les variabilités à différents
	intra-journalière à	de variabilités entre les clichés	être mis en évidence par l'étude	pas de temps pour sélectionner
	Génissiat	aux échelles inter- et intra-	des variabilités inter- et intra-	l'horaire le plus adapté au suivi
		journalières	journalières	prévu.
Définition de la ROI	Limitation de la taille de	Montrer que les pixels les plus	Les résolutions les plus	Prendre en compte la taille de la
	la ROI à Génissiat	distordus sur l'arrière-plan des	grossières présentent les plus	ROI et l'angle de vue de la caméra
		images obliques impactent la	forts taux d'erreurs de	lors de l'installation du capteur,
		qualité des résultats du	classement, et donc le plus gros	afin de limiter les différences de
		traitement d'images	impact sur les surfaces prédites.	tailles entre pixels.

Tableau 14 : Synthèse des conclusions et recommandations issues des tests présentés dans le chapitre III.

Chapitre IV : Extraction et traitement du signal

Suite à la sélection des données à traiter et à la délimitation de la surface d'étude dans l'image, une phase d'extraction du signal permet de calculer les informations pertinentes. Elles pourront notamment être représentées sous forme de séries temporelles pour l'exploitation des résultats. Cependant, entre la phase d'extraction du signal et l'analyse de ces séries temporelles, diverses opérations peuvent être mises en place pour transformer le signal en vue de son interprétation. Une phase de classification automatique permet par exemple de prédire la catégorie des pixels ou des objets qui constituent l'image, en fonction des valeurs extraites dans différents types de variables. Ces variables sont aussi appelées « paramètres descripteurs ». La section I de ce chapitre présente en détails la procédure de classification automatique. La description de la phase d'extraction des paramètres a été incluse dans cette partie, ainsi que celle du processus de segmentation, qui lui est lié. La segmentation des images permet de délimiter des objets qui correspondent à des groupes de pixels homogènes, dans lesquels sont calculés les paramètres descripteurs.

Diverses opérations sur le signal extrait peuvent aider à mettre en évidence les variations spatiales (dans des zones de l'image) ou temporelles (entre les différentes images) enregistrées. La section II de ce chapitre présente trois exemples de post-traitement qu'il est possible de réaliser sur ce signal. Celui-ci est généralement extrait dans plusieurs bandes spectrales, qui contiennent chacune de l'information. Certaines opérations entre les valeurs de ces canaux peuvent par exemple générer une information complémentaire. L'orthorectification des images est un processus qui permet d'attribuer à chaque pixel de l'image une surface proportionnelle à son emprise au sol. Grâce à cela il est donc possible de quantifier les évolutions surfaciques de l'objet suivi. Enfin, la conversion des données est présentée comme solution pour transformer des grandeurs en unités différentes. Cela permet entre autre de pouvoir parler de valeurs plus éloquentes pour l'exploitation des résultats.

La figure 65 illustre les étapes de la chaîne de traitements qui sont couvertes par le chapitre IV. Différents questionnements qui sont soulevés par ces étapes et auxquels ce chapitre tente de répondre sont également présentés.



Figure 65 : Schéma global de la démarche proposée pour l'étude des cours d'eau par imagerie in situ : mise en évidence des étapes traitées dans le chapitre IV et questionnements associés.

I- Classification automatique des images

I.1- Principes de la classification automatique et outils de classification

La classification des images consiste à attribuer une catégorie à chaque élément qui la constitue, de manière à la décrire entièrement. Cet étiquetage peut bien évidemment être réalisé manuellement ou « à dire d'expert », mais il est possible d'automatiser en partie ou complétement la classification. Cela consiste à prédire la catégorie à laquelle chaque objet appartient, grâce à des algorithmes associés à des probabilités. Dans le cadre de cette thèse, seules des procédures de classification automatique ont été explorées : c'est donc ce genre de démarche qui sont décrites cidessous.

I.1.1- Les étapes de la classification automatique

La figure 66 schématise l'étape de classification automatique proposée dans la chaîne des traitements développée pour étudier les cours d'eau par imagerie in situ (voir figure 65). Elle peut être subdivisée en plusieurs étapes, c'est pourquoi la classification a été considérée comme une phase du traitement à part entière. De nombreuses problématiques, qui sont associées à chacune,

émergent alors : la figure 66 évoque celles qui émergent dans le cas d'une classification automatique orientée objet, avec apprentissage supervisé. En effet, seul ce genre de traitement statistique a été testé pour classer les objets étudiés. Les éléments relatifs à cette étape du traitement et les tests réalisés à leur sujet sont présentés dans ce chapitre.



Figure 66 : Schéma global de la démarche proposée pour l'étude des cours d'eau par imagerie in situ : détail de la phase de classification et problématiques associées.

La classification automatique des images repose sur l'utilisation d'un certain nombre de descripteurs afin de distinguer les différentes classes des objets qui composent ces images. Ces descripteurs sont obtenus au cours de la phase d'extraction du signal, évoquée dans la section I.2 de ce chapitre. Une partie seulement des individus disponibles dans le jeu de données global est sélectionnée pour constituer l' « échantillon d'observés » (voir figure 66). L'ensemble de ces individus est classé à dire d'expert, afin de connaître pour chacun, sa catégorie d'appartenance. Parmi tous ces individus dont la classe est connue, une partie : l' « échantillon d'apprentissage », sert à l'établissement du modèle prédictif des classes. Le test statistique choisi est appliqué à ce lot qui est censé être représentatif du jeu de données global. Une autre partie des individus étiquetés à dire d'expert permet de constituer l' « échantillon de validation », sur lequel ce modèle est testé : il s'agit de valider l'efficacité du modèle qui sera ensuite appliqué au jeu de données global. Le but est de pouvoir estimer la précision des prédictions faites sur les individus dont la classe n'est pas connue a priori.

I.1.2- Classification orientée pixel ou classification orientée objet

Le choix du mode de classification à entreprendre dépend du type d'éléments qu'il faut classer : la distinction s'opère entre des pixels isolés ou des groupes de pixels. Dans le cas de l'imagerie in situ,

où la surface observée est relativement restreinte et où la résolution des images est généralement élevée, la classification de pixels isolés n'a pas vraiment de sens, bien qu'elle soit possible. La classification dite « orientée-objet », où des regroupements de pixels sont étudiés, est donc a priori préférable. Ces groupes sont formés par des pixels proches spatialement et qui partagent les mêmes propriétés radiométriques, donc qui ont un aspect similaire. Ces objets sont obtenus lors d'une phase préalable de segmentation des images, introduite dans la section I.3 de ce chapitre.

I.1.3- Procédures avec apprentissage supervisé ou non supervisé

L'imagerie in situ pour l'étude des cours d'eau est par essence acquise en milieu extérieur et les différents clichés enregistrent ainsi des conditions très variables, notamment au niveau de la luminosité. L'aspect des scènes (et donc des objets à classer) est très variable et les gammes de valeurs pour chaque paramètre descriptif peuvent être très larges. Dans la mesure du possible, il est alors conseillé de procéder à une classification avec apprentissage supervisé. L'apprentissage est a priori d'autant meilleur qu'un maximum de cas possibles est représenté dans l'échantillon d'apprentissage. Cela permet d'assurer une prédiction des classes avec un minimum de confusion.

I.1.4- Outils statistiques de la classification automatique

Il existe plusieurs outils statistiques permettant la classification automatique d'images, il faut donc choisir le plus adapté à l'étude en cours. Plusieurs points doivent être questionnés dans le cadre de ce choix, chacun d'eux étant relatif aux besoins que requière l'étude. Les particularités propres à chacun des tests statistiques impliquent des temps différents de préparation des données (notamment l'étape de classification à dire d'expert) ou de traitement informatique, par exemple. Ces considérations peuvent être déterminantes pour le choix opéré, en fonction des contraintes temporelles liées à l'étude en cours. Des comparaisons de l'efficacité des différents outils peuvent également permettre de choisir l'outil adapté au contexte, en fonction de ce qui est souhaitable ou acceptable au niveau des résultats. G. James et al. (2013) affirment en effet qu'il n'existe pas une meilleure méthode qu'une autre : la comparaison des performances des modèles produits avec différentes méthodes permet de définir la plus adaptée à l'étude d'un jeu de données particulier. Il existe différentes méthodes de classification avec apprentissage supervisé, telles que la régression logistique, l'analyse discriminante linéaire (LDA), les *random forests*, les *support vector machine* (SVM), etc., plus ou moins complexes à mettre en place.

I.1.5- Evaluation de la qualité de la classification automatique

Une phase de validation des résultats (voir figure 66) est intéressante pour connaître l'efficacité du modèle prédictif obtenu et vérifier que la précision des résultats est conforme aux attentes de

l'étude. Cette phase permet de connaître les différentes caractéristiques du modèle afin de le comparer à des résultats préexistants, et de réajuster si besoin certains des paramètres évoqués plus bas, comme le nombre et le type de descripteurs utilisés, le nombre de classes, les tailles des cellules et du masque, etc. Cette phase de validation se fait sur des individus de l'échantillon de validation qui ne font pas partie de l'échantillon d'apprentissage. La comparaison des étiquettes attribuées à dire d'expert et de la classification automatique revient à comparer les cas observés et prédits. Si les résultats fournis par le modèle mis en place sont convenables, il sera alors possible de l'appliquer à l'ensemble du jeu de données disponible (voir figure 66), en considérant que les résultats présentent l'imprécision estimée grâce à cette étape de validation.

Le taux de bons classements, qui rapporte les effectifs dont la classe prédite correspond à l'étiquette attribuée à dire d'expert aux effectifs totaux est l'indice le plus commun pour évaluer l'efficacité des modèles prédictifs. Cependant, comme le disent S. Begueria (2006) ou G. James et al. (2013), dans le cas d'un échantillon peu équilibré (comme c'est souvent le cas dans l'étude des risques naturels), cet indice est peu représentatif de la capacité du modèle à détecter correctement les différentes classes étudiées avec la même précision. Pour cela, S. Begueria et al. (2006) proposent de calculer la « sensibilité » et la « spécificité » du modèle. Dans un cas où deux classes sont étudiées, l'une est considérée comme le cas positif, parce que c'est celle où survient le phénomène ou l'objet étudié, et l'autre comme le cas négatif. La « sensibilité » correspond à la proportion de cas positifs prédits correctement. Grâce à cet indice, il est possible d'exprimer la puissance prédictive du modèle. La « spécificité » correspond au nombre de cas négatifs prédits correctement. Le tableau 15 ci-dessous illustre le calcul de ces indices. Ceux-ci ne sont pas dépendants de la proportion de chaque classe dans le jeu de données et peuvent donc être comparables entre différents modèles, voire entre différents échantillons.

		Cas Observés	
	(+) (-		(-)
Cas prédits	(+)	А	В
	(-)	С	D

Tableau 15: Exemple de table de contingence d'un modèle de classification.

A partir du tableau 15, les indices suivants seront calculés :

- Taux de bons classement (= Efficacité) = (A + D) / (A + B + C + D)
- Sensibilité = A / (A + C)
- Spécificité = D / (B + C)

Dans le cadre de ces travaux de thèse, pour comparer tous les modèles élaborés à des fins de tests, les trois indices présentés ci-dessus ont été calculés : taux de bons classements, sensibilité et spécificité. Chaque modèle peut ainsi être comparé avec les autres, indépendamment des proportions des différentes classes représentées dans les échantillons de validation, d'apprentissage et de tests. Dans le cas de la fosse Home, où la classification utilisée est relativement complexe avec 7 classes, il est tout à fait possible de calculer un indice similaire à la spécificité et à la sensibilité pour chacune des classes. C'est ce qui a été fait afin d'exprimer la capacité du modèle à prédire chacune d'entre elles.

Un autre indice a été calculé afin d'évaluer le pouvoir de généralisation des modèles élaborés (Cottet, 2010). Le biais (BIASr équation (9)) permet de comparer la qualité de l'ajustement des cas prédits par le modèle aux situations observés. Le calcul du biais relatif moyen (BIASr, équation (10)) permet de normaliser cette valeur pour la comparer avec l'efficacité de différents modèles. H. Fusch et al. (2009) proposent les équations suivantes :

BIAS
$$= \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{n} |x_o - x_p|$$
 (9)

$$BIAS_r = \frac{BIAS}{\overline{x_o}} \times 100$$
 (10)

Avec *n* le nombre d'individus ;

 x_o la valeur observée d'un individu ;

 x_p la valeur prédite d'un individu ;

 $\overline{x_o}$ la valeur observée moyenne.

I.2- Extraction des descripteurs

En vue de la classification automatique des images, un certain nombre de descripteurs doit être associé aux éléments étudiés. C'est sur ces informations que se fonde la distinction entre les différentes catégories présentes dans l'image. Le plus grand nombre de descripteurs possible est généralement préférable pour une classification exploratoire, mais la phase d'extraction est d'autant plus longue que les paramètres extraits sont nombreux et complexes. Un choix doit donc être fait en intégrant les avantages de chacun, la nécessité de chercher les descripteurs les plus pertinents ou d'en développer d'autres plus adaptés à l'objet suivi. Le nombre et le type de descripteurs dépendent évidemment de l'objectif et éventuellement du test statistique choisi pour la classification automatique. Il faudra donc connaître les préconisations relatives à chacun.

I.2.1- Nombre de paramètres à extraire

Les paramètres qu'il est possible d'extraire des images sont très divers. Généralement, ils correspondent à des indices qui permettent de résumer l'information sous la forme d'une valeur simple. Cela rend cette information à la fois plus aisée à interpréter et plus facile à manipuler. Si certains paramètres, relativement simples et évidents (tels que la moyenne, la variance ou l'intervalle interquartile, par exemple) semblent évidents, il existe de très nombreux indices statistiques, plus ou moins complexes, qui permettent de mettre en évidence différentes caractéristiques de la distribution radiométrique dans la zone d'étude. De plus, il est toujours possible d'en imaginer et d'en développer de nouveaux pour appréhender un caractère ou un autre.

Certaines statistiques courantes sont très rapides à calculer car les fonctions associées sont généralement préprogrammées dans la plupart des logiciels utilisés pour ce type d'analyses. Cependant d'autres indices statistiques plus complexes peuvent être requis, et s'ils ne sont pas directement disponibles, en plus du temps de développement nécessaire il faut envisager le temps de calcul associé à leur utilisation. Il est donc important d'optimiser l'efficacité des scripts élaborés afin de minimiser ce temps de traitement.

Le nombre de paramètres extraits dépend avant tout de la finalité de l'opération : selon le résultat souhaité et/ou selon la méthode employée, différents descripteurs, plus ou moins nombreux, seront donc nécessaires. Pour réaliser une classification automatique, il semble intéressant de disposer d'un maximum de descripteurs afin de favoriser la discrimination des différentes catégories. Cependant il existe des conditions à respecter pour la mise en place de certains tests statistiques. Dans le cas d'une régression logistique par exemple, d'après T. Heckmann et al. (2013), l'une des plus importantes est l'absence de corrélation entre les paramètres descripteurs. Il faut donc éviter l'utilisation simultanée d'indices statistiques dont l'information est redondante, par exemple les valeurs calculées dans les canaux rouge et vert, qui sont souvent très similaires.

De manière générale, il est toujours possible d'extraire et de calculer un maximum de valeurs, même sans connaître ni leur efficacité pour la discrimination des classes, ni la covariance qu'il y a entre elles, ni le type de réponse que présente le signal au phénomène étudié. Des analyses pourront être effectuées par la suite, afin de les connaître. Il sera ainsi possible de savoir quels paramètres conserver pour l'élaboration des modèles prédictifs, ou lesquels exploiter pour l'étude du phénomène en question. Seul le temps requis pour l'extraction du signal, relatif à celui disponible pour l'étude, pourrait constituer une limite réelle au nombre de paramètres extraits des images. Le

nombre de paramètres réellement utilisés ensuite dépend des conclusions des analyses effectuées en complément.

I.2.2- Choix des paramètres à extraire

En fonction du type d'objets à détecter et des caractéristiques des classes étudiées, les descripteurs utilisés pour la discrimination peuvent être différents. Si l'enjeu est de discriminer deux classes qui ont a priori une couleur nettement différente, les descripteurs les plus intéressants seront probablement de type radiométrique. Les statistiques pertinentes seront alors de type moyenne, médiane, gamme de valeurs, mode etc. et il sera bon d'exploiter un maximum de bandes spectrales disponibles. L'exploitation de différents espaces colorés peut être utile en ce sens. C'est par exemple le cas pour la discrimination de l'eau et du bois, ou de l'eau et de la glace, ou encore des sédiments et de la végétation. Une approche raster classique (pixel à pixel) peut permettre de conduire cette approche pour identifier les surfaces concernées. Si les différentes classes étudiées ont des couleurs très proches mais des aspects plus ou moins rugueux, il s'agira alors plutôt d'exploiter la texture locale de l'image pour discriminer les différentes catégories. C'est le cas lorsque la discrimination porte sur différents types de glace ou sur des classes de sédiments, par exemple. Dans ce cas il faudra définir une maille sur laquelle appliquer le calcul des indices texturaux, car celui-ci se fait sur des surfaces : il faudra donc envisager une approche par classification orientée-objet. Enfin, des indices de taille et de forme des objets produits peuvent renseigner sur la classe concernée. Ces derniers paramètres peuvent être appréhendés à partir de techniques de segmentation automatique des images. Le résultat de la segmentation automatique présenté en figure 67 (voir section 1.3.2 cidessous) peut illustrer cela car les propriétés géométriques sont clairement distinctes entre les deux classes eau et bois.

Le tableau 16 recense l'ensemble des paramètres extraits des images sélectionnées pour les tests effectués. Ces paramètres sont les mêmes pour Génissiat et la fosse Home. Ils ont été extraits grâce au même script sous le logiciel R cran. Certains étaient directement disponibles dans le logiciel et d'autres ont été implémentés pour cette occasion. Les paramètres extraits des objets segmentés automatiquement sous le logiciel ENVI étaient proposés par défaut pour l'export des données.

	Descripteur	Fosse Home et Génissiat, grille orthogonale (B. V. B. H. S. I)	Génissiat, segmentation automatique (R. V. B)	Sainte-Angèle, ROI (R, V, B, H, S, I)	Mollon, ROI (R, V, B)
Localisation	Colonne	X			
	Ligne	Х			
Horaire	Date	Х		Х	Х
	Heure	Х		Х	Х
Géométrie	Aire		Х		
	Longueur		Х		
	Compacité		Х		
	Convexité		Х		
	Solidité		Х		
	Rondeur		Х		
	Facteur de forme		Х		
	Elongation		Х		
	Linéarité		Х		
	Direction principale		Х		
	Axe A		Х		
	Axe B		Х		
	Nombre de trous		Х		
	Forme des trous		Х		
Radiométrie	Moyenne	Х	Х	Х	Х
	Médiane	Х		Х	Х
	Mode	Х		Х	
	Ecart type	Х	Х		
	Maximum		Х		
	Minimum		Х		
Texture	Etendue	Х	Х	Х	
	Moyenne texturale		Х		
	Variance	Х	Х	Х	Х
	Entropie texturale		Х		
	Intervalle interquartile	Х		Х	
	Inertie (voisinage 1 pix)	Х			
	Inertie (voisinage 3 pix)	Х			
	Inertie (voisinage 5 pix)	Х			
	Energie			Х	
	Entropie			Х	
	Contraste			Х	
	Homogénéité			Х	
Ratio de	Différence R-V	Х			
bandes	Différence R-B	Х			
	Différence V-B	Х			
Voisinage	Voisinage inertie (1 pix)	Х			
	Voisinage Différence R-V	X			

Tableau 16 : Paramètres extraits des images des différents jeux de données acquis pour les tests effectués dans le cadre de

<u>cette thèse.</u>

I.3- Segmentation des images

I.3.1- Principe et intérêt de la segmentation

L'étape de segmentation des images n'est pas obligatoire dans la chaîne de traitement proposée (voir figure 65), cependant elle est indispensable dans le cadre d'une classification orientée-objet des images, puisque c'est lors de cette procédure que sont définis les objets à considérer. La segmentation des images consiste à découper celles-ci en zones homogènes d'un point de vue radiométrique : les pixels de l'image qui sont proches les uns des autres et qui partagent des propriétés similaires sont regroupés au sein d'une même entité. La procédure peut être réalisée de manière manuelle, mais il existe de nombreux algorithmes informatiques qui permettent d'obtenir des résultats similaires plus rapidement. Dans les deux cas, les limites entre les objets correspondent généralement à des différences de niveaux de gris importantes entre pixels voisins.

La segmentation de la ROI d'une image intervient juste avant l'étape d'extraction du signal radiométrique (voir section I.2 ci-dessus). Les informations radiométriques sont alors extraites dans des unités spatiales à la fois petites et homogènes plutôt que dans une zone large. Des indices statistiques permettant de résumer l'information contenue dans chaque objet peuvent être calculés, ce qui permet de décrire les différents objets et éventuellement de constituer les descripteurs qui seront exploités lors d'une étape de classification automatique.

1.3.2- Segmentation automatique des images acquises à Génissiat

La segmentation automatique des images peut être réalisée grâce à des algorithmes programmés dans certains logiciels de traitement d'image et télédétection. Afin d'illustrer son effet, la segmentation automatique a été testée sur 29 images, sélectionnées dans le jeu de données acquis à Génissiat pour leurs propriétés visuelles très diverses. La fonction *Segment only feature extraction workflow* de la toolbox *Feature extraction* du logiciel ENVI d'Exelis a permis cela. Ce logiciel étant disponible au laboratoire, c'est celui qui a été employé mais il est loin d'être le seul à proposer ce genre de fonction. De nombreux outils sont par exemple développés sous Matlab dans le même but. Les paramètres utilisés sont les suivants :

0	Segment settings/ Edge	40
0	Merge settings/ Full lambda schedule	80
0	Texture Kernel size	3

La figure 67 présente le résultat de cette opération pour trois des images du lot. Les surfaces en eau et le bois se distinguent assez clairement par le type d'objets produits. Ceux-ci sont globalement

de petite taille et donc très nombreux quand il s'agit de bois, et de plus grande taille dans les zones d'eau. Cependant il faut noter que les zones ombragées de bois sont segmentées en des objets d'assez grande taille (figure 67.a) mais de forme assez distincte de ceux correspondant à de l'eau. Les limites des objets situés à l'ombre sont notamment beaucoup moins lisses et ils présentent des inclusions nombreuses (figure 67.a). Il est intéressant de noter que les zones d'eau peuvent être segmentées en de nombreux objets alors que la surface apparaît parfaitement lisse. Il semble que le gradient de luminosité dû au reflet du ciel soit à l'origine de ce phénomène (figure 67.b). La limite des objets ainsi distingués doit correspondre à des seuils de valeurs que l'œil n'est pas capable d'interpréter de la même manière.

Parmi les point forts que présente la procédure de segmentation automatique, la segmentation d'une image prise lors de très mauvaises conditions météorologiques, par exemple avec du brouillard (voir figure 67.c), semble produire quand même un résultat très satisfaisant pour une classification. Au contraire, sur les figures 67.a et 67.b les reflets des arbres situés en rive droite de la retenue et notamment leur limite, qui représente les cimes, sont segmentées en des objets qui ressemblent fortement à des éléments de bois, alors qu'il s'agit bien d'eau.

Aucun test comparatif n'a été effectué pour valider la qualité de ces paramètres au niveau de la segmentation générée, cependant ils semblaient produire un résultat satisfaisant au niveau de la définition des limites d'objets. Toutefois, même dans le cas de la meilleure segmentation observée, des objets mixtes sont produits et il semble que la délimitation parfaite des différents objets ne soit jamais atteinte de manière automatique.

La multiplication du nombre d'objets, notamment dans les zones occupées par du bois, a semblé constituer une limite concernant la classification automatique de ces objets. En effet, les tailles très différentes des deux types d'objets, ou bien le déséquilibre des classes engendré de ce fait ont paru être nécessaires à limiter. De plus, le nombre important et la taille réduite des objets de bois sont dus à la texture importante observée sur ces surfaces, puisque la limite des objets correspond aux variations radiométriques. L'information de texture à l'intérieur de chaque objet est donc perdue avec ce type de segmentation. Les descripteurs texturaux deviennent ainsi inutiles, alors que les descripteurs géométriques semblent au contraire être très pertinents.



Figure 67 : Illustration de la segmentation automatique réalisée sous ENVI pour trois des 29 images sélectionnées. Mise en évidence de l'effet des zones d'ombre et de soleil (a), de la segmentation dans une zone d'eau complétement libre et au niveau des reflets de la ripisylve (a et b), et de la capacité de segmentation en cas de brouillard (c).

I.3.3- Segmentation des images selon une grille orthogonale

La segmentation des images selon une grille orthogonale constitue une alternative à la procédure de segmentation automatique évoquée ci-dessus. Cela conduit à un découpage des images en cellules carrées, qui permettent d'extraire des paramètres descripteurs de la même manière que dans des objets segmentés automatiquement. L'information géométrique devient

cependant inutile, les objets ayant tous la même taille et la même forme. La grille étant régulière, il est en revanche plus aisé de spatialiser l'information de cette manière. C'est ainsi que P.E. Carbonneau et al., (2004, 2005b) utilisent une grille d'extraction pour cartographier les gradients de granulométrie du substrat dans leurs images. Les cellules d'une grille orthogonale peuvent être classées de manière automatique dans le but de détecter la surface occupée par un objet donné dans une image donnée.

Les grilles orthogonales peuvent être constituées par des cellules de tailles et éventuellement de formes diverses. Par conséquent, elles peuvent être plus ou moins nombreuses. Dans la mesure où travailler dans des sous-unités spatiales de l'image revient à dégrader la résolution spatiale de celleci, la délimitation de l'objet étudié sera d'autant plus fine que les cellules de la grille seront petites. Une taille de cellule qui ne soit pas trop importante est donc préférable afin d'obtenir les résultats les plus précis possibles. Cependant, une taille de cellule très réduite peut limiter l'expression de la texture locale de l'image. En d'autres termes, la taille des cellules doit permettre de mettre en évidence le schéma d'agencement des valeurs radiométriques des pixels puisque c'est l'une des raisons qui peut faire préférer ce mode de segmentation des images.

Un compromis est à opérer entre la précision spatiale souhaitée, une taille minimale de cellule qui permette de mesurer les propriétés radiométriques et texturales de l'objet, et un temps d'étiquetage à dire d'expert acceptable. En effet, la phase d'apprentissage en vue d'une classification automatique supervisée passe par l'étiquetage à dire d'expert des individus d'un échantillon d'images. Plus les cellules sont de petite taille et donc nombreuses dans une image, plus cette tâche est longue. Il faut donc tenir compte de cette contrainte lors de la définition des paramètres de taille et du nombre de cellules.

Cette procédure a été testée sur deux des jeux de données disponibles. Dans les deux cas, le choix opéré a consisté à diviser l'image en un nombre entier de cellules à la fois dans la hauteur et dans la largeur (voir figure 68). Au vu de la résolution spatiale de chacune des séries étudiées, la taille des cellules a semblé convenable, à la fois pour leur étiquetage à dire d'expert et pour la précision attendue des résultats. La taille et le nombre de cellules constituant chaque grille sont présentés dans le tableau 17.



Figure 68 : Grilles d'extraction utilisées sur les images acquises à Génissiat (a) et à la Fosse Home (b). Cellules hachurées : masque ; cellules vides : ROI.

Site	Dimensions de	Nombre de	Nombre de	Nombre de	Nombre de	Dimensions
d'étude	l'image (pix)	cellules dans	cellules dans	cellules dans	cellules dans	des cellules
		la grille	le masque	la largeur	la hauteur	(pix)
Génissiat	640*480	768	181	32	24	20*20
Fosse	2048*1536	3072	1404	64	48	32*32
Home						

Tableau 17 : Nombre et taille des cellules constituant les grilles d'extraction présentées en figure 68.

I.4- Constitution des échantillons d'observés, d'apprentissage et de validation

Les individus constituant les jeux de données étudiés sont des images. Cependant, dans le cadre de la classification automatique, le travail de prédiction des classes est réalisé au niveau des entités qui subdivisent ces images, qu'ils résultent d'une segmentation automatique ou d'un découpage par grille.

Les différents échantillons utilisés dans le cadre des étapes successives de la classification ne concernent pas tous le même type d'individus : pour constituer les cas observés, une partie des images disponibles a tout d'abord été sélectionnée. Différents lots d'objets qui constituent ces images ont ensuite été sélectionnés pour constituer d'une part l'échantillon d'apprentissage et d'autre part l'échantillon de validation.

I.4.1- Echantillon d'observés

Parmi l'ensemble des individus constituant un jeu de données global, certains sont sélectionnés pour constituer un « échantillon d'observés », d'une part en vue de l'élaboration du modèle prédictif, puis d'autre part en vue de l'évaluation de son efficacité. Ces images sont entièrement classées à dire d'expert : cela consiste à attribuer manuellement une classe à l'ensemble des objets présents sur ces images.

I.4.1.a- Nombre d'images étiquetées à dire d'expert

Il paraît évident que plus l'échantillon d'observés est important, plus la phase de traitement manuel. Cependant, il faut faire en sorte que cet échantillon soit assez important pour être représentatif du jeu de données global, afin de permettre que l'apprentissage prenne en compte l'ensemble des aspects présentés par chaque classe. Les caractéristiques de la scène évoluant au cours du temps, notamment en fonction des conditions météorologiques (lumière, couverture nuageuse, ...), il faut en effet que le lot d'apprentissage correspondant à chaque classe couvre l'ensemble des conditions observées dans le jeu de données global. C'est pourquoi le nombre d'images constituant l'échantillon d'observés ne peut pas être trop restreint.

Dans le cas du jeu de données de Génissiat, le nombre d'images acquises en cinq ans est énorme (près de 150 000 images en tout, voir tableau 11 dans le chapitre III). Un échantillon constitué d'une image par jour (acquise à 13h), représenterait en théorie un lot de 1 909 images. 95 images ont été sélectionnées pour réaliser des tests avec un découpage selon une grille orthogonale. Cet échantillon d'observés correspond à 5 % du total. A ces 95 images s'ajoutent 29 autres images (1,5% d'un jeu de données quotidien), sélectionnées pour la réalisation de tests incluant une phase de segmentation automatique sous ENVI. Dans le cas du jeu de données acquis sur la Saint-Jean, le nombre d'images est beaucoup plus restreint puisque les acquisitions n'ont duré que le temps d'une saison hivernale. En ne considérant que deux images par jour, celles acquises à 12h00 et 13h00, le jeu de données global s'élève à 270 images. Afin de disposer d'un jeu de données assez conséquent, ces deux horaires ont été conservés, en considérant qu'ils étaient assez semblables en matière de conditions météorologiques. Pour la constitution de l'échantillon de validation, 25 images ont été sélectionnées, soit un taux de 10 % environ.

Dans les trois cas, les objets constituant l'échantillon d'observés ont été étiquetés de la même manière, sous ArcGIS : un fichier vectoriel a été généré pour chaque image au format « .shp ». Celuici correspond soit au résultat de la segmentation automatique des images, soit à une grille orthogonale. Chaque image a ensuite été affichée en arrière-plan du fichier vectoriel correspondant, pour la sélection de tous les éléments correspondant à une même classe. Le champ « Classe » de la table attributaire a ensuite été renseigné grâce à l'outil *Field calculator*.

I.4.1.b-Mode de sélection des images

Une fois que le nombre d'images nécessaires pour constituer l'échantillon de validation a été défini, la question du mode de sélection de ces images se pose. La sélection aléatoire des images permet a priori de former un échantillon représentatif du jeu global, à la fois en matière de temporalité et de conditions météorologiques associées. Cette méthode de sélection ne permet cependant pas de couvrir toute la variabilité des situations existantes. Un cas peu représenté aura peu de chance d'être sélectionné ainsi. Une sélection manuelle de certaines images en fonction de leurs caractéristiques visuelles assure au contraire la couverture des différents cas possibles, au risque de constituer un échantillon non représentatif de la fréquence des différentes situations rencontrées dans le jeu de données global, par surreprésentation des cas particuliers.

Dans le cas du jeu de données de Génissiat, l'échantillon d'images sélectionnées pour la segmentation a été réalisé manuellement, de manière à représenter le maximum de cas possibles au niveau de l'aspect de la scène, des conditions météorologiques et de luminosité. En ce qui concerne le jeu de données dédié aux tests avec découpage des images selon une grille, la sélection des images constituant l'échantillon de validation s'est faite en trois temps :

- 31 images ont été sélectionnées manuellement, de la manière évoquée ci-dessus, dans le but de couvrir un maximum de types d'images au niveau de l'aspect de la scène observée ;
- 31 images ont été choisies au hasard, parmi les clichés du jeu de données global acquis au cours de l'année 2011 ;

 - 33 images ont été incluses en fonction de leur date : elles correspondent aux trois jours précédant chaque opération d'enlèvement mécanique du bois dans la retenue, effectuée entre 2011 et mai 2015. Ces clichés représentent donc les situations durant lesquelles les quantités de bois sont les plus importantes.

Dans le cas de la Saint-Jean, les images sélectionnées pour la constitution de l'échantillon d'observés ont été choisies au hasard dans le jeu de données restreint à deux images par jour, acquises à 12h00 et 13h00.

I.4.2- Echantillon d'apprentissage

Un certain nombre des entités subdivisant les images qui constituent l'échantillon d'observés est sélectionné pour l'élaboration du modèle, donc pour la constitution de l' « échantillon d'apprentissage ». La phase d'apprentissage consiste en la définition des seuils entre les classes, en fonction des paramètres représentatifs de chacune d'elles. De la même manière que pour la constitution de l'échantillon d'observés, la réflexion devra être portée sur le nombre et le mode de sélection des individus qui constituent cet échantillon.

I.4.2.a- Proportion de l'échantillon d'observés à sélectionner

D'après T. Heckmann et al. (2013), la taille idéale d'un échantillon peut être définie de manière exploratoire. Il ne doit être ni trop petit, ni trop grand. Entre autre, un échantillon trop petit aurait une forte probabilité de ne pas être représentatif du jeu de données, tous les cas de la diversité n'étant pas représentés. D'après ces auteurs, S.B. Green (1991) aurait défini la règle suivante (équation (11)) pour la taille minimale de l'échantillon :

$$n_{\min} \ge 50 + 8m \tag{11}$$

avec : *n_{min}* la taille minimale de l'échantillon

m le nombre de variables prédictives.

Dans le cadre de ces travaux, un maximum de 69 descripteurs différents ont pu être calculés. Si tous étaient pris en compte, il faudrait donc choisir au minimum 602 individus (cellules de la grille ou objets résultant de la segmentation), ce qui est largement possible, vu la taille des jeux de données utilisés. Il serait même possible, dans tous les jeux de données disponibles pour les tests présentés, de sélectionner bien plus d'individus que cela.

Cependant, il ne faudrait pas non plus que la taille de cet échantillon devienne trop importante. Dans le cas de données spatialisées (T. Heckmann et al. (2013) travaillaient sur des zones susceptibles aux glissements de terrains), il y a en effet un risque de favoriser l'autocorrélation spatiale des données en densifiant l'échantillon. Dans le cas de ces travaux de thèse, ce risque est à considérer puisqu'au sein d'une même image, les cellules ou objets conjoints présentent a priori une plus forte probabilité d'être classés comme leurs voisins. Cependant, cet aspect a été considéré comme un atout pour la détermination automatique de la classe des individus, en utilisant le voisinage comme l'un des paramètres descripteurs des individus des jeux de données acquis à la fosse Home et à Génissiat (voir tableau 15 de ce chapitre). Cette restriction n'a donc pas été prise en compte.

I.4.2.b- Mode de sélection des individus

D'après T. Hastie et al. (2009), dans le cas où les données sont nombreuses et dans le but d'estimer l'efficacité d'un modèle, il est conseillé de diviser le jeu de données en trois parties, en sélectionnant les individus pour chacune d'elles de manière aléatoire. Une partie est vouée à l'entrainement et permet d'élaborer des modèles. Une seconde partie est associée à la validation afin d'évaluer les erreurs de prédiction pour la sélection du modèle. La troisième partie permet de déterminer l'erreur de généralisation du modèle choisi à partir de différents tests. Selon ces auteurs, il est difficile de définir une règle absolue concernant la quantité d'individus à attribuer à chaque sous-échantillon, mais généralement les parties évoquées ci-dessus pourront représenter respectivement 50, 25 et 25 % du jeu de données.

Dans les travaux présentés ici, deux groupes de données seulement ont été constitués, généralement sélectionnés de manière aléatoire dans l'échantillon d'images constituant les « observés ». Ces deux sous-échantillons représentent chaque fois 50 % de l'échantillon d'observés. Le premier échantillon constitue l'échantillon d'apprentissage. Il sert à élaborer le modèle, tandis que le second échantillon sert de validation, permettant d'estimer l'efficacité du modèle en comparant les classifications à dire d'expert et automatique.

Sélectionner les individus au hasard revient a priori à respecter les proportions des différentes catégories étudiées. S. Begueria (2006), qui travaille sur les risques naturels, affirme que le type de jeux de données qu'il étudie est rarement équilibré et que les proportions des différentes classes peuvent être très différentes. Cela peut avoir un effet important sur les statistiques utilisées pour évaluer les performances du modèle. En effet, si une classe A est surreprésentée par rapport à la classe B, le modèle présentera des taux de bons classements très élevés si toutes les prédictions sont « A » : le peu d'individus « B » qui seront mal classés n'auront que peu d'impact sur l'efficacité du modèle. Or, une classe dont l'effectif est vraiment très faible ne permettra pas de constituer des échantillons équilibrés de taille assez importante pour l'apprentissage ou la validation du modèle. Plutôt que de chercher à équilibrer les échantillons quand ce n'est pas possible, il semble donc intéressant d'adapter les outils d'évaluation.

I.4.3- Réflexion sur la représentativité des échantillons

Selon G. James et al. (2013), afin de constituer un échantillon convenable, il faut que celui-ci soit représentatif de la population dont il est tiré, donc qu'il représente les mêmes proportions en ce qui concerne les différentes classes existantes. La création d'un tel échantillon peut être contraignante si ces proportions ne sont pas connues. Et connaître ces valeurs peut être relativement compliqué dans le cas de populations de très grandes tailles, comme par exemple le jeu de données acquis à Génissiat, qui comprenait environ 150 000 images au moment du dernier déchargement des données. Le capteur étant toujours en service, ce jeu de données ne cesse de grossir. Les proportions, il est toutefois possible de tenter de les représenter correctement en constituant un échantillon assez important. Si le nombre d'éléments sélectionnés aléatoirement est suffisant, toutes les classes, même peu fréquentes, peuvent a priori être représentées. Il s'agit alors de définir quel nombre d'individus correspond à un échantillon « suffisant ».

Dans le cadre de ces travaux, un certain nombre d'images a été sélectionné au hasard pour la constitution des échantillons d'observés : dans le cas de la fosse Home, 25 images acquises à 12h00 ou 13h00 représentent environ 10 % de l'ensemble des images disponibles acquises aux mêmes horaires. Dans ce cas, la proportion du jeu de données constituant l'échantillon de validation est assez importante pour imaginer que les différentes classes soient présentes dans l'échantillon, probablement représentées dans leurs proportions respectives. Dans le cas du jeu de données acquise à Génissiat, 31 images ont été sélectionnées au hasard, mais il a été décidé de compléter l'échantillon de validation avec des images choisies en fonction de certaines propriétés visuelles, dues notamment à certaines conditions météorologiques, ou selon la taille du radeau de bois. Dans le jeu de données global, le bois est a priori moins représenté que l'eau. Cependant, il a été décidé de surreprésenter cette classe, afin d'optimiser la diversité des éléments utilisés lors de la phase d'apprentissage. Il a en effet été estimé que plus l'échantillon d'apprentissage était complet en termes de situations visuelles, plus la prédiction sur cette classe serait bonne.

I.5- Phase de classification à dire d'expert

I.5.1- Nombre de classes à utiliser

Les images de l'échantillon d'observés ont toutes été classées à dire d'expert, c'est-à-dire qu'une modalité a été attribuée manuellement à chaque cellule de la grille d'extraction ou pour chaque objet résultant de la segmentation automatique. Eventuellement en fonction de l'outil de classification automatique employé, mais aussi en fonction des besoins de l'étude et de la pertinence des choix entrepris, la question du nombre de classes souhaité s'est posée. Il est envisageable que plus le nombre de classes est important, plus elles sont susceptibles d'être proches, donc plus la discrimination des éléments appartenant à chacune est délicate. Aussi, plus la classification utilisée est complexe et plus l'étape de classification à dire d'expert est laborieuse. Pour définir les classes à utiliser, il faut donc considérer la question scientifique initiale, le temps de travail disponible pour la phase d'apprentissage et les imprécisions potentielles liées au travail de l'opérateur lors de l'étiquetage, en particulier si les classes sont très proches visuellement.

I.5.1.a- Exemple d'une classification binaire

La procédure de classification automatique a été testée sur les jeux de donnés acquis à Génissiat et à la fosse Home. Dans le cas du jeu de données acquis à Génissiat, la classification a été mise en place selon que la zone étudiée est en eau ou recouverte par le radeau de bois.

Le tableau 18 présente les résultats du modèle de classification automatique élaboré grâce à un *random forest* sur ce jeu de données. 95 images ont été utilisées pour constituer l'échantillon d'observés, sachant que 20 000 individus, qui correspondent aux cellules d'une grille orthogonale de 20 pixels de côté, ont été tirés au hasard pour l'apprentissage du modèle. Tous les autres individus ont servi à la validation du modèle. Les effectifs des deux classes utilisées ainsi que les indices introduits en section I.1.5 de ce chapitre sont présentés dans le tableau 18. Les indices de sensibilité et de spécificité sont tous les deux relativement élevés. Ils atteignent respectivement 0,98 et 0,96. La spécificité légèrement moins bonne traduit une légère tendance du modèle à classer comme du bois les cellules qui correspondent à de l'eau.

Classe	Effectif	Fréquence	Qualité du modèle prédictif		
	55 663	1	Taux de bons classements (%) : 97,22		
Bois	33 150	0,60	Sensibilité : 0,98		
Eau	22 513	0,40	Spécificité : 0,96		

 Tableau 18 : Effectifs des différentes classes utilisées et résultats du modèle prédictif élaboré grâce au random forest sur le jeu de données de Génissiat.

I.5.1.b- Exemple d'une classification plus complexe

Dans le cas des images acquises sur la Saint-Jean, la classification retenue est en revanche beaucoup plus complexe. Le test présenté ci-dessus a été appliqué sur 25 images qui constituent l'échantillon d'observés. La grille orthogonale qui a servi à l'extraction des paramètres descripteurs présente une maille de 32 pixels de côté. Sept classes différentes ont été définies pour l'étude des différents types de glace. Celles-ci sont illustrées dans le chapitre II, par la figure 29, et sont les suivantes :

- eau libre,
- frasil libre,
- frasil semi-consolidé,
- glace rugueuse,
- glace lisse,
- glace de fond,
- neige.

L'une des classes correspond à la glace de fond, qui contrairement aux autres et comme son nom l'indique, est située sous la surface de l'eau. Le tableau 19 présente les effectifs et la fréquence de chaque classe ainsi que les indices de qualité du modèle pour la prédiction de chacune. Le taux global de bons classements atteint grâce à un *random forest* est de 94,56 %, ce qui est aussi bon que les résultats obtenus à Génissiat par exemple (voir tableau 18). Les différentes classes ne sont cependant pas du tout équilibrées, il faut donc se méfier de la significativité de cet indice.

Classe	Effectif	Fréquence	Qualité du modèle prédictif
Eau	10 635	0,26	0,95
Frasil libre	1 845	0,05	0,86
Frasil semi-consolidé	1 757	0,04	0,95
Glace rugueuse	2 456	0,06	0,95
Glace lisse	7 181	0,18	0,91
Glace de fond	38	0,00	1,00
Neige	16 463	0,41	0,97

Tableau 19 : Effectifs des différentes classes utilisées et résultats du modèle prédictif élaboré grâce au random forest sur le jeu de données de la Saint-Jean.

Il faut aussi remarquer que le taux de bons classements correspondant à la glace de fond est de 1, ce qui peut paraître étonnant. Cela ne veut pas forcément dire que cette classe ne subit aucune erreur de classement, mais peut-être plutôt que dans l'échantillon de test de la prédiction, aucun individu de cette classe n'a été sélectionné. Cela paraît possible, vu le faible effectif de cette catégorie. Dans un tel cas, aucune erreur de classement n'est possible.

La qualité de la prédiction du modèle est assez homogène et relativement élevée dans les différentes classes utilisées. La classe « frasil libre » présente toutefois une valeur légèrement moins

bonne que les autres, avec 0,86. Les particules de frasil libre étant souvent des particules isolées et flottant sur l'eau, les cellules correspondant à cette classe sont probablement souvent de type mixte, et comme évoqué dans la section III.2 du chapitre III, les classes mixtes peuvent présenter des valeurs de qualité de la prédiction plus faibles.

1.5.2- Test comparatif de divers modes de gestion des éléments mixtes

En fonction de la précision de la segmentation ou du découpage des images, il est probable que certains éléments soient de type « mixte » et représentent au moins deux classes. Cela survient notamment dans le cas d'un découpage des images selon une grille orthogonale. Il faut donc établir une règle de décision concernant l'étiquetage des cellules mixtes, car ces éléments particuliers présentent a priori des caractéristiques qui les distinguent des classes « pures » et peuvent ainsi contribuer à une certaine imprécision des résultats. W.A. Marcus et al. (2003), R.N. Handcock et al. (2006), B.J. MacVicar et al. (2009) ou encore C.J. Legleiter et M.A. Fonstad (2012) soulignaient notamment le problème du taux de mauvaises détections à cause de ces pixels mixtes, résultant d'une résolution spatiale trop grossière. Afin d'éviter ce genre d'imprécision une solution possible consisterait à créer des classes mixtes pour les individus qui combinent les différentes classes pures étudiées. Cependant, cela multiplie d'autant le nombre de classes et augmente le risque de confusion entre elles, en fonction de l'aspect de l'image et des éléments concernés.

Dans le cas où il est décidé de n'utiliser que des classes pures, la réflexion porte alors sur la règle d'attribution d'une modalité en fonction des proportions des différentes classes présentes. Il faut donc se demander si la cellule doit porter l'étiquette de la classe dominante ou si l'une des classes est plus importante que les autres. Si l'une des classes est plus importante, elle pourrait par exemple être attribuée à une zone si elle y est présente, même en très faible proportion. Plusieurs protocoles de classification à dire d'expert des individus constituant un échantillon d'observés ont été testés, afin de savoir lequel était le plus efficace pour une classification automatique des images. Cette expérience est décrite ci-dessous.

I.5.2.a- Méthodologie mise en place

Lors de la phase de classification à dire d'expert des éléments mixtes, plusieurs choix sont possibles. Plusieurs protocoles ont été comparés pour connaître leur impact sur l'efficacité du modèle prédictif. Pour cela, un échantillon d'observés a été constitué de 95 images. Celles-ci ont été découpées selon une grille orthogonale de 20 pixels de maille. Afin de détecter la surface du radeau de bois de manière automatique, un *random forest* a été effectué à la suite des classifications à dire d'expert. Dans un premier temps, trois classes ont été exploitées. Les deux premières, pures, correspondent à la présence exclusive de bois ou d'eau, la troisième, mixte, correspond à la présence combinée de bois et d'eau. Dans un second temps, deux classes seulement ont été utilisées, en répartissant les cellules mixtes dans les deux classes « bois » et « eau ». Deux seuils de décision ont été testés : d'une part, les cellules étaient classées en « bois » dès lors qu'elles représentaient au moins un quart de bois. D'autre part, le seuil était fixé à 50 %, ce qui consistait à classer la cellule selon la classe dominante. Dans tous les cas, le masque « agrandi » (voir figure 62 du chapitre III) a été appliqué aux images, et parmi toutes les cellules constituant l'échantillon d'observés, 20 000 ont été tirées au hasard pour constituer l'échantillon d'apprentissage. Le reste des cellules a servi à l'échantillon du modèle.

I.5.2.b- Résultats du test

Le tableau 20 présente les résultats des différents modèles établis. Dans un premier temps, les résultats concernant le modèle dit « mixte », qui se base sur l'utilisation d'une troisième classe pour représenter les éléments mixtes, sont étudiés. L'échantillon d'observés est assez peu équilibré, avec une forte dominance de la classe « bois ». La classe mixte représente 11 % des individus, qui se répartissent à peu près équitablement dans les deux classes « eau » et « bois » dans le cas des deux autres modèles testés. Avec 97 %, le taux global de bons classements est légèrement moins bon pour le modèle « mixte » que pour les deux autres modèles. Par contre, les indices de spécificité et de sensibilité sont similaires, voire légèrement meilleurs dans le modèle « mixte ». Cependant, avec 60 %, l'efficacité du modèle pour prédire correctement la classe des éléments mixtes est assez faible en comparaison aux deux autres classes (97 % et 99 % pour le bois et l'eau respectivement).

	Modèle "Mixte"	Modèle "Bois 50 %"	Modèle "Bois 25 %"
Taux de la classe bois (%)	52,43	58,33	59,55
Taux de la classe eau (%)	36,53	41,67	40,45
Taux de la classe mixte (%)	11,03	-	-
Taux de bons classements (%)	93,74	97,21	97,25
Spécificité	0,97	0,96	0,95
Sensibilité	0,99	0,98	0,99
Efficacité de classement pour la classe mixte	0,61	-	-

Tableau 20 : Caractéristiques des trois modèles prédictifs testés : répartition des classes et indices d'efficacité des modèles.
Les deux modèles qui ne reposent que sur deux classes sont à présent comparés. Les résultats obtenus sont très similaires entre eux. La classe « bois » est très légèrement surreprésentée dans le cas du modèle où le seuil de décision appliqué lors de l'étiquetage est de 25 %, ce qui est normal. En revanche, les indices de bons classements sont équivalents.

En figure 69, l'efficacité prédictive des deux modèles est représentée sous forme graphique : le nombre de cellules classées automatiquement en « bois » est comparé avec le nombre d'étiquettes « bois » affectées à dire d'expert. Chaque point du graphique correspond à l'une des images de l'échantillon d'observés. La régression linéaire entre les deux surfaces mais aussi le BIASr (biais relatif) de chaque modèle ont été calculés. Il peut être admis, ici aussi, que les deux modèles sont très similaires : la pente de la régression est très proche de 1 dans les deux cas, et les R² ainsi que les BIASr sont équivalents.



Figure 69 : Nombre de cellules classées automatiquement en fonction du nombre de cellules classées à dire d'expert en « bois », pour les deux modèles qui ne se basent que sur deux classes (« bois » et « eau »), avec des seuils de décisions fixés à 25 % (a) et à 50 % (b) pour l'étiquetage de la classe « bois ».

Le modèle « mixte » n'a pas été inclus dans l'analyse de la figure 69, car pour parvenir à ce type de représentation, il faut établir une règle de décision supplémentaire, qui concerne le taux de remplissage en bois des cellules mixtes : étant mixtes, il n'est pas correct de considérer ces cellules comme complétement vides ou complétement pleines de bois. De nombreuses possibilités sont envisageables : il aurait par exemple été possible de considérer que chaque cellule « mixte » correspondait à la moitié d'une cellule « bois ». Il aurait également été possible de se baser sur le

seuil de décision en considérant selon le cas que les cellules « mixtes » représentaient 25 % ou 50 % d'une cellule « bois ». Cette question n'est pas débattue ici mais elle est évoquée dans le test présenté en section II.2.3.

Les résultats présentés par la figure 69 ne sont que moyennement satisfaisants : en effet, les taux de bons classements sont particulièrement élevés, cependant il s'agit du nombre d'individus classés dans la catégorie « bois ». Si les régressions linéaires obtenues sont si fortes, c'est que chaque cellule de la grille d'extraction des paramètres présente la même valeur. De cette manière, il est considéré que la surface du radeau de bois observé sur les images est proportionnelle à la somme des cellules qui portent l'étiquette « bois ». Ce n'est en réalité pas le cas en raison du point de vue oblique du capteur installé à Génissiat : de ce fait, chaque cellule de la grille ne représente pas la même surface au niveau du plan d'eau. L'étude de l'efficacité des modèles prédictifs doit donc inclure une phase d'orthorectification des images, afin de connaître la surface représentée par chaque cellule des images. Cette phase de traitement des images est présentée dans la section II.2 de ce chapitre, mais pour plus de clarté les résultats de ces modèles sont présentés ci-dessous, en figure 70. Ici encore, les résultats des deux modèles sont très proches, et ces derniers peuvent être considérés comme similaires. Les régressions linéaires, bien que très fortes, sont cependant moins bonnes ici que sur la figure 69, où le nombre de cellules était présenté à la place de la surface constituant le radeau.



Figure 70 : Surface prédite en fonction de la surface observée du radeau de bois, pour les deux modèles qui ne se basent que sur deux classes (« bois » et « eau »), avec des seuils de décisions fixés à 25 % (a) et à 50 % (b) pour l'étiquetage de la classe « bois ».

I.5.2.c- Conclusions et recommandations

Au vu des résultats de la comparaison des trois modèles élaborés avec différentes règles de décision concernant la classification des objets mixtes (tableau 20), il ne semble pas forcément intéressant d'utiliser une troisième classe pour identifier les cellules mixtes. L'efficacité du modèle qui présente une troisième classe semble en effet légèrement moins bonne que celle des autres, et l'indice d'efficacité du modèle pour la détection de la classe « mixte » est clairement moins bon que celui des deux autres classes. Utiliser une classe qui caractérise les éléments mixtes revient donc à favoriser la classification erronée de toute une partie des individus. Il est d'ailleurs possible d'imaginer que la majorité des mauvais classements obtenus dans les modèles n'utilisant que deux classes concernent principalement des éléments mixtes. Il serait intéressant de pouvoir vérifier cette hypothèse. Il est également possible de penser que dans le cas d'une classification plus complexe que celle testée ici, l'utilisation de classes mixtes revient à complexifier d'autant les analyses et à compromettre leur discrimination par le modèle prédictif.

Ces conclusions concernent l'utilisation d'un *random forest* pour le processus de classification automatique. Les résultats comparatifs des modèles seraient potentiellement différents si un autre test statistique avait été utilisé pour réaliser cette classification. Comme l'indiquent G. James et al. (2013), il n'y a pas, a priori, de méthode de classification meilleure qu'une autre, tout dépend du jeu de données étudié. Il est donc possible que pour différents outils statistiques employés, différents comportements soient à adopter face au cas des individus mixtes.

Dans le cadre d'une classification binaire, qui n'utilise que des classes « pures », il faut toutefois intégrer les éléments mixtes et donc définir un seuil de décision lors de la phase de classification à dire d'expert des individus constituant l'échantillon d'observés. D'après les tests effectués, la différence des résultats entre les deux seuils testés n'est pas vraiment significative. Il est donc difficile d'affirmer que l'un ou l'autre des comportements est le plus pertinent. Il semble donc judicieux de suivre le protocole le plus commode. Dans mon cas, définir un seuil à 25 % de bois m'a semblé le plus intéressant. En effet, la décision de classer une cellule en bois était ici plus simple et donc plus rapide, car juger de la classe dominante en cas de proportions à peu près égales posait parfois des « cas de conscience ». D'autre part, les cellules représentant le fond de l'image sont rarement pleines de bois, et même rarement remplies à moitié. Un seuil de décision fixé à 50 % ne permet de prendre en compte le bois de ces cellules que très rarement, alors que le seuil de 25 % permet de les comptabiliser un peu plus souvent, et ainsi de valoriser la présence de bois localisé en rive droite du réservoir.

II- Post-traitement du signal

II.1- Opérations sur les bandes spectrales

II.1.1- Ratios et différences entre bandes spectrales

Calculer un ratio de bandes est une opération relativement simple qui consiste, sur une même image, à calculer le rapport entre les valeurs radiométriques contenues dans deux bandes spectrales différentes. C.J. Legleiter et al. (2004) parvenaient à estimer la bathymétrie des cours d'eau en calculant des ratios entre différentes bandes disponibles dans leurs images hyperspectrales. En fonction de la signature spectrale des éléments observés, l'analyse de ratios plutôt qu'un signal brut peut en effet permettre de faire ressortir certains objets ou certains états des éléments observés. Le même principe peut-être exploité en soustrayant les valeurs contenues dans une bande spectrale à celles d'une autre. La figure 71 illustre par exemple la différence de comportement spectral du bois par rapport à l'eau dans la retenue du barrage de Génissiat, selon qu'il est situé à l'ombre ou au soleil. Les comportements relatifs dans ces trois contextes ne sont pas les mêmes dans les canaux rouge et bleu (respectivement figures 71.a et 71.b). Et la différence entre ces deux bandes permet de délimiter particulièrement bien la zone occupée par le bois localisé au soleil (figures 71.c et 71.d). Les zones d'ombres situées sur l'eau semblent disparaître avec ce traitement (figures 71.c et 71.d). Les ratios de l'une de ces bandes sur l'autre (figures 71.e et 71.f) permettent de faire ressortir certains objets comme par exemple certaines pièces de bois, ou encore des éléments de la structure du barrage, mais semblent moins intéressants pour la discrimination des trois contextes qui sont présentés ici.

Dans le cas d'une analyse automatique des images, ce genre d'opérations intervient généralement juste avant une phase de classification puisque ces nouvelles variables peuvent aussi être utilisées pour la discrimination des pixels de l'image. De tels ratios ont été calculés pour chacune des cellules des grilles orthogonales appliquées aux images de Génissiat. Le ratio (ou la soustraction) de bandes spectrales peut aussi être calculé sur les valeurs moyennes obtenues dans chacun des canaux rouge, vert et bleu. Ces descripteurs ont été pris en compte dans la classification automatique des cellules.

En s'inspirant du même principe, il est également possible de calculer le rapport ou la différence entre les valeurs spectrales contenues dans différentes zones d'une image, et éventuellement d'une même bande spectrale. Ce type d'indice est particulièrement intéressant si l'une des zones subit un traitement particulier et que l'autre sert de témoin : si les conditions de luminosité sont homogènes dans l'image, ou au moins similaires dans les deux zones, il est ainsi possible de comparer l'évolution

171

relative des deux surfaces pour connaître l'impact de ce traitement au niveau de la radiométrie des images. C'est le test mis en place sur le jeu de données acquis à Mollon, et présenté ci-dessous dans la section II.1.2.



Figure 71 : Illustration du comportement spectral du bois situé à l'ombre et au soleil et de l'eau, dans les canaux rouge (a), bleu (b), et dans les ratios de bandes « rouge - bleu » (c) et « bleu - rouge » (d), « rouge/bleu » (e) et « bleu/rouge » (d).

II.1.2- Test de la détection de l'effet d'un balayage sur l'évolution de la radiométrie du fond à Mollon (Ain)

II.1.2.a- Méthodologie

Les acquisitions d'images faites sur l'Ain à Mollon avaient entre autres buts de déterminer l'impact du biofilm chlorophyllien sur la radiométrie des images. Dans ce cadre, huit campagnes de balayage du fond du lit ont été menées sur une zone du lit du cours d'eau. Celle-ci correspond à la moitié de la surface des images acquises par la caméra installée sur ce site. Ce jeu de données a été utilisé pour comprendre de quelle manière un ratio entre les signaux extraits de deux zones, balayée et non balayée, pouvait renseigner sur l'impact des opérations de balayages sur la radiométrie des images.

Pour cela, les images acquises du 30 mars au 31 août 2012 ont été exploitées. Seules les images acquises avant 9h00 ont été utilisées, car il a été mis en évidence que les plus fortes probabilités de voir du fond étaient obtenues pour les images acquises tôt le matin (voir section I.2 du chapitre III). Cela représente un lot de 605 images, acquises à la fréquence du quart d'heure. En cas de luminosité insuffisante, les images sont prises en noir et blanc, et celles-ci n'ont pas été exploitées dans le cadre de cette étude. Cela explique les variations dans le nombre d'images disponibles à chaque date, qui représente en moyenne 5,1 clichés par jour.

La figure 72 présente les deux zones qui correspondent, pour celle de gauche, à une zone témoin qui n'a subi aucun traitement, et pour celle de droite, à la zone balayée. Le tracé de la zone de droite correspond à l'emprise géométrique de la surface qui a été systématiquement balayée au cours des 8 campagnes de balayage. Le tracé de la zone témoin (figure 72) correspond au symétrique de la zone balayée par rapport à la hauteur de l'image.

Les valeurs radiométriques contenues dans les canaux rouge, vert et bleu des images ont été extraites dans ces deux zones (figure 72), puis la moyenne, la médiane et la variance ont été calculées sur ces valeurs. Le rapport (12) entre ces valeurs zonales a ensuite été étudié au cours du temps. L'augmentation de la valeur de ce rapport correspond à une augmentation des valeurs radiométriques dans la zone traitée.

$$Rapport radiométrique = \frac{Radiométrie(zone traitée)}{Radiométrie(zone témoin)}$$
(12)



Figure 72 : Zones d'extraction des paramètres dans les images acquises à Mollon : zone balayée (à droite) et sa symétrique, non balayée (à gauche).

L'évolution de cette valeur au cours du temps a été représentée sous forme de séries temporelles. Afin de localiser les campagnes de balayage pour faciliter l'interprétation des résultats, leurs dates ont été mises en évidence sur ces graphiques. D'autre part, chacune des 8 campagnes de balayage a été étudiée indépendamment. Le rapport radiométrique calculé pour le canal rouge a été représenté relativement à la date de balayage : entre cinq jours avant et 10 jours après l'intervention.

II.1.2.b- Résultats du test

Sur la figure 73 l'évolution du rapport entre les médianes calculées dans chaque canal est présentée. Dans presque tous les cas, à la suite d'une campagne de balayage (représentée par un trait vertical), une réaction du rapport radiométrique est observée, qui se traduit par une augmentation des valeurs, principalement dans les canaux rouge et vert, dans la zone balayée. Ces résultats sont surtout très nets dans le cas des balayages des 9 et 16 mai, et du 12 juillet. A l'occasion de ces balayages, il est intéressant de noter que les valeurs dans le canal bleu, qui sont habituellement supérieures aux deux autres, deviennent inférieures à ces dernières. Cependant, il est aussi intéressant de remarquer que ces trois dates en particulier correspondent à des baisses importantes du niveau d'eau sous la caméra : outre l'effet du balayage, cette réaction au niveau du rapport radiométrique correspond à des variations de hauteurs d'eau, et il est difficile de distinguer les effets de ces deux facteurs.

La figure 74 présente les mêmes résultats, pour le canal rouge uniquement, et pour chaque campagne de balayage prise individuellement. L'évolution de ce rapport entre les 5 jours précédant et les 10 jours suivant la date du balayage y est présentée. Chaque point correspond à une image donnée, le nombre de clichés acquis par jour étant variable. Dans tous les cas sauf pour deux campagnes de balayage (le 6 avril et le 2 mai), une nette augmentation du rapport radiométrique survient après le balayage. Il se produit donc une augmentation des valeurs dans la zone balayée, qui a tendance à s'éclaircir par rapport à la zone témoin. Cependant, dans tous les cas, l'effet du balayage n'est perceptible que durant cinq jours au maximum : après cette période, la valeur moyenne du rapport retrouve sa valeur initiale. Ici encore, il est intéressant de comparer ces évolutions du rapport radiométrique à celles de la hauteur d'eau visible sur les images. Il semble que, comme lors de l'analyse de la figure 73, il soit possible de relier ces deux variables : les clichés relatifs aux deux dates où aucun effet du brossage de la zone traitée n'est perceptible correspondent à des niveaux d'eau relativement importants. En particulier le 2 mai, où le signal ne semble pas évoluer du tout, les débits sont à la fois bien supérieurs au module de l'Ain et peu variables durant quatre jours. Le 2 mai au contraire, la réaction du rapport radiométrique est claire, mais uniquement après deux jours, lorsque les hauteurs d'eau sont inférieures à celle du module de l'Ain. C'est aussi le cas pour toutes les dates postérieures à celle-ci.

Dans les deux cas où l'effet du balayage n'est pas perceptible, la présence du biofilm dans la zone d'étude peut être questionnée, ainsi que son type (chlorophyllien ou non), étant donné que ce sont les deux dates les plus précoces dans l'année. Il est aussi envisageable qu'une hauteur d'eau trop importante sous la caméra empêche de voir le fond du cours d'eau : les figures 73 et 74 indiquent en effet que le balayage du 2 mai a été réalisé en période de hautes eaux. Des conditions de hautes eaux peuvent également être reliées à des conditions météorologiques défavorables, qui entraînent une luminosité limitée, et donc une qualité d'images qui permet moins bien de distinguer le fond du cours d'eau, comme cela a été discuté dans la section II.2 du chapitre III.

175



Figure 73 : Rapport entre les valeurs radiométriques médianes extraites de la zone balayée et de la zone non balayée au cours du temps, dans les canaux rouge, vert et bleu. Les lignes verticales représentent les campagnes de balayage. Comparaison avec les hauteurs d'eau calculées sous la caméra (en bleu clair).



Figure 74 : Rapport entre les valeurs radiométriques médianes extraites de la zone balayée et de la zone non balayée, dans le canal rouge, relativement à chaque campagne de balayage. Comparaison avec les hauteurs d'eau calculées sous la caméra (en bleu clair) – la ligne tiretée représente la hauteur d'eau équivalente au module de l'Ain.

II.1.2.c- Conclusions du test et recommandations

Les résultats de ce test sont intéressants mais ils ne permettent d'affirmer que partiellement l'utilité de ce rapport radiométrique pour évaluer l'impact de la présence de biofilm sur la radiométrie des images acquises à Mollon. Ainsi, il semble que l'utilisation de cet indice soit largement soumise à des conditions d'observation particulière : une hauteur d'eau limitée semble notamment nécessaire. D'après les observations réalisées, ce seuil de hauteur d'eau pourrait correspondre au module de la rivière, mais il s'agit plus certainement de la hauteur limite en deçà de laquelle le fond est visible. D'après la section II.2 du chapitre III, cette limite pourrait donc être variable en fonction de la luminosité dans la scène. Néanmoins, lorsque les conditions sont propices à l'observation du fond du lit, il semble que cet indice permette de traduire une différenciation du comportement radiométrique des deux zones étudiées. Le balayage de la zone traitée aurait bien un effet sur la radiométrie des images, en augmentant les valeurs dans cette dernière. Cela pourrait résulter de l'arrachement d'un biofilm de type chlorophyllien.

Ces conclusions permettent d'avancer que, comme évoqué en section I.3.2 du chapitre II, l'observation d'un phénomène ou d'un objet localisé sur le fond du cours d'eau est soumise à la capacité de l'œil à distinguer le fond du cours d'eau. Parmi les nombreux facteurs contraignant cette capacité, la hauteur d'eau apparaît comme la principale. Définir les conditions qui permettent d'observer le fond d'un cours d'eau (qui pourraient être appelées « fenêtres de visibilité ») peut être judicieux afin de pouvoir sélectionner les images à traiter. La qualité des traitements et analyses est en effet a priori liée à un échantillonnage cohérent des images, qui correspondrait donc à ces conditions optimales d'observation.

II.2- Orthorectification des images

II.2.1- Calcul de la résolution spatiale des images suite à l'orthorectification

Sur les images qui sont acquises au niveau du sol ou à faible altitude, les prises de vue sont généralement obliques, ce qui implique que tous les pixels de l'image ne représentent pas la même surface au sol. Afin de quantifier précisément la surface couverte par un phénomène ou bien celle occupée par un objet, une phase d'orthorectification des images est nécessaire. Cela permet d'attribuer au niveau de chaque sous-unité de l'image (pixel ou objet résultant de la segmentation de l'image), une estimation de sa surface réelle. Pour cela, il faut disposer d'une équivalence entre les coordonnées de certains points dans l'image et leur géolocalisation sur le terrain. L'orthorectification consiste à corriger l'image en la distordant, pour attribuer des distances entre les pixels qui soient proportionnelles à celles de la réalité terrain. Une nouvelle résolution spatiale de l'image peut être calculée à la suite de cette opération, ce qui permet d'estimer la précision des informations tirées de

l'analyse des images. D'après W. Bertoldi et al. (2012), la résolution spatiale des images rectifiées étant dépendante de l'emprise du pixel le plus large (donc le plus éloigné de la caméra), il vaut donc mieux limiter l'étendue de la zone étudiée.

Le processus de « calibration » des caméras, qui n'est pas abordée plus précisément dans ces travaux, se rapproche par certains aspects de l'orthorectification des images. Une phase de calibration du capteur utilisé permet de corriger les distorsions des images induites par les imperfections de la lentille du système optique. Cela permet d'améliorer la relation entre la surface observée sur les images et la surface réelle représentée par chaque pixel. Cette opération semble particulièrement intéressante dans le cas d'images acquises de manière verticale au sol, où les surfaces représentées par chaque pixel sont déjà très similaires. Au contraire de l'orthorectification, cette procédure n'a pas été testée dans le cadre de ces travaux de thèse. Mais dans le cas d'images obliques, il semble que face aux distorsions liées au point de vue, les distorsions induites par le capteur lui-même soient négligeables.

II.2.2- Test illustant le lien entre répartition de la taille des pixels et forme de la ROI

II.2.2.a- Méthodologie

Afin de pouvoir calculer des surfaces sur les images acquises sur le Rhône à Génissiat et sur celles acquises sur l'Yzeron à Francheville, une phase d'orthorectification des données y a été réalisée. Dans le cas du jeu de données du Rhône, l'orthorectification des images permet de suivre la surface du radeau de bois détectée au cours du temps par classification automatique. Dans le cas de l'Yzeron, la finalité de l'opération serait de faire de même avec les surfaces ensablées, mais ce point dans les traitements du jeu de données n'a pas été atteint. L'orthorectification de ces images a toutefois été menée, à des fins de comparaison avec les résultats de Génissiat : le but est d'étudier, en fonction de la forme de la ROI, la distribution des tailles de pixels. La conception des installations et l'angle de visée des capteurs impliquent en effet une distorsion des clichés plus ou moins importante, qui est illustrée par ce test.

Avec les autorisations des gestionnaires du barrage de Génissiat, l'accès à la retenue sur une embarcation de petite taille a permis d'acquérir une série de points de contrôle (*Ground Control Points* : GCP). Un lot de points a été enregistré au DGPS, chacun ayant été photographié simultanément avec la caméra en place (voir figure 75.a). Cela a permis de corréler les deux systèmes de coordonnées : géographique et image. Les figures 75.b et 75.c illustrent ce lien entre les deux systèmes. Une dizaine de points, qui y figurent en bleu, a été utilisée pour le processus d'orthorectification.

179

Le logiciel Fudaa-LSPIV (téléchargeable sur forge.irstea.fr) a été utilisé pour orthorectifier les images grâce à ces données. Ce logiciel a été développé par Irstea pour réaliser des estimations de vitesses de courant par LSPIV. Il comprend plusieurs modules, dont un pour l'orthorectification, un pour les analyses LSPIV et plusieurs pour l'exploitation et la représentation des résultats. Seules les premières fonctions ont été exploitées. Sur les images acquises à Génissiat, la classification automatique ayant été réalisée sur une grille orthogonale d'une maille de 20 pixels, il a été choisi de calculer la surface au sol représentée par chaque cellule de cette grille. Dans le cadre d'une chaîne de traitement globale des images (voir figure 11 du chapitre II), il est commode d'attribuer une surface directement aux objets qui sont classés automatiquement. De plus, il est beaucoup plus rapide de calculer la taille de ces objets (au nombre de 768 dans ici) que celle de chaque pixel individuel de l'image (au nombre de 307 200).

Autant d'images que de cellules de la grille ont été générées, aux dimensions des images produites par la caméra et en noir et blanc : chaque image représente l'une des cellules de la grille en blanc, le reste de l'image étant noir. Après l'orthorectification, il a été considéré que tous les pixels blancs ou gris correspondaient à la cellule en question. La surface correspondante à chacune a été estimée en additionnant les surfaces de tous ces pixels, proportionnellement à leur niveau de gris, selon l'équation (13) :

$$Sgc = R^2 \sum_{j=0}^{j=M} \sum_{i=0}^{i=N} Cij$$
 (13)

avec : S_{gc} la surface au sol d'une cellule ;

i et *j* sont les indices de localisation du pixel étudié parmi les *M* lignes et *N* colonnes respectivement de l'image ;

R la résolution d'un pixel après l'orthorectification (ici : 0,7 m, valeur fournie par le logiciel) ;

Cij est le niveau de gris du pixel localisé en (i ; j) (avec 0 = noir et 1 = blanc, toutes les valeurs situées entre les deux correspondant aux différents niveaux de gris existant.

Dans le cas des images acquises sur l'Yzeron, le même processus d'orthorectification a été employé. Les acquisitions des GCP sur le site de Francheville ont été faites au DGPS également, mais l'Yzeron étant de taille restreinte et de faible profondeur, la campagne d'acquisition a pu être menée à pied, directement dans le lit du cours d'eau (voir figure 76.a). Une série de repères localisables sur les images de la caméra en place (figure 76) a été placée dans le lit et sur les berges, puis repérée au DGPS. La méthode exposée ci-dessus a été appliquée, la taille des cellules carrées correspondant à la grille d'une maille de 32 pixels.





b)



Figure 75 : Acquisition de points au DGPS dans la retenue de Génissiat (a). Ensemble despoints disponibles dans le système image (b) et dans le système géographique (c).Les points surlignés en bleu sont ceux retenus pour le processus d'orthorectification.



Figure 76 : Acquisition de points au DGPS sur le site de Francheville sur l'Yzeron : localisation de l'ensemble des repères utilisés sur l'image oblique (a) et sur une vue verticale (b).

II.2.2.b- Résultats du test

Les résultats qualitatifs du processus d'orthorectification appliqué aux images acquises à Génissiat et à Francheville sont présentés dans la figure 77. La correspondance entre les images brutes et orthorectifiées y est illustrée. La localisation des GCP sur les images brutes (figures 77.a et 77.c) permet de mettre en évidence la distorsion que subissent les images lors du processus : l'étirement que ces éléments subissent au cours de la correction est clairement visible (figures 77.b et 77.d). Les deux zones d'étude n'ont pas du tout la même taille ni la même forme dans les deux cas. La portion observée de la retenue du barrage de Génissiat représente environ 35 000 m² alors que sur l'Yzeron elle ne représente que 250 m² environ. Respectivement, les résolutions moyennes des deux images après orthorectification sont de 0,7 m et de 0,07 m (cette différence est due à la surface observée mais également à la résolution des images qui est différente à l'origine). Le tableau 21

résume les valeurs caractéristiques de la distribution des tailles de cellules des grilles utilisées dans les deux cas. La taille de la ROI correspond à la somme des tailles de toutes les cellules contenues dans la ROI.



Figure 77 : Illustration du processus d'orthorectification appliqué aux images acquises à Génissiat (a) et (b) et à Francheville (c) et (d) : images brutes (a) et (c) et images orthorectifiées (b) et (d).

		Francheville	Génissiat
Résolution (m)		0,06	0,70
Taille de la ROI (m ²)		234,12	10 609,52
Distribution des tailles (m²)	Maximum	1,50	327,30
	D75	0,18	11,85
	D50	0,07	2,89
	D25	0,04	1,05
	Minimum	0,00	0,00

Tableau 21 : Caractéristiques de l'orthorectification appliquée à Francheville et à Génissiat : résolution et tailles des cellules.

La figure 78 présente les fréquences cumulées des cellules contenues dans les ROI des deux images en fonction de leur taille relative à celle de la ROI. Cela reflète aussi la distribution des tailles des pixels contenus dans l'image, mais en étudiant des tailles relatives il est possible de confronter les deux courbes sur un même graphique. Les deux courbes présentent la même tendance, à savoir que de très nombreuses cellules présentent une taille très limitée, et ne représentent qu'une toute petite partie de la ROI. Au contraire, une faible part des cellules couvre une partie très importante de la surface représentée par la ROI. Dans le cas de Génissiat par exemple, environ 10 % des cellules les plus grandes recouvrent à peu près 60 % de la zone. Cependant à Francheville cette tendance est plus douce et les tailles de pixels sont réparties de manière un peu plus équilibrée : les 10 % des cellules dont la taille est la plus importante recouvrent seulement 40 % de la zone étudiée. Cette différence est liée à la configuration des installations, qui n'est pas la même dans les deux cas. En effet, par rapport au site de Francheville, la prise de vue à Génissiat est beaucoup plus oblique car la caméra est plus basse par rapport à la surface observée. De plus, à Francheville la ROI est beaucoup moins large et l'image rectifiée est de forme plus rectangulaire qu'à Génissiat. Ceci implique qu'entre les deux images, le nombre de pixels de grande taille est proportionnellement plus important à Génissiat.



Figure 78 : Fréquence cumulée des cellules de la ROI en fonction de la taille relative cumulée des cellules dans les images de Génissiat et de Francheville, après le processus d'orthorectification.

II.2.2.c- Conclusions du test et recommandations

Les deux cas traités présentent des différences très importantes, que ce soit au niveau de la résolution des images, de la taille globale de la ROI, ou de la distribution des tailles des cellules. A la base, ces deux jeux de données présentent déjà des différences très importantes : au niveau du nombre de pixels (300 000 dans le cas de Génissiat, 3 000 000 dans le cas de Francheville), car les dimensions des images sont différentes, ou au niveau de la distance moyenne à la cible, ce qui induit des résolutions d'images très différentes. Les surfaces représentées par ces deux ROI sont également sans commune mesure.

Cependant, les formes des deux distributions ont tout de même été comparées. Comme le montre la figure 78, des deux distributions celle de Génissiat est la moins équilibrée. Les différences entre les tailles minimales et maximales, comme les différences d'effectifs dans les différentes classes de tailles y sont beaucoup plus importantes qu'à Francheville. Cela est attribué à la différence de forme entre les deux ROI, ainsi qu'à la différence de configuration des deux systèmes d'acquisition. En effet, la distance maximale des cellules à la caméra est largement réduite dans le cas de Francheville, ainsi que le rapport entre cette distance et la hauteur de la caméra par rapport à la surface de l'eau.

Les déséquilibres entre les tailles des pixels de l'image rectifiée impliquent une résolution très variable dans les différentes cellules, dont un aspect des éléments observés tout aussi variable, mais

également une précision des résultats du traitement des images limitée dans les zones de l'image éloignées de la caméra. C'est ce qui est montré en section III.1.2 du chapitre III. Afin de limiter au maximum ces déséquilibres, il semble bon de limiter l'obliquité de l'angle de vue du capteur lors de l'installation, en particulier si la zone à étudier est assez large. Il est aussi essentiel de toujours positionner la caméra de telle manière que la zone d'intérêt soit toujours au premier plan afin de bénéficier des meilleurs résultats.

II.2.3- Test illustrant l'impact de la classification des éléments mixtes dans l'estimation des surfaces

L'orthorectification des images implique des déformations plus ou moins importantes selon la taille et la forme de la ROI, comme il en a été discuté dans la section précédente. Plus l'angle de vue du capteur est oblique et plus les pixels localisés dans le fond de l'image présentent une taille importante : leur impact en termes de surface est donc d'autant plus important au niveau des résultats du traitement des images. Dans le cadre d'une classification automatique, il est en effet primordial que ces éléments de grande taille soient classés correctement, car la précision des surfaces globales détectées en dépend. Il en va de même pour ce qui concerne la gestion des éléments mixtes dans l'image : dans le cas des traitements menés sur les images de Génissiat, considérer une cellule à moitié remplie de bois comme complétement remplie revient à surestimer d'autant la surface du radeau. Un test a été mis en place afin d'illustrer cela.

II.2.3.a- Méthodologie

Dans la section I.5.2, il a été discuté des règles de décision concernant la classification à dire d'expert des éléments mixtes dans le cadre des traitements appliqués au jeu de données de Génissiat. La problématique du taux de remplissage des objets mixtes, qui affecte les surfaces estimées par classification automatique des images, a également été évoquée (voir section I.5.2). En effet, les cellules mixtes ne sont par définition pas entièrement recouvertes d'eau ou de bois, mais présentent les deux classes à la fois. La quantité de bois représentée dans ces éléments est variable selon la proportion des classes visibles, mais également en fonction de la taille de la cellule concernée.

Afin de se rendre compte de l'impact des cellules mixtes dans l'estimation de la surface du radeau de bois, de montrer l'effet de leur localisation dans l'image, et de se rendre compte de l'importance de la règle de décision dont il est question, la surface représentée par ces éléments a été estimée. Cela permet également d'identifier les imprécisions potentielles des résultats des traitements effectués. Pour cela, deux images ont été considérées, représentant pour l'une un radeau de taille relativement petite (observé le 4 février 2011, voir figure 79.a), et pour l'autre un

186

radeau de taille relativement grande (observé le 9 aout 2013, voir figure 79.b). Sur les deux images, le bois est concentré du côté de la caméra, de manière à ce que toutes les cellules mixtes dessinent une ligne continue. Ces images ont été « découpées » selon une grille de 20 pixels de côté afin de les classer à dire d'expert. Après une phase d'orthorectification, la taille de chaque cellule de la grille est connue, ce qui a permis d'estimer la surface observée du radeau de bois. Les éléments mixtes ont été considérés de différentes manières : ceux-ci ont d'abord été considérés comme représentant 0 % de bois, puis leur surface a été considérée comme recouverte successivement de 25 %, 50 %, 75 % et enfin 100 % de bois. Les surfaces globales des radeaux ont ainsi été comparées.



Figure 79 : Images représentant un radeau (a) de petite taille, observé le 04/02/2011 et (b) de grande taille, observé le 09/08/2013. Ces images sont utilisées pour comparer les tailles estimées en fonction des la gestion des cellules mixtes.

II.2.3.b- Résultats du test

Le tableau 22 synthétise le nombre de cellules attribuées à chaque classe dans les deux cas, le nombre total de cellules étant de 768. Le nombre de cellules mixtes est presque le même dans les deux cas (26 cellules pour le petit radeau de bois, 27 pour le grand), mais il équivaut à 10 % des cellules du petit radeau et à 5 % seulement de celles du grand radeau (voir tableau 22). Le tableau 23 compare les valeurs de tailles des deux radeaux en fonction de la proportion de bois considérée dans les cellules à l'interface entre le bois et l'eau : la surface de bois a été estimée avec des cellules mixtes étant considérées comme vides ou complétement pleines de bois, remplies au quart, à la moitié et aux trois guarts.

ois	257	536
ixte	27	26
au	306	25
	ixte au	ixte 27 Eau 306

Tableau 22 : Nombre de cellules de bois, d'eau et mixtes dans les deux images présentées en figure 79.

Proportion de bois dans les cellules mixtes (%)	Surface totale / pourcentage de la taille maximale (petit radeau, m² / %)	Surface totale / pourcentage de la taille maximale (grand radeau, m² / %)	Rapport de taille entre petit et grand radeau (%)
100	500 / <i>100</i>	5000 / <i>100</i>	10,0
75	472 / 94	4444 / 89	10,6
50	444 / 88	3887 / <i>78</i>	11,4
25	415 / 83	3331 / 67	12,5
0	387 / 77	2774 / 55	13,9

Tableau 23 : Surfaces et pourcentages de la taille maximale estimés en fonction de la proportion de bois considérée dans les cellules mixtes situées à l'interface eau/bois, sur un petit et un grand radeau de bois. Rapport de taille entre le petit et le grand radeau en fonction de ce taux de remplissage.

Le tableau 23 montre que le taux de remplissage appliqué aux cellules mixtes a un impact considérable sur la surface totale estimée : sur un radeau de bois de petite taille, dont la surface totale est concentrée près de la caméra, la surface estimée en considérant les éléments mixtes comme vides de bois correspond à 77 % de la taille du radeau estimée en considérant que ces éléments mixtes sont pleins de bois. En d'autres termes, en considérant les éléments mixtes comme complétement pleins à complétement vides, la surface estimée est réduite de presque un quart, ce qui est non négligeable. Mais pour un radeau de grande taille, également concentré près de la caméra, cette réduction atteint presque la moitié de la surface estimée maximale (la surface passe de 100 à 55 %), ce qui est vraiment très important. Cela montre l'importance de considérer avec soin

le taux de remplissage des éléments mixtes, que ce soit lors de la classification à dire d'expert ou au cours de l'estimation des surfaces prédites par classification automatique.

Quand les cellules mixtes sont considérées comme vides de bois, la surface du petit raft représente environ 15 % de celle du grand raft, et ce rapport n'est plus que de 10 % si les cellules mixtes sont considérées comme pleines. La relation entre les variations des deux surfaces n'est donc pas proportionnelle, et cela montre l'effet de la position des cellules dans l'image sur l'imprécision de l'estimation de la taille : plus les cellules concernées sont éloignées de la caméra, plus leur taille est élevée donc plus leur rôle dans l'estimation des surfaces est important.

II.2.3.c- Conclusion et recommandations

Avec ce test, l'effet des éléments mixtes dans l'estimation des surfaces orthorectifiées a été estimé en fonction de leur position par rapport à la caméra. Mais il n'a pas été fait mention du meilleur comportement à adopter au sujet du taux de remplissage. Lors de la classification automatique des images, si une classe de type « mixte » est exploitée, il faut pourtant considérer avec soin le pourcentage des différentes classes que les cellules concernées sont censées représenter. L'hypothèse qu'une répartition équitable entre ces classes serait un bon compromis peut être émise. De plus, en agissant ainsi, il est clair que dans chaque élément, les classes seront soit surestimées soit sous-estimées. Mais il est aussi possible d'imaginer qu'entre tous les éléments mixtes, ces sur- ou sous-estimations s'équilibrent et s'annulent. Des analyses complémentaires seraient nécessaires pour vérifier ce qu'il en est réellement.

Sans pouvoir formuler de préconisation particulière à ce niveau, il peut être rappelé ici encore que l'angle du capteur influence la qualité des résultats. Le limiter permet de conserver des tailles de pixels réduites, et donc de minimiser l'imprécision des résultats lors de la phase de post-traitement du signal.

II.2.4- Test illustrant l'importance de la résolution des données pour la qualité des résultats

Plus la taille des cellules de la grille d'extraction est grande, plus la délimitation des objets dans l'image est imprécise. De plus, avec un angle de vue des capteurs oblique, les objets qui apparaissent dans le fond des images sont beaucoup plus petits que ceux situés au premier plan. Comme la classification des cellules est moins précise dans le fond de la ROI, il semble que l'utilisation d'une taille de cellule réduite pour les objets situés dans cette zone serait judicieuse. En effet, l'impact que la présence d'éléments mixtes peut avoir sur la précision des résultats de la classification automatique des images a déjà été évoqué. Il semble donc judicieux de les limiter en nombre dans le jeu de données utilisé, et limiter la résolution des données (c'est-à-dire éventuellement celle des images, mais également la taille des cellules résultant d'un découpage par grille comme ici) est une solution potentielle. Un test a été mis en place pour vérifier cela.

II.2.4.a- Méthodologie

Sur le jeu de données acquis à Génissiat, l'utilisation d'une grille comprenant différentes tailles de cellules en fonction de leur localisation dans l'image a été testé pour comprendre si cela permettait de préciser les résultats. Notamment, le but était de tester si la réduction de la taille des objets localisés dans le fond de l'image permettait d'augmenter la qualité des résultats de la classification automatique des images. Pour cela, un test basé sur un jeu de 62 images a été réalisé. Ces images ont été choisies au hasard pour la moitié d'entre elles, et les 31 autres ont été sélectionnées pour leurs caractéristiques visuelles. Deux procédures de classification automatique y ont été réalisées grâce au *random forest*, suite à l'extraction des paramètres descripteurs selon deux types de grilles orthogonales. Dans un premier temps, la grille présentée en figure 68.a dans ce chapitre a été appliquée : chaque cellule est carrée et mesure 20 pixels de côté. Dans un second temps, les cellules situées dans la zone la plus lointaine de la caméra ont été subdivisées (voir figure 80). Cette zone correspond également à la zone affectée par les reflets de la végétation riveraine (voir figure 80). Ces cellules de 10 pixels de côté ont été reclassées à dire d'expert et un nouveau modèle statistique a été élaboré.



Figure 80 : Grille d'extraction utilisée sur les images acquises à Génissiat, avec subdivision des cellules les plus éloignées de la caméra. En rose : la zone de battement de la limite des reflets de la végétation riveraine.

II.2.4.b- Résultats du test

Les résultats des deux modèles prédictifs élaborés grâce à un *random forest* sont présentés dans le tableau 24. Même s'il semble que ceux obtenus grâce à une grille d'extraction de taille homogène soient légèrement meilleurs qu'avec une grille possédant deux tailles de cellules, ils ne sont pas fondamentalement différents. Il n'est pas possible de conclure ici que l'utilisation d'une maille plus fine dans les zones les plus lointaines de l'image soit utile pour améliorer la précision des prédictions du modèle. Au contraire, cela ne semble pas vraiment souhaitable puisque les résultats sont légèrement moins bons et que la classification à dire d'expert est d'autant plus longue que les cellules à étiqueter sont nombreuses.

	ROI unique	ROI séparée en deux zones
Taux de bons classements (%)	95,25	96,37
Spécificité	0,97	0,96
Sensibilité	0,93	0,97
BIASr (%)	108,69	10,90

Tableau 24 : Résultats des modèles prédictifs réalisés avec un random forest sur deux types de grilles d'extraction des paramètres descripteurs.

Cependant, l'observation de la figure 81 montre clairement une différence de qualité entre les deux modèles. Cette figure présente les surfaces réelles du radeau de bois. Il est clair que le modèle élaboré avec une subdivision des cellules localisées dans la zone la plus lointaine du capteur permet de prédire les surfaces avec une précision bien supérieure (R² = 0,93 et le BIASr est seulement de 11 % dans ce cas, contre R² = 0,07 et BIASr = 109 % avec l'utilisation d'une seule taille de cellules). Dans le cas de l'utilisation de deux tailles de cellules différentes, d'une part la corrélation entre les surfaces prédites et observées est bien meilleure, et d'autre part les surfaces en question sont limitées : cette réévaluation des surfaces montre encore l'impact des cellules de type mixte. Leur nombre est sans doute considérablement réduit avec l'utilisation de tailles de cellules inférieures et les surfaces classées en « bois » sont donc bien moindres. Sans pour autant qu'il y ait plus de mauvais classements dans un cas que dans l'autre, l'étiquetage des cellules avec une différenciation de taille reflète la réalité de manière plus précise.



Figure 81 : Surface prédite en fonction de la surface observée, avec une taille de cellules homogène (a) et différenciée (b).

II.2.4.c- Conclusions et recommandations

Malgré un temps de préparation des données plus important dans le cas d'une réduction de la taille des cellules localisées à l'arrière-plan des images, cette solution semble être efficace pour tirer au mieux parti des informations contenues dans une ROI la plus large possible. S'il n'est pas possible de limiter la zone d'étude à une surface où la résolution des images est assez importante, il est donc possible d'adapter l'échelle d'extraction des paramètres descripteurs de l'image, en vue de sa classification.

Les limites qu'induit l'angle de prise de vue du capteur sur la précision des résultats sont encore mises en évidence ici. Il est donc judicieux de limiter autant que possible l'existence de cellules dans lesquelles plusieurs classes sont représentées. Pour cela, une réflexion sur l'échelle adéquate doit être menée avant l'étape de segmentation des images. Il y a un compromis à opérer entre une taille de cellules suffisante pour laisser apparaître certains aspects de l'image, notamment la texture, et une taille limitée afin de réduire au minimum le nombre d'objets mixtes dans les analyses.

II.3- Conversion des surfaces occupées par un objet en volume ou en masse

II.3.1- Principe de la conversion

Les informations brutes extraites des images correspondent à des valeurs ou statistiques radiométriques. Une phase de classification permet d'interpréter ces valeurs pour travailler sur des catégories plutôt que sur une information quantitative. Cela permet par exemple de distinguer les éléments observés, éventuellement de les localiser dans l'image, et potentiellement de quantifier la surface occupée par chacun. Il peut être intéressant de quantifier des objets en termes volumiques ou massiques par exemple, car ce sont des grandeurs qui peuvent avoir plus de sens pour l'interprétation des résultats que la seule surface occupée par l'objet d'intérêt.

Pour parvenir à cela, il faut disposer d'un certain nombre de valeurs de comparaison afin de pouvoir relier quelques valeurs observées sur les images à leur équivalent dans l'unité d'intérêt. Le plus grand nombre de couples de valeurs est souhaitable et dans la mesure du possible, la gamme la plus large doit être représentée. Grâce à cela, il est possible de tracer une « courbe d'étalonnage » afin de définir une loi statistique reliant les deux grandeurs. En appliquant le modèle défini à partir de cette comparaison, l'information extraite des images au cours du temps peut ainsi être transformée dans une valeur quantitative équivalente.

III.3.2- Exemple de la conversion des surfaces de bois en volumes de bois prédits sur les images acquises à Génissiat

III.3.2.a- Méthodologie de conversion des données

Dans le cadre des traitements appliqués au jeu de données acquis à Génissiat, après une phase de classification automatique (section I.1 de ce chapitre) et suite à l'application du processus d'orthorectification décrit ci-dessus (section II.2), chaque image est associée à une surface de bois prédite. Il a alors été testé s'il était possible d'exprimer les quantités de bois présentes dans le réservoir du barrage au cours du temps, en termes de volumes plutôt que de surfaces.

Au cours de la période d'étude (début 2011 - mi 2015), 11 opérations d'extraction mécanique du bois contenu dans le réservoir de Génissiat ont été enregistrées (14 ont réellement eu lieu, mais les images n'existent pas pour trois d'entre elles). Les prises de vue faites à 13h00 la veille du début de chacune d'entre elle ont été sélectionnées. Afin de connaître la surface de bois occupée dans chaque image, celle-ci a été digitalisée manuellement, le tracé précis des radeaux ayant été digitalisé dans l'ensemble de l'image (sans application de masque). La surface de chaque radeau ainsi délimitée a été représentée en blanc et le reste de l'image en noir, afin d'appliquer le processus d'orthorectification décrit en section 1.2.2.a de ce chapitre. La figure 82 illustre le processus de mesure appliqué à cette opération de conversion.

193



Figure 82 : Mesure de la surface des radeaux de bois présents dans la retenue de Génissiat à la veille de chaque extraction mécanique : image brute (a), digitalisation manuelle du radeau (b) et orthorectification (c).

Lors de chaque campagne d'extraction, les quantités de DIB (Déchets Industriels Banaux) extraites ont été pesées précisément par l'entreprise en charge des opérations (voir tableau 25). Puis la CNR a estimé les volumes de bois correspondant, en fonction du nombre de camions de bois emportés par l'entreprise (tableau 25). La loi statistique reliant ces deux types de valeurs a permis de vérifier la précision des estimations réalisées par la CNR. En effet, la valeur de DIB étant mesurée, elle est a priori plus précise que celle de bois, qui est estimée. Cependant, c'est celle qui concerne le bois, et non pas les DIB, qui est réellement intéressante. Ce sont donc les deux types de valeurs qui ont été comparés pour savoir s'il était possible d'exploiter directement le volume de bois. La relation qui relie ces deux grandeurs a également permis d'estimer les valeurs de masse de bois extraite du réservoir pour deux des dates pour lesquelles cette information était manquante (voir tableau 25). Afin de donner à cette loi un sens physique et d'augmenter la précision des deux valeurs estimées, elle a été forcée à passer par l'origine, car il semble logique que pour une extraction ne produisant

pas de bois, il n'y ait ni DIB pesé ni bois estimé. La valeur extrême qui correspond à la crue de début mai 2015 n'a pas été prise en compte, pour un meilleur ajustement du modèle sur les valeurs faibles.

Campagne d'extraction		Masse de DIB extraits	Volume de bois estimé par la	Surface du
Début	Fin	(tonnes)	CNR (m ³)	raft (m²)
15/05/2015	10/07/2015	10,16	3 674	35 239,77
04/11/2014	14/11/2014	2,50	480	_
21/07/2014	30/07/2014	3,34	560	3 015,96
13/02/2014	17/02/2014	0,56	117 *	1 428,47
07/01/2014	14/01/2014	1,74	364 *	2 228,43
28/10/2013	20/11/2013	3,78	1 060	4 249,52
03/09/2013	17/09/2013	3,16	510	3 444,12
17/06/2013	09/07/2013	4,62	950	8 856,24
17/12/2012	01/02/2013	4,62	1 110	9 422,30
23/07/2012	30/07/2012	0,94	410	_
21/05/2012	29/05/2012	1,48	210	-
28/02/2012	15/03/2012	2,64	720	3 201,41
21/11/2011	28/11/2011	2,16	260	2 688,68
18/07/2011	29/07/2011	2,18	690	5 193,21

* : valeurs estimées grâce aux valeurs de DIB extraits – formule appliquée présentée en figure 83.

Tableau 25 : Dates et quantités de bois et DIB relatives aux campagnes d'extraction du bois dans le réservoir de Génissiat.

Les 11 couples de valeurs (volume de bois observé ; surface de bois observée) ont alors permis d'établir un modèle prédictif du volume de bois contenu dans la retenue en fonction de la surface observée sur les images. Suite à la classification automatique des images acquises au barrage de Génissiat, les données de surface prédite du radeau ont ainsi pu être converties en volume de bois prédit, par l'application de ce modèle. La classification automatique a été réalisée sur 1 118 images, acquises à 13h00 et segmentées selon une grille orthogonale de 20 pixels de côtés, grâce à un *random forest*. 69 descripteurs ont été extraits pour caractériser chacune des cellules de la grille, 181 de ces cellules appartenant au masque « agrandi » qui a été appliqué aux images (voir figure 62 du chapitre III).

III.3.2.b- Résultats de la conversion

La figure 83 représente la corrélation entre les quantités de DIB extraits et pesées par l'entreprise et les volumes de bois estimés par la CNR : même si elles semblent un peu dispersées, en particulier dans les valeurs faibles, cette relation est assez forte avec R² = 0,83, calculé sur 13 individus. L'utilisation des valeurs estimées par la CNR à la place de celles mesurées par l'entreprise

est donc acceptable, malgré le fait que ces dernières soient tout de même plus précises a priori. En effet, plus que des masses de DIB, ce sont les volumes de bois qu'il est intéressant de pouvoir relier aux surfaces observées sur les images. Cette loi réajustée (voir figure 83) a donc été exploitée pour estimer deux valeurs de volumes de bois manquantes dans la série, correspondant aux campagnes d'extraction ayant eu lieu en janvier et février 2014 (voir tableau 25).

La classification automatique appliquée au jeu de données global acquis à Génissiat a permis de produire une série temporelle de la surface du bois stocké dans la retenue de Génissiat. Ces surfaces ont été converties en volumes de bois grâce au modèle présenté dans la figure 84. La corrélation linéaire présentée est très forte, avec $R^2 = 0,96$, et p-value = 1,26*10-7 calculée sur 11 individus. Cette loi est robuste car même en supprimant la valeur extrême (liée à la crue de mai 2015), la loi statistique est très proche (y = 0,11 * x + 98), mais R² tombe à 0,67 et p-value = 0,64.



Figure 83 : Volume de bois estimé par la CNR en fonction du poids de DIB extraits lors de chaque campagne d'extraction.

Au total, 1 118 images ont été classées automatiquement, toutes prises à 13h00 entre février 2011 et juin 2015. La plus grande surface prédite est de 10 609 m², ce qui correspond à la surface entière de la partie visible du réservoir sur les images. La surface minimale prédite est de 3 m². Dans 27 % des images, l'embâcle de bois occupe 1 000 à 2 000 m², ce qui correspond à moins de 20 % de la partie visible du réservoir (figure 85.a). En termes de volumes, les prédictions varient entre 138 et 1 199 m³ et à peu près la moitié des estimations réalisées enregistrent un volume entre 200 et 400 m3 de bois. La distribution des volumes présente la même forme que celle des surfaces, ce qui est logique puisque la relation entre les deux grandeurs est de type linéaire.



Figure 84 : Volume de bois estimé (b) en fonction de la surface du radeau observée dans la retenue du barrage de Génissiat

à la veille des campagnes d'extraction.



Figure 85 : Distribution de la surface de bois (a) et du volume de bois (b) prédits dans le jeu de données global (1 118 images, prises à 13h00). Le volume a été estimé à partir de la surface prédite grâce à l'équation présentée dans la figure 84.

III.3.2.c- Remarques concernant la méthode présentée

La méthode de conversion des données présentée ci-dessus semble donner des résultats satisfaisants car les modèles employés (figures 83 et 84) sont relativement bons. Dans la mesure où les résultats de la classification des images fournissent des valeurs de surfaces observées qui semblent correctes, l'étude des données sous forme de volumes de bois plutôt que de surfaces apparaît donc pertinente en vue de l'interprétation des résultats. Cependant, une limite de la méthode présentée peut être mise en évidence : le modèle établi entre la surface du radeau observée sur les images et le volume de bois estimé par la CNR a été réalisé grâce à des surfaces délimitées manuellement dans les images. Elles se distinguent des surfaces obtenues par classification automatique en trois points :

- Tout d'abord, les radeaux de bois observés sur les 11 images la veille de chaque extraction ont été digitalisés manuellement pour la confrontation avec les volumes de bois estimés. Ces surfaces observées sont donc forcément plus précises que celles qui sont prédites grâce à un *random forest*, lors de la phase de classification automatique. En effet, même si la précision du modèle prédictif est très élevée, il n'est pas possible d'obtenir 100% de bons classements. Le modèle reliant surface observée et volume estimé (voir figure 84) semble cependant d'autant plus précis.

- Ensuite, cette digitalisation manuelle s'est faite sans application de masque : toute la surface de la retenue a été observée pour la délimitation du radeau de bois. Or, lors de la phase de classification automatique, il y a bien application d'un masque (nommé « masque agrandi », voir figure 62 du chapitre précédent). La gamme de surfaces couvertes par le modèle qui compare les volumes estimés par la CNR en fonction de la surface observée sur les images (voir figure 84) est donc supérieure à celle qu'il est possible d'obtenir par la méthode de classification automatique employée.

- Enfin, les surfaces prédites par classification automatique sont obtenues par le découpage des images qui résulte de l'application d'une grille orthogonale de 20 pixels de côté, alors que la digitalisation manuelle revient à faire de même, avec une grille beaucoup plus fine puisque la maille correspond à la largeur des pixels de l'image. Il semblerait donc que les limites du radeau soient beaucoup moins précises et l'évaluation des surfaces probablement biaisées dans une étude par grille de 20 pixels de maille, même dans le cas d'un étiquetage à dire d'expert. Cependant, d'après la figure 86, la relation entre les deux types de surfaces est très bonne, pour des valeurs inférieures à 10 000 m². Au-delà, les surfaces résultant de la grille sont considérablement sous-estimées : c'est normal, puisqu'il s'agit de la zone couverte par le masque appliqué aux cellules de la grille dans la zone éloignée de la caméra.

198



Figure 86 : Surface résultant de l'étiquetage à dire d'expert des cellules de la grille en fonction de la surface digitalisée manuellement dans les images.

III- Conclusion de ce chapitre : éléments à retenir

En plus des nombreux retours d'expériences et exemples présentés dans ce chapitre, cinq tests ont été réalisés pour répondre à différents questionnements qui se posent lors de la phase de traitement du signal extrait des images. Le tableau 26 synthétise ces résultats et les recommandations qui résultent de ces tests. Il résume en quelques phrases les éléments à retenir, qui sont développés plus haut dans le texte.

Etape de la chaîne de	Test (section	Objectif	Conclusion	Recommandations
traitement	concernée)			
Classification	Gestion des éléments	Savoir si l'utilisation d'une	- L'utilisation d'une classe mixte	- Il n'est pas nécessaire d'utiliser
	mixtes (I.5.2)	classe mixte ou la modification	limite la qualité des résultats en	une classe particulière aux
		des règles de classification des	augmentant les taux d'erreurs	éléments mixtes.
		éléments mixtes améliore la	de classements ;	- La classification à dire d'expert
		qualité des résultats de	- La modification des seuils de	des éléments mixtes doit avant
		classification automatique.	décision pour la classification	tout privilégier la simplicité de la
			des éléments mixtes semble	tâche.
			être peu importante pour la	
			qualité des résultats.	
Post-traitement	Détection de	Comprendre si le rapport	- L'observation du fond du lit	Il faut définir les « fenêtres de
(opérations sur les	l'arrachement du	entre les valeurs extraites de	requière certaines conditions	visibilité » pour garantir la qualité
bandes spectrales)	biofilm grâce au rapport	deux zones de l'image permet	particulières ;	d'observation des éléments
	radiométrique (II.1.2)	de mettre en évidence	- Dans les « fenêtres de	immergés.
		l'arrachement du biofilm.	visibilité » le rapport	
			radiométrique semble efficace	
			pour observer l'évolution de la	
			radiométrie du fond.	
Post-traitement	Répartition des surfaces	Illustrer la distorsion des	La configuration de l'installation	Afin de limiter les écarts de tailles
(orthorectification)	des pixels en fonction	images à cause de l'angle du	du capteur et la taille et la	entre pixels et donc les
	de la forme de la ROI	capteur par la distribution des	forme de la ROI impactent sur la	imprécisions des résultats, il faut
	(11.2.2)	surfaces au sol des pixels.	distribution de tailles des pixels.	limiter l'obliquité du capteur, et
				positionner la ROI au premier plan
				de l'image.

Etape de la chaîne de	Test (section	Objectif	Conclusion	Recommandations
traitement	concernée)			
Post-traitement (orthorectification)	Impact de la	Illustrer l'impact du taux de	Le taux de remplissage des	Il faut limiter l'angle de vue du
	classification des	remplissage des éléments	éléments mixtes a un impact	capteur pour conserver des tailles
	éléments mixtes sur les	mixtes sur l'estimation de la	très important sur la surface	de pixels réduites et minimiser les
	estimations de surfaces	surface du radeau de bois.	totale estimée, surtout s'ils sont	imprécisions des résultats.
	(11.2.3)		localisés sur le fond de l'image.	
Post-traitement (orthorectification)	Impact de la résolution	Savoir si la réduction de la	- Le temps de classification à	S'il n'est pas possible de limiter
	des données sur la	taille des cellules au fond de	dire d'expert est bien plus	l'angle de vue du capteur, il faut
	précision des résultats	l'image améliore la précision	important si les cellules sont	adapter l'échelle d'extraction des
	(11.2.4)	des résultats.	plus nombreuses ;	paramètres et par exemple réduire
			- Les résultats en termes de	la taille des cellules de l'arrière-
			surfaces sont beaucoup plus	plan de l'image.
			précis avec des cellules plus	
			petites sur le fond de l'image.	

Tableau 26 : Synthèse des conclusions et recommandations issues des tests présentés dans le chapitre IV.

Chapitre V : Exploitation des images

L'acquisition des images (chapitre III) et le traitement du signal (chapitre IV) mènent à l'étape de l'exploitation des données pour exposer et analyser l'évolution d'une forme ou d'un processus de l'espace fluvial. Cette étape justifie l'intérêt de tout le travail initial et, surtout, cristallise toute la motivation de ce projet de thèse. Ce chapitre présente les résultats et les interprétations émanant de l'analyse de trois des jeux de données originaux et contrastés dont les retombées sur la connaissance de l'espace fluvial sont très diversifiées : la croissance du couvert de glace à la fosse Home sur la Rivière Saint-Jean (section II), l'effet du balayage sur la relation hauteur d'eau et radiométrie des images à Mollon sur l'Ain (section III), et finalement l'évolution des débits ligneux au barrage de Génissiat sur le Rhône (section IV).

Dans tous les cas, l'analyse focalise sur les séries temporelles d'images permettant de décrire les évolutions du phénomène étudié (milieu, objet, processus). La représentation de l'évolution dans le temps d'une caractéristique du phénomène extraite des images, et sa confrontation à des données complémentaires, permettent d'explorer les liens explicatifs de l'évolution du phénomène mais aussi de quantifier les tendances observées de cette évolution. Ici, les signaux seront tout d'abord observés sous une forme brute. Les informations auxquelles ils sont confrontés (météorologiques et hydrologiques notamment) permettront une analyse qualitative des résultats orientant le sens des analyses supplémentaires à mener. Des analyses bivariées sont ensuite menées sur certaines des données pour examiner la force de relations permettant de modéliser les évolutions observées. Outre la compréhension du phénomène observé, le but de ces modèles est de fournir un outil d'analyse des séries temporelles produites dans les mêmes conditions sur des périodes très longues. La figure 87 représente les étapes de la chaîne de traitements présentée qui sont développées dans ce chapitre.


Figure 87 : Schéma global de la démarche proposée pour l'étude des cours d'eau par imagerie in situ : étapes et problématiques associées à la phase d'exploitation des résultats.

I- Evolution du signal et interprétation des résultats

Cette thèse propose et valorise l'étude de l'évolution d'un signal extrait d'images prises au cours du temps, pour rehausser la compréhension et la quantification de phénomènes de l'espace fluvial. Dans l'étude des cours d'eau, plusieurs formes de temporalité peuvent être mises en évidence : des cycles quotidien, hebdomadaire ou saisonnier ; des tendances linéaire, exponentielle ou logarithmique ; des séquences d'événements dépassant un certain seuil d'amplitude ; ou encore l'apparition et la disparition d'un phénomène. De manière à interpréter les évolutions de ce signal, il est intéressant d'utiliser des données complémentaires, pour aider à leur compréhension et apporter des réponses, voire confirmer des hypothèses quant à leur explication.

I.1- Confrontation du signal à des données complémentaires

Les séries hydrologiques sont les données complémentaires les plus significatives. Elles sont par exemple particulièrement intéressantes pour comprendre les conditions de production de bois d'un bassin versant, le seuil d'arrachement d'un biofilm chlorophyllien ou le patron temporel d'évacuation de particules sableuses sur le fond d'un cours d'eau. Des chroniques de débits moyens journaliers fournis par la Banque Hydro ont été utilisées pour interpréter les signaux extraits des images acquises sur le Rhône à Génissiat et à Mollon sur l'Ain. Dans le cas de la Saint-Jean, les débits moyens journaliers exploités proviennent du CEHQ.

La confrontation des valeurs extraites des images à des chroniques météorologiques peut éventuellement expliquer des évolutions du signal difficiles à interpréter, et mettre en avant certaines imprécisions dans la classification automatique dues aux variations environnementales qui se traduisent dans la radiométrie des images. Dans les rivières de régions froides, comme la rivière Saint-Jean, les chroniques de températures et, plus spécifiquement, les degrés-jour de gel accumulé, expliquent l'amplitude des échanges thermiques favorisant l'apparition des différents types de glace. Pour l'analyse des données qui y ont été produites, des données de températures fournies par Environnement Canada ont été utilisées.

Des dates d'interventions concernant la gestion du cours d'eau peuvent également être une aide à la compréhension de certains phénomènes. À Génissiat, par exemple, les dates des campagnes d'extraction mécanique du bois ont permis de mettre en évidence leur impact sur les quantités de bois prédites. A Mollon, ce sont les opérations de balayage du fond du lit qui sont confrontées à l'évolution du signal extrait des images, pour essayer de mettre en évidence un lien de cause à effet entre les deux phénomènes et comprendre la dynamique de développement du biofilm chlorophyllien.

I.2- Analyses du signal après transformation des variables

Plusieurs types d'analyses des séries temporelles peuvent être appliqués aux signaux extraits des images. Le choix du type d'analyse dépend du type de données étudiées mais aussi de la séquence temporelle des images.

Dans un premier temps, il importe de procéder à une analyse visuelle des séries temporelles. Cette visualisation permet de valider la qualité et le réalisme de la série. Elle permet aussi de mettre en évidence certains éléments qualitatifs dans l'évolution du signal, tels que la réaction du signal à un évènement ponctuel. Ce genre d'observations a été mené sur les signaux obtenus sur le Rhône, sur l'Ain et sur la Saint-Jean.

Dans un deuxième temps, des analyses dans le domaine des fréquences peuvent être réalisées pour quantifier des composantes de cyclicités (transformées de Fourrier) et de ruptures de cyclicité (Ondelettes) dans les séries temporelles extraites des images. Pour quantifier les éléments détectés visuellement et caractériser de manière statistique des évolutions communes entre deux variables (flux de bois et débits, par exemple), il est également possible de comparer les résultats des analyses

par ondelettes ou par transformées de Fourier sur ces deux variables. Ce type d'analyse a été mis en place sur le jeu de données acquis à Génissiat.

Finalement, la comparaison de deux grandeurs numériques peut, de manière plus évidente, être menée par une analyse de régression. La comparaison des débits maximums enregistrés entre deux extractions et des quantités de bois extraites a par exemple été réalisée sur Génissiat. La représentation d'une troisième variable, telle que l'intensité ou la fréquence de l'évènement de crue subi, peut ajouter un élément de discussion pour l'analyse des résultats. C'est également ce qui a été fait sur le même jeu de données. Cela nécessite néanmoins un traitement préalable des données, afin de sélectionner les valeurs à comparer.

II- Evolution des types de glace présents sur la Saint-Jean (Québec) au cours de l'hiver 2010-2011.

II.1- Méthodologie

Au cours de l'hiver 2010-2011, une caméra automatique a été installée sur la rive gauche de la rivière Saint-Jean au Québec (voir figure 28 dans le chapitre II). Ce jeu de données a été exploité pour caractériser la dynamique de formation et d'évacuation du couvert de glace et, plus particulièrement, pour déterminer les surfaces relatives des différents types de glace recouvrant la rivière au cours du temps.

Un jeu de 265 images a été d'abord été constitué par l'ensemble des prises de vue effectuées à 12h00 et 13h00. Parmi ces images, 25 ont été sélectionnées pour constituer l'échantillon d'observés et ont donc été entièrement classées à dire d'expert. Cela a consisté en l'attribution d'une étiquette de classe à chaque cellule découpant les images selon une grille orthogonale de 32 pixels de côté (voir figure 68 dans le chapitre IV). Les six classes utilisées correspondent aux types de glace observés : eau libre ; frasil libre ; frasil semi-consolidé ; glace rugueuse ; glace lisse ; neige. La catégorie « glace de fond » évoquée dans la section I.5.1.b du chapitre IV n'a pas été considérée, et les cellules concernées ont été classées comme de l'eau. En présence d'éléments étrangers aux classes utilisées (bois flotté, neige sur l'objectif etc.), les cellules affectées ne sont pas étiquetées lors de la classification à dire d'expert : le nombre total de cellules observées dans les images de l'échantillon d'observés est alors inférieur au nombre constituant la ROI.

69 paramètres descripteurs (voir tableau 16 du chapitre IV) ont été extraits dans chacune des cellules de la grille pour les 25 images de l'échantillon d'observés. Un échantillon d'apprentissage de 20 000 de ces cellules a été tiré aléatoirement pour l'élaboration d'un modèle prédictif du type de

glace représenté par les images grâce à un *random forest*. Le modèle a été validé sur le reste des individus étiquetés à dire d'expert. L'étude des indices de l'efficacité prédictive du modèle pour les différentes classes a permis de savoir si celui-ci était satisfaisant ou non.

Le jeu de données global est ensuite réduit aux seules images acquises à 13h00 pour l'application du modèle. Cette réduction permet de diminuer le temps de traitement des images, et notamment le temps inhérent à la phase de calcul des paramètres descripteurs. Les mêmes 69 paramètres descripteurs ont été extraits dans chacune des cellules de la grille pour les 148 images concernées. Les 13 images acquises à 13h00 et ayant servi à l'apprentissage ont été replacées dans le jeu de données global. Cela a permis de comparer les valeurs correspondant aux données observées (la classification à dire d'expert) et aux données prédites (la classification automatique) et de les faire figurer en même temps sur les résultats graphiques. Les surfaces relatives observées dans les 12 images acquises à 13h00 et ayant servi à l'apprentissage ont été comparées avec les surface prédites à 13h00 aux mêmes jours. Les éléments étrangers n'étant pas étiquetées lors de la classification à dire d'expert, le nombre total de cellules observées dans les images acquises les 13, 17 et 27 décembre 2010 (voir figure 88), le nombre total de cellules d'observées est inférieur au nombre de cellules constituant la ROI.

Pour analyser les résultats et en tirer des conclusions géomorphologiques, une représentation sous forme de séries temporelles multiples est proposée. Elle expose le nombre relatif de cellules occupées par chacune des classes étudiées dans la ROI de l'image comportant en tout 1 668 cellules (figure 88). Ce type de représentation, utilisée par J. Nafziger et al. (2011) à partir d'images analysées à dire d'expert, permet de suivre l'évolution du type de couvert de glace durant la période hivernale. Les images acquises à la fosse Home n'ayant pas été orthorectifiées, il importe d'avoir en tête que les surfaces représentées ne sont pas proportionnelles aux surfaces réellement occupées par chacune des classes étudiées. Seule une analyse qualitative des résultats a été réalisée dans ce cas. Quelques images de l'échantillon de validation sont également présentées en complément des séries temporelles, afin d'illustrer l'aspect du couvert glaciel en plusieurs points de la séquence étudiée.

Des données complémentaires, hydrologiques et météorologiques, ont été comparées avec l'évolution des surfaces relatives de glace sur la rivière Saint-Jean. Le processus observé étant directement dépendant des conditions environnementales, la confrontation de ces valeurs peut permettre de mieux comprendre et expliquer les variations observées au cours du temps. La comparaison des résultats prédictifs obtenus avec ces chroniques de données peut également constituer une validation de la méthode présentée pour ce genre d'observations, en fonction de la logique des phénomènes observés.

II.2- Résultats et interprétations

Le tableau 27 présente la qualité prédictive du modèle élaboré pour les différentes classes utilisées. Parmi toutes ces classes, celle qui subit le plus grand nombre d'erreurs de classement est le frasil libre, ce qui est cohérent avec les résultats présentés dans la section I.5.1.b dans le chapitre IV. Les résultats de ce modèle sont très similaires à ceux du modèle qui considérait la classe « glace de fond », cependant, cela permet de s'affranchir des incohérences que engendrées avec cette classe.

Class	Efficiency of the model			
Water	0.95			
Frazil	0.89			
Consolidated frazil	0.93			
Rough ice	0.92			
Ice sheet	0.91			
Snow	0.97			
Good classification rate : 94.40 %				

Tableau 27 : Taux de bons classements global et efficacité prédictive du modèle pour les différentes classes utilisées.

Les résultats de la classification automatique des images de la Saint-Jean, illustrés par la figure 88, sont globalement satisfaisants et la méthode proposée semble en effet bien adaptée à ce genre d'observations. Cinq phases différentes, qui reflètent bien l'évolution du couvert glaciel, peuvent être distinguées sur la figure 88 : avant le 1^{er} janvier 2011, le nombre de cellules prédites comme de l'eau est très majoritaire. En effet, le couvert glaciel n'est pas encore apparu. Du 1^{er} au 19 janvier, celui-ci se développe progressivement, avec des périodes de croissance et des évènements de rupture des couches de glace, ainsi que des évolutions des différentes classes de glace, qui se succèdent. Entre le 19 janvier et le 20 mars 2011, le couvert glaciel est complet, il recouvre entièrement la rivière, et la neige s'y accumule. Des épisodes de fonte de cette neige surviennent de temps en temps, qui se transforme en glace lisse. Le plus important est celui observé à la mi-mars, qui doit être associée à une période de redoux (voir l'illustration du 17 mars dans la figure 89). Certaines cellules sont même considérées comme de l'eau, qui peut en effet apparaitre en fine couche au-dessus de la glace lisse. A partir du 20 mars 2011, le couvert de glace commence à fondre pour de bon. La neige se transforme progressivement en glace lisse puis la rivière commence à réapparaître, avec la réapparition d'eau libre à partir du 29 mars. Cette phase est appelée « débâcle thermique », étant liée à la remontée progressive des températures. Et finalement, le 12 avril 2011 le couvert glaciel disparaît brutalement : il est possible qu'il soit rompu puis évacué par le courant qui gagne en puissance, suite à la fonte généralisée de la glace de rivière et de la neige sur les versants.



Figure 88 : Série temporelle du nombre de cellules classées automatiquement (plages de couleurs) et à dire d'expert (croix) dans les différents types de glace au cours de l'hiver 2010-2011 sur la Saint-Jean au niveau de la fosse Home. La séquence présentée correspond à la période du 12 décembre 2010 au 24 avril 2011.



Figure 89 : Clichés extraits du jeu de données acquis à la fosse Home sur la Saint-Jean. Ces images, qui font partie de l'échantillon de validation constitué pour la phase de classification automatique des images, ont été sélectionnées pour illustrer les classifications expertes qui sont représentées sur la figure 88. La zone blanche transparente illustre le masque appliqué.

Afin de valider ou d'invalider les hypothèses qui sont formulées plus haut au sujet de l'évolution du couvert glaciel et de la succession des différents types de glace observés, ces résultats graphiques ont été confrontés avec des séries temporelles de températures et de débits. Les températures ont été mesurées au niveau de l'aéroport de Gaspé, soit environ 3 km de la fosse Home à vol d'oiseau (voir figure 28.a du chapitre II). Les débits quant à eux ont été mesurés sur la rivière York, mais la section II.4.1 du chapitre II explique pourquoi ils sont confrontés aux éléments qui concernent la Saint-Jean.

Les grandes phases décrites ci-dessus ont été représentées sur la figure 90. Si ces phases semblent très peu corrélées à la situation hydrologique, en revanche l'évolution des températures semble expliquer parfaitement la dynamique du couvert glaciel. En décembre 2010 les débits sont particulièrement importants (M. Boivin et al. (2017) estiment que la période de retour de la crue observée sur la York serait supérieure à 50 ans), il semble donc normal que le couvert de glace ne puisse pas s'établir. Mais surtout, les températures moyennes journalières restent seulement légèrement inférieures à 0°C : il semble que ce ne soit pas assez froid pour que la glace de berge puisse se fixer et initier la formation du couvert glaciel. D'après les prédictions de la classification automatique, cela survient uniquement à partir du premier janvier 2011, ce qui coïncide justement avec une baisse réelle des températures. Le seuil de -15°C est presque atteint à deux reprises. Au cours de cette période de baisse des températures, les différents types de glace étudiés se succèdent, et recouvrent progressivement la globalité de la surface du cours d'eau.

Au cours de la période allant du 19 janvier au 20 mars 2011, le couvert glaciel est complet, et essentiellement recouvert de neige. Les températures restent très basses au cours de toute la période, et surpassent les -5°C en de rares occasions seulement avant le mois de mars. A partir du premier mars, les températures commencent à remonter globalement, de manière très progressive. Un épisode où les températures sont un peu plus élevées à la mi-mars conduit à l'épisode de fonte qui déjà été commenté plus haut. Cet épisode explique probablement la légère augmentation des débits qui survient à la même période (voir figure 90). Cependant, l'anomalie observée le premier mars et qui consiste en une transformation de la neige en glace lisse ne correspond en réalité pas à une température particulièrement haute : en effet, en observant l'image en question il est facile de s'apercevoir qu'il s'agit d'erreurs de classification car l'image est surexposée, à cause de la luminosité importante dans la scène à 13h00 (voir figure 91).



Figure 90 : Confrontation des résultats de la classification automatique des images aux températures mesurées à l'aéroport de Gaspé et aux débits mesurés sur la rivière York.

A partir du 20 mars, le couvert glaciel commence à fondre réellement, et progressivement l'eau réapparait. Cela coïncide avec des températures moyennes journalières qui sont alors toujours supérieures à 5°C, et globalement toujours en hausse. Finalement, l'évacuation brutale de ce qui reste du couvert glaciel survient le 12 avril : une légère augmentation des débits est en effet observée à ce moment-là, qui restent cependant relativement limités (bien en-dessous du module de la Saint-Jean, qui est comparable à celui de la York). Il semble donc que la rupture de la glace soit principalement due à la fragilisation du couvert glaciel par réduction de son épaisseur au cours de la fonte : il ne s'agit pas d'une « débâcle mécanique ».



<u>Figure 91 : Illustration de la scène étudiée le 1^{er} mars 2011 à 12h00 (a) et à 13h00 (b). La surexposition de l'image conduit à des erreurs au cours de la classification automatique, qui se traduisent par des anomalies au sein de la série temporelle.</u>

II.3- Remarques et conclusions sur l'étude de la dynamique d'un couvert glaciel par imagerie in situ

La classification automatique réalisée sur le jeu de données de la Saint-Jean semble efficace et les résultats obtenus sont globalement satisfaisants. Malgré un environnement enneigé, donc relativement homogène au niveau de l'aspect, la discrimination des classes de glaces se fait relativement bien : il semble que les paramètres de textures soient particulièrement utiles dans un cas comme celui-là. Les phases de développement puis de disparition du couvert glaciel sont ainsi bien illustrées par les séries temporelles produites. Il est en effet intéressant de noter que la classification automatique, même si elle n'est pas toujours précise (il existe des erreurs de classement, comme l'illustre le cas du 1^{er} mars 2011), reflète globalement l'évolution réelle d'un couvert glaciel : les grandes phases du développement du couvert glaciel sont bien distinctes, ainsi que les petits épisodes de fonte de la neige lors de redoux temporaires, par exemple, dont il est possible de vérifier l'existence dans les jeux de données (figure 89 par exemple). Il faut aussi noter

que la présence de frasil et de frasil semi-consolidé n'apparait qu'au cours de la phase de formation du couvert : c'est bien le cas dans la réalité, le traitement des images est donc assez précis pour restituer ce genre de détails.

Certaines images présentent cependant de grandes imprécisions dans l'étiquetage automatique. C'est par exemple le cas le 6 janvier 2011, où la classification à dire d'expert indique une image composée à moitié d'eau et à moitié de frasil consolidé. La classification automatique a pourtant considéré que les cellules représentaient de la glace rugueuse ou lisse. L'image correspondante est montrée en figure 89. Ces imprécisions peuvent s'expliquer par les caractéristiques visuelles de l'image en question : l'eau particulièrement calme et lisse s'apparente probablement à de la glace lisse et le frasil libre est exceptionnellement aggloméré sur une grande surface, et s'apparente en effet à de la glace rugueuse. Sur l'ensemble du jeu de données, les surfaces en frasil libre semblent globalement sous-estimées car les surfaces prédites sont toujours faibles alors que les surfaces observées sur certaines images peuvent être assez importantes. Au contraire, d'autres images présentent une classification automatique correspondant très précisément à l'étiquetage à dire d'expert. Le cas du 17 mars 2011 est donné en exemple dans la figure 89.

L'utilisation de certaines données complémentaires, telles que des chroniques des températures moyennes journalières, ou des chroniques de débits reflétant la situation hydrologique observée sur les images sont très intéressantes à confronter aux séries temporelles produites. En effet, cela a permis d'expliquer, de valider ou d'invalider les évolutions observées par classification automatique. Il semble qu'au cours de l'hiver 2010-2011, les débits soient restés relativement stables sur la rivière Saint-Jean, et que les conditions de formation et d'évacuation du couvert glaciel aient été liées aux températures plus qu'à tout autre facteur environnemental. D'après les observations réalisées, l'existence d'un couvert glaciel est directement lié à des températures moyennes journalières globalement inférieures à -5°C. En effet, sa formation en janvier 2011 ne s'initie qu'en dessous de ce seuil et sa fonte en mars 2011 ne commence que lorsque les températures l'ont à nouveau dépassé. Il faut garder en tête que les températures correspondant aux images, acquises au milieu et a priori au plus chaud du jour, sont très probablement supérieures aux valeurs moyennes journalières étudiées : les épisodes de fonte de la glace en surface surviennent donc malgré des températures moyennes négatives.

L'utilisation d'autres données complémentaires pourrait être envisageable, sous réserve de leur disponibilité : afin de pleinement tirer parti de la classification automatique établie, l'orthorectification des images serait par exemple grandement intéressante : convertir un nombre de cellules représentant les différents types de glace en des surfaces correspondant à des portions de la

rivière permettrait d'estimer les quantités de glace présentes, et de réaliser une cartographie des qualités de glace au cours du temps. Cela est d'autant plus intéressant que la présence de glace n'est pas homogène sur toute la section du cours d'eau : le thalweg est notamment la dernière partie de la section à être recouverte de glace. Le site d'étude étant situé sur la courbe d'un méandre, le lit du cours d'eau est très probablement asymétrique et il est possible que la succession des types de glace ne se fasse pas tout à fait de la même manière entre le premier plan et l'arrière-plan de l'image : J. Dubé (2009) définissait en effet une croissance de la glace différenciée entre les faciès de type seuils et mouilles et cette différenciation pourrait s'exprimer également entre l'intérieur et l'extérieur de la courbe d'un méandre. Les superficies relatives occupées par chaque classe seraient ainsi différentes des fréquences des cellules de la ROI. En connaissance d'autres éléments tels que la bathymétrie du cours d'eau dans la section d'étude, il serait également envisageable de pouvoir déterminer un lien entre ces deux types de cartographies afin de pouvoir mettre en évidence cette différenciation de la croissance du couvert glaciel.

A cause de la variabilité spatiale des conditions d'écoulement du cours d'eau mais également en fonction de la variation des conditions environnementales, S. Beltaos (2000) affirme que les propriétés de la glace sont très variables spatialement. Si la formation du couvert glaciel se fait selon certains mécanismes particuliers, cette variabilité implique qu'il est très difficile de prévoir l'occurrence des évènements de rupture du couvert glaciel. Selon S. Beltaos (*in press* en 1997, d'après Beltaos (2000)), les méthodes empiriques souvent mises en place pour la prévision de l'occurrence des débâcles glacielles, ont peu de chance d'être applicables à d'autres sites sur le même cours d'eau ou bien sur d'autres cours d'eau : les résultats obtenus sont spécifiques à un site donné. Dans ce contexte, l'utilisation de caméras de terrain est donc particulièrement intéressante puisque cela permet par exemple de multiplier les points de vue et de sonder différents sites simultanément avec un minimum d'effort.

III- Impact des campagnes de balayage du fond du cours d'eau sur la relation entre hauteur d'eau et radiométrie des images sur l'Ain à Mollon

III.1- Principe et méthodologie

Le jeu de données acquis sur l'Ain a permis de tenter de comprendre l'impact de la présence de biofilm de type chlorophyllien sur la radiométrie des images. Il a été supposé que ce biofilm constituait une limite à la réalisation de bathymétrie des cours d'eau par des analyses radiométriques, le biofilm modifiant en effet la relation attendue entre la hauteur d'eau et la radiométrie des images.

La première étape consistait à définir la relation entre la radiométrie des images et la hauteur d'eau. Définir quelles sont les conditions qui permettent d'optimiser cette relation est important car connaître cette relation devrait permettre de prédire des hauteurs d'eau à partir de la radiométrie extraite des images et, par conséquent, de produire des cartes bathymétriques.

La deuxième étape consistait à déterminer l'influence de la croissance des biofilms sur les paramètres de la relation radiométrie – hauteur d'eau. Sur l'Ain, des campagnes de balayages du lit pour évacuer le biofilm ont été effectuées et enregistrées par imagerie, grâce à la programmation du détecteur de mouvement. A l'aide du logiciel ArcGIS et sur les images prises en ces occasions, la zone ayant subi ce traitement a ainsi pu être délimitée pour chaque date. L'emprise géométrique de la zone systématiquement balayée au cours des 8 campagnes de terrain est représentée par la figure 92, a alors été définie pour l'extraction de statistiques radiométriques sur les canaux rouge, vert et bleu. La moyenne, la médiane et la variance des valeurs radiométriques de chacune des bandes ont été calculées sous R. 4 931 images, correspondant à l'ensemble des clichés disponibles pour les traitements acquis entre le 30 mars et le 31 aout 2012, ont été ainsi traités.



Figure 92 : Zone d'extraction des statistiques radiométriques dans les images acquises à Mollon entre le 30 mars et le 31 aout 2012.

Les distributions par date de ces statistiques radiométriques ont été représentées sous forme de séries temporelles, puis confrontées aux hauteurs d'eau moyennes journalières enregistrées à la

même période. Les dates des campagnes de balayage ont également été représentées sur ces séries temporelles afin de comprendre la réaction de la radiométrie à ces deux facteurs.

L'hypothèse étudiée est qu'une régression linéaire négative relie les deux variables hauteur d'eau et radiométrie. D'une part, cette relation a été étudiée sur les 4 931 images acquises entre avril et août 2012, pour lesquelles les valeurs radiométriques ont été extraites dans la zone de balayage (voir figure 92). D'autre part, les valeurs radiométriques extraites de la zone centrale des images (voir figure 45 du chapitre III) étant disponibles, cette même relation a été étudiée pour les 9 907 images acquises entre le 30 mars 2012 et le 1^{er} avril 2013.

III.2- Résultats et interprétation

III.2.1- Confrontation des séries temporelles de valeurs radiométriques et de débits

La figure 93 représente la distribution des moyennes radiométriques dans le canal rouge, extraite dans l'emprise carrée de la zone de balayage au cours du temps. Chaque *boxplot* représente la distribution des moyennes d'une même journée. Ces distributions sont comparées aux hauteurs d'eau calculées sous la caméra, représentées sur la partie haute du graphique. Les huit campagnes de balayage ayant eu lieu au cours de la période d'étude sont représentées en bleu par des lignes verticales. La figure 94 représente les mêmes résultats en termes de variance de la radiométrie au lieu de la moyenne. Une représentation logarithmique permet de simplifier la lisibilité du graphique.

L'analyse de la figure 93 donne tout d'abord l'impression que la valeur moyenne de la radiométrie varie de manière inverse à la hauteur d'eau : les périodes où cette valeur augmente correspondent à peu près à celles où les hauteurs d'eau sont les plus faibles. De manière inverse, une profondeur plus importante semble avoir tendance à faire baisser la radiométrie moyenne sur la journée. Cela parait conforme aux prédictions qui auraient pu être faites : plus la profondeur de l'eau est élevée, plus la couleur de l'eau est sombre (donc les valeurs radiométriques sont basses). Et c'est ce principe théorique qui est généralement appliqué lors des prédictions bathymétriques par imagerie (Legleiter et al. 2004 ; Carbonneau et al., 2006 ; Lejot et al., 2007 ; Moretto et al., 2013).

Les tendances exprimées ci-dessus concernent la valeur moyenne de la radiométrie, mais aussi la largeur de la distribution de la moyenne radiométrique dans les images, dans une moindre mesure : une légère corrélation positive relie la valeur radiométrique moyenne et l'étendue de la distribution. Cela signifie que la variabilité des valeurs moyennes augmente, donc que les aspects des images sont plus variés dans de telles conditions, avec la diminution de la profondeur de l'eau. La figure 94 confirme cette observation : la variance des images est clairement plus importante dans les périodes où les profondeurs sont plus faibles, à tout moment de la période étudiée.



Figure 93 : Distribution des valeurs radiométriques moyennes dans le canal rouge (en bas) et hauteurs d'eau mesurées sous la caméra (en haut) entre le 30 mars et le 31 aout 2012. Les lignes bleues verticales représentent les différentes campagnes de balayage.



Figure 94 : Distribution des variances dans le canal rouge (en bas, représentée en log) et hauteurs d'eau mesurées sous la caméra (en haut) entre le 30 mars et le 31 aout 2012. Les lignes bleues verticales représentent les différentes campagnes de balayage.

En ce qui concerne les balayages réalisés dans la zone d'étude, leur effet n'est pas toujours très perceptible par cette méthode. S'il est possible d'associer une augmentation de la valeur radiométrique moyenne à certaines dates (les 9 mai, 12 et 30 juillet), ce n'est pas le cas pour la plupart des campagnes de balayage. Au niveau de la variance des valeurs moyennes dans le canal rouge, il est possible de relier les balayages des 2 mai et 30 juillet à des modifications radiométriques dans la zone d'étude. Cependant, ce n'est pas le cas pour les autres balayages. Dans ces deux cas, la variance réagit de manière inverse (baisse dans le cas du 2 mai, alors que la hauteur d'eau moyenne est assez importante, et augmentation à la suite du 30 juillet, alors que cette hauteur d'eau est relativement faible). Le tableau 28 résume les circonstances des différentes campagnes de balayage et présente quelques hypothèses au sujet de l'effet observé.

Date du balayage	Evolution des hauteurs d'eau	Effet du balayage sur la radiométrie moyenne	Hypothèse
		(canal rouge)	
06 avril	Début d'un pic de crue	Nul	Effet du balayage annulé par la montée du niveau d'eau : trop d'eau pour voir l'effet
02 mai	Au maximum d'un pic	Nul	Effet du balayage invisible à cause du niveau
	de crue		d'eau
09 mai	En baisse	Augmentation	
16 mai	A la fin d'un pic de crue	Nul	
30 mai	Constante	Nul	
23 juin	En baisse, une semaine	Nul	Peut-être pas de biofilm sur le fond après un
	après un gros pic de		gros pic de crue
	crue		
12 juillet	Légère baisse	Augmentation (mais qui	
		s'annule assez	
		rapidement)	
30 juillet	Constante	Nette augmentation	

 Tableau 28 : Evolution des hauteurs d'eau et impact des campagnes de balayage sur la radiométrie moyenne du canal rouge

 dans les images acquises à Mollon, recensés d'après la figure 93,

III.2.2- Corrélation entre hauteur d'eau et moyennes des valeurs radiométriques

III.2.2.a- Dans la zone balayée

Les analyses présentées ci-dessous avaient pour but de mettre en évidence la corrélation pressentie lors de l'observation des figures 93 et 94 entre les moyennes radiométriques et la hauteur d'eau pour les 4 931 images considérées. La figure 95 présente une dispersion des valeurs radiométrique très importante. Même s'il est possible d'observer une légère tendance à la baisse de la radiométrie en même temps que la hausse des hauteurs d'eau jusqu'à environ 210 cm, il est difficile de définir une réelle corrélation de ces deux variables sur l'ensemble des valeurs disponibles : le tableau 29 présente des valeurs de coefficient de détermination et de p-value très faibles et non significatives. Cette variabilité importante était déjà perceptible sur les figures 93 et 94, car même s'il est possible de parler de tendances générales, l'étendue des distributions y traduit bien des variabilités très importantes au cours de chaque journée.

Sample of images	R ²	p-value	Number of images
All images	0.09	< 2.2e-16	4,931
Before 8:00 UTC	0.05	9.5e-13	962
Between July and September	0.03	2.2e-13	1,867
Insolation = 60 min	0.06	< 2.2e-16	1,833
Bottom visible	0.13	< 2.2e-16	3,016
Sweeping of the bottom < 5 days	0.13	< 2.2e-16	1,391
All conditions together	0.00	0.48	35

 Tableau 29 : Composition des échantillons, coefficients de détermination (R²) et p-value associés à chaque relation

 présentée en figure 95.

La figure 95 expose aussi la relation entre la radiométrie et la hauteur d'eau pour 3 critères mis en évidence comme propices à la visibilité du fond (voir section II.2.2 du chapitre III) ; des horaires matinaux, une acquisition au cours des mois d'été, et une insolation maximale sont les conditions qui permettent d'obtenir les plus fortes probabilités de voir le fond sur les images. La visibilité du fond est également représentée en vert sur la figure 95 ; celle-ci est clairement corrélée à la hauteur d'eau sous la caméra. Les jours consécutifs aux campagnes de balayages ont également été représentées, mais la variabilité des cas n'est aucunement réduite ainsi. Les conditions « optimales », représentées en fuchsia, correspondent à l'ensemble des critères évoqués dans la figure 95 : seules 35 images répondent simultanément à ces 5 conditions. Le but de n'étudier que ces images était d'affiner un maximum la relation entre les variables radiométriques et de hauteur d'eau, mais il est impossible d'établir une régression linéaire valable grâce à ces points-là. Ils sont à la fois trop peu nombreux, et pour les quelques hauteurs d'eau représentées, la variabilité des moyennes radiométriques reste très importante. Cette variabilité est clairement illustrée par la figure 96, qui représente une série de clichés acquis toutes les demi-heures entre 7h30 et 16h00, le 24 juillet 2012.



Figure 95 : Radiométrie moyenne dans la zone balayée en fonction de la hauteur d'eau sous la caméra, pour 4 931 images (en noirs). Mise en évidence de cette relation pour certains facteurs particuliers qui améliorent théoriquement la qualité de cette relation. 35 images seulement (en fuchsia) rassemblent toutes ces conditions.



Figure 96 : Illustration de l'évolution de l'aspect des images au cours d'une journée, pour des conditions de hauteur d'eau et d'insolation constantes : le 24 juillet 2012 entre 7h30 et 16h00 (une image toutes les demi-heures : lire de gauche à droite et de haut en bas) ; hauteur d'eau variant entre 99,8 cm et 101,6 cm ; insolation = 60 min toute la journée.

Au cours d'une journée où la hauteur d'eau varie très peu (moins de 2 cm sur la figure 96) et où l'insolation maximale est constante, l'aspect des images et donc la radiométrie extraite est très différente d'un cliché à l'autre, pour diverses raisons :

- la teinte générale du cliché évolue, à cause de la luminosité ambiante et des réglages

automatiques réalisés par le capteur ;

- des ombres apparaissent dans les images ;

- des poissons peuvent être visibles ponctuellement dans la colonne d'eau ;
- des reflets d'aspects variés peuvent également apparaître à la surface de l'eau.

A cause du passage des ombres et de l'intensité de la réflexion du soleil en tout début d'aprèsmidi, la zone étudiée (en haut à droite de l'image) semble être particulièrement sujette à cette variabilité. Pour cette raison, le même genre de relation a été étudié pour la zone centrale de l'image.

III.2.2.b- Dans la zone centrale des images

La figure 97 représente la moyenne des valeurs radiométriques extraites dans la zone centrale de 9 907 images, en fonction de la hauteur d'eau correspondante. La corrélation entre ces deux variables n'est pas plus nette dans la zone centrale de l'image que dans la zone de balayage (voir figures 92 et 95). Puisque le lien entre la variabilité des cas et l'horaire de la journée a été mis en évidence, il a été décidé de ne représenter en fuchsia sur la figure 97 que les images acquises à 8h00. Cela concerne 368 clichés. Il est alors possible de tracer une régression linéaire entre ces points, qui répond bien à la tendance attendue, à savoir que les valeurs radiométriques baissent lors de l'augmentation des hauteurs d'eau. Cependant, le coefficient de détermination de cette relation est encore très faible (R² = 0,12), ce qui la rend peu intéressante. Les clichés acquis à 8h00 pendant les mois d'été d'une part, et sur lesquels le fond du cours d'eau est visible d'autre part, ont été projetés sur la figure 97. Comme dans le cas de la figure 95, ces conditions particulières ne favorisent aucunement l'établissement de la relation attendue.



Figure 97 : Radiométrie moyenne calculée dans la zone centrale des images (voir figure 45 du chapitre III) en fonction de la hauteur d'eau sous la caméra dans les 9 907 images acquises entre le 30 mars 2012 et le 1^{er} avril 2013.

III.3- Remarques et conclusion

Les résultats de ces analyses permettent de dégager quelques tendances, qui correspondent au principe sur lequel se basent les prédictions de la bathymétrie par imagerie. Il semble en effet que plus les hauteurs d'eau sont élevées, plus la radiométrie est basse, donc la scène observée sur les images est sombre. De plus, il semble que plus les hauteurs d'eau sont faibles, plus la variance calculée dans la zone d'étude est importante. Cette variance qui augmente peut être interprétée comme la texture du fond du lit qui est de plus en plus visible, ce qui est le cas a priori avec des hauteurs d'eau limitées. Mais il est également possible que de faibles hauteurs d'eau soient liées à des conditions météorologiques particulièrement ensoleillées, une forte luminosité favorisant l'apparition à la fois des ombres et des reflets, donc une variance élevée dans la radiométrie des images.

L'impact des balayages est cependant difficile à entrevoir grâce à la méthode présentée dans cette section. Il est en effet difficile de dégager des éléments fiables, parce que les campagnes de balayage ont été peu nombreuses et les réponses radiométriques sont très variables. Contrairement à la méthode des ratios de bandes exposée dans la section I.2 du chapitre II, l'étude de l'évolution de la radiométrie sur une seule zone permet éventuellement de distinguer l'impact d'un traitement mais il faut également prendre en compte les variations de hauteur d'eau, de luminosité et les artéfacts qui apparaissent au cours du temps. Distinguer ces éléments des conséquences du balayage semble relativement compliqué dans le cas présent. Il est donc possible de réaffirmer l'intérêt que présente la méthode d'analyse des données par ratio de bandes, qui consiste à étudier l'évolution relative des radiométries extraites de la zone balayée et d'une zone témoin.

Finalement, sans traitement préalable des images étudiées, il semble malheureusement impossible de définir une corrélation entre les valeurs radiométriques et les hauteurs d'eau qui y sont associées. La variabilité radiométrique des images entre deux prises de vues consécutives a été mise en cause pour cela. En effet, malgré des conditions environnementales très homogènes au cours de toute une journée, la radiométrie des scènes évolue rapidement et il est très difficile de les comparer. En 2015, J. Riquier était contraint d'adapter un modèle de prédiction radiométrique à chaque campagne d'acquisition aérienne, à cause de l'évolution des conditions de luminosité et du substrat au cours du temps. A une échelle de temps plus fine, J. Lejot (2008) faisait face au même problème : il affirmait qu'en une demi-heure seulement, le temps d'acquérir des clichés représentant l'ensemble de la scène étudiée, les ruptures radiométriques induites par les changements de luminosité imposait l'application de prétraitements des images en vue de l'exploitation de leur radiométrie. P.E. Carbonneau et al. (2006) affirmaient également que comme ces variations lumineuses sont inévitables, il faut corriger les valeurs radiométriques des images avant de pouvoir les comparer. L' « histogramme matching » et l' « étirement dynamique » semblent les deux solutions les plus évidentes. Elles consistent à modifier les histogrammes de distribution des images. Dans le premier cas, la forme de l'histogramme est calquée sur celui d'une image de référence, qu'il faut alors définir (Carbonneau et al., 2006). Dans le second cas, il est étiré pour occuper l'ensemble de la gamme de valeurs existantes (généralement 256 valeurs, de 0 à 255, pour une image 8 bits (Lejot, 2008). Une telle procédure semble donc nécessaire pour l'élaboration d'un modèle prédictif des hauteurs d'eau en fonction des valeurs radiométriques. D'autant plus que ce sont justement des images acquises à des moments différents, sur une longue période, qui sont utilisées.

IV- Estimation du flux de bois produit par le bassin versant du Rhône par observation des accumulations de bois dans la retenue du barrage de Génissiat (Rhône)

IV.1- Méthodologie

Afin d'obtenir un signal à exploiter, le traitement des images acquises à Génissiat a consisté en une classification automatique grâce à un *random forest* afin de séparer l'eau du bois. 69 descripteurs ont été extraits des images, dans des cellules de 20 pixels de cotés qui ont subdivisé l'image en une grille orthogonale (voir figure 68 du chapitre IV). Un masque correspondant au

« masque agrandi (voir figure 62 du chapitre III) a été appliqué et une série de 95 images a constitué l'échantillon d'observés. 20 000 cellules étiquetées à dire d'expert ont été tirées au hasard pour l'apprentissage du modèle, qui a ensuite été validé sur le reste des cellules. L'efficacité du modèle correspond aux éléments présentés dans la section I.5.1.a du chapitre IV, la classification utilisée ne comprenant que deux classes : « bois » et « eau ». Suite à une phase d'orthorectification des données (décrite en section II.2.2 du chapitre IV), puis à une phase de transformation des données (section III.3.2 du chapitre IV), une série temporelle des volumes de bois présents dans la retenue a pu être étudiée. Divers outils statistiques ont été employés afin d'analyser ces données temporelles.

L'exploitation des données acquises à Génissiat a consisté dans un premier temps en des analyses visuelles et qualitatives des séries temporelles produites. D'une part, il s'est agi de se concentrer sur la série temporelle des surfaces de radeau prédites au cours du temps, considérant que ce signal était le plus précis. Chaque étape de traitement des données, telle que la transformation des données par exemple, induit en effet une perte de précision supplémentaire, plus ou moins importante. Cette série temporelle a été confrontée aux hydrogrammes du Rhône et de ses affluents en amont du barrage. Seul un extrait de ces données est présenté ci-dessous, car la période globale étudiée est très longue. La période présentée a été sélectionnée parce qu'elle est néanmoins assez longue, sans données manquantes résultant d'avaries de la caméra. Plusieurs cycles d'accumulation/extraction du bois y sont visibles, et un en particulier a été illustré grâce à une série d'images dont les dates de prises de vue ont été localisées sur le graphique (figures 98 et 99).

La série temporelle des surfaces de bois a été convertie en volumes de bois contenus dans la retenue du barrage. Cette donnée a été représentée sous forme graphiques et confrontée aux débits relatifs de l'Arve et de la Valserine. Les débits relatifs correspondent au rapport du débit moyen journalier sur le débit moyen de chacun des deux cours d'eau. Présentés ainsi, ils sont directement comparables entre eux puisqu'ils reposent sur une échelle commune. Les volumes de bois contenus dans le réservoir de Génissiat peuvent également être représentés sous forme de flux quotidiens. Pour cela, à chaque volume de bois prédit a été retranché celui de la veille. Des graphiques illustrant ces deux types de données sont présentés ci-dessous pour deux courtes périodes, qui correspondent à des plages de deux mois de l'année 2013. Celles-ci permettent une analyse précise de l'évolution relative de ces signaux.

Afin d'étudier la corrélation entre le signal des quantités de bois estimées et les chroniques de débits des affluents du Rhône, ce signal a été lissé grâce à des régressions de type « loess ». Cela permet d'étudier les corrélations entre les évolutions des différentes variables en s'affranchissant d'une part plus ou moins importante de bruit, qui complexifie l'analyse. Ces régressions

correspondent au calcul de valeurs qui sont ajustées localement sur un nombre plus ou moins important de points. Dans ce cas, ces calculs ont été réalisés avec des paramètres *span* de 0,02 et 0,1, soit respectivement sur 2 % et 10 % des points constituant le jeu de données global, autrement dit 22 et 112 points, respectivement.

Un autre outil permettant de comparer la forme des signaux a été utilisé : les mêmes séries temporelles ont été converties en transformées de Fourier. Dans ce genre de graphique, la présence de pics correspond aux périodes de retour de certains motifs dans le signal. Par ce biais, il s'agissait de mettre en évidence des fonctionnements cycliques communs entre les débits du Rhône et le flux de bois dans la retenue du barrage.

Enfin, il s'est agi de mettre en évidence le lien existant entre l'importance des pics de crues enregistrées par l'Arve et par la Valserine et l'importance des quantités de bois produites par le bassin versant amont du Rhône et de quantifier le lien entre ces deux phénomènes. Ce travail a été effectué au sein des périodes délimitées par les campagnes d'extraction mécanique du bois. 14 périodes ont ainsi pu être définies. Pour chacune d'elles, les quantités de bois extrait mécaniquement de la retenue ainsi que les débits maximums enregistrés dans les séries hydrologiques de l'Arve et de la Valserine au cours de chaque période ont été référencés. La combinaison des deux débits a été calculée, ainsi que la proportion représentée par le débit de la Valserine dans cette somme de valeurs. Cette grandeur permet de représenter l'importance relative des débits des deux cours d'eau et donc de renseigner sur la provenance de la crue. Les quantités de bois accumulées ont également été calculées. Pour cela, la différence entre les valeurs maximales et minimales enregistrées pour chaque période a été calculée, dans la série temporelle des volumes de bois estimés. Le tableau 30 présente ces différentes valeurs ainsi que les dates de début et de fin des périodes étudiées. Grâce aux valeurs présentées dans ce tableau, les quantités de bois extraites (estimées par la CNR) ou accumulées (prédites par la méthode exposée) ont pu être comparées aux débits des affluents du Rhône, en tenant compte de l'origine de la principale crue.

Période entre deux campagnes d'extraction		DIB	Bois	Débits maximums enregistrés		Contribution relative de	Volume de Bois	
Début	Fin	Masse extraite par la société (t)	Volume estimé par la CNR (m ³)	Arve + Valserine (m ³ /s)	Arve (m³/s)	Valserine (m ³ /s)	la Valserine au débit de crue (%)	accumulé prédit (m ³)
01/02/2011	29/07/2011	2,18	310	278	269	9	3,4	805,48
30/07/2011	28/11/2011	2,16	130	156	131	25	19,1	493,06
29/11/2011	15/03/2012	2,64	325	269	166	103	62,0	936,23
16/03/2012	29/05/2012	1,48	105	209	167	42	25,2	
30/05/2012	30/07/2012	0,94	205	283	236	47	23,0	
31/07/2012	01/02/2013	4,62	555	391	304	87	28,6	
02/02/2013	09/07/2013	4,62	475	418	300	118	39,3	
10/07/2013	17/09/2013	3,16	255	336	287	49	17,1	657,26
18/09/2013	20/11/2013	3,78	1060	379	288	91	31,6	975,97
21/11/2013	14/01/2014	1,74		257	189	68	36,0	747,23
15/01/2014	17/02/2014	0,56		155	119	36	30,3	377,33
18/02/2014	30/07/2014	3,34	280	289	235	54	23,0	387,77
31/07/2014	14/11/2014	2,5	216	224	211	13	6,2	
15/11/2014	10/07/2015	10,16	1670	806	706	100	14,2	1042,72

Tableau 30 : Quantités de bois extrait lors des opérations d'enlèvement, débits maximums enregistrés sur l'Arve et la Valserine et quantités de bois accumulées estimées correspondant à

chaque période définie par les dates de deux campagnes d'extraction mécanique du bois,

IV.2- Résultats et interprétation

IV.2.1- Des quantités de bois corrélées aux séries hydrologiques

IV.2.1.a- Mise en évidence de tendances globales

Sur le jeu de données acquis à Génissiat, la classification automatique des images a permis de tracer une série temporelle de la surface de bois prédite dans le réservoir au cours du temps. La figure 98 en présente un extrait. Cette série temporelle est confrontée aux débits du Rhône, de l'Arve et de la Valserine ce qui permet de mettre en évidence des résultats intéressants, les tendances observées semblent correspondre aux attendus. Un lien net entre les quantités de bois prédites au cours du temps et les séries hydrologiques présentées est visible : de manière globale, les quantités de bois prédites augmentent progressivement au cours du temps, et il est souvent possible de les relier à des pics de crue de l'un, l'autre ou des deux affluents du Rhône (début août, début novembre 2013, ou début juillet 2014 pour les deux affluents ; fin mai 2014 pour l'Arve ; mi-décembre 2013 pour la Valserine, par exemple).

La figure 98 fait également figurer, de deux manières différentes, les quantités de bois extraites de la retenue lors des opérations d'extraction. Elles sont représentées par des surfaces sur le graphique du haut, la largeur de la forme correspondant à la durée de la période d'extraction et la surface étant proportionnelle à la valeur extraite. Et d'autre part elles sont représentées par des longueurs, sur les deux graphiques du bas, la position du pic correspondant à la fin de la campagne d'extraction et la hauteur du pic étant proportionnelle à la valeur extraite. La diminution des quantités de bois lors de chaque campagne d'extraction est claire, à l'exception de celle de février 2014, pour laquelle une baisse des surfaces prédites ne survient qu'à partir de mars. La figure 99 illustre l'un des cycles d'augmentatiotn-diminution des surfaces de bois prédites.

Les séries hydrologiques et les quantités de bois sont nettement liées, cependant, le bruit que trouvé dans le signal est assez important, et la variabilité locale complique la comparaison des différentes variables. Afin de limiter ce bruit, il est possible de lisser les signaux étudiés. C'est ce qui a été fait grâce à des régressions loess, présentées dans la figure 100. Sur ce graphique, toutes les variables sont nettement corrélées sur l'ensemble de la période d'étude. Tout d'abord, les deux signaux qui correspondent à la combinaison des débits de l'Arve et de la Valserine et aux débits du Rhône sont très parallèles. Et comme il a été dit plus haut, le volume de bois présent dans le réservoir augmente lors des épisodes de crues, alors que la diminution des quantités contenues dans le réservoir est nettement liée aux périodes d'enlèvement mécanique du bois. Il semble cependant que les quantités de bois prédites commencent généralement à diminuer progressivement avant le début de ces campagnes d'extraction, après les pics de crue.



Figure 98 : Surface de bois prédite, débit du Rhône, de l'Arve et de la Valserine et quantités de bois extraites de la retenue du barrage de Génissiat entre juin 2013 et septembre 2014.



Figure 99 : Clichés extraits du jeu de données acquis à Génissiat illustrant l'évolution de l'embâcle de bois entre le 30 aout et le 5 novembre 2013. Chaque cliché est positionné chronologiquement sur la figure 98 pour illustrer l'évolution du signal de prédiction de la surface de l'embâcle.



Figure 100 : Séries temporelles lissées des débits du Rhône, des débits combinés de l'Arve et de la Valserine, et du volume de bois contenu dans la retenue de Génissiat. Les signaux ont été lissés grâce à des régressions loess, avec des paramètres span de 0,02 et 0,1.

IV.2.1.b- Mise en évidence de tendances à une échelle plus fine

L'évolution du signal correspondant à la surface de l'embâcle est aussi très fortement liée à la fluctuation des débits du Rhône à Surjoux (figure 98), et il est possible de relier les augmentations à des pics de crues (début août, début novembre 2013, ou début juillet 2014). Cependant, ne forte variation cyclique de la surface du radeau de bois est également visible, qui semble indépendante des crues. Elle semble plutôt refléter une fluctuation hydrologique et pourrait notamment correspondre au cycle hebdomadaire enregistré sur l'hydrogramme du Rhône et lié à l'exploitation de l'ouvrage (voir figure 98).

Afin de mettre en évidence ces cycles communs, les patrons temporels des débits du Rhône et les flux de bois (différence entre les quantités observées d'un jour à l'autre) ont été comparés grâce à des transformées de Fourier (figure 101). Dans le cas des débits (figure 101.a), il est aisé de distinguer certains éléments cycliques. En particulier, des périodes à l'échelle hebdomadaire (T = 3,5 et T = 7 jours), qui correspondent très probablement à la demande hydro-électrique qui varie à l'échelle de la semaine, apparaissent clairement. Cette périodicité était déjà clairement visible dans l'hydrogramme du Rhône, présenté en figure 98, qui présente systématiquement des valeurs plus faibles durant les week-ends. De plus, d'autres cycles sont identifiés aux périodes T = 90 et T=200 jours, ce qui pourraient correspondre à une variabilité saisonnière. Dans le cas des changements de quantités de bois au cours du temps (figure 101.b), des périodes T = 3, T = 7 et T = 200 sont également visibles, bien que très limitées pour cette variable. Il existe donc bien un lien entre ces deux variables indiquant que les fluctuations hydrologiques à court terme doivent jouer un rôle dans la dynamique du radeau. Cependant la forme générale des deux courbes de Fourier est très différente. Le signal correspondant aux quantités de bois est très bruité, en particulier dans les courtes périodes, et cela ne peut pas être expliqué par la seule évolution des débits du Rhône.





Figure 101 : Transformées de Fourier du débit du Rhône à Surjoux (a) et du taux d'accumulation du volume de bois (b).

IV.2.1.c- Limites induites par la classification automatique

Afin d'illustrer l'évolution de la surface de l'embâcle au cours du temps, une série de 6 clichés est présentée en figure 99. Une marque correspondant à chaque cliché est positionnée sur le graphique supérieur de la figure 98, entre le 30 août et le 5 novembre 2013. Cette période correspond à la diminution de la surface au cours d'une période d'extraction, puis à la croissance de celui-ci par des apports de bois résultant d'un évènement de crue. Cette série d'images montre bien ce cycle d'évolution, avec un radeau de bois qui diminue en surface sur les trois premières images, puis qui ré-augmente sur les suivantes.

Il est possible de remarquer les aspects très divers des images au cours du temps, notamment au niveau de la couleur de l'eau et de l'aspect du bois qui constitue l'embâcle. Sur la figure 99 l'embâcle semble contenir à peu près les mêmes quantités de bois sur les clichés 1 et 6, alors que sur la figure 98, elle est largement surestimée à la position 6. L'aspect du bois qui constitue le radeau, mais également celui de l'eau, sont justement assez différents entre les deux clichés qui correspondent aux positions 1 et 6 : la différence des résultats de la prédiction de la surface pourrait être imputée à ces variations d'aspect. La surface de bois prédite en novembre 2013 étant proche de 10 000 m², cela correspond à une ROI remplie de bois, ce qui n'est pourtant pas le cas.

De plus, sur le cliché 2 il est possible d'identifier l'embarcation qui opère l'extraction de bois. Cette présence dans l'image contribue probablement à la surestimation de la surface de l'embâcle pour cette image, car il est tout à fait possible que la classification automatique ait considéré cette zone de l'image comme du bois, au lieu d'eau. Sur la Figure 98 le cliché 2 est justement localisé sur

un pic de la surface de bois prédite. Cependant ce pic correspond aussi à un pic de crue enregistré sur l'Arve.

IV.2.1.d- Des facteurs externes qui affectent les prédictions des quantités de bois

Toutes les évolutions des quantités de bois prédites ne peuvent pas être liées à des évènements de crue, ou aux opérations d'extraction mécanique du bois. D'après les figures 98 et 101, il semble que les variations des quantités de bois à des échelles de temps courtes soient liées aux fluctuations des débits du Rhône en amont du barrage, donc aux cycles d'exploitation de l'ouvrage. Cependant, le bruit observé dans le signal sur la figure 101 permet de dire que d'autres éléments entrent en compte. Des diminutions des surfaces de bois prédites peuvent généralement être observées après les crues et un apport de bois important (figure 98).

Outre les erreurs qui surviennent au cours de la classification automatique, il est probable que les changements de quantités de bois puissent être dus à des modifications de l'aspect du radeau, de sa forme et/ou de sa densité. En effet, hors des périodes d'extraction mécanique, la réduction de la surface de l'embâcle ne peut pas être liée à des exports de bois vers l'aval. Cela veut donc dire que quand les débits diminuent, la même quantité de bois persiste alors que des changements dans la surface occupée par l'embâcle, qui apparait plus petit suite à la décrue, sont observés. Pendant la crue, la vitesse du courant est élevée et tout le bois est poussé contre la couronne du barrage. A ce moment, l'embâcle peut être observé correctement. Mais lors de la diminution des débits, cette pression ne s'exerce pas de la même manière et la forme de l'embâcle est contrôlée par d'autres facteurs, notamment des courants internes au réservoir. Il est plus dispersé, potentiellement avec des éléments qui se localisent hors de la ROI. Le cycle de compaction-décompaction qui se met en place affecte ainsi la prédiction des quantités de bois présentes dans la retenue.

IV.2.2- Rôle des différentes crues sur les quantités de bois prédites

IV.2.2.a- Des crues aux impacts variables dans le temps

La figure 102 représente les volumes de bois (figures 102.a et 102.b) et les taux d'accumulation du bois (figures 102.c et 102.d) prédits au cours du temps, en fonction des débits relatifs de l'Arve et de la Valserine. Ces graphiques représentent de manière plus précise à deux périodes particulières, qui regroupent plusieurs évènements de crues : les séries allant du 11 août au 18 septembre 2013 et du 16 septembre au 22 novembre 2013 sont aussi visibles à une échelle plus large dans la figure 98. Il existe un lien très net entre les deux types de séries temporelles : les variations des débits de l'Arve et de la Valserine affectent directement le volume de bois. Par exemple, le volume de bois présent dans la retenue augmente le jour suivant la crue du 29 juillet 2013 (figure 102.a). De manière similaire, la crue du 8-9 septembre 2013 a aussi conduit à une augmentation des quantités de bois présentes, cependant elle est survenue en pleine campagne d'extraction du bois, ce qui a fait considérablement diminuer ces quantités. Dans le second exemple (figure 102.b), l'augmentation des quantités de bois est plus progressive, mais il semble que chaque crue survenant les 5, 16 et 23-24 octobre 2013 fournit des petites quantités de bois qui alimentent l'embâcle : ces crues produisent environ 300 m³ de bois en un mois (voir figure 102.b). La crue du 3 novembre, elle, est beaucoup plus importante et produit une très grande quantité de bois : presque 600 m³, en deux jours seulement (voir figure 102.b). Cependant il a été évoqué en commentaire de la figure 99 que cette valeur pouvait être surestimée à cause d'erreurs de classification.

Les figures 102.c et 102.d présentent les mêmes données sous forme de flux quotidiens de bois. Vu la variabilité du signal observé dans cette série temporelle (déjà observée sur le signal des volumes de bois), toutes les variations ne semblent pas intéressantes à interpréter. Il a donc été considéré de manière arbitraire que les gains ou les pertes de bois dans le radeau étaient significatifs lorsqu'ils dépassaient la largeur d'un écart-type de la distribution. En ce qui concerne la première période de l'exemple, des apports significatifs surviennent donc le lendemain de la crue du 29 juillet 2013, mais également après celle du 8 août. Un pic similaire survient le 25 août, le même jour qu'un pic de crue de l'Arve. Lors de l'analyse de la figure 102.a, ces deux crues ne semblaient pas être particulièrement importantes au niveau de la production de bois, puisque les quantités atteintes ne dépassent pas celles déjà observées quelques jours auparavant. Cependant, après chaque pic, les quantités de bois prédites avaient diminué et atteint des niveaux beaucoup plus bas : le flux de bois semble important alors qu'il n'y a a priori par de réelle production supplémentaire.

Au regard de cette figure 102.c, il n'est pas possible de prétendre, contrairement aux conclusions de l'analyse de la figure 102.a, que la crue du 8-9 septembre produise du bois de manière significative. A propos du second exemple (figure 102.d), la crue du 23-24 octobre produit seulement une quantité de bois non significative en termes de flux, le 24 octobre. Mais des pics de production de bois surviennent également le 30 octobre et le 1^{er} novembre, qui peuvent éventuellement aussi être liés à la crue du 27 octobre sur la Valserine. La crue du 3 au 6 novembre, qui est très importante sur la Valserine, a fourni une grande quantité de bois avec un pic dans la production qui survient le jour du début de la crue.

Au niveau de la diminution des quantités de bois, le second exemple présente plusieurs pics significatifs, qui surviennent au cours de la campagne d'extraction (figure 102.d), mais ceux de la première période (figure 102.c) qui sont significatifs ne correspondent pas à des extractions réelles de bois. Il est donc légitime de se poser la question de la significativité de la valeur d'un écart-type en

ce qui concerne les baisses de quantités de bois dans la retenue. D'une part, si des diminutions significatives sont observées, elles devraient l'être au cours des campagnes d'extraction. Comme ce n'est pas toujours le cas, une limite de la méthode à ce niveau peut éventuellement être mise en évidence. D'autre part, le flux quotidien n'est peut-être pas la meilleure variable pour représenter ces évolutions car il semble qu'elles aient un effet progressif sur plusieurs jours, vu la durées des campagnes.



<u>Figure 102 : Séries temporelles du volume de bois prédit (a et b) et du flux quotidien de bois (c et d), et séries hydrologiques</u> <u>des deux principaux affluents du Rhône en amont du barrage de Génissiat, pour deux périodes de l'année 2013.</u>

IV.2.2.b- Des apports de bois variant en fonction de l'origine géographique des crues

Il s'est agi de définir le rôle de chacun des affluents du Rhône sur les quantités de bois prédites. Pour cela, pour chaque période délimitée par deux campagnes d'extraction, les quantités de bois extraites (figure 103.a) puis les quantités maximales de bois prédites (figure 103.b) ont été comparées aux valeurs maximales des débits combinés de l'Arve et de la Valserine. Les quantités de bois extraites de la retenue du barrage de Génissiat sont très fortement liées à l'importance des pics de crues des débits cumulés de l'Arve et de la Valserine (figure 103.a). Ce résultat est très significatif comparé à ceux présentés par M. Boivin et al. (2015) ou encore B. Moulin et H. Piégay (2004). Ces auteurs ont en effet montré des relations plus complexes entre ces variables, et évoquent l'existence de phases de rétention du bois dans les tronçons en amont du site d'étude. Un temps de latence entre la production de bois et son export a ainsi été mis en avant, et relié au moment de l'occurrence des crues dans les séries hydrologiques. Lorsque la relation entre la production de bois et le pic de crue est considérée en utilisant les valeurs prédites par imagerie, la corrélation entre les variables est cependant beaucoup plus faible ($R^2 = 0,36$, figure 103.b). L'une des raisons principales à cela est probablement que les quantités de bois les plus importantes ne sont pas bien estimées à cause de la taille de la ROI : contrairement à la zone observée pour l'élaboration de la figure 103.a, elle ne couvre pas la totalité du réservoir, et à cause du masque qui a été choisi, la surface étudiée est limitée à 10 000 m² (au lieu de 35 000 m² pourtant visible sur les images). En effet, si la régression linéaire est corrigée en forçant l'évènement extrême de juin 2015 à la valeur observée, R² augmente significativement et atteint 0,79.

La figure 103 représente la contribution de la Valserine en termes de débits grâce à des tailles de cercles différentes. Cette taille est proportionnelle au rapport du débit de la Valserine sur le débit combiné de l'Arve et de la Valserine. Sur la figure 103.b, il semble que les cercles de tailles les plus importantes correspondent à la fois à des valeurs de débits combinés faibles, et à des quantités de bois prédites qui surestiment le modèle linéaire présenté dans cette figure. Cela signifie d'une part que des crues importantes de la Valserine ont peu d'impact sur le débit combiné avec celui de l'Arve. Ce qui ne paraît pas anormal vu la petite taille relative de la Valserine comparée à l'Arve. D'autre part la surestimation des volumes de bois produits semble montrer que la Valserine produit relativement de plus grandes quantités de bois que l'Arve. Cependant la figure 103.a semble montrer que ces prédictions sont imprécises, car les mêmes tendances n'y sont pas observées : les volumes de bois extraits de la retenue sont simplement proportionnels aux débits maximaux enregistrés.


Figure 103 : Volume de bois extrait (a) et volume de bois prédits par imagerie (b) en fonction des débits combinés de la Valserine et de l'Arve. La taille des cercles représente la contribution relative du débit de la Valserine par rapport au débit combiné de l'Arve et de la Valserine.

Cette différence entre les quantités de bois extraites du réservoir et les quantités de bois prédites a été expliquée par des changements de forme et de densité du radeau. Lorsque le débit est important, tout le bois flotté est poussé contre l'ouvrage, ainsi la densité du radeau augmente. Au contraire, quand les débits sont limités, d'autres facteurs entrent en compte, ce qui permettrait des mouvements de recirculation du bois et la dispersion du radeau, éventuellement hors de la ROI (voir figure 104). Dans ce contexte, il est possible de considérer que lorsqu'une crue provient principalement de la Valserine, l'effet sur les débits sur le Rhône est moindre par rapport aux crues générées par l'Arve. Cela pourrait expliquer pourquoi le volume de bois prédit est supérieur aux valeurs observées (figure 103) : au cours des évènements de crue de faible importance, tout le bois est potentiellement situé dans la ROI, mais le radeau est moins dense, parce que la vitesse du courant n'exerce pas la même pression contre le couronnement du barrage. Les quantités de bois prédites sont donc surestimées.



Figure 104 : Illustration de l'aspect et de la forme du radeau de bois le 17 juillet (a) et le 20 novembre (b) 2011, le 27 février 2012 (c) et le 6 janvier 2014 (d), à 13h00.

IV.3- Remarques et conclusions

Les analyses des résultats du traitement des images acquises sur le site de Génissiat ont permis de mettre en évidence différents éléments. D'une part, l'évolution de la surface et du volume de bois stocké dans le réservoir a été montrée, puis un flux quotidien a été calculé. D'autre part, différents traitements statistiques réalisés (lissage du signal par régression loess, transformées de Fourier, analyses bivariées des données) permettent d'interpréter le patron temporel dégagé, ainsi que le rôle des crues dans la production de bois arrivant à Génissiat. Cette dernière tâche a toutefois nécessité d'échantillonner un certain nombre de valeurs parmi toutes celles des séries temporelles disponibles. Des valeurs maximales et minimales ont été extraites, des valeurs relatives ont été calculées dans le but de mieux rendre compte les tendances existantes.

La surface prédite du radeau de bois dans la retenue du barrage de Génissiat est corrélée aux débits du Rhône, et notamment elle augmente lors des crues. Cette conclusion résulte d'une analyse visuelle, qui permet de distinguer certaines tendances communes aux séries temporelles, mais cellesci restent difficiles à quantifier. Cette difficulté a été imputée au bruit important qui affecte le signal. Outre des erreurs potentielles résultant de la classification automatique des images, des vitesses d'écoulement et des pressions exercées sur le radeau de bois variables seraient en effet les causes de phénomènes de compaction-décompaction, voire de dispersion des éléments ligneux dans la retenue. En effet, le lien entre la surface du radeau et le volume de bois présent dans la retenue n'est pas toujours très bon car le radeau de bois fluctue en densité : il peut se dilater ou se compresser. Il semble que le lien est bien établi si les mêmes niveaux de densité sont comparés. Cette situation existe lors des forts débits du Rhône, qui concentrent le bois contre l'ouvrage. L'un des challenges qui se présente à la suite de ces travaux serait donc de préciser, afin de les prévoir, les différents facteurs qui affectent la densité du radeau.

L'importance des crues enregistrées dans le bassin versant du Rhône au niveau de Génissiat sur le débit ligneux est en partie dépendante de la contribution relative des sous-bassins versant de l'amont. La Valserine et l'Arve ayant des tailles différentes, et leurs bassins versants respectifs étant de natures différentes, les débits de l'un ou l'autre de ces affluents ne sont pas du tout les mêmes, ainsi que les apports de bois qui en résultent. Le modèle prédictif des apports de bois en fonction des débits enregistrés à Génissiat est d'autant plus complexe à établir. Il a été montré que les crues de la Valserine avaient seulement un faible impact en termes de contribution aux débits du Rhône. Contrairement aux évènements de crue provenant de l'Arve, cela engendre une faible probabilité de compaction des éléments ligneux contenus dans la retenue de Génissiat : la densité du radeau de bois n'est pas la même selon que la crue provienne de l'Arve ou de la Valserine.

Ces résultats mettent donc en évidence les difficultés d'application de cette méthode de traitement automatique des images dans un tel contexte. En effet, l'étude d'objets flottants sur la retenue d'un barrage semble tout à fait possible, la détection du bois apparaissant relativement précise au vu des résultats obtenus. Cependant, la nature même de l'objet étudié révélée par la présente analyse rend la démarche de quantification du bois présent dans le réservoir au cours du temps compliquée à partir d'une loi linéaire reliant le volume et la surface de bois. Outre les débits, il est possible que le vent, probablement dans une moindre mesure, agisse de la même manière sur la répartition des pièces de bois dans la retenue. La forme de la fenêtre d'acquisition, donc la conception du système d'installation semble aussi être l'un des facteurs limitant la précision des résultats, l'ensemble du bois n'étant pas visible quand celui-ci se répartit hors de la ROI.

242

Conclusion générale et perspectives

I- Synthèse des principaux résultats obtenus

Les tests et analyses menés au cours de ce travail de thèse ont permis de répondre à la plupart des questions scientifiques identifiées lors de ma synthèse bibliographique et présentées en section I.1 du chapitre II. Ces questions n'ont été traitées que sous certains angles et les réponses apportées ne sont probablement pas exhaustives. Les principaux apports de ce travail sont présentés ci-dessous.

1) L'optimisation des prises de vue est nécessaire afin d'assurer l'exploitation des images et notamment l'automatisation de leurs traitements. Cela passe tout d'abord par une installation des capteurs, sur un support fixe fournissant des images qui présentent le même cadre et qui sont donc comparables au cours du temps. Le choix du site, du support et l'orientation du capteur doivent être réalisés de manière à limiter notamment les phénomènes de surexposition des images, et les contrastes ombre/soleil dans la scène. Les clichés étant acquis sur des périodes de quelques mois à quelques années, il faut en outre considérer que la végétation environnante enregistre une croissance et peut ainsi former un écran visuel et obstruer la scène d'intérêt. La migration latérale du cours d'eau étudié peut menacer à terme le support des capteurs. L'observation d'éléments situés sous la surface de l'eau présente de nombreuses contraintes : par exemple l'impact des reflets, des vagues, des variations de hauteur d'eau et de luminosité sur la visibilité du fond. Ces contraintes correspondent globalement à celles déjà soulignées par certains auteurs qui ont essayé de mesurer la bathymétrie par imagerie aérienne (Lejot, 2008 ; Gilvear et al., 2004).

2) Le signal extrait des images peut être analysé directement, bien qu'il soit généralement judicieux de le post-traiter afin de mettre en évidence le phénomène suivi. Sur les capteurs testés, seuls les canaux du visible sont disponibles, donc l'information spectrale est a priori relativement limitée. Le post-traitement peut par exemple consister à utiliser des ratios de bandes ou analyser des différences de valeurs entre les bandes spectrales, pour souligner la présence de certains éléments dans l'image. Mais il semble avant tout nécessaire de calculer les paramètres radiométriques qui caractérisent au mieux les objets suivis. La classification automatique des images peut être un autre type de post-traitement conduisant à étudier des classes d'objets au cours du temps, ce qui peut être beaucoup plus aisé que l'analyse d'un signal brut. La conversion des grandeurs étudiées en d'autres unités, ou bien l'orthorectification des images, permettent également de produire des données plus

243

facilement interprétables. Enfin, la comparaison des résultats à des données externes semble, si non systématique, essentielle à l'exploitation du signal. Les données hydrologiques sont particulièrement intéressantes à comparer aux phénomènes suivis en milieux fluviaux, mais les données météorologiques semblent également de première importance, non seulement pour expliquer lesdits phénomènes, mais également parce que ces conditions affectent la qualité des images exploitées et donc le signal extrait.

3) Le suivi des processus biophysiques en milieu fluvial est tout à fait possible grâce à des pièges photographiques ou caméras de surveillance, malgré une résolution spectrale limitée au visible. Le capteur étant placé à proximité de sa cible, les résolutions spatiales sont généralement élevées par rapport à la taille des objets suivis. La résolution temporelle des jeux de données, quant à elle, est variable et à adapter au type d'objet suivi. Il est clair, cependant, qu'elle est bien supérieure aux résolutions temporelles envisageables grâce à des capteurs aériens ou satellites. Les résultats présentés dans ce manuscrit montrent que malgré les quantités de données très importantes produites ainsi, l'exploitation des images peut-être automatisée relativement aisément, grâce à des logiciels en libre accès (R pour l'extraction du signal et les analyses des données, Fudaa-LSPIV pour le processus d'orthorectification).

II- Etude des milieux fluviaux par imagerie in situ : mise en évidence et mesures de différentes temporalités

La synthèse des résultats des différents tests réalisés sur les cinq jeux de données disponibles pour ce travail de thèse a permis de définir quelles sont les potentialités de l'imagerie in situ pour l'étude des processus biophysiques en milieux fluviaux. Différents types de temporalités peuvent être mis en évidence grâce à un tel outil d'observation. C'est le point fort de cette méthodologie d'observation des cours d'eau par rapport à l'imagerie satellite ou aérienne, dont les résolutions temporelles ne peuvent aucunement atteindre de telles précisions. Ces temporalités sont représentées sur la figure 105.



Figure 105 : Représentation schématique des trois patrons d'évolutions observables et des différentes temporalités mesurables par imagerie in situ.

La haute fréquence d'acquisition des images fournie par les capteurs in situ permet d'observer les cours d'eau de manière régulière et continue dans le temps. Des séries temporelles qui représentent le fonctionnement du milieu ou l'évolution de l'objet suivi peuvent donc être tracées. Trois types de patrons d'évolution ont été définis (figure 105) : « binaire », dans le cas où la caractérisation d'un objet se résume à déterminer sa présence/absence ; « progressif », lorsque l'évolution de l'objet en question suit une trajectoire « quelconque » ; « périodique », lorsque cette évolution est cyclique, c'est-à-dire qu'un modèle se répète dans le temps.

Quelques soit le patron d'évolution observé par imagerie in situ, la précision temporelle disponible permet la mesure de caractéristiques temporelles de l'objet d'étude. La localisation dans le temps des évènements permet avant tout de définir des dates (début, fin d'un évènement, point de rupture, voir figure 105), qui correspondent généralement à des conditions environnementales particulières. L'analyse de ces dates mise en correspondance avec des chroniques de données externes revient à définir les valeurs seuils qui régissent le phénomène étudié. Entre les dates mises en évidence, des durées, des périodes de cycles, peuvent être mesurées.

Sur une période donnée, le nombre d'occurrences d'un phénomène ou le temps de retour d'un cycle correspondent à des fréquences (voir figure 105). Elles sont généralement particulièrement intéressantes pour caractériser le fonctionnement d'un milieu fluvial, et peuvent souvent être corrélées à des fréquences ou des périodes de retour des crues enregistrées sur le cours d'eau étudié. L'évolution d'une variable sur une période donnée définit un taux d'accroissement ou bien un flux, qui exprime une quantité rapportée à une unité de temps. Ces valeurs sont souvent intéressantes à confronter à l'intensité des crues enregistrées au cours de la même période, par exemple.

Enfin, dans le cas de l'observation d'un objet immergé, situé sur le fond ou dans la colonne d'eau, les séries temporelles produites par imagerie in situ mettent en évidence des « fenêtres de visibilité », évoquées au cours de ce manuscrit. Dans ces fenêtres sont réunies les conditions environnementales (notamment hauteur d'eau et luminosité, mais pas uniquement) qui permettent l'observation de l'objet suivi. Les identifier permet de prédire les périodes où l'objet est a priori visible sur les images, et donc de sélectionner celles qui sont réellement utiles pour les traitements à effectuer.

Bien que l'exploitation du jeu de données produit à Francheville n'ait pas été assez poussée, l'évolution schématique de la surface ensablée sur l'Yzeron a été représentée sur la figure 106. En effet, les retours d'expérience résultant de l'analyse des différents jeux de données traités dans le cadre de cette thèse, et de la réflexion sur les temporalités présentées en figure 105, permettent d'envisager le type d'observation possible sur le site de l'Yzeron. De la même manière qu'à Mollon, l'objet suivi étant localisé sous la surface de l'eau, des « fenêtres de visibilité » permettraient de disposer d'observations qui ne peuvent qu'être discontinues dans le temps. Je fais ainsi l'hypothèse que les cycles observés sont liés à l'existence de conditions-seuil : certains évènements de crue, de débits dépassant une certaine intensité, amènent des quantités de sable qui colmatent le fond du cours d'eau. Des débits moins importants, qui correspondent à un autre seuil, doivent alors permettre d'évacuer progressivement ce sable. Deux points de rupture pourraient donc être mis en évidence, en lien avec des conditions hydrologiques particulières.

246



Figure 106 : Représentation schématique de l'évolution supposée de la surface ensablée sur le site de Francheville.

III- Recommandations en matière d'acquisition d'images in situ pour étudier les milieux fluviaux

L'installation des capteurs constitue une étape primordiale de la démarche proposée dans ce manuscrit. Trois points sont à considérer avec soin pour optimiser les traitements d'images (voir figure 107). La qualité de ces traitements découle directement de la qualité des images et des jeux de données obtenus. La « qualité des images » est considérée comme bonne lorsqu'il est possible de distinguer visuellement sur ces images la scène d'étude et l'objet suivi et qu'une procédure d'automatisation de l'extraction de l'information est alors possible. Les trois points qu'il faut considérer avec attention avant l'installation des capteurs sont ainsi l'environnement du site d'étude, le type de support choisi pour l'installation et le modèle de capteur employé. La notion de qualité des images est intrinsèquement liée aux analyses et traitements envisagés : les types d'analyses et de traitements prévus sont donc partie intégrante des choix réalisés au niveau de ces trois points.

L'environnement : le choix du site d'étude doit considérer l'environnement dans lequel les acquisitions auront lieu, et donc les différentes contraintes qui en découlent. Tout d'abord, le choix du support dépendra des éléments disponibles sur place. Les limites à l'acquisition de données de qualité en découleront également : les cycles de croissance/dégradation de la végétation peuvent conduire à l'obstruction de la scène visée tandis que l'acquisition en milieu urbanisé peut faire craindre un risque de vandalisme plus élevé, par exemple. Les conditions hydrologiques et morphologiques (faciès d'écoulement, fréquence des crues, risque d'érosion, turbidité de l'eau etc.) et météorologiques (conditions de luminosité, fréquence des précipitations, du brouillard, températures minimales etc.), intrinsèques à la situation géographique du site d'étude, seront déterminantes dans le choix du site, en fonction des possibilités d'observation de l'objet suivi.

- Le support : le choix du support détermine la qualité de l'installation qu'il est possible de concevoir. L'orientation du capteur est par exemple un élément primordial pour éviter les phénomènes de surexposition ou les reflets des éléments riverains. La solidité du support permet de disposer d'un cadre fixe qui garantit des traitements plus précis. L'utilisation d'un abri ou d'un système énergétique autonome contribue à la qualité des acquisitions, sachant que les interventions sur le capteur (nettoyage, changement des batteries) sont autant de raisons potentielles d'en modifier l'angle de visée. Les contraintes qui s'appliquent à chaque type de support sont également variables. L'utilisation d'un arbre posera la question de l'accessibilité au capteur et de la durabilité de l'installation. La présence d'éléments maçonnés ou d'ouvrages d'art posera plutôt la question du mode de fixation du capteur et de la législation qui s'applique.
- Le capteur : finalement, du type de capteur utilisé dépendent les résolutions spatiales, spectrales et temporelles des images. Les caractéristiques techniques telles que la vitesse d'obturation, l'utilisation d'un flash, la disponibilité des réglages possibles etc. sont intrinsèques au modèle d'appareil employé et fournissent autant de possibilités d'intervenir sur la qualité « optique » des acquisitions. L'espace de stockage des données, la résistance aux conditions extérieures (notamment le froid et l'humidité) et la consommation énergétique des capteurs pourront finalement être déterminants pour la durée des acquisitions, et éventuellement la période d'étude considérée.



Figure 107 : Impact des choix réalisés lors de l'installation des capteurs sur les traitements des images.

Certaines des limites à la bonne qualité des clichés semblent pouvoir être corrigées par des processus de traitement d'image, bien que dans un souci d'efficacité, le traitement individuel des images pour en améliorer la qualité n'est pas souhaitable. La présence d'ombre peut par exemple tout de même permettre l'extraction d'un signal exploitable, grâce à un travail sur les distributions radiométriques dans les zones touchées (Carbonneau et al., 2012b). Le décalage de l'angle de visée de la caméra au cours du temps devrait aussi pouvoir être surmontable grâce à un processus de géoréférencement automatique des images (par exemple celui proposé par P.E. Carbonneau et al., 2010) pour les recaler les unes par rapport aux autres. Mais trois contraintes majeures existent encore pour l'exploitation des images : les phénomènes de surexposition (reflets, trop forte luminosité dans un environnement enneigé, etc.), qui conduisent à une perte totale de l'information radiométrique dans la zone concernée ; la présence d'artéfacts (objets volants, flottants, animaux aquatiques etc.), qui se placent entre l'objectif et l'objet d'étude et donc affectent une partie de la scène visée ; les effets de flou dans la scène, qui modifient la distribution spatiale des valeurs radiométriques censées représenter la scène observée. Dans le cas de l'imagerie in situ, ce phénomène est dû principalement au vent, lorsque le support d'installation est un mât ou un arbre. Si l'objet observé est immergé, ce phénomène peut également être dû à un temps d'exposition du capteur trop long par rapport aux vitesses de surface de l'eau. Lors de la conception de l'installation, une attention particulière doit être portée à l'environnement, au support, et au capteur afin de s'assurer d'acquérir des images de qualité. Afin de prendre pleinement conscience des facteurs qui affectent les clichés produits, il est bon d'observer ceux-ci après un certain temps d'acquisition. La mise en évidence de certaines contraintes pourra conduire à la modification de l'installation, pour optimiser les prises de vue. La variabilité de la luminosité au cours des journées ou de l'année est un facteur qu'il est difficile d'évaluer sans une expertise non automatisée des images. L'observation des jeux de données sera toujours le meilleur moyen d'en saisir toutes les particularités.

IV- Perspectives de travail

Ce travail de thèse a permis de mieux évaluer les potentialités et les limites de l'utilisation de l'imagerie in situ pour l'étude des milieux fluviaux. Cependant, de nombreux aspects de l'exploitation et de l'automatisation des traitements des données restent à explorer pour une connaissance exhaustive des possibilités existantes. Il est notamment possible d'envisager de tester différentes méthodes de classification automatique des images. Parce qu'il m'a semblé plus efficace de travailler sur des groupes de pixels plutôt que sur des pixels individuels, et parce que les catégories d'appartenance de ces objets sont connues a priori, j'ai fait le choix de la classification orientée-objet avec apprentissage supervisé. La méthode des *random forests* est apparue la plus simple à mettre en

place et la plus efficace à la fois. Cependant il existe de nombreux autres outils qui pourraient potentiellement aussi convenir à la démarche proposée. La phase d'apprentissage étant une opération manuelle relativement longue, il est peut-être envisageable de développer des chaînes de traitement plus rapides, basées sur des outils qui ne requièrent pas une telle opération. La procédure d'extraction des paramètres est également une phase du traitement qui a nécessité énormément de temps. L'efficacité des scripts que j'ai développés (voir en Annexes) est donc clairement un point à optimiser, et cela peut potentiellement passer par l'utilisation d'un logiciel plus adapté au traitement d'images. C'est par exemple le cas de Matlab, qui n'a cependant pas l'avantage d'être un logiciel libre et gratuit comme R.

Pour chacun des sites d'étude exploités dans ce travail de thèse, un certain nombre de perspectives se présente pour améliorer les résultats obtenus sur le plan géomorphologique et hydrologique. Concernant l'Yzeron et la Mitis, il s'agirait tout d'abord de pouvoir pousser les analyses un peu plus loin afin de valider les hypothèses de départ. Le jeu de données acquis sur la Saint-Jean a été relativement bien exploité, cependant l'orthorectification des images aurait permis de cartographier les différents types de glace présents au cours du temps, et donc d'étudier leur importance relative dans une unité faisant plus de sens pour l'interprétation des résultats.

En ce qui concerne les acquisitions faites sur l'Ain, l'extraction du signal au cours du temps n'a malheureusement pas permis de relier les valeurs radiométriques à la hauteur d'eau sous la caméra. La cause la plus probable à cela est une variabilité des conditions lumineuses trop importante entre les différents clichés : dans les mêmes conditions de hauteur d'eau, même à un horaire constant, l'éclairage dans l'image semble être très variable d'un jour à l'autre, en fonction notamment des conditions météorologiques. Contrairement aux modèles bathymétriques plus traditionnellement développés, où l'emprise d'un cliché est relativement large et où la valeur de chaque pixel est interprétée comme une profondeur, dans mon cas j'ai essayé de caractériser la hauteur d'eau sur des clichés très nombreux, qui ne présentent pas tous les mêmes conditions d'éclairage. Pour parvenir à définir une telle relation, il faudrait donc pouvoir exploiter une information de teinte affranchie de l'impact de la luminosité dans la scène. Cela pourrait être envisageable grâce à un changement d'espace colorimétrique, par exemple. L'espace CieLab, développé par la CIE (International Commission on Illumination ou Commission Internationale de l'Eclairage) pourrait par exemple être intéressant car il isole l'information de « Luminance » des images dans un canal particulier. Deux autres canaux de « chrominance » sont calculés, pour référencer la radiométrie des pixels sur deux échelles différentes : du rouge au vert et du bleu au jaune. La relation entre radiométrie et hauteur d'eau pourrait donc être basée sur l'un de ces deux canaux, ou bien éventuellement sur les deux.

250

Les limites mises en évidence au sujet de l'exploitation du jeu de données acquis à Génissiat concernent d'une part la taille limitée de la ROI, qui ne permet pas de visualiser l'ensemble du bois présent dans la retenue, et d'autre part les variations de densité du radeau, qui sont a priori liées aux conditions de vitesses d'écoulement. A cause de cela, bien que la discrimination du bois et de l'eau semble très satisfaisante de manière automatique, l'estimation des quantités de bois présentes au cours de temps est problématique. Bien que probablement compliquées, des mesures de terrain complémentaires pourraient peut-être permettre de corréler la densité du bois à un indice de texture extrait des images. Le suivi de pièces de bois par géolocalisation dans la retenue pourrait par ailleurs permettre de comprendre les phénomènes de recirculation du bois à la surface de l'eau, en lien avec les variations de débits et éventuellement sous l'influence du vent. L'étude de la surface du radeau pourrait ainsi être menée dans des conditions comparables, similaires aux « fenêtres de visibilité » évoquées plus haut au sujet de l'observation d'éléments immergés.

Références bibliographiques

- ALI I. ET TOUGNE L., 2009, Unsupervised video analysis for counting of wood in river during floods, 5th International Symposium on Visual Computing, Las Vegas (USA), 30 Novembre -2 décembre 2009, pages 578–587.
- ANGULO J. ET SERRA J., 2004, Traitements des images de couleur en représentation luminance/saturation/teinte par norme L_1, Traitement du Signal, volume 21, numéro 6, pages 583-604.
- ATHA J.B., 2013, Fluvial Wood Presence and Dynamics over a Thirty Year Interval in Forested Watersheds, thèse de doctorat, Université de l'Oregon, 161 pages.
- BARRETO J.P., ROQUETTE J., STURM P. ET FONSECA F., 2009, Automatic camera calibration applied to medical endoscopy, dans Proceedings of the 20th British machine vision conference, London (Royaume Uni), 9 pages.
- BEAL D., 2006, Estimation des caractéristiques des aérosols à partir de la variation spectrale et spatiale du signal échantillonné par le capteur MERIS/ENVISAT : application à la correction atmosphérique, thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 196 pages.
- BEGUERIA S., 2006, Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management, dans Natural Hazards, volume 37, issue 3, page 315-329.
- BELTAOS S., 2008, Progress in the study and management of river ice jams, Cold Regions Science and Technology, volume 51, numéro 1, pages 2-19.
- BELTAOS S., 2000, Advances in river ice hydrology, Hydrological processes, volume 14, numéro 9, pages 1613–1625.
- BENACCHIO V., 2012, Etude des facteurs limitant la prédiction de la bathymétrie par imagerie : approche expérimentale à partir d'un capteur in situ sur la basse vallée de l'Ain, mémoire de M2, Université Lumière Lyon 2, Lyon, 61 pages.

- BENACCHIO V., PIÉGAY H., BUFFIN-BÉLANGER T. ET VAUDOR L., 2017, A new methodology for monitoring wood fluxes in rivers using a ground camera: Potential and limits, Geomorphology, volume 279, pages 44-58.
- BERGERON N. ET CARBONNEAU P. E., 2012, Geosalar: Innovative Remote Sensing Methods for Spatially Continuous Mapping of Fluvial Habitat at Riverscape Scale, dans CARBONNEAU P. E. ET PIÉGAY H. (edts), Fluvial Remote Sensing for Science and Management, chez John Wiley & Sons, chapitre 9, pages 193-213.
- BERTOLDI W., PIÉGAY H., BUFFIN-BÉLANGER T., GRAHAM D ET RICE S., 2012, Application of close-range imagery in river research, dans CARBONNEAU P.E. ET PIÉGAY H. (Edts.), Fluvial remote sensing for science and management, chez Wiley-Blackwell, chapitre 15, pages 341-366.
- BERTOLDI W., ZANONI L. ET TURBINO M., 2010, Assessment of morphological changes induced by flow and flood pulses in a gravel bed braided river: The Tagliamento River (Italy), dans Geomorphology, volume 114, pages 348-360.
- BERTOLDI W., GURNELL A., SURIAN N., TOCKNER C., ZANONI L., ZILIANI L. ET ZOLEZZI G., 2009, Understanding reference processes: linkages between river flow, sediment dynamics and vegetated landforms along the Taglamento River, Italy, dans River Research and Applications, volume 25, pages 501-516.
- BERTRAND M., LIEBAULT F. ET PIEGAY H., 2013, *Debris-flow* susceptibility of upland catchments, dans Natural Hazards, volume 67, issue 2, pages 497-511.
- BESNARD C., 2016, Application et développement de l'approche hydrogéomorphologique aux plaines alluviales du Québec méridional, mémoire de maitrise, Université du Québec à Rimouski (UQAR), 260 pages.
- BILBY R.E., 2003, Decomposition and nutrient dynamics of wood in streams and rivers, dans GREGORY, S.V., K.L. BOYER, AND A.M. GURNELL, (Edts.), The ecology and management of wood in world rivers, American Fisheries Society, Symposium 37, pages 135-147.

BOIVIN, M., 2016, Analyse par bilan ligneux de la dynamique des bois morts à multiples échelles spatiales et temporelles dans une rivière semialluviale de région froide, thèse de doctorat, Université de Lyon – Univesrité du Québec à Rimouski, 185 pages.

BOIVIN M., BUFFIN-BÉLANGER T. ET PIÉGAY H., 2017, Interannual kinetics (2010–2013) of large wood in a river corridor exposed to a 50-year flood event and fluvial ice dynamics, Geomorphology, volume 279, pages 59-73.

BOIVIN M., BUFFIN-BÉLANGER T. ET PIÉGAY H., 2015, *The* raft of the Saint-Jean River, Gaspé (Québec, Canada): A dynamic feature trapping most of the wood transported from the catchment, dans Geomorphology, volume 231, pages 270-280.

BOURGAULT D., 2008, *Shore-based photogrammetry of river ice*, Canadian Journal of Civil Engineering, volume 35, numéro 1, pages 80-86.

BRAUDRICK C.A. ET GRANT G.E., 2001, *Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment*, dans Geomorphology, volume 41, pages 263-283.

BUFFIN-BÉLANGER T. ET BERGERON N.E, 2011, *Editorial: Advances in river ice science*, River Research and Applications, volume 27, numéro 9, pages 1073-1075.

CAPO S., MARIEU V., BRU D., LUBAC B. ET BONNETON P., 2013, Decaldal morphodynamics evolution of mixed-energy inlet using multispectral Spot imagery, Coastal Dynamics 2013, pages 283-294.

CARBONNEAU P.E., 2005, The threshold effect of image resolution on image-based automated grain-size mapping in fluvial environments, dans Earth Surface Processes and Landforms, volume 30, pages 1687-1693.

CARBONNEAU P.E. ET PIÉGAY H. (Edts.), 2012, Fluvial remote sensing for science and management, chez Wiley-Blackwell, 440 pages.

CARBONNEAU P.E. ET PIÉGAY H., 2012, Introduction: The growing use of imagery in fundamental and applied river sciences, dans CARBONNEAU P.E. ET PIÉGAY H. (Edts.), Fluvial remote sensing for science and management, chez Wiley-Blackwell, chapitre introductif, pages 1-18. CARBONNEAU P.E., FONSTAD M.A., MARKUS W.A. ET DUGDALE S.J., 2012a, *Making riverscape real*, Geomorphology, volume 137, pages 74-86.

CARBONNEAU P.E., PIEGAY H., LEJOT J., DUNFORD R. ET MICHEL K., 2012b, *Hyperspatial imagery in riverine environments*, dans PIEGAY H. ET CARBONNEAU P., Fluvial remote sensing for science and management, Wiley and Sons, chapitre 8, pages 163-191.

CARBONNEAU P.E., DUGDALE S.J ET CLOUGH S., 2010, An automated georeferencing tool for watershed scale fluvial remote sensing, River research and applications, volume 26, numéro 5, pages 650-658.

CARBONNEAU P.E., LANE S.N. ET BERGERON N.E., 2006, Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments, Earth Surface Processes and Landforms, volume 31, numéro 11, pages 1413-1423.

CARBONNEAU P.E., BERGERON N.E. ET LANE S.N., 2005a, Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes, dans Water Resources Research, volume 41, 9 pages.

CARBONNEAU P.E., BERGERON N.E. ET LANE S.N., 2005b, Texture-based image segmentation applied to the quantification of superficial sand in salmonid river gravels, Earth Surface Processes and Landforms, volume 30, numéro 1, pages 121-127.

CARBONNEAU P.E., LANE S.N. ET BERGERON N.E., 2004, Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers, using airborne digital imagery, dans Water Resources Research, volume 40, 11 pages.

CARBONNEAU P.E., LANE S.N. ET BERGERON N.E., 2003, Cost-effective non-metric close-range digital photogrammetry and its application to a study of coarse gravel river beds, dans International journal of remote sensing, volume 24, numéro 14, pages 2837-2854.

CHANDLER J., ASHMORE P., PAOLA C., GOOCH M. ET VARKARIS F., 2002, Monitoring River-Channel Change Using Terrestrial Oblique Digital Imagery and Automated Digital Photogrammetry, Annals of the Association of American Geographers, volume 92, numéro 4, pages 631-644. CHARLTON R., 2008, Fundamentals of fluvial geomorphology, chez Taylor and Francis e-library, 234 pages.

- COMITI F., ANDREOLI A ., LENZI M.A. ET MAO L., 2006, Spatial density and characteristics of woody debris in five mountain rivers of the Dolomites (Itailan Alps), dans Geomorphology, volume 78, pages 44-63.
- COMITI F., ANDREOLI A., MAO L. ET LENZI M.A., 2008, Wood storage in three mountain streams of the Southern Andes and its hydro-morphological effects, dans Earth Surface Processes and Landforms, volume 33, pages 244-263.
- CONNERS R.W., TRIVEDI M.M. ET HARLOW C.A., 1984, Segmentation of a high-resolution urban scene using texture operators, Computer vision, graphics, and image processing, volume 25, pages 273-310.
- COTTET M., 2010, La perception des bras morts fluviaux, Le paysage, un médiateur pour l'action dans le cadre de l'ingénierie de la restauration. Approche conceptuelle et méthodologique appliquée aux cas de l'Ain et du Rhône, thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon 3, 320 pages.
- DAIGLE A., BÉRUBÉ F., BERGERON N. ET MATTE P., 2013, *A* methodology based on Particle image velocimetry for river ice velocity measurement, Cold Regions Science and Technology, volume 89, pages 36-47.
- DE CASTILHO BERTANI T., DE FÀTIMA ROSSETTI D. ET GURGEL ALBUQUERQUE P.C., 2013, Object-based classification of vegetation and terrain topography in Southwestern Amazonia (Brazil) as a tool for detecting ancient fluvial geomorphic features, Computers & Geosciences, volume 60, pages 41-50.
- DUBÉ J., 2009, Effet de la morphologie d'une succession seuil-mouille sur la croissance et l'évolution d'un couvert de glace dans un tronçon de la rivière Rimouski, Est du Québec, mémoire de Maîtrise, Université du Québec, 101 pages.
- DRAMAIS G., LE COZ J., CAMEMEN B. ET HAUET A., 2011, Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage– discharge curves, Journal of Hydro-environment Research, volume 5, numéro 4, pages 301-312.

- DROUIN H., 2007, Validation quantitative des cartes de glace de rivière. RADARSAT-1, mémoire de maîtrise, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 102 pages.
- EIJKELKAMP AGRISEARCH EQUIPMENT, 2007, *Mini-Diver Manuel d'utilisation*, 25 pages.
- ELACHI F. ET VAN ZYL J., 2006, *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*, chez Wiley, deuxième édition, 552 pages.
- FEARNS P.R.C., KLONOWSKI W., BABCOCK R.C., ENGLAND P. ET PHILIPS J., 2011, Shallow water substrate mapping using hyperspectral remote sensing, Continental shelf research, volume 31, pages 1249-1259.
- FEURER D., 2009, *Géométrie 3D des lits de rivière par stéréophotogrammétrie à travers l'eau*, thèse de doctorat, AgroParistech et Université Laval, 258 pages.
- FEURER D., BAILLY J-S., PUECH C., LE COARER Y. ET VIAU A.A., 2008, Very high-resolution mapping of riverimmersed topography by remote sensing, Progress in physical geography, volume 32, numéro 4, pages 403-419.
- FLAMINIO, S., COTTET, M., ET LE LAY, Y-F., 2015, A la recherche de l'Yzeron perdu : quelle place pour le paysage dans la restauration des rivières urbaines?, Norois, volume 4, pages 65-79.
- FONSTAD M.A. ET MARCUS W.A., 2005, Remote sensing of stream depths with hydraulically assisted bathymetry (HAB) models, Geomorphology, volume 72, pages 320-339.
- FUCHS H., MAGDON P., KLEINN C. ET FLESSA H., 2009, Estimating aboveground carbon in a catchment of the Siberian forest tundra: Combining satellite imagery and field inventory, dans Remote sensing of environment, volume 113, pages 518-531.
- GEERLING G.W., VREEKEN-BUIJS M.J., JESSE P., RAGAS A.M.J. ET SMITS A.J.M., 2009, Mapping river floodplain ecotopes by segmentation of spectral (CASI) and structural (LiDAR) remote sensing data, River Research and Applications, volume 25, numéro 7, pages 795-813.

GILVEAR D., HUNTER P. ET HIGGINS T., 2007, An experimental approach to the measurement of the effects of water depth and substrate on optical and near infra-red reflectance: a field-based assessment of the feasibility of mapping submerged instream habitat, International Journal of Remote Sensing, volume 28, numéro 10, pages 2241-2256.

GILVEAR D.J., DAVIDS C. ET TYLER A.N., 2004, The use of remotely sensed data on channel hydromorphology; River Tummel, Scotland, River Research and Applications, volume 20, numéro 7, pages 795–811.

GILVEAR D.J. ET BRYANT R., 2003, Analysis of aerial photography and other remotely sensed data, dans KONDOLF G.M. ET PIÉGAY H. (edts), Tools in fluvial geomorphology, chez Wiley, chapitre 6, pages 135 à 170.

GIRARD M-C. ET GIRARD C.M., 1999, *Traitement des* données en télédétection, chez Dunod, 529 pages.

GONZALEZ R.C., WOODS R.E. ET EDDINS S.L., 2004, *Digital image processing using Matlab*, chez Pearson Prentice Hall, première édition, 609 pages.

GRAHAM D.J., RICE S.P. ET REID I., 2005, A transferable method for the automated grain sizing of river gravels, Water Resources Research, volume 41, numéro 7, W07020.

GROSPRETRE L., 2011, Etude et gestion des impacts hydrogéomorphologiques de la périurbanisation. L'exemple du bassin de l'Yzeron dans l'Ouest lyonnais, thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2, 280 pages.

HABERSACK H. (Dir.), 2015, WP5 report – Sediment transport monitoring, Alpine Space, SedAlp project, 254 pages.

HAMEL V.B., BUFFIN-BELANGER T. ET HETU B., 2013,
Contribution à l'étude de l'érosion des berges :
analyse à haute résolution spatio-temporelle des
mouvements subaériens sur une berge de la rivière
Ouelle, Québec, Canada, dans Géomorphologie :
Relief, Processus, Environnement, volume 2/2013,
pages 119-132.

HANDCOCK R.N., GILLESPIE A.R., CHERKAUER K.A., KAY J.E., BURGES S.J. ET KAMPF S.K., 2006, Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales, Remote Sensing of Environment, volume 4, numéro 100, pages 427-440. HARALICK R.M., SHANMUGAM K. ET DINSTEIN I., 1973, *Textural features for image classification*, dans IEEE Transaction on systems, man and cybernetics, volume SMC-3, numéro 6, pages 610-621.

HAUET A., JODEAU M., LE COZ J., MARCHAND B., DIE MORAN
A., LE BOURSICAUD R. ET DRAMAIS G., 2014,
Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière, dans la Houille
Blanche, EDP Sciences, numéro 3, pages 16-22.

HAUET A., CREUTIN J-D. ET BELEUDY P., 2008, Sensitivity study of large-scale particle image velocimetry measurement of river discharge using numerical simulation, Journal of Hydrology, volume 349, numéro 1-2, pages 178-190.

HASTIE T., TIBSHIRANI R. ET FRIEDMAN J., 2009, *The* elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, chez Springer, 2ème edition, 745 pages.

HECKMANN T., GEGG K., GEGG A. ET BECHT M., 2013, Sample size matters : investigating the effect of sample size on a logistic regression debris flow susceptibility model, dans Natural Hazards and Earth System Sciences Discussion, volume 1, n°3, pages 2731-2779.

HEIKKILA J. ET SILVEN O., 1997, A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer vision and pattern recognition, pages 1106-1112.

HEUMANN B.W., 2011, An Object-Based Classification of Mangroves Using a Hybrid Decision Tree— Support Vector Machine Approach, Remote Sensing, volume 3, numéro 12, pages 2440-2460.

HORN B.K.P., 2000, *Tsaï's camera calibration method revisited*, copyright 2000, https://www.ai.mit.edu/people/bkph/papers/tsai explain.pdf

JAMES G., WITTEN D., HASTIE T. ET TIBSHIRANI R., 2013, An introduction to statistical learning with applications in R, chez Springer, 426 pages.

JAVERNICK L., BRASINGTON J. ET CARUSO B., 2014, Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry, Geomorphology, volume 213, pages 166-182. KAY S., HEDLEY J.D. ET LAVENDER S., 2009, Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes : a review of methods for visible and near-infrared wavelengths, dans Remote sensing, volume 1, numéro 4, pages 697-730.

KELLER E.A. ET SWANSON F.J., 1979, Effect of large organic material on channel form and fluvial processes, Earth Surface Processes, volume 4, pp. 361-380.

KRAMER N. ET WOHL E., 2014, Estimating fluvial wood discharge using time-lapse photography with varying sampling intervals, dans Earth surface processes and landforms, volume 39, n°6, pages 844-852.

KULIKOVA M.S., 2009, Shape Recognition for Image Scene Analysis, these de doctorat, Université de Nice – Sophie Antipolis, 143 pages.

LA CECILIA D., TOFFOLON M., WOODCOCK C.E. ET FAGHERAZZI S., 2016, Interactions between river stage and wetland vegetation detected with a Seasonality Index derived from LANDSAT images in the Apalachicola delta, Florida, Advances in Water Resources, volume 89, pages 10-23.

LALONDE J-F., 2011, Understanding and recreating visual appearance under natural illumination, thèse de doctorat, Carnegie Mellon University, 211 pages.

LASSETTRE N.S. ET KONDOLF G.M., 2012, Large woody debris in urban stream channels: redefining the problem, dans River research and applications, volume 28, pages 1477-1487.

LEGLEITER C.J. ET FONSTAD M.A., 2012, An introduction to the physical basis for deriving river information by optical remote sensing, dans CARBONNEAU P.E. ET PIÉGAY H. (Edts.), Fluvial remote sensing for science and management, chez Wiley-Blackwell, chapitre 3, pages 43-70.

LEGLEITER C.J. ET ROBERTS D.A, 2005, Effects of channel morphology and sensor spatial resolution on image-derived depth estimates, Remote Sensing of Environment, volume 95, numéro 2, pages 231-247.

LEGLEITER C.J., ROBERTS D.A., MARCUS W.A. ET FONSTAD M.A., 2004, Passive optical remote sensing of river channel morphology and in-stream habitat: Physical basis and feasibility, Remote Sensing of Environment, volume 93, numéro 4, pages 493-510. LEJOT J., 2008, Suivi des formes fluviales par télédétection à très haute résolution. Application aux programmes de restauration de la basse vallée de l'Ain et du Haut-Rhône (Chautagne), thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2, 257 pages.

LEJOT J., PIEGAY H., HUNTER P.D., MOULIN B. ET GAGNAGE M., 2011, Utilisation de la télédétection pour la caractérisation des corridors fluviaux: exemples d'applications et enjeux actuels, Géomorphologie: relief, processus, environnement, volume 17, numéro 2, pages 157–172.

LEJOT J., DELACOURT C., PIÉGAY H., TRÉMÉLO M.L., FOURNIER T., 2007, Very high spatial resolution imagery for reconstructing channel bathymetry and topography from an unmanned controlled platform, dans Earth Surface Processes and Landforms, volume 32, pages 1705-1725.

LILLESAND T.M., KIEFER R.W. ET CHIPMAN J.W., 2008, *Remote sensing and image interpretation*, chez Wiley, sixième édition, 756 pages.

LOUCHARD E.M., REID R.P. ET STEPHENS F.C., 2003, Optical remote sensing of benthic habitats and bathymetry in coastal environments at Lee Stocking Island, Bahamas: a comparative spectral classification approach, Limnology and oceanography, volume 48, numéro 1, partie 2, pages 511-521.

LYN D.A., COOPER T., YI Y-K., SINHA R ET RAO A.R., 2003, Debris Accumulation at Bridge Crossings: Laboratory and Field Studies, rapport final, School of Civil Engineering, Purdue University, 59 pages.

MACVICAR B.J., HAUET A., BERGERON N., TOUGNE L. ET IMTIAZ A., 2012, *River monitoring with groundbased videography*, dans PIEGAY H. ET CARBONNEAU P., Fluvial remote sensing for science and management, Wiley and Sons, chapitre 16, pages 367-383.

MACVICAR B. ET PIÉGAY H., 2012, Implementation and validation of video monitoring for wood budgeting in a wandering piedmont river, the Ain River (France), dans Earth processes and landforms, volume 37, n°12, pages 1272-1289.

MacVICAR B.J., PIEGAY H., HENDERSON A., COMITI F., OBERLIN C. ET PECORARI E., 2009, Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers: field trials of wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques, dans Earth Surface Processes and Landforms, volume 34, pages 2031-2046. MADIGOU E., 2005, Influence du statut trophique de cours d'eau sur les fonctionnalités

microbiennes des biofilms (épipsammon et épilithon), thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1,236 pages.

MARCUS W.A., 2002, Mapping of stream microhabitats with high spatial resolution hyperspectral imagery, Journal of geographical systems, volume 4, pages 113-126.

MARCUS W.A. ET FONSTAD M.A., 2010, Remote sensing of rivers : the emergence of a subdiscipline in the river sciences, dans Earth Surface Processes and Landforms, volume 35, pages 1867-1872.

MARCUS W.A. ET FONSTAD M.A., 2008, Optical remote mapping of rivers at sub-meter resolutions and watershed extents, Earth Surface Processes and Landforms, volume 33, numéro 1, pages 4-24.

MARCUS W.A., LEGLEITER C.J., ASPINALL R.J., BOARDMAN J.W. ET CRABTREE R.L., 2003, High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams, dans Geomorphology, volume 55, n° 1-4, pages 363-380.

MARTIN D.J. ET BENDA L.E., 2001, Patterns of instream wood recruitment and transport at the watershed scale, dans Transactions of the American Fisheries Society, volume 130 pages 940-958.

MELEDER V., LAUNEAU P., BARILLE L. ET RINCE Y., 2003, Cartographie des peuplements du microphytobenthos par télédétection spatiale visible-infrarouge dans un système conchylicole, Comptes Rendus Biologies, volume 326, pages 377-389.

MORETTO J., DELAI F. ET LENZI M.A., 2013, Hybrid DTMS derived by lidar and colour bathymetry for assessing fluvial geomorphic changes after flood events in gravel-bed rivers (tagliamento, piave and brenta rivers, italy), International Journal of Safety and Security Engineering, volume 3, numéro 1, pages 128-140.

Moss B., 2010, Ecology of freshwater – a view for the twenty-first century, Wiley-Blackwell, 4° édition, 470 pages.

MOULIN B., 2005, Variabilité spatiale et temporelle du bois mort dans le réseau hydrographique de l'Isère à l'amont de Grenoble, thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, 448 pages. MOULIN B. ET PIÉGAY H., 2004, Characteristics and temporal variability of large woody debris trapped in a reservoir on the river Rhône (Rhône): implications for river basin management, dans River Research and Applications, volume 20, pages 79-97.

MIYAMOTO E. ET MERRYMAN T., 2005, Fast calculation of Haralick texture features, https://www.inf.ethz.ch/personal/markusp/teachi ng/18-799B-CMU-spring05/material/eizantad.pdf.

NAFZIGER J., MORLEY J., HICKS F., LINNANSAARI T., FRASER A., PENNELL C. ET CUNJAK R., 2011, *Freeze-up*, *breakup*, and winter ice observations on four small regulated and unregulated streams in Newfoundland, Canada, 16th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Winnipeg, Manitoba.

OLIVIER J-M., CARREL G., LAMOUROUX, N., DOLE-OLIVIER M-J., MALARD F., BRAVARD J-P., AMOROS C., 2009, *The Rhône River Basin*, dans TOCKNER K., UEHLINGER U. AND ROBINSON C.T. (Edts.), *Rivers of Europe*, chez Academic Press, London, chapitre 7, pages 247-295.

OTHONIEL C., 2006, La croissance du biofilm photosynthétique : un indicateur du statut trophique des cours d'eau ?, thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 277 pages.

PASQUALINI V., PERGENT-MARTINI C., CLABAUT P., MARTEEL H. ET PERGENT G., 2001, Integration of aerial remote sensing, photogrammetry, and GIS technologies in seagrass mapping, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, volume 67, numéro 1, pages 99-105.

PESCE S., TLILI A. ET MONTUELLE B., 2008, Les biofilms aquatiques : dans quelle mesure permettent-ils de comprendre l'effet des pesticides sur le fonctionnement des cours d'eau ? Exemple en zone de vignoble, Ingénieries, n°55-56, pages 79-91.

POWER M., LOWE R., FUREY P., WELTER P., LIMM M., FINLAY
J., BODE C., CHANG S., GOODRICH M. ET SCULLEY J.,
2008, Algal mats and insect emergence in rivers
under Mediterranean climates: towards
photogrammetric surveillance, Freshwater
Biology, volume 54, numéro 10, pages 2101-2115.

RASO T., 2011, Mise en place d'une méthodologie d'étude diachronique des méso-habitats piscicoles à partir de photographies aériennes et d'images satellitales, mémoire de fin d'étude, ENGEES, 75 pages.

RAVAZZOLO D., MAO L., PICCO L., SITZIA T. ET LENZI M.A., 2015, *Geomorphic effects of wood quantity and characteristics in three Italian gravel-bed rivers*, dans Geomorphology, volume 246, pages 79-89.

REGNIERS O., 2014, Méthodes d'analyse de texture pour la cartographie d'occupations du sol par télédetection très haute résolution: application à la fôret, la vigne et les parcs ostréicoles, thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 146 pages.

RICOLFE-VIALA C. ET SANCHEZ-SALMERON A.J., 2011, Using the camera pin-hole model restrictions to calibrate the lens distortion model, Optics & Laser Technology, volume 43, numéro 6, pages 996-1005.

RICOLFE-VIALA C. ET SANCHEZ-SALMERON A.J., 2010, Correcting non-linear lens distortion in cameras without using a model, Optics & Laser Technology, volume 42, numéro 4, pages 628-639.

RIQUIER J., 2015, Réponses hydrosédimentaires de chenaux latéraux restaurés du Rhône français. Structures spatiales et dynamiques temporelles des patrons et des processus, pérennité et recommandations opérationnelles, thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2, 293 pages.

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 pages.

ROUSSILLON T., PIÉGAY H., SIVIGNON I., TOUGNE L. ET LAVIGNE F., 2009, Automatic computation of pebble roundness using digital imagery and discrete geometry, Computers & Geosciences, volume 35, numéro 10, pages 1992-2000.

RUIZ-VILLANUEVA V., PIÉGAY H., GAERTNER V., PERRET F. ET STOEFFEL M., 2016, Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers, dans Catena, volume 140, pages 182-194.

RUIZ-VILLANUEVA V., DIEZ-HERRERO A., BODOQUE J.M. ET BLADÉ E., 2014, Large wood in rivers and its influence on flood hazard, dans Cuadernos de Investigacion Geografica, numéro 40, volume 1, pages 229-246. SANIN A., SANDERSON C. ET LOVELL B.C., 2012, Shadow detection: A survey and comparative evaluation of recent methods, Pattern Recognition, volume 45, numéro 4, pages 1684-1695.

SEO J.I., NAKAMURA F., NAKANO D., ICHOYANAGI ET CHUN K.W., 2008, Factors controlling the fluvial export of large woody debris, and its contribution to organic carbon budgets at watershed scales, dans Water Resources Research, volume 44, W04428, 13 pages.

SCHAEPMAN-STRUB G., SCHAEPMAN M.E., PAINTER T.H., DANGEL S. ET MARTONCHIK J.V., 2006, *Reflectance quantities in optical remote sensing—definitions and case studies*, Remote Sensing of Environment, volume 103, numéro 1, pages 27-42.

SHE Y., ANDRISHAK R., HICKS F., MORSE B., STANDER E., KRATH C., KELLER D., ABARCA N., NOLIN S., TANEKOU F.N. ET MAHABIR C., 2009, Athabasca River ice jam formation and release events in 2006 and 2007, Cold Regions Science and Technology, volume 55, numéro 2, pages 249-261.

SMITH M.J. ET PAIN C.F., 2009, Applications of remote sensing in geomorphology, Progress in Physical Geography, volume 33, numéro 4, pages 568-582.

STUMPF A. ET KERLE N., 2011, Object-oriented mapping of landslides using Random Forests, Remote Sensing of Environment, volume 115, numéro 10, pages 2564-2577.

TSAI R.Y., 1987, A versatile camera calibration technique for high acuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, IEEE Journal of robotics and automation, volume RA-3, numéro 4, pages 323-344.

TURNER W., SPECTOR S., GARDINER N., FLADELAND M., STERLING E. ET STEININGER M., 2003, *Remote sensing for biodiversity science and conservation*, Trends in Ecology & Evolution, volume 18, numéro 6, pages 306-314.

WAWRZYNIAK V., 2012, Etude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique: exemples dans le bassin du Rhône, thèse de doctorat, Université Jean Monet Lyon 3, 171 pages.

WILLIAM D.J., RYBICKI N.B., LOMBANA A.V., O'BRIEN T.M. ET GOMEZ R.B., 2003, Preliminary investigation of submerged aquatic vegetation mapping using hyperspectral remote sensing, Environmental Monitoring and Assessment, volume 81, pages 383-392.

- ZANONI L., GURNELL A., DRAKE N. ET SURIAN N., 2008, Island dynamics in a braided river from analysis of historical maps and air photographs, River Research and Applications, volume 24, numéro 8, pages 1141-1159.
- ZHANG Z., 2000, A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transaction on patterns analysis and machine intelligence, volume 22, numéro 11, pages 1330-1334.

Références numériques

Organisme / site	Lien internet	Date de visite
Site officiel de l'administration française	www.service-public.fr/particuliers/vosdroits	Février 2017
Banque Hydro	hydro.eaufrance.fr	Août 2015
Bassin RM&C	www.rdbrmc.com/hydroreel2	Mai 2012
Portail du droit français	www.legifrance.gouv.fr	Février 2017
Portail du droit québécois	legisquebec.gouv.qc.ca	Février 2017
Forge logicielle d'Irstea	forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv	Janvier 2017
OFEV	www.hydrodaten.admin.ch/fr/2170.html#historische_daten	Août 2015
Portail radiofréquences-santé- environnement du gouvernement français	www.radiofrequences.gouv.fr	Janvier 2017
SAGYRC	www.riviere-yzeron.fr	Janvier 2017
SBVA	www.bassevalleedelain.com	Janvier 2017
Outil de visualisation de la trajectoire du soleil	sunearthtool.com	Décembre 2016

Table des matières

Sommaire	1
Introduction générale	3
Chapitre I : Télédétection et caractérisation biophysique des rivières	5
I- Télédétection appliquée au domaine fluvial	5
I.1- Un champ scientifique en pleine croissance	5
I.2- L'acquisition d'images : quelques notions de base	6
I.2.1- Des vecteurs et des capteurs	6
I.2.1.a- Vecteurs	7
I.2.1.b- Capteurs	7
I.2.2- Quantités mesurées	9
I.3- L'application de la télédétection aux milieux fluviaux	10
I.4- Des potentialités fonction des vecteurs d'acquisition	
I.4.1- Supports satellites et aéroportés	11
I.4.1.a- Couverture au sol de l'imagerie satellite	11
I.4.1.b- Résolution spatiale et flexibilité de l'imagerie aérienne	
I.4.1.c- Limites des acquisitions aéroportées et satellites	13
I.4.2- Acquisitions in situ	13
I.4.2.a- Suivi des processus à haute résolution temporelle	13
I.4.2.b- Une résolution spatiale élevée	14
I.4.2.c- Complexité des mesures de terrain et acquisitions continues	14
I.4.3-Exemples d'études menées en télédétection fluviale	14
II- Traitements d'images appliqués à l'étude des cours d'eau	
II.1- Analyse visuelle des images	16
II.1.1- Photo-interprétation et qualité des données	16
II.1.1.a- Résolution spatiale	16
II.1.1.b- Résolution spectrale	16
II.1.2- Calculs et transformation des données	
II.1.2.a- Indices spectraux	
II.1.2.b- Changement d'espace colorimétrique	
II.1.3- Limites humaines de la photo-interprétation	19
II.2- Exploitation du signal radiométrique	19
II.2.1- Signature spectrale des objets	

II.2.2- Gradients lumineux et absorption	20
II.3- Etude de la texture	22
II.3.1- Matrice de cooccurrence	22
II.3.2- Indices de texture	22
II.3.3- Exploitation de la texture en traitement d'images	23
II.4- Classification automatique des images	24
II.4.1- Méthodes orientées-pixels ou orientées-objets	24
II.4.2- Apprentissage supervisé et non supervisé	25
II.4.2.a- Random forests	26
II.4.2.b- Support Vector Machine (SVM)	26
II.5- Détection automatique d'objets	26
II.5.1- Traitements classiques	26
II.5.2- Avantages de la vidéo	27
II.5.3- Méthode LSPIV	27
III- Etude des milieux fluviaux par imagerie in situ	28
III.1- Description et évolution d'un environnement fluvial	28
III.1.1- Description des formes fluviales	28
III.1.2- Elaboration de modèles numériques de terrain	29
III.1.3- Estimation de la bathymétrie	30
III.1.4- Caractérisation de la granulométrie et de la morphométrie	31
III.1.5- Analyse de la température	32
III.2- Mesures diachroniques, suivi temporel à pas de temps fins	32
III.2.1- Connaissance et évolution des processus fluvio-glaciels	32
III.2.2- Estimation des flux de bois et budget ligneux	34
III.2.3- Mesure de la vitesse d'écoulement de surface par LSPIV (Large-Scale Particule Velocimetry)	e Image 35
III.2.4- Présence de biofilm	37
III.2.5- Erosion des berges par processus subaériens	38
IV- Contraintes et limites de l'imagerie pour l'étude des cours d'eau	
IV.1- Résolution spatiale	39
IV.1.1- Résolution des images et taille des objets étudiés	39
IV.1.2- Le cas des pixels mixtes	41
IV.2- Traitements optiques des images	42
IV.2.1- Calibration	42

IV.2.1.a- Paramètres et modèles de calibration	42
IV.2.1.b- Méthodes de calibration	43
IV.2.2- Orthorectification et géoréférencement	44
IV.2.2.a- Orthorectification	44
IV.2.2.b- Géoréférencement	44
IV.3- Condition atmosphériques	45
IV.4- Variabilité des conditions lumineuses	46
IV.5- Ripisylve et ombres portées	47
IV.5.1- La ripisylve, un obstacle à la lumière	47
IV.5.2- Impact des ombres sur la radiométrie des images	48
IV.5.3- Traitement des ombres	48
IV.6- Surface de l'eau et formation de reflets	49
IV.6.1- Réfraction des rayons lumineux	49
IV.6.2- Réflexion des rayons lumineux	51
IV.7- Automatisation des traitements	53
IV.7.1- Une nécessité dans un contexte spatial et temporel de plus en plus étendu	53
IV.7.2- Des tests prometteurs	53
IV.7.3- Des limites qui persisteront	54
V- Conclusion du chapitre I	55
Chapitre II : Questionnements scientifiques, méthodologie générale et sites d'étude	57
I- Questionnements scientifiques et méthodologie	57
I.1- Questionnements scientifiques	57
I.2- Protocole méthodologique général	60
I.3- Sites d'étude, capteurs, tests réalisés et objets étudiés	62
1.3.1- Sites d'étude et capteurs utilisés	62
1.3.2- Objets d'étude et types de traitements : réflexion théorique sur la méthode éla	oorée 64
1.3.2.a- Milieux observés	64
1.3.2.b- Eléments étudiés : objets caractérisés au cours du temps	67
1.3.2.c- Types de suivis et procédures mises en place	69
1.3.3- Tests réalisés	70
II- Sites d'études : contexte opératoire et données utilisées	71
II.1- Site de Génissiat (Rhône, France)	71
II.1.1- Localisation du capteur et contexte de l'installation	71
II.1.2- Variables d'intérêt	

II.1.2.a- Accumulations de bois dans la retenue du barrage	73
II.1.2.b- Bassin versant du Rhône en amont de Génissiat et données hydrologiques	74
II.2- Site de Mollon (Ain, France)	76
II.2.1- Localisation du capteur et contexte de l'installation	76
II.2.2- Variables d'intérêt	79
II.1.2.a- Hauteur d'eau sous la caméra	80
II.1.2.b- Données météorologiques et campagnes de balayage	84
II.3- Site de Francheville (Yzeron, France)	86
II.4- Site de la fosse Home (Saint-Jean) et site de Sainte-Angèle-de-Merici (Mitis), Québec	89
II.4.1- Site de la fosse Home	89
II.4.2- Site de Sainte-Angèle	92
Chapitre III : Acquisition des images et préparation des données	95
I- Conception d'une installation pour l'acquisition d'images	96
I.1- Recommandations concernant la conception de l'installation	96
I.1.1- Choix du site d'étude et du support du capteur	96
I.1.2- Choix du capteur	99
I.1.3- Configuration de l'installation	99
I.2- Remarques relatives à l'acquisition des images	101
I.2.1- Cadres légaux en France et au Québec	101
I.2.1.a- Installation de capteurs	101
I.2.1.b- Acquisition et exploitation d'images	102
I.2.2- Fréquence d'acquisition	102
I.2.3- Résolution spatiale des images	104
I.3- Retours d'expériences sur l'utilisation d'un filtre polarisant	104
I.3.1- Principe optique du filtre polarisant	104
I.3.2- Evaluation de l'effet d'un filtre polarisant sur la Mitis à Sainte-Angèle	105
I.3.3- Discussion des résultats du test et recommandations	109
II- Evaluation de la variabilité inter- et intra-journalière comme préalable à la sélection des ima à traiter	ages 110
II.1- Effet des ombres et de la luminosité sur l'observation d'éléments à la surface de l'eau .	111
II.2- Effet de la date, de l'heure et des conditions environnementales sur l'observation d'éléments sur le fond du cours d'eau : tests réalisés sur l'Ain	115
II.2.1- Méthodologie	115
II.2.2- Facteurs limitant la visibilité du fond par imagerie	117
II.2.2.a- Proportion relative des différents facteurs limitant la visibilité du fond	117

II.2.2.b- Impact de la hauteur d'eau sur la visibilité du fond	119
II.2.2.c- Impact de la période d'acquisition sur la visibilité du fond	122
Heure	122
Mois	123
II.2.2.d- Impact des conditions météo (insolation et nébulosité) sur la visibilité du for	nd 124
Insolation	124
Nébulosité	126
II.2.3- Conclusions du test et recommandations	127
II.3- Effet de la fréquence d'échantillonnage sur les variabilités inter- et intra-journalières signal extrait : test réalisé à Génissiat	du 129
II.3.1- Méthodologie	129
II.3.2- Variabilités intra- et inter-journalières de la surface de bois détectée	130
II.3.3- Conclusions du test et recommandations	134
III- Définition de la zone d'étude (Region Of Interest, ROI)	135
III.1- Extraction de certaines zones en vue de l'amélioration du traitement	135
III.1.1- Application d'un masque aux images	135
III.1.2- Réflexion des éléments riverains sur la surface de l'eau : l'exemple de Génissiat.	137
III.2- Evaluation de l'effet de la réduction de la ROI sur une image oblique	138
III.2.1- Méthodologie	139
III.2.2- Impact des cellules distantes sur la précision des résultats	140
III.2.3- Conclusions du test et recommandations	142
IV- Conclusion du chapitre III : éléments à retenir	142
Chapitre IV : Extraction et traitement du signal	145
I- Classification automatique des images	146
I.1- Principes de la classification automatique et outils de classification	146
I.1.1- Les étapes de la classification automatique	146
I.1.2- Classification orientée pixel ou classification orientée objet	147
I.1.3- Procédures avec apprentissage supervisé ou non supervisé	148
I.1.4- Outils statistiques de la classification automatique	148
I.1.5- Evaluation de la qualité de la classification automatique	148
I.2- Extraction des descripteurs	150
I.2.1- Nombre de paramètres à extraire	151
I.2.2- Choix des paramètres à extraire	152
I.3- Segmentation des images	154

I.3.1- Principe et intérêt de la segmentation	154
I.3.2- Segmentation automatique des images acquises à Génissiat	154
I.3.3- Segmentation des images selon une grille orthogonale	156
I.4- Constitution des échantillons d'observés, d'apprentissage et de validation	159
I.4.1- Echantillon d'observés	159
I.4.1.a- Nombre d'images étiquetées à dire d'expert	159
I.4.1.b-Mode de sélection des images	160
I.4.2- Echantillon d'apprentissage	161
I.4.2.a- Proportion de l'échantillon d'observés à sélectionner	161
I.4.2.b- Mode de sélection des individus	162
I.4.3- Réflexion sur la représentativité des échantillons	163
I.5- Phase de classification à dire d'expert	163
I.5.1- Nombre de classes à utiliser	163
I.5.1.a- Exemple d'une classification binaire	164
I.5.1.b- Exemple d'une classification plus complexe	164
I.5.2- Test comparatif de divers modes de gestion des éléments mixtes	166
I.5.2.a- Méthodologie mise en place	166
I.5.2.b- Résultats du test	167
I.5.2.c- Conclusions et recommandations	170
II- Post-traitement du signal	171
II.1- Opérations sur les bandes spectrales	171
II.1.1- Ratios et différences entre bandes spectrales	171
II.1.2- Test de la détection de l'effet d'un balayage sur l'évolution de la radiométrie d	u fond à
Mollon (Ain)	
II.1.2.a- Méthodologie	173
II.1.2.b- Résultats du test	174
II.1.2.c- Conclusions du test et recommandations	178
II.2- Orthorectification des images	178
II.2.1- Calcul de la résolution spatiale des images suite à l'orthorectification	178
II.2.2- Test illustant le lien entre répartition de la taille des pixels et forme de la ROI	179
II.2.2.a- Méthodologie	179
II.2.2.b- Résultats du test	182
II.2.2.c- Conclusions du test et recommandations	185
II.2.3- Test illustrant l'impact de la classification des éléments mixtes dans l'estimatio	n des

II.2.3.a- Méthodologie	186
II.2.3.b- Résultats du test	187
II.2.3.c- Conclusion et recommandations	189
II.2.4- Test illustrant l'importance de la résolution des données pour la qualité des ré	sultats
	189
II.2.4.a- Méthodologie	190
II.2.4.b- Résultats du test	191
II.2.4.c- Conclusions et recommandations	192
II.3- Conversion des surfaces occupées par un objet en volume ou en masse	192
II.3.1- Principe de la conversion	192
III.3.2- Exemple de la conversion des surfaces de bois en volumes de bois prédits sur images acquises à Génissiat	les 193
III.3.2.a- Méthodologie de conversion des données	193
III.3.2.b- Résultats de la conversion	195
III.3.2.c- Remarques concernant la méthode présentée	198
III- Conclusion de ce chapitre : éléments à retenir	199
Chapitre V : Exploitation des images	203
I- Evolution du signal et interprétation des résultats	204
I.1- Confrontation du signal à des données complémentaires	204
I.2- Analyses du signal après transformation des variables	205
II- Evolution des types de glace présents sur la Saint-Jean (Québec) au cours de l'hiver 201	0-2011.
	206
II.1- Méthodologie	206
II.2- Résultats et interprétations	208
II.3- Remarques et conclusions sur l'étude de la dynamique d'un couvert glaciel par ima situ	igerie in 213
III- Impact des campagnes de balayage du fond du cours d'eau sur la relation entre hauter et radiométrie des images sur l'Ain à Mollon	ur d'eau 215
III.1- Principe et méthodologie	215
III.2- Résultats et interprétation	217
III.2.1- Confrontation des séries temporelles de valeurs radiométriques et de débits.	217
III.2.2- Corrélation entre hauteur d'eau et moyennes des valeurs radiométriques	220
III.2.2.a- Dans la zone balayée	220
III.2.2.b- Dans la zone centrale des images	224
III.3- Remarques et conclusion	225

IV- Estimation du flux de bois produit par le bassin versant du Rhône par observation des
accumulations de bois dans la retenue du barrage de Génissiat (Rhône)
IV.1- Méthodologie
IV.2- Résultats et interprétation 230
IV.2.1- Des quantités de bois corrélées aux séries hydrologiques
IV.2.1.a- Mise en évidence de tendances globales
IV.2.1.b- Mise en évidence de tendances à une échelle plus fine
IV.2.1.c- Limites induites par la classification automatique
IV.2.1.d- Des facteurs externes qui affectent les prédictions des quantités de bois 236
IV.2.2- Rôle des différentes crues sur les quantités de bois prédites
IV.2.2.a- Des crues aux impacts variables dans le temps
IV.2.2.b- Des apports de bois variant en fonction de l'origine géographique des crues 239
IV.3- Remarques et conclusions
Conclusion générale et perspectives243
I- Synthèse des principaux résultats obtenus
II- Etude des milieux fluviaux par imagerie in situ : mise en évidence et mesures de différentes
temporalités
III- Recommandations en matière d'acquisition d'images in situ pour étudier les milieux fluviaux
IV- Perspectives de travail 249
Références hibliographiques 253
Références numériques
Table des matières
Table des Figures 270
Table des Figures 270 Table des Tableaux 275
Table des Figures 270 Table des Tableaux 275 Annexes 277
Table des Figures 270 Table des Tableaux 275 Annexes 277 Annexes 1 : Renommer des images selon la date et l'heure de prise de vue 1
Table des Figures 270 Table des Tableaux 275 Annexes 277 Annexe 1 : Renommer des images selon la date et l'heure de prise de vue i Annexe 2 : Etiquetage manuel des images constituant l'échantillon d'observés (travail dans une
Table des Figures 270 Table des Tableaux 275 Annexes 277 Annexe 1 : Renommer des images selon la date et l'heure de prise de vue i Annexe 2 : Etiquetage manuel des images constituant l'échantillon d'observés (travail dans une grille orthogonale, voir section I.3.3 du chapitre IV) iii
Table des Figures 270 Table des Tableaux 275 Annexes 277 Annexe 1 : Renommer des images selon la date et l'heure de prise de vue i Annexe 2 : Etiquetage manuel des images constituant l'échantillon d'observés (travail dans une grille orthogonale, voir section I.3.3 du chapitre IV) iii Annexe 3 : Extraction de paramètres radiométriques dans une liste d'images au format .jpg, et iii
Table des Figures 270 Table des Tableaux 275 Annexes 277 Annexe 1 : Renommer des images selon la date et l'heure de prise de vue i Annexe 2 : Etiquetage manuel des images constituant l'échantillon d'observés (travail dans une grille orthogonale, voir section I.3.3 du chapitre IV) iii Annexe 3 : Extraction de paramètres radiométriques dans une liste d'images au format .jpg, et export des tables de valeurs vii
Table des Figures 270 Table des Tableaux 275 Annexes 277 Annexe 1 : Renommer des images selon la date et l'heure de prise de vue i Annexe 2 : Etiquetage manuel des images constituant l'échantillon d'observés (travail dans une grille orthogonale, voir section I.3.3 du chapitre IV) iii Annexe 3 : Extraction de paramètres radiométriques dans une liste d'images au format .jpg, et export des tables de valeurs vii Annexe 4 : Application d'un random forest pour la prédiction des classes d'objets dans un jeu de dannées vii
Table des Figures 270 Table des Tableaux 275 Annexes 277 Annexe 1 : Renommer des images selon la date et l'heure de prise de vue i Annexe 2 : Etiquetage manuel des images constituant l'échantillon d'observés (travail dans une grille orthogonale, voir section 1.3.3 du chapitre IV) iii Annexe 3 : Extraction de paramètres radiométriques dans une liste d'images au format .jpg, et export des tables de valeurs vii Annexe 4 : Application d'un random forest pour la prédiction des classes d'objets dans un jeu de données. xii

Table des Figures

Figure 1 : Illustration des catégories de champs électromagnétiques et de quelques utilisations courantes, selo la longueur d'onde ou la fréquence. Modifié. d'après www.radiofrequences.gouv.fr	on 8
Figure 2 : Image multispectrale de la vallée de la rivière Yakima, Washigton, à la mi-août : à gauche, composition en couleurs réelles, bandes 1, 2 et 3 (bleu, vert et rouge) ; à droite, composition colorée	-
infra-rouge, bandes 2, 3, et 5 (vert, rouge et proche infrarouge). Lillesand et al., 2008, page 336 Figure 3 : Représentation de l'espace colorimétrique HSI sur des plans circulaires. Ceux-ci sont perpendiculaire à l'axe vertical de l'intensité. Gonzalez et al. 2004, page 210	17 25 18
Figure 4 : Image initiale « parrots » (a), et décomposition de l'image couleur selon lareprésentation en norme L1 : luminance (b), teinte (c) et saturation (d). Angulo et Serra, 2004, page 24	19
Figure 5 : Spectre de réflectance de l'eau et de deux espèces de végétation aquatique immergée(Va = Vallisneria americana : My = Myriophyllumspicatum), William et al. 2003, p.388,	20
Figure 6 : Zones en eau (gauche) et bathymétrie couleur (droite) sur un sous-tronçon du Tagliamento (Italie) e	n 21
Figure 7 : Exemples d'occupations du sol texturées dans les images optiques THR.Regniers, 2014, page 1 2 Figure 8 : Représentation schématique du principe de réfraction d'un rayon lumineux	24 50
Figure 9 :Déformations induites par un dioptre non plan pour des incidences fortes (relativement à la rugosité	51
Figure 10 : Représentation schématique du principe de réflexion d'un rayon lumineux	,1 52
Figure 10 : Representation serientarque du principe de renexion à dirité yon familieux instrument in situ. En	
italique : grandes phases de la méthode : en noir : principales étapes : en vert : étapes optionnelles	51
Figure 12 : Schéma de la phase optionnelle de classification automatique des images (en violet). En noir :	-
étapes du squelette principal de la méthode : en vert : étape optionnelle de la méthode	52
Figure 13 : Carte de localisation des trois caméras utilisées en France.	53
Figure 14 : Carte de localisation des deux caméras utilisées au Québec	53
Figure 15 : Illustration des capteurs utilisés sur les différents sites test : Axis 211W (a) et Reconvx PC800 (b).	54
Figure 16 : Représentation des contraintes et limites inhérentes aux différents types de mesures possibles par imagerie : en zone aérienne (A), à l'interface air/eau (B), dans la colonne d'eau (C), ou sur le fond du lit	
(D)	56
Figure 17 : Carte de localisation du barrage de Génissiat dans le bassin versant du Rhône	/1
Figure 18 : Installation réalisée sur le site de Génissiat (Rhône) (a) ; localisation et angle de vue de la caméra (b) : exemple d'image prise par la caméra (c).	73
Figure 19 : Localisation des stations hydrologiques du bassin versant du Rhône entre le Lac Léman et le barrag de Génissiat utilisées dans cette étude.	е 75
Figure 20 : Localisation du site de Mollon et de la station hydrométrique de Chazey-sur-Ain dans le bassin versant de l'Ain	77
Figure 21 : Localisation du site d'étude sur la commune de Villieu-Loyes-Mollon (a), et localisation des différents capteurs (b) : un capteur de pression atmosphérique, une caméra (c) et un capteur de hauteu d'eau (d).	r 78
Figure 22 : Exemple d'image constituant le jeu de données de Mollon : image acquise le 8 août 2012 (102,2 cn d'eau).	ו 79
Figure 23 : Hauteur d'eau mesurée à Mollon en fonction du débit mesuré à Chazey-sur-Ain. Les couleurs	-
representent les acquisitions faites sur differentes periodes.	32
Figure 24 : Relations statistiques utilisees pour la prediction des hauteurs d'eau au niveau de la camera duran	i na
les periodes ou les piezometres n'ont pas fonctionne	32
Figure 25 : illustration des campagnes de balayage à Molion. La partie droite est prossee, la partie gauche est	20
IIUII DI USSEE	סנ
Figure 26 : Localisation du site d'etude de Francheville dans le bassin versant de l'Yzeron	5/
de décalage à 17h00	38

Figure 28 : Localisation du site d'étude dans le bassin versant de la saint-Jean (a), site de la fosse Home : emplacement et angle de vue de la caméra (b) ; exemple d'une mage acquise le 12 décembre 2010 à 15h00 (c)
Figure 29 : Illustration de la classification des glaces utilisée
Figure 30 : Linéaire des principales branches drainant le bassin versant de la Mitis (a) ; emplacement et angle
de vue de la caméra sur le site de Saint Angèle (Mitis) (c) ; installation des capteurs (c) et exemples
d'images prises par la caméra, avec (d) et sans (e) filtre polarisant, le 4 avril 2014 à 16h30
Figure 31 : Schéma global de la démarche proposée pour l'étude des cours d'eau par imagerie in situ : mise en
évidence des étapes traitées dans ce chapitre et problématiques associées
Figure 32 : Boitier de sécurité métallique (gauche) et camouflage des caméras (droite) de la marque Reconyx.97
Figure 33 : Modification du cadre des prises de vue due au décalage de la caméra dans le temps, sur la rivière
Saint-Jean (le 12 décembre 2010 à gauche, le 5 janvier 2011 à droite ; cadre initial en jaune sur les deux
images)
Figure 34 : Obstruction d'une partie de la zone d'étude par la croissance de la végétation sur l'Yzeron, le 12
février 2015 (gauche) et le 18 novembre 2013 (droite).
Figure 35 : Altération de la visibilité de la scène par la pluie (a) ou la neige (b)
Figure 36 : Illustration de l'un des problèmes à prendre en compte lors de l'installation des capteurs : la
formation de reflets en surface de l'eau (ainsi que les ombres portées), qui limitent la visibilité du fond du
cours d'eau (a) ou qui saturent complétement l'image (b) 100
Figure 37 : Illustration des angles d'Euler et de leur signification pour l'orientation de la prise de vue des
capteurs
Figure 38 : Schema du principe de la polarisation de la lumière et du filtre polarisant.
Figure 39 : injustration de l'evolution de l'aspect des images acquises sur la Mittis au cours du temps, sans (a, c,
E) et avec (b, d, f) fillte polarisant . le 10 (a et b), le 16 (c et d) et le 22 (e et f) avri 2014 à 11100 107
sur la Mitis dans les canaux rouge, vert et bleu, avec et sans filtre polarisant
Figure 41 : Distributions des intervalles interquartiles calculés dans la ROI des images acquises sur la Mitis avec
et sans filtre polarisant
Figure 42 : Evolution des ombres et de la luminosité sur les clichés acquis chaque heure à Génissiat, le 2
octobre 2012
Figure 43 : Profiles radiométriques des bandes rouge (traits pleins), verte (traits tiretés) et bleue (traits
pointillés) en plusieurs localisations d'une image de la retenue du barrage de Génissiat. La gauche des
graphiques correspond à la gauche ou au haut de l'image114
Figure 44 : Illustration de l'effet de saturation résultant d'une trop forte luminosité, le 27 mars 2011 sur la
Saint-Jean à 12h (a). La figure (b) présente la même scène, photographiée à 11h, qui n'est pas
surexposée
Figure 45 : Illustration de la zone centrale des images acquises à Mollon : zone d'observation pour la
classification en fonction de la visibilité du fond et zone d'extraction des paramètres radiométriques 116
Figure 46 : Illustration des facteurs recensées sur 607 images pour expliquer l'impossibilité de voir le fond du lit
en basses eaux (hauteur d'eau sur site <201 cm) : ombres (a) ; reflets (b) ; vagues (c) 117
Figure 47 : Effectifs des images pour lesquelles le fond est invisible à cause des reflets, en fonction de l'heure.
118
Figure 48 : Hauteur d'eau estimee sous la camera entre le 30 mars 2012 et le 1 avril 2013, avec visibilité ou
Invisibilité du fond du lit sur les images du jeu de données
Figure 49 : Distribution des hauteurs d'eau estimees sous la camera, par classe de visibilité du fond
Figure 50 : Probabilité de voir le fond par classe de nauteurs d'eau sous la camera
Figure 51 : Probabilité de voir le fond par neure de prise de vue
d'aqui estimées sous la caméra (cm) en fonction du mois (b)
Figure 53 · Probabilité de voir le fond du cours d'eau en fonction de l'insolation vécue dans l'heure
Figure 54 : Effectif des images nour chaque classe d'insolation, en fonction du mois de l'acquisition des clichés
125 125 1 Encount des intégés pour chaque classe à insolution, en fonction du mois de l'acquisition des clienes.
Figure 55 · Probabilité de voir le fond du cours d'eau en fonction de la nébulosité 126
Figure 56 : Surface du raft prédite (m^2) (a) et flux de bois (m^2/i) (b) en décembre 2011 avec séries temporelles
des valeurs horaires (acquises chaque heure entre 10h00 et 16h00) et quotidiennes (acquises à 13h00).

Figure 57 : Illustration du radeau de bois à 13h00 les 2 (a), 16 (b), 17 (c), 20 (d), 28 (e) et 29 (f) décembre 2011.
Figure 58 : Valeur moyenne journalière de la surface du radeau de bois (a) et variabilité intra-journalière (b) avant et après la crue du 16 décembre 2011
Figure 59 : Surface du radeau prédite à 13h00 en fonction de la surface moyenne calculée à partir de la
prédiction réalisée sur 7 images par jour, pour les cinq périodes étudiées (soit 250 images)
Figure 61 : Illustration des limites haute et basse de la zone de reflets des éléments riverains (a) et apparition du sol en basses eaux en rive gauche (b) de la retenue du barrage de Génissiat
Figure 62 : Masques appliqués lors des tests de classification automatique sur les images acquises à Génissiat : masque « normal » en hachures pleines et masque « agrandi » en hachures tiretées
Figure 63 : Nombre de mauvais classements pour chaque cellule de la ROI : avec masque initial (a), et « agrandi » (b)
Figure 64 : Surface prédite en fonction de la surface observée sur les 92 images de l'échantillon : avec application d'un masque « normal » (a) et d'un masque « agrandi » (b)
Figure 65 : Schéma global de la démarche proposée pour l'étude des cours d'eau par imagerie in situ : mise en évidence des étapes traitées dans le chapitre IV et questionnements associés
Figure 66 : Schéma global de la démarche proposée pour l'étude des cours d'eau par imagerie in situ : détail de la phase de classification et problématiques associées
Figure 67 : Illustration de la segmentation automatique réalisée sous ENVI pour trois des 29 images sélectionnées. Mise en évidence de l'effet des zones d'ombre et de soleil (a), de la segmentation dans une zone d'eau complétement libre et au niveau des reflets de la ripisylve (a et b), et de la capacité de
segmentation en cas de brouillard (c)
Figure 69 : Nombre de cellules classées automatiquement en fonction du nombre de cellules classées à dire d'expert en « bois », pour les deux modèles qui ne se basent que sur deux classes (« bois » et « eau »), avec des seuils de décisions fixés à 25 % (a) et à 50 % (b) pour l'étiquetage de la classe « bois »
Figure 70 : Surface prédite en fonction de la surface observée du radeau de bois, pour les deux modèles qui ne se basent que sur deux classes (« bois » et « eau »), avec des seuils de décisions fixés à 25 % (a) et à 50 %
Figure 71 : Illustration du comportement spectral du bois situé à l'ombre et au soleil et de l'eau, dans les canaux rouge (a), bleu (b), et dans les ratios de bandes « rouge - bleu » (c) et « bleu - rouge » (d), « rouge/bleu » (e) et « bleu/rouge » (d).
Figure 72 : Zones d'extraction des paramètres dans les images acquises à Mollon : zone balayée (à droite) et sa
Figure 73 : Rapport entre les valeurs radiométriques médianes extraites de la zone balayée et de la zone non balayée au cours du temps, dans les canaux rouge, vert et bleu. Les lignes verticales représentent les campagnes de balayage. Comparaison avec les hauteurs d'eau calculées sous la caméra (en bleu clair).
Figure 74 : Rapport entre les valeurs radiométriques médianes extraites de la zone balayée et de la zone non balayée, dans le canal rouge, relativement à chaque campagne de balayage. Comparaison avec les hauteurs d'eau calculées sous la caméra (en bleu clair) – la ligne tiretée représente la hauteur d'eau équivalente au module de l'Ain
Figure 75 : Acquisition de points au DGPS dans la retenue de Génissiat (a). Ensemble des points disponibles dans le système image (b) et dans le système géographique (c). Les points surlignés en bleu sont ceux retenus pour le processus d'orthorectification
Figure 76 : Acquisition de points au DGPS sur le site de Francheville sur l'Yzeron : localisation de l'ensemble des repères utilisés sur l'image oblique (a) et sur une vue verticale (b)
Figure 77 : Illustration du processus d'orthorectification appliqué aux images acquises à Génissiat (a) et (b) et à Francheville (c) et (d) : images brutes (a) et (c) et images orthorectifiées (b) et (d)
Figure 78 : Fréquence cumulée des cellules de la ROI en fonction de la taille relative cumulée des cellules dans les images de Génissiat et de Francheville, après le processus d'orthorectification
Figure 79 : Images représentant un radeau (a) de petite taille, observé le 04/02/2011 et (b) de grande taille, observé le 09/08/2013. Ces images sont utilisées pour comparer les tailles estimées en fonction des la gestion des cellules mixtes

Figure 80 : Grille d'extraction utilisée sur les images acquises à Génissiat, avec subdivision des cellules les plu éloignées de la caméra. En rose : la zone de battement de la limite des reflets de la végétation riverain	มร 1e. 190
Figure 81 : Surface prédite en fonction de la surface observée, avec une taille de cellules homogène (a) et différenciée (b).	192
Figure 82 : Mesure de la surface des radeaux de bois présents dans la retenue de Génissiat à la veille de cha	que
extraction mécanique : image brute (a), digitalisation manuelle du radeau (b) et orthorectification (c).	194
Figure 83 : Volume de bois estimé par la CNR en fonction du poids de DIB extraits lors de chaque campagne d'extraction.	196
Figure 84 : Volume de bois estimé (b) en fonction de la surface du radeau observée dans la retenue du barra	age
de Génissiat à la veille des campagnes d'extraction.	197
Figure 85 : Distribution de la surface de bois (a) et du volume de bois (b) prédits dans le jeu de données glob	bal
(1 118 images, prises à 13h00). Le volume a été estimé à partir de la surface prédite grâce à l'équation	ı
présentée dans la figure 84.	197
Figure 86 : Surface résultant de l'étiquetage à dire d'expert des cellules de la grille en fonction de la surface	
digitalisée manuellement dans les images.	199
Figure 87 : Schéma global de la démarche proposée pour l'étude des cours d'eau par imagerie in situ : étape	es et
problématiques associées à la phase d'exploitation des résultats.	204
Figure 88 : Série temporelle du nombre de cellules classées automatiquement (plages de couleurs) et à dire	
d'expert (croix) dans les différents types de glace au cours de l'hiver 2010-2011 sur la Saint-Jean au	
niveau de la fosse Home. La séquence présentée correspond à la période du 12 décembre 2010 au 24	
avril 2011	209
Figure 89 : Clichés extraits du jeu de données acquis à la fosse Home sur la Saint-Jean. Ces images, qui font	
partie de l'échantillon de validation constitué pour la phase de classification automatique des images,	ont
été sélectionnées pour illustrer les classifications expertes qui sont représentées sur la figure 88. La zo	ne
blanche transparente illustre le masque appliqué	210
Figure 90 : Confrontation des résultats de la classification automatique des images aux températures mesure	ées
à l'aéroport de Gaspé et aux débits mesurés sur la rivière York	212
Figure 91 : Illustration de la scène étudiée le 1 ^{er} mars 2011 à 12h00 (a) et à 13h00 (b). La surexposition de	
l'image conduit à des erreurs au cours de la classification automatique, qui se traduisent par des	
anomalies au sein de la série temporelle.	213
Figure 92 : Zone d'extraction des statistiques radiométriques dans les images acquises à Mollon entre le 30	.
mars et le 31 aout 2012.	216
Figure 93 : Distribution des valeurs radiométriques moyennes dans le canal rouge (en bas) et hauteurs d'eau mesurées sous la caméra (en haut) entre le 30 mars et le 31 aout 2012. Les lignes bleues verticales	r
représentent les différentes campagnes de balayage	218
Figure 94 : Distribution des variances dans le canal rouge (en bas, représentée en log) et hauteurs d'eau	
mesurées sous la caméra (en haut) entre le 30 mars et le 31 aout 2012. Les lignes bleues verticales	
représentent les différentes campagnes de balayage	219
Figure 95 : Radiométrie moyenne dans la zone balayée en fonction de la hauteur d'eau sous la caméra, pour	-
4 931 images (en noirs). Mise en evidence de cette relation pour certains facteurs particuliers qui	
améliorent théoriquement la qualité de cette relation. 35 images seulement (en fuchsia) rassemblent	
toutes ces conditions.	222
Figure 96 : Illustration de l'évolution de l'aspect des images au cours d'une journée, pour des conditions de	
hauteur d'eau et d'insolation constantes : le 24 juillet 2012 entre 7h30 et 16h00 (une image toutes les	; _
demi-heures : lire de gauche à droite et de haut en bas) ; hauteur d'eau variant entre 99,8 cm et 101,6	,
cm ; insolation = 60 min toute la journee	223
Figure 97 : Radiometrie moyenne calculee dans la zone centrale des images (voir figure 45 du chapitre III) er	۱
tonction de la nauteur d'eau sous la camera dans les 9 907 images acquises entre le 30 mars 2012 et le	е 225
1 BVTII 2013.	225
Figure 36 : Surface de pois predite, debit du knone, de l'Arve et de la Valserine et quantités de bois extraités	s ue
ia retenue un parrage de Genissiat entre juin 2013 et septembre 2014.	231
rigure 39. Cilcules extraits du jeu de données acquis à Genissiat illustrant l'évolution de l'embacié de bois en	itre
illustrer l'ávolution du signal de prédiction de la surface de l'empâcie	นเ ววว
הומשנובר דביטוענוטון עם שברומו עב ארבעוכנוטון עב זם שנומנב עב דבווושמנוב	252

Figure 100 : Séries temporelles lissées des débits du Rhône, des débits combinés de l'Arve et de la Valserine, du volume de bois contenu dans la retenue de Génissiat. Les signaux ont été lissés grâce à des	et
régressions loess, avec des paramètres span de 0,02 et 0,1	233
Figure 101 : Transformées de Fourier du débit du Rhône à Surjoux (a) et du taux d'accumulation du volume d bois (b)	le 235
Figure 102 : Séries temporelles du volume de bois prédit (a et b) et du flux quotidien de bois (c et d), et séries hydrologiques des deux principaux affluents du Rhône en amont du barrage de Génissiat, pour deux périodes de l'année 2013	s 238
Figure 103 : Volume de bois extrait (a) et volume de bois prédits par imagerie (b) en fonction des débits combinés de la Valserine et de l'Arve. La taille des cercles représente la contribution relative du débit d la Valserine par rapport au débit combiné de l'Arve et de la Valserine	រe 240
Figure 104 : Illustration de l'aspect et de la forme du radeau de bois le 17 juillet (a) et le 20 novembre (b) 201 le 27 février 2012 (c) et le 6 janvier 2014 (d), à 13h002	11, 241
Figure 105 : Représentation schématique des trois patrons d'évolutions observables et des différentes temporalités mesurables par imagerie in situ	245
Figure 106 : Représentation schématique de l'évolution supposée de la surface ensablée sur le site de Francheville	247
Figure 107 : Impact des choix réalisés lors de l'installation des capteurs sur les traitements des images 2	248

Table des Tableaux

Tableau 1 : Exemples d'études menées sur les milieux aquatiques par imagerie, selon trois types d'acquisit	ion :
Satellite, dell'enne et in situ.	15
rabieau 2 : synthèse des caracteristiques techniques, des localisations, des reglages et des prises de vue di cantours utilisés on fonction dos variables d'intérêt	es 65
Capteurs dunises en fonction des variables à interet	05
Tableau 3 : Milleu observe à partir des jeux de données acquis sur les différents sites d'étude	67
l'ableau 4 : Types de suivis possibles par imagerie in situ en fonction du milieu concerne, et types de suivis envisagés sur les différents jeux de données disponibles	68
Tableau 5 : Synthèse des tests, procédures et analyses réalisés sur les différents jeux de données acquis	70
Tableau 6: Données hydrologiques et débits caractéristiques du Rhône, de l'Arve et de la Valserine, prover	iant 76
Tableau 7: Hauteurs d'eau mesurées manuellement sous la caméra et par le piézemètre à la même beure	70
rableau 7. Hauteurs à éau mésures manuellement sous la camera et par le plezometre à la meme neure	pour op
Tableau 8 : Débits mesurés à la station de Chazey-sur-Ain et hauteurs d'eau correspondantes estimées sou	us la
camera,	83
l'ableau 9 : Synthèse des periodes couvertes par les différents jeux de données exploites dans le cadre de	OF
Telude du site de Molion,	00
Tableau 10 : Caracteristiques techniques des capteurs utilises sur les differents sites test.	99
Tableau 11 : Frequence des prises de vue et nombre d'images produites sur chaque site test	103
Tableau 12 : Valeurs caracteristiques des hauteurs d'eau estimees sous la camera : maximales, minimales i	et
moyennes permettant la visibilité du fond sur les images. Pour chaque valeur de hauteur d'eau, le de	ebit a
la station de Chazey sur Ain a été calculé en moyennant les valeurs correspondantes observées	121
Tableau 13 : Caractéristiques des deux masques et ROI testés et efficacité des modèles obtenus avec chaci	un.
	140
Tableau 14 : Synthèse des conclusions et recommandations issues des tests présentés dans le chapitre III	143
Tableau 15: Exemple de table de contingence d'un modèle de classification	149
Tableau 16 : Paramètres extraits des images des différents jeux de données acquis pour les tests effectués	dans
le cadre de cette thèse	153
Tableau 17 : Nombre et taille des cellules constituant les grilles d'extraction présentées en figure 68	158
Tableau 18 : Effectifs des différentes classes utilisées et résultats du modèle prédictif élaboré grâce au ran	dom
forest sur le jeu de données de Génissiat	164
Tableau 19 : Effectifs des différentes classes utilisées et résultats du modèle prédictif élaboré grâce au ran	dom
forest sur le jeu de données de la Saint-Jean	165
Tableau 20 : Caractéristiques des trois modèles prédictifs testés : répartition des classes et indices d'effica	cité
des modèles	167
Tableau 21 : Caractéristiques de l'orthorectification appliquée à Francheville et à Génissiat : résolution et t	ailles
des cellules	184
Tableau 22 : Nombre de cellules de bois, d'eau et mixtes dans les deux images présentées en figure 79	188
Tableau 23 : Surfaces et pourcentages de la taille maximale estimés en fonction de la proportion de bois	
considérée dans les cellules mixtes situées à l'interface eau/bois, sur un petit et un grand radeau de	bois.
Rapport de taille entre le petit et le grand radeau en fonction de ce taux de remplissage	188
Tableau 24 : Résultats des modèles prédictifs réalisés avec un random forest sur deux types de grilles	
d'extraction des paramètres descripteurs	191
Tableau 25 : Dates et quantités de hois et DIB relatives aux campagnes d'extraction du hois dans le réservo	nir de
Génissiat	195
Tableau 26 : Synthèse des conclusions et recommandations issues des tests présentés dans le chanitre IV	201
Tableau 20 : Synthèse des conclusions et recommandations issues des tests présentes dans le chapitre IV.	201
utilizáne	 ງ∩ດ
uuiisees	208
rabieau zo . Evolution des nauteurs d'eau et impact des campagnes de balayage sur la radiometrie moyen	220
uu canai rouge dans les images acquises a iviolion, recenses d'apres la figure 93,	220
rableau 29 . Composition des echantilions, coernicients de détermination (K ⁻) et p-value associes à chaque	224
ו כומנוטוו מופט מווער כוו ווצעו כידס	221
Annexes

Liste des annexes :

Annexe 1 : Renommer des images selon la date et l'heure de prise de vue	i
Annexe 2 : Etiquetage manuel des images constituant l'échantillon d'observés (travail dans une grille	
orthogonale, voir section I.3.3 du chapitre IV)	iii
Annexe 3 : Extraction de paramètres radiométriques dans une liste d'images au format .jpg, et export des	
tables de valeurs	. vii
Annexe 4 : Application d'un random forest pour la prédiction des classes d'objets dans un jeu de données	.xii
Annexe 5 : Calcul de la surface au sol des cellules de la grille orthogonale grâce au processus	
d'orthorectification du logiciel Fudaa-LSPIV 1.3.2	xvi

Annexe 1 : Renommer des images selon la date et l'heure de prise de vue

Logiciels utilisés :

- Exif Viewer (gratuit)
- R (libre et gratuit)

Protocole proposé :

Grâce au logiciel Exif-Viewer2, exporter les données exifs de images à traiter (il faut que ces données soient disponibles avec les images) (figure A1.1).

EXIF Viewer	
Exif-Viewer <i>Ջ</i>	Paramètres de l'export Excel Choix du répertoire:
Retrouver un répertoire Image: Citer of the second seco	Répertoire: c\Users\vbenacch\Desktop\Test Image: construction of the set o
Export Visualisation Editer Zoom Ung photo Ung photo Giffies Equivalent 35mms Cgmparateur Export Excel Feintaliser Is date du Ichier Auster Ies noms des Ichier	Préférences A Propos de Quitter

Figure A1.1 : Illustration de l'export Excel grâce au logiciel ExifViewer2.

Une feuille Excel s'ouvre automatiquement (voir figure A1.2) : l'enregistrer au format .csv pour les traitements sous R, dans le même dossier que toutes les images à renommer (ce dossier ne doit contenir que l'ensemble des images à renommer et cette table). La colonne « Date » sera exploitée pour extraire les informations selon lesquelles les images seront renommées.

X	1 - P -	-						-	_	exit	f - Microsoft E	xcel	_	_			-		. 6 X	
F	ichier Accueil	Inserti	on Mise	en pa	ge Form	ules	Données	R	évision /	Affichage	Acrobat							۵	() - # 1	
	Coller	Calibri G I S	* 11 * <u>-</u> *	* 1 🌆 •	Δ· Δ· ≡	=	<mark>■</mark> ≫* ■ 详 律	部国	Texte	, 000 568 4	Mise en f	orme Mettre sous forme nelle* de tableau*	Styles de cellules *	an Insérer → Supprimer Format →	Σ * @* 2*	Trier et filtrer *	Rechercher et delectionner *			
Pre	sse-papiers 🛱		Police	-	G.	4	Alignement	1	i No	mbre	lis .	Style		Cellules	_	Editi	on			
	G1	• (f _x	Da	te															*
	A		В		C		D			E	F	G	н		I	1	J	К		-
1	Répertoire		Fichier	*	Taille	-	Constructeur	-	Modèle	*	Firmware	Date	Program	me 💌 Diaphr	agme 🔻	Vitess	d'exposition	ISO "	Correction	
2	c:\Users\vbe	nacch\Des	k IMG_000	1.JPG	354731 By	tes	RECONYX		PC800 PRO	FESSIONAL	N/D.	08.02.2016 17:30:00	N/D.	N/D.	50 G	1/30 s	- 270 - 17 A. A. A.	250	N/D.	
3	c:\Users\vbe	nacch\Des	k IMG_000	2.JPG	354942 By	tes	RECONYX		PC800 PRO	FESSIONAL	N/D.	08.02.2016 18:00:00	N/D.	N/D.		1/30 s		400	N/D.	
4	c:\Users\vbe	nacch\Des	k IMG_000	3.JPG	341686 By	tes	RECONYX		PC800 PRO	FESSIONAL	N/D.	08.02.2016 18:30:00	N/D.	N/D.		1/30 s		400	N/D.	
5	c:\Users\vbe	nacch\Des	k IMG_000	4.JPG	207774 By	tes	RECONYX		PC800 PRO	FESSIONAL	N/D.	08.02.2016 19:00:00	N/D.	N/D.		1/30 s		400	N/D.	
6	c:\Users\vbe	nacch\Des	k1IMG_000	5.JPG	193557 By	tes	RECONYX		PC800 PRO	FESSIONAL	N/D.	08.02.2016 19:30:00	N/D.	N/D.		1/30 s		400	N/D.	
7	c:\Users\vbe	nacch\Des	k IMG_000	6.JPG	193913 By	tes	RECONYX		PC800 PRO	FESSIONAL	N/D.	08.02.2016 20:00:00	N/D.	N/D.		1/30 s		400	N/D.	
8	c:\Users\vbe	nacch\Des	k IMG_000	7.JPG	194010 By	tes	RECONYX		PC800 PRO	FESSIONAL	N/D.	08.02.2016 20:30:00	N/D.	N/D.		1/30 s		400	N/D.	
9	c:\Users\vbe	nacch\Des	k IMG_000	8.JPG	193995 By	tes	RECONYX		PC800 PRO	FESSIONAL	N/D.	09.02.2016 06:00:00	N/D.	N/D.		1/30 s		400	N/D.	
10	c:\Users\vbe	nacch\Des	k1IMG_000	9.JPG	193640 By	tes	RECONYX		PC800 PRO	FESSIONAL	N/D.	09.02.2016 06:30:00	N/D.	N/D.		1/30 s		400	N/D.	-
11	c:\Users\vbe	nacch\Des	k IMG_001	0.JPG	193287 By	tes	RECONYX		PC800 PRO	FESSIONAL	N/D.	09.02.2016 07:00:00	N/D.	N/D.		1/30 s		400	N/D.	
	A				1005 10 0		BEOOLDAL				11/10		11/10	11/0		4 100		100	11/0	

Figure A1.2 : Extrait du fichier Excel listant les données exifs du dossier d'images traité.

Le script suivant (script A1.1) permet de renommer automatiquement les images selon les informations de date et d'heure extraites de la liste d'exifs : il est nécessaire que l'ordre des lignes dans le fichier de données exifs correspond à l'ordre des images dans le dossier qui les contient.

Script A1.1 : Script R permettant de renommer les images selon la date et l'heure de leur prise de vue.

```
## Choix du repertoire de travail (-> dossier contenant les images et le
## fichier de donnees Exifs)
setwd(choose.dir())
## Liste de tous les fichiers presents dans le repertoire
liste_fichiers = list.files()
## On s'interesse au fichier avec extension .csv
for (i in 1:length(liste_fichiers)) {
 elem = unlist(strsplit(liste_fichiers[i], split="\\."))
 if(elem[length(elem)]=="csv"){
    table_exif = liste_fichiers[i]
  }
}
## On lit cette table
lesexif = read.table(table_exif, sep=";", header=T, quote="\"")
## Dans cette table, on s'interesse a colonne "Date"
for (i in 1:nrow(lesexif)) {
 date_non_formatee = lesexif$Date[i]
  ## Cette colonne contient une date et une heure
 date_exif = as.POSIXct(date_non_formatee, format="%d.%m.%Y %H:%M:%S")
  ## On met en forme cette date pour en faire le nom du fichier
 date_formatee = format(date_exif, "%Y%m%d_%H%M")
 ancien_nom = as.vector(lesexif$Fichier[i])
 nouveau_nom = paste(date_formatee,".JPG", sep="")
  ## on renomme l'image
  file.rename(from=ancien_nom, to=nouveau_nom)
}
```

Annexe 2 : Etiquetage manuel des images constituant l'échantillon d'observés (travail dans une grille orthogonale, voir section I.3.3 du chapitre IV)

Logiciel utilisé :

• QGis 2.16 (libre et gratuit)

Protocole proposé :

Générer une grille vectorielle de base grâce à l'outil *Vecteur > Outil de recherche > Grille vecteur* : il s'agit de créer une grille correspondant à l'emprise des images à traiter (dans ce cas, 640*480 pixels : l'étendue indiquée sera donc « *0, 620, -460, 0* », voir figure A2.1). La maille souhaitée dans le cas présenté est de 20 pixels. Enregistrer cette grille dans le dossier adapté (clic droit sur la couche > *Enregistrer sous...*).

Paramètres	Journal	Exécuter comme processus de la
Étandua da la	a grille (vmin, vmax, vmin, vmax)	
0 620 -460	0	
Espacement e	en X	
20,000000	757730	a 🔶
Espacement e	en Y	
20,000000		a 🔺
Type de grille		
Grille en sort	tie en tant que polygones	
Grille		
C:/Users/vb	enacch/Documents/Camera_Genissiat/Grille_base.shp	
		0%

Figure A2.1 : Paramètre de création d'une grille orthogonale correspondant à l'emprise d'images mesurant 640*480 pixels, de 20 pixels de largeur de maille.

Modifier les champs de la table attributaire de la grille : ouvrir les propriétés de la couche en doublecliquant sur son nom dans la liste des couches. Dans les propriétés « Champs » (figure A2.2), basculer en mode « Edition », puis :

- Supprimer les champs inutiles
- Créer les champs suivants : « Ligne » ; « Colonne » ; « Classe », de type « Entier ».

General	Mise en page	e de l'éditeur (d'attribut Autogénére	r	▼ Foncti	on d'initialisation Pythor	ı	
Style	▼ Cham	ips						
Étiquettes								
Champs	Id /	Nom	Outil d'édition	Alias	Type générique	Type identifié	Longueur	Précision
	123 0	id	Édition de texte		qlonglong	Integer64	10	0
Rendu	123 1	Ligne	Édition de texte		int	Integer	2	0
Infobulles	123 2	Colonne	Édition de texte		int	Integer	2	0
Actions	123 3	Classe	Édition de texte		int	Integer	2	0
	10. I							
Diagrammes Métadonnées Variables								
Diagrammes Métadonnées Variables Légende					2-			
Diagrammes Métadonnées Variables Légende	Relati	ions			20- 	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,]	

Figure A2.2 : Propriétés des champs de la couche « grille de base » et détails de la table attributaire préconisée.

Indicer chaque cellule de la grille de base selon ses coordonnées « Ligne, Colonne » : ouvrir la table d'attributs de la grille (clic droit > *Ouvrir la table d'attributs*), basculer en mode « Edition », puis compléter les indices de lignes et de colonnes, en sélectionnant chaque ligne puis chaque colonne, et en utilisant pour chacune la calculatrice de champs (voir figure A2.3).



Figure A2.3 : Processus d'indicage des lignes et des colonnes de la grille vectorielle.

Pour l'étiquetage des cellules correspondant au masque du jeu de données, procéder de la même manière que pour l'indiçage des lignes et colonnes : attribuer un numéro de classe particulier (par exemple 0 ou 99), afin de distinguer ces cellules de celle de la ROI.

Bien penser à enregistrer ces modifications : cette grille est désormais la référence pour le jeu de données en question. Pour chaque image de l'échantillon d'observés, copier-coller cette grille de base et la renommer au nom de l'image en question.

Importer ensuite chaque image à étiqueter (*Couche > Ajouter une couche > Ajouter une couche raster...*), ainsi qu'autant de copies de la grille de base, renommées comme chacune de celles-ci (*Couche > Ajouter une couche > Ajouter une couche vecteur...*).

Pour l'étiquetage des cellules de la ROI, procéder de la même manière que pour l'indiçage des lignes, des colonnes et du masque : sélectionner les cellules par groupes, par transparence sur l'image (voir figure A2.4).



Figure A2.4 : Sélection des cellules de la grille pour leur étiquetage manuel, grâce à la calculatrice de champs.

Annexe 3 : Extraction de paramètres radiométriques dans une liste d'images au format .jpg, et export des tables de valeurs

Le script d'extraction proposé ci-dessous permet d'extraire une série de paramètres descripteurs dans les canaux rouge, vert, bleu, teinte, saturation et intensité des images. Le calcul de l'espace colorimétrique HSI, à partir de RGB, se fait aussi grâce à ce script. Dans l'exemple proposé, chaque paramètre est extrait dans une grille orthogonale qui découpe l'image selon une grille orthogonale de 20*20 pixels.

Logiciel utilisé :

• R (libre et gratuit)

Prérequis :

L'ensemble des images doit être contenu dans un dossier (« DOSSIER » dans l'exemple). D'autres éléments peuvent être présents dans ce dossier, à condition qu'ils ne soient pas au format .jpg. Les tables de paramètres seront enregistrées dans un dossier « PARAM », à la racine de « DOSSIER ».

Dans l'exemple proposé, le nom des images contient l'information de date et d'heure de prise de vue. Il est sous la forme « AAAA-MM-JJ_XXHYY », « A » se rapportant à l'année, « M » au mois, « J » au jour, « X » à l'heure et « Y » aux minutes.

Protocol proposé :

```
- Chargement de tous les packages et fonctions nécessaires à l'utilisation du script :
```

```
## Chargement de tous les packages
require(rgdal)
library(MASS)
require(rpart)
require(rpart.plot)
require(randomForest)
library("foreign")
```

```
## Fonction pour le traitement des images .jpg :
#- fonctions développées par Lise Vaudor (CNRS UMR 5600 - EVS) -#
```

```
## Ouverture du fichier .jpg et import des donnees
jpg_to_imdata=function(myfile, compression=1, corners_position=NA){
    info <- GDALinfo(myfile)
    nb_bands=info[["bands"]]
    mydimim= round(c(info[["rows"]],info[["columns"]]) /compression)
    size=mydimim[1]*mydimim[2]
    im=readGDAL(myfile, output.dim=mydimim)
    v=c()</pre>
```

```
for (i in 1:nb_bands) {v=c(v, im@data[,i])}
if(is.na(corners_position[1])) {corners_position=c(0,0,mydimim[1],mydimim[2]
)}
 result=list(values=v, mydim=mydimim, corners_position=corners_position)
  return(result)
}
## Mise en forme de ces donnees
imdata_to_raster=function(imdata, band=1){
 nb_bands=length(imdata$values)/prod(imdata$mydim)
  l=length(imdata$values)/nb_bands
 M=matrix(imdata$values[((band-1)*l+1):(band*l)], nrow=imdata$mydim[2],
ncol=imdata$mydim[1])
  return(M)
}
## Changement d'espace colorimetrique
RGBtoHSI = function(image) {
 maphoto = jpg_to_imdata(image)
 R = imdata_to_raster(maphoto, band=1)
 matR = matrix(R, ncol=ncol(R))
 V = imdata_to_raster(maphoto, band=2)
 matV = matrix(V, ncol=ncol(R))
 B = imdata to raster (maphoto, band=3)
 matB = matrix(B, ncol=ncol(R))
  ##########
 I = (R+V+B)/3
 matI = matrix(I, ncol=ncol(R))
  ##########
 vectR = as.vector(R)
 vectV = as.vector(V)
 vectB = as.vector(B)
 vectr = vectR/(vectR+vectV+vectB)
 vectv = vectV/(vectR+vectV+vectB)
 vectb = vectB/(vectR+vectV+vectB)
 vectrvb = cbind(vectr, vectv, vectb)
 vector_min = apply(vectrvb, 1, min)
 vector_s = 1-(3/(vectr+vectv+vectb))*vector_min
 vectS = vector_s*100
 matS = matrix(vectS, ncol=ncol(R))
 matS[which(matS=="NaN")]=0
  ##########
 r = R/(R+V+B)
  v = V/(R+V+B)
 b = B/(R+V+B)
  teta = acos((0.5*((r-v)+(r-b)))/(((((r-v)^2)+((r-b)*(v-b)))^{0.5}))
  h = teta
  h[which(b>v)] = (2*pi)-(teta[which(b>v)])
  h[which(teta=="NaN")] = 0
  H = h*180/pi
 matH = matrix(H, ncol=ncol(R))
  ##########
 resultat = list ("R"= matR, "V"=matV, "B"=matB, "H"=matH, "S"=matS,
"I"=matI)
 return (resultat)
}
## Calcul de l'inertie dans un voisinage variable
Inertie = function(image, nb_voisin){
```

```
viii
```

```
nb de valeurs = 0
 matrice_somme = matrix(rep(0, ncol(image)*nrow(image)), nrow=nrow(image))
 NA_nb_de_col = rep(NA, ncol(image))
 NA_nb_de_row = rep(NA, nrow(image))
 for (l in -nb_voisin:nb_voisin) {
    for (c in -nb_voisin:nb_voisin) {
     Matrix_en_Row = matrix (rep(NA_nb_de_col, sqrt(1^2)),
ncol=ncol(image))
     Matrix_en_Col = matrix(rep(NA_nb_de_row, sqrt(c^2)),
nrow=nrow(image))
      if (1<0) {
        image_supprR = image[1:(nrow(image)-sqrt(l^2)), ]
        new_image_row = rbind (Matrix_en_Row, image_supprR)
      }else{
        image_supprR = image[(sqrt(l^2)+1):nrow(image), ]
        new_image_row = rbind(image_supprR, Matrix_en_Row)
      }
      if (c<0) {
        image_supprC = new_image_row[ , 1:(ncol(image)-sqrt(c^2))]
        new_image_col = cbind (Matrix_en_Col, image_supprC)
      }else{
        image supprC = new image row[ , (sqrt(c^2)+1):ncol(image)]
        new image col = cbind (image supprC, Matrix en Col)
      3
      matrice soustraction = image - new image col
      matrice_carres = matrice_soustraction^2
      nb_de_valeurs = nb_de_valeurs+1
      matrice_somme = matrice_somme + matrice_carres
    }
  }
 matrice_inertie = matrice_somme/nb_de_valeurs
  return (matrice inertie)
}
```

```
## Calcul des valeurs moyennes dans le voisinage immediat de chaque zone
#- fonction développée par Lise Vaudor (CNRS UMR 5600 - EVS) -#
```

```
Masque_Voisin = function(monimage) {
  matrice_base=matrix (NA, nrow=nrow (monimage) +2, ncol=ncol (monimage) +2)
  myarray=array(NA, dim=c (nrow (matrice_base), ncol (matrice_base), 8))
  myij=expand.grid(i=0:2, j=0:2)
  ind=which(myij$i==1 & myij$j==1)
  myij=myij[-ind,]
  for (k in 1:nrow(myij)){
    i=myij$i[k]
    j=myij$j[k]
    matrice_ij=matrice_base
    matrice_ij[i+1:nrow(monimage), j+1:ncol(monimage)]=monimage
    myarray[,,k]=matrice_ij
  4
  M=apply (myarray, MARGIN=c (1, 2), FUN="mean", na.rm=T)
  M=M[2: (nrow (M) -1), 2: (ncol (M) -1)]
  return(M)
}
```

- Recensement des images contenues dans le dossier de travail en vue de leur traitement : ## definition du repertoire de travail ou sont contenues les images setwd ("C:/.../DOSSIER")

```
## liste des elements dispo dans le dossier
listefichiers = list.files()
liste_images = c()
for (a in 1:length(listefichiers)){
   listeelem = unlist(strsplit(listefichiers[a], "\\."))
   ## on fait la liste des images presentes et donc a traiter
   if(listeelem[length(listeelem)]=="jpg" |
listeelem[length(listeelem)]=="jpg" |
liste_images = c(liste_images, listefichiers[a])
   }
}
```

```
Extraction des paramètres dans les images de la liste :
tous_les_param = c()
## on traite chaque image une par une et on extrait les informations
temporelles contenues dans le nom
for (x in 1:length(liste_images)) {
  nom_image = substr(liste_images[x], 6, 21)
 mois_image = as.numeric(substr(liste_images[x], 11, 12))
  if (mois_image > 6) {
    mois = mois_image-(mois_image-6)
  } else {
    mois = mois_image
  }
 heure = as.numeric(substr(liste_images[x], 17, 18))
  ## on calule HSI a partir de RGB
  HSI image = RGBtoHSI(liste images[x])
  table image = c()
  ## on s interesse a chacune de ces 6 bandes une a une et y calcule l
inertie
  ## (ici dans des voisinages de 1, 3 et 5 pixels)
  for (e in 1:length(HSI_image)) {
    Inertiel_image = Inertie(HSI_image[[e]], 1)
    Inertie3_image = Inertie(HSI_image[[e]], 3)
    Inertie5 image = Inertie(HSI image[[e]], 5)
    table couche = c()
    table ref couche = c()
    ## puis on extrait differents parametres dans chaque cellule
    ## (ici des carres de 20*20 pixels)
    for (l in 1: (nrow(HSI_image[[1]])/20)) {
      for (c in 1: (ncol(HSI_image[[1]])/20)) {
        indL = ((1*20)-19): (1*20)
        indC = ((c*20)-19): (c*20)
        zoneHSI = HSI_image[[e]][indL, indC]
        zoneIn1 = Inertie1_image[indL, indC]
        zoneIn3 = Inertie3_image[indL, indC]
        zoneIn5 = Inertie5_image[indL, indC]
        moyHSI = mean(zoneHSI, na.rm = TRUE)
        moyIn1 = mean(zoneIn1, na.rm = TRUE)
        moyIn3 = mean(zoneIn3, na.rm = TRUE)
        moyIn5 = mean(zoneIn5, na.rm = TRUE)
        medHSI = median(zoneHSI, na.rm=TRUE)
        varHSI = var(as.vector(zoneHSI), na.rm=TRUE)
        ETHSI = sd(as.vector(zoneHSI), na.rm=TRUE)
        modeHSI = as.numeric(names(sort(table(zoneHSI), decreasing
=TRUE)[1]))
        etendueHSI = max(zoneHSI, na.rm = TRUE)-min(zoneHSI, na.rm = TRUE)
        IinterqHSI = (quantile(zoneHSI, na.rm=TRUE)[[4]])-
(quantile(zoneHSI, na.rm=TRUE)[[2]])
```

```
## pour chaque cellule on note les references et on combine avec
les ref des autres carres
          table_ref = cbind(paste(nom_image, l, c, sep="_"), nom_image, l, c,
mois, heure)
          table_ref_couche = rbind(table_ref_couche, table_ref)
          ## pour chaque cellule on aligne tous les parametres que l on vient
de calculer et on combine ca aux autres parametres calcules sur les autres
carres
          table_zone = cbind(moyHSI, moyIn1, moyIn3, moyIn5, medHSI, varHSI,
ETHSI, modeHSI, etendueHSI, linterqHSI)
         table_couche = rbind(table_couche, table_zone)
       }
     }
     ## pour chaque bande de l image on combine la table ainsi creee aux
autres
     table_image = cbind(table_image, table_couche)
  }
   ## on calcule des differences entres les differents canaux R, V et B
   ## et on combine ces nouveaux parametres a tous ceux qui concernent une
meme image
  table_RV = table_image[ , 1]-table_image[ , 12]
  table_RB = table_image[ , 1]-table_image[ , 23]
  table_VB = table_image[ , 12]-table_image[ , 23]
  table image ref = cbind (table ref couche, table image, table RV,
table RB, table VB)
  ## on renomme correctement toutes les colonnes de la table correspondant
a une image
colnames(table_image_ref) = c("Reference", "Image", "Colonne", "Ligne",
"Mois", "Heure", "Moy_R", "In1_R", "In3_R", "In5_R", "Med_R", "Var_R",
"Mois", "Heure", "Moy_R", "In1_R", "In3_R", "In5_R", "Med_R", "Var_R",
"ETp_R", "Mod_R", "Etd_R", "Iiq_R", "Moy_V", "In1_V", "In3_V", "In5_V",
"Med_V", "Var_V", "ETp_V", "Mod_V", "Etd_V", "Iiq_V", "Moy_B", "In1_B",
"In3_B", "In5_B", "Med_B", "Var_B", "ETp_B", "Mod_B", "Etd_B", "Iiq_B",
"Moy_H", "In1_H", "In3_H", "In5_H", "Med_H", "Var_H", "ETp_H", "Mod_H",
"Etd_H", "Iiq_H", "Moy_S", "In1_S", "In3_S", "In5_S", "Med_S", "Var_S",
"ETp_S", "Mod_S", "Etd_S", "Iiq_S", "Moy_I", "In1_I", "In3_I", "In5_I",
"Med_I", "Var_I", "Etp_I", "Mod_I", "Etd_I", "Iiq_I", "Diff_RV", "Diff_RB",
"Diff_VB")
  ## sur la table de l image en traitement, on calcule les valeurs moyennes
des carres du voisinage immediat de chaque carre, sur deux des parametres
  mat_Inl1 = matrix(as.numeric(table_image_ref[, 58]), nrow=24)
  Voisin_In1I_mat = Masque_Voisin(mat_In1I)
  Voisin_In1I_vect = as.vector(Voisin_In1I_mat)
  mat_DiffRV = matrix(as.numeric(table_image_ref[, 68]), nrow=24)
  Voisin_DiffRV_mat = Masque_Voisin (mat_DiffRV)
  Voisin_DiffRV_vect = as.vector(Voisin_DiffRV_mat)
  ## on combine ces dernieres infos a celle existant auparavant sur l image
  table_image_ref_Voisin = data.frame(table_image_ref,
"Voisin Inll"=Voisin Inll vect, "Voisin DiffRV"=Voisin DiffRV vect)
   ## on donne un nom a la table complete et on l enregistre
   ## dans un dossier avec toutes les tables similaires
  nomtable1 = paste(nom image, " PARAM.csv", sep="")
  setwd("C:/.../DOSSIER/PARAM")
  write.table(table_image_ref_Voisin, nomtable1, row.names=F, sep=";",
quote=FALSE)
   ## puis on revient au dossier, et on fait de meme pour les autres images
setwd("C:/.../DOSSIER")
}
```

Annexe 4 : Application d'un random forest pour la prédiction des classes d'objets dans un jeu de données.

Le script proposé ci-dessous permet de mettre en forme les données correspondantes aux images d'un jeu de données (paramètres descripteurs et classes des objets qui les subdivisent), et d'y appliquer un *random forest* afin de pouvoir prédire les classes de chacun de ces objets. Dans l'exemple proposé, les objets en question correspondent aux cellules d'une grille orthogonale, ils sont référencés par le numéro de ligne et de colonne qui les localisent dans l'image.

Logiciel utilisé :

• R (libre et gratuit)

Prérequis :

Soit le dossier « GENISSIAT » hiérarchisé et composé de la manière suivante :

Dossier GENISSIAT

- \circ $\,$ Dossier SAMPLE :
 - Toutes les images au format .jpg qui constituent l'échantillon d'observés, accompagnées de leur grille vectorielle résultant de l'étiquetage manuel des images (voir annexe 2) et de la table attributaire associée, au format .dbf ou .csv ;
 - Dossier SAMPLE_PARAM : les tables au format .csv contenant les paramètres extraits de chaque images de l'échantillon d'observés (voir annexe 3) ;
 - Dossier SAMPLE_CLASSES (vide)
 - Dossier SAMPLE_RESULTS (vide)
- Dossier DATASET : l'ensemble les images, au format .jpg, qui constituent le jeu de données à étudier

La prédiction des classes dans le jeu de données global (« DATASET ») peut être réalisée en appliquant le modèle développé au cours de la phase d'apprentissage sur les tables de paramètres extraites des images (voir annexe 3) contenues dans le dossier DATASET.

Protocol proposé :

- Chargement des packages nécessaires à l'utilisation du script : require (randomForest)

```
library("foreign")
```

- Recensement des différents éléments présents dans le dossier :

```
## definition du repertoire de travail ou sont contenues les images
setwd("C:/.../GENISSIAT/SAMPLE")
## liste des elements dispo dans le dossier
listefichiers = list.files()
liste_images = c()
liste_tables = c()
for (a in 1:length(listefichiers)){
  listeelem = unlist(strsplit(listefichiers[a], "\\."))
  ## on fait la liste des images presentes et donc a traiter
  if(listeelem[length(listeelem)]=="jpg" |
listeelem[length(listeelem)] == "JPG") {
    liste_images = c(liste_images, listefichiers[a])
  }
  ## et la liste des tables ou sont recensees leurs classifications
manuelles
  if(listeelem[length(listeelem)]=="dbf" |
listeelem[length(listeelem)] == "csv") {
    liste_tables = c(liste_tables, listefichiers[a])
  }
}
```

```
Mise en forme des données de classes et de paramètres :
## rassemblement des tables de classes en une seule table :
setwd("C:/.../GENISSIAT/SAMPLE")
toutes_les_tables = c()
for (x in 1:length(liste_tables)){
  nom table = substr(liste tables[x], 6, 21)
  if(substr(liste_tables[x], nchar(liste_tables[x])-2,
nchar(liste_tables[x])) == "dbf"){
    latable = read.dbf(liste_tables[x], as.is=FALSE)
  4
  if(substr(liste_tables[x], nchar(liste_tables[x])-2,
nchar(liste_tables[x])) == "csv"){
    latable = read.table(liste_tables[x], sep=";", header=T)
  3
  les ref tables =c()
  for (y in 1:nrow(latable)){
    1 = latable$Colonne[y]
    c = latable$Ligne[y]
    ref_table_lc = paste(nom_table, l, c, sep="_")
    les_ref_tables = c(les_ref_tables, ref_table_lc)
  }
  la_table_classes = cbind(les_ref_tables, latable$Classe)
  colnames(la_table_classes) = c("Reference", "Classe")
  nomtable_classe = paste(nom_table, "_CLASSES.csv", sep="")
  setwd("C:/.../GENISSIAT/SAMPLE/SAMPLE_CLASSES")
 write.table(la_table_classes, nomtable_classe, row.names=F, sep=";",
quote=FALSE)
  setwd("C:/.../GENISSIAT/SAMPLE")
  toutes_les_tables = rbind(toutes_les_tables, la_table_classes)
}
write.table(toutes_les_tables, "Sample_Classes.csv", row.names=F, sep=";",
quote=FALSE)
```

```
## rassemblement des tables de parametres en une seule table
setwd("C:/.../GENISSIAT/SAMPLE/SAMPLE_PARAM")
listefichiers = list.files()
```

```
toutes_les_tables = c()
for (x in 1:length(listefichiers)){
  latable = read.table(listefichiers[x], sep=";", header=T)
  toutes_les_tables = rbind(toutes_les_tables, latable)
}
setwd("C:/.../GENISSIAT/SAMPLE")
write.table(toutes_les_tables, "Sample_Param.csv", row.names=F, sep=";",
quote=FALSE)
## combinaison des tables de parametres et de classes
setwd("C:/.../GENISSIAT/SAMPLE")
table_param = read.table("Sample_Param.csv", sep=";", header=T)
table_classes = read.table("Sample_Classes.csv", sep=";", header=T)
## merge des tables et export a la racine du dossier
table_merge = merge(table_param, table_classes, by="Reference", all=T)
write.table(table_merge, "Sample_Apprenti.csv", row.names=F, sep=";",
quote=FALSE)
   Application d'un random forest à l'échantillon d'observés : phase d'apprentissage
setwd("C:/.../GENISSIAT/SAMPLE")
Tab_Ech = read.table("Sample_Apprenti.csv", sep=";", header=T)
## application d'un masque "agrandi" pour que toutes les images aient le
meme masque
ind_masque = which((Tab_Ech$Ligne<4) |</pre>
                      (Tab_Ech$Ligne==4 & (Tab_Ech$Colonne<7 |</pre>
Tab Ech$Colonne>21))
                      (Tab Ech$Ligne==5 & (Tab Ech$Colonne<4 |
Tab Ech$Colonne>30))
                      (Tab_Ech$Ligne>5 & Tab_Ech$Ligne<16 &
Tab_Ech$Colonne<4)
                      (Tab_Ech$Ligne==16 & Tab_Ech$Colonne==1) |
                      (Tab_Ech$Ligne==20 & Tab_Ech$Colonne>30) |
                      ((Tab_Ech$Ligne>20 & Tab_Ech$Ligne<23) &
Tab Ech$Colonne>28)
                      (Tab Ech$Ligne==23 & Tab Ech$Colonne>27) |
                      (Tab Ech$Ligne==24 & (Tab Ech$Colonne<13 |
Tab Ech$Colonne>27)))
Tab Ech$Classe[ind masque] = 0
## on limite les donnees aux cellules qui ont une classe 1 ou 2 (on exclut
masque et autres)
data = Tab_Ech[which(Tab_Ech$Classe>=1), ]
data = na.omit(data)
## on definit les descripteurs a prendre en compte
descripteurs = data[ , c(3:71)]
## on definit la variable que categorise les donnees : selon quoi les
discriminer
Classe = paste("class", data$Classe, sep="")
Classe = as.factor(Classe)
## on tire au hasard 20000 cellules qui serviront d'echantillon
d'apprentissage
ind_ajustement = sample(1:nrow(data), 20000, replace=F)
## on realise le random forest pour "apprendre" sur ces valeurs la
rf = randomForest(Classe[ind_ajustement]~.,
data=descripteurs[ind_ajustement, ])
```

```
## puis on fait des predicitons pour tous les autres cellules
pred = predict(rf, newdata=descripteurs[-ind_ajustement, ])
## on teste l efficacite du modele : on ecrit la table de contingence
tableperf = table(pred, Classe[-ind_ajustement])
tableperf = tableperf/rowSums(tableperf)
print(tableperf)
## on exprime le taux de bons classements
BC = length (which (pred == Classe [-ind_ajustement])) / length (pred) * 100
print(BC)
## on calcule les indices de performance proposes par Begueria (2006)
nb_positifs = length(which(Classe[-ind_ajustement]=="class2"))
nb_negatifs = length(which(Classe[-ind_ajustement]=="class1"))
nb_vrais_positifs = length(which(Classe[-ind_ajustement]=="class2" &
pred=="class2"))
nb_faux_positifs = length(which(Classe[-ind_ajustement]=="class1" &
pred=="class2"))
nb_vrais_negatifs = length(which(Classe[-ind_ajustement]=="class1" &
pred=="class1"))
nb_faux_negatifs = length(which(Classe[-ind_ajustement]=="class2" &
pred=="class1"))
Specificite = nb vrais negatifs/(nb negatifs)
print (Specificite)
Sensibilite = nb vrais positifs/(nb positifs)
print (Sensibilite)
```

Annexe 5 : Calcul de la surface au sol des cellules de la grille orthogonale grâce au processus d'orthorectification du logiciel Fudaa-LSPIV 1.3.2

Logiciels utilisés :

- Fudaa-LSPIV 1.3.2 (gratuit)
- R (libre et gratuit)
- XnView (gratuit)

<u> Prérequis :</u>

Il faut avoir réalisé une campagne de terrain pour acquérir au moins une dizaine de points de contrôle qui caractérisent la scène observée sur les images voir section.

Le dossier de travail donné en exemple, nommé « ORTHO », ne contient qu'une seule image nommée « Originale », au format .jpg, qui provient du jeu de données étudié : elle a donc les mêmes dimensions que toutes celles étudiées (dans l'exemple proposé elle mesure 2048*1536 pixels). Les script A5.1 ne s'intéresse qu'à la première bande spectrale pour générer un série d'images aux mêmes dimensions. Un sous dossier « A_Orthorectifier » de « ORTHO » sera utilisé pour l'export des images créées.

L'exemple proposé s'intéresse à une grille orthogonale de 32 pixels de maille.

Protocole proposé :

- Orthorectification des images du jeu de données :

Grâce au logiciel XnView, convertir l'image « Originale » au format .pgm (Ascii) pour la rendre exploitable sous Fudaa-LSPIV 1.3.2. Dans les options de la conversion, bien cocher la case « Ascii », et conserver 256 niveaux de gris).

Dans Fudaa-LSPIV 1.3.2, importer cette images au format .pgm : *Fichier > Créer*, puis *LSPIV > Sélection des images sources...*. Dans le cadre de gestion des images cliquer sur *Ajouter* puis sélectionner l'image d'intérêt.

Dans Fudaa-LSPIV, définir les points de contrôle sur l'image importée : *LSPIV > Points de référence > Définir...* Un cadre s'ouvre (voir figure A5.1) : rentrer les coordonnées géographiques d'un point puis cliquer sur son emplacement dans l'image, puis faire de même pour chaque point de contrôle. Cliquer enfin sur *Fin de saisie*. Il est recommandé de rentrer des coordonnées relatives, pour limiter la longueur des valeurs entrées au cours de cette phase.



Figure A5.1 : Sélection des points de références en vue de l'orthorectification des images sous Fudaa-LSPIV.

Vérifier la précision des données en s'assurant que l' « Ecart » entre les valeurs réelles et recalculées par le logiciel reste limité : *LSPIV > Vérification des points de référence…* Si cet écart est convenable, valider. Sinon, vérifier la précision des données utilisées et des emplacements pointés sur l'image.

Calculer automatiquement les paramètres de transformation : *LSPIV > Paramètres de transformation...* Dans le cadre qui s'ouvre, cliquer sur *Calculer les valeurs par défaut*, puis sur *Appliquer* voir figure A5.2). L'image transformée apparaît, puis si cela semble convenable, relever la valeur de résolution annoncée et valider. Transformer alors les images selon cette déformation : *LSPIV > Transformer les images*.



Figure A5.2 : Calcul des paramètres de transformation des images sous Fudaa-LSPIV.

Enregistrer alors ce projet pour sauvegarder et pouvoir réutiliser ces paramètres de transformation : *Fichier > Enregistrer sous...* Dans le cadre qui s'ouvre, sélectionner le dossier « ORTHO » et exporter un fichier au format .lspiv.zip.

- Génération d'une série d'image à orthorectifier :

Le script A5.1 permet de créer une série d'images en noir et blanc qui correspondent chacune à une cellule de la grille orthogonale utilisée. Chaque image fait figurer en blanc la surface d'intérêt et en noir le reste de l'image. L'export se fait directement en .pgm, format supporté par la version 1.3.2 de Fudaa-LSPIV.

Script A5.1 : Script R permettant de créer une série d'images binaires représentant les cellules d'une grille.

```
## Chargement des packages necessaires :
require(rgdal)
require(pixmap)
## selection du dossier de travail
setwd("C:/.../ORTHO")
```

```
## Lecture de l'image originale
ImageOriginale = readGDAL ("Originale.jpg")
## Creation d'une matrice aux dimensions de l'image originale
setwd("C:/.../ORTHO/A Orthorectifier")
lamatrice = matrix((ImageOriginale[, ][[1]]), nrow=2048, ncol=1536)
for (1 in 1:64) {
  for (c in 1:48) {
    indcol = c((1*32-31):(1*32))
    indrow = c((c*32-31):(c*32))
    lamatrice[ , ] = 0
    lamatrice[indcol, indrow] = 255
    if (1 < 10) {
     nomcolonne = paste("0", 1, sep="")
    } else {
     nomcolonne = 1
    }
    if (c < 10) {
     nomligne = paste("0", c, sep="")
    } else {
     nomligne = c
    }
    nomdelimage = paste(nomligne, "_", nomcolonne, ".pgm", sep="")
    lamatrixpix = pixmapGrey(t(lamatrice))
   write.pnm(lamatrixpix, file= nomdelimage, forceplain = TRUE, type =
"pqm", maxval = 255)
 }
ł
```

Dans Fudaa-LSPIV 1.3.2, importer cette série d'images au format .pgm : *Fichier > Créer*, puis *LSPIV > Sélection des images sources...*. Dans le cadre de gestion des images cliquer sur *Ajouter* puis sélectionner l'ensemble des images d'intérêt.

Orthorectifier cette série d'images grâce aux paramètres définis précédemment : *LSPIV > Points de référence > Importer...* Dans le fichier .lspiv.zip exporté puis dé-zippé, sélectionner le dossier *outputs.dir/GRP.dat*. Les points de contrôle se calent directement sur l'image. Procéder alors de la même manière : calculer les paramètres de transformation, transformer les images, puis exporter le projet dans un dossier « Orthorectifie » de « ORTHO ». Dé-zipper ce fichier .lspiv.zip.

- Calcul des surfaces de chaque cellule orthorectifiée :

Dans le fichier .lspiv.zip dé-zippé, le dossier img_transf/cache contient les images orthorectifiées au format .gif. Le script A5.2 permet de calculer sur chacune la surface représentée par la cellule blanche. Pour ce calcul, la résolution des images orthorectifiées est nécessaire : elle a été fournie par le logiciel Fudaa-LSPIV (dans cette exemple elle est de 0.0684 m/pix). La table exportée peut être exploitée pour attribuer aux résultats du traitement des images des surfaces au sol proportionnelles à la réalité.

Script A5.2 : Script R permettant de calculer la surface « blanche » sur des images orthorectifiées en noir et blanc.

```
## calcul de la taille de chaque carre :
setwd("C://ORTHO/Orthorectifie/dossier.lspiv/img transf/cache")
listeimages = list.files()
liste_tailles_pix = c()
liste_tailles_m2 = c()
for (j in 1:length(listeimages)){
  ImageOrtho = readGDAL(listeimages[j])
  VecteurOrtho = ImageOrtho[ , ][[1]]
  TailleCarrePix = length(VecteurOrtho[which(VecteurOrtho>=200)])
  TailleCarreM2 = (sum(VecteurOrtho)/255)*0.695^2
  liste_tailles_pix = c(liste_tailles_pix, TailleCarrePix)
  liste_tailles_m2 = c(liste_tailles_m2, TailleCarreM2)
}
tableau_carres_tailles = cbind(listeimages, liste_tailles_pix,
liste_tailles_m2)
## association du nom de chaque carre avec sa taille
setwd("C://ORTHO/A_orthorectifier")
liste images grille = list.files()
liste carres = c()
liste lignes = c()
liste colonnes = c()
for (a in 1:length(liste_images_grille)) {
  carre = unlist(strsplit(liste_images_grille[a], ".pgm"))[1]
  ligne = unlist(strsplit(carre, "_"))[1]
colonne = unlist(strsplit(carre, "_"))[2]
  liste_carres = c(liste_carres, carre)
  liste_lignes = c(liste_lignes, ligne)
  liste_colonnes = c(liste_colonnes, colonne)
3
tableau_lignes_colonnes = cbind(liste_carres, liste_lignes, liste_colonnes)
## export de la table de tailles des cellules
unetable = cbind(liste_colonnes, liste_lignes, liste_tailles_pix,
liste_tailles_m2, liste_carres)
colnames(unetable) = c("Colonne", "Ligne", "Taille (pix)", "Taille (m)",
"Carré")
setwd("C://ORTHO")
write.table(unetable, "Table_tailles_carres.csv", sep=";", dec=",",
row.names=F)
```